



Mitteilungen

Nils Peter Huber

Probabilistische Modellierung von
Versagensprozessen bei Staudämmen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2008)

Titelbild: Barrage de la Gileppe (La Wallonie/Belgien) [Foto: N. P. Huber]

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0401-4

ISSN 1437-8477

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Der Ingenieur bedient sich der Technik, die Technik dient dem Menschen. Vor diesem Hintergrund obliegt dem Ingenieur zwingend die Aufgabe, technische Anlagen und Bauwerke dem individuellen und gesellschaftlichen Bedürfnis nach Sicherheit anzupassen. Stauanlagen sind Bauwerke, welche einen hohen Nutzen aufweisen. Sie können, in die Vergangenheit blickend, aber auch als Quell von Unglück und Vergänglichkeit dienen. Dem Ingenieur ein wissenschaftlich fundiertes Werkzeug an die Hand zu geben, um die Sicherheit von Stauanlagen differenziert zu betrachten und gezielt erhöhen zu können, ist ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit und mein ausdrücklicher Wunsch. Ich glaube fest, mit meiner Arbeit einen wichtigen Baustein für die Verwirklichung dieses Wunsches liefern zu können.

Die vorliegende Arbeit ist zur Zeit meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, vor allem in den Jahren 2002 bis 2007, entstanden. Waren die Risikobetrachtungen für Stauanlagen am IWW anfänglich eine *black box* mit einem Schwerpunkt auf qualitativen Aussagen, so habe ich mit großem Interesse daran teilhaben können, wie die inhaltliche Füllung zahlreicher Bausteine zu einem komplexen Werkzeug geführt hat. Universitätsprofessor Dr.-Ing. Jürgen Köngeter sei ausdrücklich für die Idee gedankt, den hier behandelten Forschungszweig der Risikobetrachtung von wasserbaulichen Anlagen am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft zielgerichtet und konsequent zu verfolgen und zu etablieren. Ihm gebührt tiefer Respekt und persönlicher Dank dafür, dass er die Ausgestaltung und Weiterentwicklung der Methoden auch in schwierigen Zeiten stets gefördert hat. Die durch Herrn Professor Köngeter gewährten Freiheiten und das stets entgegengebrachte Vertrauen werden mir in ebensolcher Erinnerung verbleiben wie die zahlreichen sehr interessanten und persönlich immer ausgesprochen angenehmen Gespräche.

Ich danke auch Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Hans-Burkhard Horlacher für die Übernahme des Korreferats und auch ihm für die gewährten Freiheiten, die Unterstützung und auch für die Annahme einer textlich so umfangreichen Arbeit. Sein Interesse an wasserbaulichen und probabilistischen Aspekten bestätigen mich stets in dem im Jahre 2004 gefassten Entschluss, ihn als zweiten Berichter vorzuschlagen.

Die Erstellung eines solch umfangreichen Schriftstücks erfordert vor allem eines: Geduld. Diese ist nicht nur durch den Schreibenden aufzubringen, sondern vor allem auch

von denjenigen, welche in Aufopferung Ihrer kostbaren Freizeit inhaltlich diskutieren und lesen - viel lesen! Es ist von unschätzbarem Wert, Kollegen, Freunde und eine Familie an der Seite zu haben, die diese Aufgabe wahrnehmen. An dieser Stelle sei denjenigen herzlich gedankt, welche ihre Hilfe mitunter in Erwartung einer leichten Aufgabe angeboten haben: Meinen aktuellen und ehemaligen Begleitern am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft in Aachen, namentlich Sonja Christoph, Gesa Kutschera, Maren Niemeyer, Daniel Bachmann, Bernhard Becker, Gerd Demny und Thomas Holzapfel. Auch meine Freunde Andreas Rosenkranz und Timo Schmitt konnten sich meines Anliegen nicht erwehren und haben einen wichtigen Anteil am Gelingen der Arbeit.

Darüber hinaus geht nichts über eine angenehme Arbeitsumgebung. Hierzu tragen auch heute noch alle Mitarbeiter am IWW tagtäglich bei. Zurückschauend sind meine ehemaligen Bürokollegen Sebastian Rubbert und Husam Baalousha besonders zu nennen. Danke für so manches Schmunzeln und erfrischend humorvolles Wortgefecht!

Para mi es de especial importancia expresar mi agradecimiento al profesor Fernando Delgado Ramos de la Universidad de Granada en España, quién durante unos meses, en los que desarrollé esta tesis, me dió la oportunidad de obtener una visión y perspectiva profunda, no sólo de un campo de investigación nuevo, sino también de una hermosa ciudad y un país lleno de vida. La personal y agradable relación, sumado a la siempre buena disposición, me hace esperar con mucho optimismo y alegría un futuro trabajo en conjunto. Por todo lo anterior, Fernando, mi más sincero agradecimiento. Der Aufenthalt im Jahre 2005 erfolgte unter anderem auch durch Unterstützung von Seiten des Deutschen Akademischen Austausch Dienstes (DAAD).

Drei Menschen nehmen ganz besondere Rollen ein. Ohne sie hätte mir die Kraft gefehlt, diese Arbeit zu einem guten Ende zu bringen: Meiner Mutter Edith Huber für ihre Unterstützung und Fürsorge in allen Lebenslagen, so lange ich zurückdenken kann. Nun, in Bezug auf die stets offen kommunizierte Furcht, dass ich niemals fertig werden würde: *Es ist vollbracht!* Meinem Vater Patrik Huber natürlich auch für die tief gehenden fachlichen Diskussionen - aber vor allem für unzählige weitere Dinge im Leben: Väterliche Unterstützung, Vertrauen und auch mahnende Worte. Zuletzt meiner Verlobten Brigitte Suelmann für ihre unbeschreibliche Geduld, für ihre Uneigennützigkeit, den steten Zuspruch, für ihr Verständnis und für ihre Liebe. Ich schließe ihr gegenüber mit dem Versprechen für eine gemeinsame Zukunft mit mehr Zeit und Aufmerksamkeit von meiner Seite.

Aachen, im März 2008

Nils Peter Huber

Kurzfassung

Staudämme sind komplexe Ingenieurbauwerke, deren Versagen in der Vergangenheit umfangreiche Folgen nach sich gezogen haben. Die international verbreitete Bestrebung, die aus den Stauanlagen erwachsenden Risiken zu analysieren und zu beurteilen sowie mit den Restrisiken umzugehen, findet zunehmend auch in Deutschland Eingang in konzeptionelle Ansätze und wird in der DIN 19700 für Stauanlagen festgeschrieben. Ein umfangreiches und in der Dissertation beschriebenes Werkzeug, um die Risiken von wasserbaulichen Anlagen fundiert zu betrachten, liegt am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen mit dem Verfahren *RAPID (Risk Assessment: Probability, Inundation, Damage)* vor. Der weithin anerkannten Definition aus dem technischen Anwendungsfeld folgend wird das Risiko als Produkt aus der Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines unerwünschten Ereignisses und den daraus erwachsenden Konsequenzen betrachtet. Letztere sind für den Bereich der Ökonomie umfangreich, für die Ökologie und den Bereich der psychosozialen Schäden teilweise einer Quantifizierung zugänglich, so dass bei einer Quantifizierbarkeit auch von Wahrscheinlichkeiten durch die mathematische Berechnung von Risiken ein Weg zur Objektivierung von Risikoaussagen eröffnet wird. Die Zielsetzung der Arbeit wird deshalb in den Kontext der quantitativen Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten für Staudämme gelegt.

Die probabilistische Versagensmodellierung ist eine Methode zur rechnerischen Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten, welche es ermöglicht, die physikalische Grundlage von Versagensprozessen detailliert abzubilden. Dieses Merkmal und die Verwendung wissenschaftlich fundierter und anerkannter konzeptioneller Rechenmodelle macht sie gegenüber alternativen Verfahren überlegen. Ein Studium der Literatur zeigt, dass probabilistische Modellansätze zwar existieren, potentiell relevante Versagensmechanismen jedoch nur bis zu einer begrenzten Detailtiefe ausformuliert werden. Darüber hinaus ist kein Modell dokumentiert, welches das breite Spektrum relevanter und wesentlicher Gefährdungen für Staudämme abdeckt. Für das im Rahmen der Dissertation neu entwickelte generische probabilistische Versagensmodell *PrEDaF (Probability of Embankment Dam Failure)* werden für interne und externe Gefährdungen komplexe Versagensmechanismen formuliert und mit analytischen, empirischen und numerischen Ansätzen hinterlegt. In vier Hauptmodulen werden die externen Gefährdungen *Hydrologische Ereignisse, Seismologie, Hangrutschungen in den Stauraum* und das *Versagen oberstromiger Stauanlagen* sowie die daraus umfangreich ableitbaren Versagensmechanismen mathematisch-

physikalisch beschrieben und über die Eintrittswahrscheinlichkeiten der entsprechenden Initialereignisse ein zeitlicher Bezug der ermittelten Versagenswahrscheinlichkeiten hergestellt. *Innere Erosionsprozesse, geostatische Vorgänge* und *Einflüsse aus Überwachungsmaßnahmen* werden in den vier Hauptmodulen untergeordnet, jedoch ebenso detailliert, prozessorientiert und wissenschaftlich fundiert berücksichtigt. Die Transformation von Auftretenswahrscheinlichkeiten sowie aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten in konzeptionellen Modellen und in den im Modell verwendeten Parametern zur Versagenswahrscheinlichkeiten erfolgt mittels *Monte-Carlo-Simulationen* und daran angelehnter Verfahren zur Varianzreduktion.

Im Zuge der Analyse von konzeptionellen Modellansätzen für innere Erosionsprozesse wird erkannt, dass für die Interaktion von mineralischen Dammkernmaterialien mit angrenzenden mineralischen Filterkörpern, in so genannten *Basis-Filter-Systemen*, in Bezug auf differenzierte Aussagen zur Stabilität Defizite bestehen. Differenzierungen sind innerhalb eines probabilistischen Modells von besonderem Interesse, um nicht nur zwischen einer Erosion von Kernmaterial und deren Ausbleiben zu unterscheiden, sondern zu erwartende Erosionsausmaße abschätzen zu können. Dieser Schritt wird als besonders wichtig herausgestellt. Weil bekannte Filterkriterien deterministisch und dabei in Bezug auf eine Erosion eines Basiserdstoffs in einen Filterkörper trennscharf sind, wird mittels *logistischer Regressionsanalysen* aus einer sehr umfangreichen Basis von Laborversuchsdaten (so genannte *No-Erosion-Filter(NEF)-Tests*) ein probabilistisches Filterkriterium für feinkörnige Basiserdstoffe abgeleitet. Dieses unterteilt den Bereich der zu erwartenden Erosion eines Basiserdstoffs und ermöglicht damit nach Einbindung in das Modell *PrEDaF* die differenzierte Betrachtung möglicher Folgemechanismen. Es erlaubt darüber hinaus auch im Hinblick auf die Bemessung von Filterkörpern verbesserte Aussagen.

Am Beispiel einer fiktiven Stauanlage wird der Einsatz des erarbeiteten probabilistischen Modells *PrEDaF* dargestellt. Es wird dabei auch gezeigt, dass sich das entwickelte Modell sehr gut für die Bewertung von konstruktiven und organisatorischen Maßnahmen zur Minderung der Versagenswahrscheinlichkeiten von Staudämmen eignet. Dies erlaubt die zielgerichtete Minderung von Risiken.

Abstract

Dams are complex engineering structures whose failures have caused extensive consequences in the past. The internationally prevalent trend to analyze and assess risk as well as to manage the residual risk is increasingly finding its way into conceptual approaches to dam safety in Germany and now codified in the German technical standard DIN 19700 for dams and reservoirs. A comprehensive approach for assessing risk of hydraulic structures in a profound manner, named *RAPID: Risk Assessment: Probability, Inundation, Damage*, is described in this thesis and now available at the Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management at RWTH Aachen University. Following the well-accepted definition of risk in a technical context, risk is defined as the product of the probability of occurrence for an undesirable event and the resulting consequences. As consequences are within the field of (socio-)economics extensively, within the context of ecologic and psychosocial effects at least partially amenable to quantification, quantifying probabilities will allow for the mathematical calculation of risk, allowing to assess risk within an objective framework. Derived from this, the objective of the thesis is defined in the context of the quantitative determination of probabilities of failure for embankment dams.

The method of the probabilistic modelling of failures is a method for the mathematical determination of probabilities of failure which allows the detailed representation of the physical basics of failure processes. This attribute and the utilization of scientifically profound as well as acknowledged conceptual calculation models make it superior to alternative methods used for quantifying or estimating the probabilities of failure. A literature study shows that probabilistic modelling approaches are available in principle. Nevertheless within these, potentially relevant failure modes are only described up to a limited level of detail. Additionally, no model which shows the capability of covering the wide range of relevant and significant hazards for embankment dams is documented in the literature. Within the thesis a new generic probabilistic model named *PrEDaF (Probability of Embankment Dam Failure)* is developed and coded. It comprises comprehensive and complex failure modes which are formulated as outcomes of internal and external hazards. These modes are mathematically based on analytical, empirical and numerical approaches. The four external hazards *hydrological events*, *seismology*, *landslides into the reservoir* and *the failure of an upstream dam* allow the representation of the probabilities of failure based on time as the external initiating events are all time-dependent. In the

model these hazards are assigned to four main modules. *Internal erosion*, *geostatic processes* and *influences from dam monitoring* are included into the four main modules but considered equal in detail, process-orientation and scientific accuracy. The transformation of aleatory and epistemic uncertainties in parameters and conceptual models to probabilities of failure is performed by applying *Monte-Carlo* modeling techniques and related methods for variance reduction.

In the course of working within the topic of internal erosion on the identification of filter criteria in order to implement these into the model it is recognized that shortcomings exist in the field of drawing sophisticated conclusions for the interaction of mineral dam cores and filter bodies, within so-called *base-filter-systems*. Such sophisticated conclusions are of particular interest for the purpose of probabilistic modelling of filter performance. It is found especially important to estimate the expected gradual extent of erosion of base material into adjacent filters instead of simply separating erosion from non-erosion status. As well-established filter criteria are of deterministic nature and separate into dichotomous categories, analyses using the method of *logistic regression* are undertaken. A data basis formed by the results of a large number of laboratory *No-Erosion-Filter(NEF)-Tests* is available for this purpose. The investigations result in a probabilistic filter criterion for fine-grained base soils. It subdivides the range of expected erosion of base soil and therefore allows for its inclusion into the probabilistic model *PrEDaF* in order to extensively investigate possible failure modes. Additionally it allows for improved filter design.

The application of the developed probabilistic model *PrEDaF* is presented for a fictitious dam. In doing so it is also shown that the model is very well suited for evaluating the efficiency of constructive and organizational measures within the framework of reducing probabilities of failure of embankment dams. This allows for purposeful mitigation of risk.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole	XVIII
1 Einleitung	1
1.1 Stauanlagensicherheit und Versagen im historischen Kontext	1
1.2 Vom Sicherheitsdenken zur Risikophilosophie	2
1.3 Übergeordnete Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Konzept zur Betrachtung der Risiken von Stauanlagen	9
2.1 Allgemeines	9
2.2 Normative Anforderung	10
2.2.1 Forderungen der DIN 19700 für Stauanlagen	10
2.2.2 Internationale Ansätze	11
2.3 Grundzüge des <i>RAPID</i> -Verfahrens	16
2.4 Risikoanalyse	18
2.4.1 Identifikation von Gefährdungen	18
2.4.2 Versagensmechanismen	20
2.4.3 Versagenswahrscheinlichkeiten	20
2.4.4 Versagensfolgen	22
2.4.5 Schadenspotentiale	24
2.4.6 Risikobestimmung	33
2.5 Risikobeurteilung und Maßnahmenplanung	34
2.5.1 Risikoakzeptanz	34
2.5.2 Risikominderung	38
2.5.3 Restrisiko	41
2.6 Risikomanagement	42
2.6.1 Aufgaben des Risikomanagements	42
2.6.2 Risikomanagement einer Stauanlage	43
2.6.3 Makroskaliges Risikomanagement	43
2.7 Stand der Arbeiten und Defizite	44
3 Identifikation von Versagensmechanismen	47
3.1 Grundlagen	47
3.2 Strukturierte Beschreibung von Versagensmechanismen	48
3.2.1 Verfahrensüberblick	48
3.2.2 Einflussdiagramme	49
3.2.3 Ereignisablaufdiagramme	50
3.2.4 Fehlerbäume	51
3.2.5 Anwendungsgrenzen diskreter logischer Methoden	54
3.3 Historische Versagens- und Schadensstatistik	56
3.3.1 Dammversagensereignisse	56

3.3.2	Einbindung von Dammschadensereignissen	58
3.3.3	Zusammenführung und Ergänzung der Mechanismen	59
3.4	Bisherige Arbeiten zur Versagenswahrscheinlichkeitsbetrachtung von Dämmen	60
3.4.1	Betrachtungsrahmen	60
3.4.2	Externe Gefährdungen	62
3.4.3	Interne Gefährdungen	67
3.5	Diskussion der Erkenntnisse und Ableitung des Untersuchungsbedarfs	71
3.5.1	Zusammenfassung und Diskussion	71
3.5.2	Weiteres Vorgehen	73
4	Methoden zur Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten	76
4.1	Überblick	76
4.2	Versagenswahrscheinlichkeit und Unsicherheiten	77
4.2.1	Ereignisrahmen zur Versagenswahrscheinlichkeitsbestimmung	77
4.2.2	Charakterisierung von Unsicherheiten	78
4.2.3	Mathematische Beschreibung von Unsicherheiten	79
4.3	Nicht-modellbasierte probabilistische Ansätze	81
4.3.1	Allgemeine Struktur	81
4.3.2	Reine Schätzverfahren	82
4.3.3	Versagensstatistische Methoden	83
4.4	Probabilistische Modellierung	85
4.4.1	Zuverlässigkeitstheoretische Grundlagen	85
4.4.2	Lösungsverfahren für statistische Momente	87
4.4.3	Verfahren zur direkten Bestimmung von Versagenswahrscheinlichkeiten	90
4.4.4	Bewertung der Verfahren der stochastischen Modellierung	94
4.4.5	Monte-Carlo-basierte Verfahren zur Varianzreduktion	96
4.5	Kombination und Interpretation von Unsicherheitsaussagen	101
4.6	Zusammenfassung	102
5	Hydrologische und hydraulische Mechanismen	105
5.1	Überblick	105
5.1.1	Normative Grundlage und Motivation	105
5.1.2	Ableitung des Vorgehens	105
5.2	Hydrologische Extremereignisse und Überströmwahrscheinlichkeit	108
5.2.1	Allgemeines	108
5.2.2	Zufluss zum Stauraum und Überströmwahrscheinlichkeit	109
5.2.3	Windinduzierter Wellenauflauf	113
5.2.4	Hydraulische Leistungsfähigkeit von Entlastungsanlagen	123
5.2.5	Ausfall technischer Anlagen	124
5.2.6	Ausufern von Entlastungsgerinnen	129
5.3	Stabilität von Schüttungen bei Überströmen	129
5.3.1	Grundlagen zur Breschenmodellierung	129

5.3.2	Hydraulik des Breschendurchflusses	131
5.3.3	Aufbruch- und Erosionsresistenz von Dammbaumaterialien	133
5.3.4	Zeitbedarf für die Breschenentwicklung	139
5.4	Modelltechnische Umsetzung der hydrologischen und hydraulischen Prozesse	142
5.5	Zusammenfassung des hydrologisch-hydraulischen Versagensmechanismus 144	
6	Seismologie	146
6.1	Überblick	146
6.1.1	Normative Grundlage und Motivation	146
6.1.2	Ableitung des Vorgehens	146
6.2	Seismische Einwirkungen	149
6.2.1	Grundkennwerte	149
6.2.2	Magnituden	149
6.2.3	Intensitäten	151
6.2.4	Beschleunigungen	152
6.2.5	Antwortspektren	153
6.2.6	<i>Arias</i> -Intensität	154
6.3	Liquefaktion	155
6.3.1	Allgemeines	155
6.3.2	Auftreten einer Liquefaktion	156
6.3.3	Laterale Verformungen und Setzungen	160
6.3.4	Dynamischer Einfluss auf die Scherfestigkeit	163
6.4	Böschungstabilität unter Erdbebeneinfluss	163
6.4.1	Überblick	163
6.4.2	Pseudo-statischer Stabilitätsansatz mit Erdbebenersatzkräften	164
6.4.3	Verformungsansatz	164
6.5	Grenzzustände der Verformung	173
6.6	Zusammenfassung des seismischen Versagensmechanismus	174
7	Massenbewegungen in den Stauraum	177
7.1	Überblick	177
7.1.1	Normative Grundlage und Motivation	177
7.1.2	Ableitung des Vorgehens	177
7.2	Phänomenologie der Impulswellenentstehung	179
7.2.1	Überblick	179
7.2.2	Ursachen von Hangbewegungen	180
7.2.3	Wellentheorie	182
7.3	Mathematische Beschreibung von Impulswellen	184
7.3.1	Grundlagen	184
7.3.2	Hangrutschung und Wellenentstehung	185
7.3.3	Wellenfortpflanzung und Dispersion	191
7.3.4	Wellenauflauf und Wellenüberschlag	195
7.3.5	Erosion der Krone	196

7.4	Zusammenfassung des Versagensmechanismus aus Hangrutschungen . . .	198
8	Versagen oberstromiger Stauanlagen und sonstige Gefährdungen	201
8.1	Überblick	201
8.1.1	Normative Grundlage und Motivation	201
8.1.2	Ableitung des Vorgehens	201
8.2	Versagen von oberstromigen Stauanlagen	202
8.2.1	Überblick	202
8.2.2	Breschenbildung und Schwallauslösung	204
8.2.3	Bruchwellenfortpflanzung	206
8.2.4	Dämpfung des Bruchwellenscheitels	208
8.2.5	Beispielhafte Anwendung	212
8.3	Versagen von Vorsperren	214
8.3.1	Bildung von Schwallwellen	214
8.3.2	Wellenfortpflanzung und Auflauf	216
8.4	Sabotage und krieglerische Einwirkungen	217
8.5	Zusammenfassung der behandelten Versagensmechanismen	217
9	Geostatische Versagensmechanismen	219
9.1	Überblick	219
9.1.1	Normative Grundlage und Motivation	219
9.1.2	Allgemeines und Ableitung des Vorgehens	219
9.2	Ausgedehnte Setzungen	220
9.2.1	Setzungsfolgen	220
9.2.2	Aspekte der Primär- und Konsolidationssetzungen	221
9.3	Horizontale Verformungen	222
9.4	Hohlraumverfüllungen	223
9.5	Böschungsbruch	225
9.5.1	Grundlagen	225
9.5.2	Einordnung in Versagensmechanismen	226
9.5.3	Böschungsbruch auf kreisförmigen Scherflächen	227
9.5.4	Gleiten auf zusammengesetzten geraden Scherflächen	229
9.5.5	Dreidimensionalität des Böschungsversagens	230
9.5.6	Programmtechnische Implementierung der Böschungsbruchbe- trachtung	231
9.6	Strömungsprozesse in Damm und Untergrund	240
9.6.1	Elemente der Sickerströmungsberechnung	240
9.6.2	Sickerströmungsberechnung	241
9.6.3	Infiltration in den Dammkörper	243
9.6.4	Durchströmung von Hohlräumen im Dammkörper	245
9.6.5	Ausspülungen am Dammfuß	246
9.7	Zusammenfassung der geostatischen Versagensmechanismen	248

10	Innere Erosionsprozesse	250
10.1	Überblick	250
10.1.1	Normative Grundlage und Motivation	250
10.1.2	Ableitung des Vorgehens	250
10.2	Grundlagen innerer Erosionen	252
10.2.1	Räumliche Aspekte des Auftretens	252
10.2.2	Typen der inneren Erosion	253
10.3	Ursachen der Inneren Erosion	254
10.3.1	Überblick	254
10.3.2	Externe Einwirkungen	255
10.3.3	Hoch durchlässige Untergrundschichten	258
10.3.4	Spannungsinduzierte Rissbildung und hydraulischer Aufbruch	259
10.3.5	Erosion im Zusammenhang mit Querungen und Einbauten	265
10.3.6	Hydraulische Öffnung eines Erosionskanals	267
10.4	Fortführung der Erosion und Stabilität des Erosionskanals	272
10.4.1	Überblick	272
10.4.2	Kriterien für die Suffosion	274
10.4.3	Kriterien für die Kontakterosion	279
10.4.4	Filterstabilität bei Rissbildung im Kern	287
10.4.5	Hydraulischer Erosionsprozess in Rissen und Erosionsröhren	288
10.4.6	Piping im Untergrund	292
10.5	Erosionsröhrenstabilität und Folgen eines Zusammenbruchs	296
10.5.1	Entkopplung der Prozesse	296
10.5.2	Stabilität einer Erosionsröhre	297
10.5.3	Räumliche Wirkung des Erosionsröhrenzusammenbruchs	300
10.6	Zeitliches Auftreten und Entwicklung innerer Erosionen	303
10.7	Versagensmechanismen der inneren Erosion	304
11	Probabilistische Betrachtung der Stabilität von Basis-Filter-Systemen in Dämmen	307
11.1	Ziele und Vorgehen	307
11.2	Bemessung von Basis-Filter-Systemen	308
11.2.1	Allgemeines zur Filterbemessung	308
11.2.2	Grundlegende Anforderungen an mineralische Filter	309
11.2.3	Prozess der Selbstfiltration	310
11.2.4	Verbreitete empirische Filterkriterien	312
11.2.5	Alternative empirische Filterkriterien	318
11.3	Inhärente Unsicherheiten bei der Bewertung von Basis-Filter-Systemen	320
11.3.1	Problemstellung	320
11.3.2	Einflussparameter auf die Basis-Filter-Interaktion	320
11.3.3	Einflüsse aus der Untersuchungsmethodik	321
11.3.4	Betrachtungen zu möglichen neuen Filterkriterien	325
11.4	Differenzierte Betrachtung des Versagens von Basis-Filter-Systemen	332
11.4.1	Konzept einer differenzierten Betrachtung von Basis-Filter-Erosionen	332

11.4.2	Differenzierte Analyse für ausgewählte Parameterkombinationen	336
11.4.3	Regressionsanalyse für die differenzierten Erosionskategorien	342
11.4.4	Regressionsanalyse im multivariaten Fall	346
11.5	Probabilistische Aspekte von Basis-Filter-Systemen	349
11.5.1	Ableitung des weiteren Vorgehens	349
11.5.2	Epistemische Unsicherheiten der Basis-Filter-Stabilität	350
11.5.3	Methode der logistischen Regression	351
11.5.4	Variablenauswahl und Untersuchungskonzept	354
11.5.5	Durchführung der logistischen Regressionsanalysen	360
11.5.6	Güte der logistischen Regression	363
11.5.7	Validierung des gewählten logistischen Regressionsansatzes	368
11.5.8	Logistische Regression der kontinuierlichen Erosion	370
11.6	Diskussion der laborversuchsspezifischen Ergebnisse	372
11.6.1	Zusammenfassende Betrachtung der Thematik	372
11.6.2	Aussagehorizont der erzielten Ergebnisse	376
11.6.3	Bestehende Defizite	377
11.7	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf Dammbauwerke	379
11.8	Einbindung in die Versagenswahrscheinlichkeitsbetrachtung	380
11.8.1	Überblick	380
11.8.2	Aufweitung einer Erosionsröhre	381
11.8.3	Erhöhter Sickerwasseranstieg	385
12	Überwachungsmaßnahmen an Stauanlagen	387
12.1	Überblick	387
12.1.1	Normative Grundlage	387
12.1.2	Ableitung des Vorgehens	387
12.2	Organisations- und Überwachungsmethoden	388
12.3	Modell der Stauanlagenüberwachung	391
12.3.1	Überblick	391
12.3.2	Datenerhebung	391
12.3.3	Interpretation und Detektion vor Ort	393
12.3.4	Sofortmaßnahmen	394
12.3.5	Meldung und Datenübertragung an die Zentrale	396
12.3.6	Interpretation und Detektion in der Zentrale	396
12.3.7	Maßnahmenfindung, Anweisung und Kommunikation	397
12.4	Fehlerwahrscheinlichkeiten	398
12.4.1	Überblick	398
12.4.2	Fehlerwahrscheinlichkeit menschlicher Handlungen	398
12.4.3	Fehlerwahrscheinlichkeit technischer Komponenten	406
13	Probabilistisches Versagensmodell <i>PrEDaF</i>	409
13.1	Grundkonzept des Modells	409
13.2	Stochastikmodul	411
13.2.1	Zufallszahlengenerator	411

13.2.2	Bestimmung beliebig verteilter Zufallszahlen	413
13.3	Modellaufbau und Einbindung der Versagensmechanismen	413
13.3.1	Kopplung externer und interner Gefährdungen	413
13.3.2	Einbindung der Hauptmodule in das Modell	415
13.3.3	Teil-, Unter- und Versagensmodule des Modells	418
13.3.4	Hauptmodul <i>Hydrologie</i>	420
13.3.5	Hauptmodul <i>Seismologie</i>	422
13.3.6	Hauptmodul <i>Hangrutschung</i>	423
13.3.7	Hauptmodul <i>Stauanlagenversagen oberstrom</i>	423
13.3.8	Spezielle Lösungsansätze für ausgewählte Module	425
13.4	Validierung und Verifikation der Modellkomponenten	428
13.4.1	Überblick	428
13.4.2	Validierung des Stochastikmoduls	428
13.4.3	Validierung und Verifikation der Implementierung der Grenzzustandsgleichungen	431
13.4.4	Validierung und Verifikation spezieller Module	433
13.5	Zusammenfassende Betrachtung	433
14	Quantifizierung von Unsicherheiten und skalenabhängige Fluktuation	435
14.1	Überblick	435
14.2	Modellunsicherheiten	436
14.2.1	Unsicherheiten des Gesamtkonzepts	436
14.2.2	Unsicherheiten der Modellkomponenten	437
14.2.3	Diskussion in Bezug auf das Gesamtmodell <i>PrEDaF</i>	439
14.3	Parameterunsicherheiten	441
14.3.1	Allgemeines	441
14.3.2	Unsicherheiten externer Parameter	441
14.3.3	Unsicherheiten geotechnischer Parameter	445
14.3.4	Sonstige Parameter am Beispiel des Pipings	451
14.4	Skalenabhängigkeit der Unsicherheit	452
14.4.1	Notwendigkeit der skalenabhängigen Betrachtung	452
14.4.2	Theoretische Grundlagen	453
14.4.3	Korrelationsmodelle	455
14.4.4	Abschätzung der Fluktuationslängen	457
14.4.5	Umsetzung im Modell <i>PrEDaF</i>	458
14.5	Korrelation in Dammlängsrichtung	459
15	Anwendungsbeispiel	464
15.1	Ziele und Vorgehen	464
15.2	Beschreibung der <i>Basisvariante</i>	465
15.2.1	Aufbau des Absperrbauwerks	465
15.2.2	Hydrologie und hydraulische Anlagen	467
15.2.3	Randbedingungen für die Seismologie	468
15.2.4	Hanginstabilitäten	469

15.2.5	Oberstromige Stauanlagen	470
15.2.6	Überwachung	470
15.2.7	Allgemeine Modelleinstellungen	471
15.3	Probabilistische Modellierung der <i>Basisvariante</i>	472
15.4	Maßnahmen zur Verringerung der Versagenswahrscheinlichkeit	474
15.4.1	Erhöhung der Dammkrone um 1 m	475
15.4.2	Erhöhung der Dammkrone um 5 m	477
15.4.3	Verlängerung des Dichtschleiers	481
15.4.4	Einbindung von Überwachungsmaßnahmen	484
15.4.5	Zusammenstellung der Ergebnisse für Minderungsmaßnahmen	488
15.5	Verzicht auf die Berücksichtigung skalenabhängiger Fluktuationen	489
15.5.1	Überblick	489
15.5.2	Vorausgehende Diskussion	490
15.5.3	Eingangswerte der Untersuchung	491
15.5.4	Ergebnisse	491
15.6	Variationsbetrachtung für den Bereich der inneren Erosion	493
15.6.1	Überblick	493
15.6.2	Ergebnisse	494
15.7	Vergleich zwischen Modellierung und historischer Statistik	495
15.7.1	Vergleich mit Tabelle 3.1	495
15.7.2	Vergleich auf Basis von Anhang A	496
15.8	Zusammenfassung und Bewertung des Anwendungsbeispiels	499
16	Zusammenfassung und Ausblick	502
16.1	Zusammenfassung und Bewertung	502
16.1.1	Identifizierte Ziele und Vorgehensweisen	502
16.1.2	Modellentwicklung	504
16.1.3	Anwendungsbeispiel	506
16.1.4	Analysen zur Basis-Filter-Stabilität	508
16.1.5	Fazit	509
16.2	Ausblick	511
16.2.1	Weiterer Entwicklungsbedarf für <i>RAPID</i>	511
16.2.2	Fortentwicklung von <i>PrEDaF</i> und erweiterte Analysen	513
16.2.3	Stabilität von Basis-Filter-Systemen	516
A	Versagenswahrscheinlichkeiten nach der Methode der historischen Statistik nach Foster et al. (1998)	565
B	Durchströmung von Dammkörper und Untergrund	570
B.1	Allgemeines	570
B.2	Homogener Damm	571
B.3	Zonierter Damm auf undurchlässigem Untergrund	572
B.4	Zonierter Damm auf durchlässigem Untergrund	575
B.4.1	Grundlagen	575
B.4.2	Szenario U_A : Lange durchlässige Dichtschürze, kein Dichtschleier	575

B.4.3	Szenario U_B : Lange undurchlässige Dichtschürze, undurchlässige Dichtung, kein Dichtschleier	578
B.4.4	Szenario U_C : Kurze durchlässige Dichtschürze, kein Dichtschleier	579
B.4.5	Szenario U_D : Dichtschürze, vollständiger Dichtschleier	580
B.4.6	Szenario U_E : Keine Dichtschürze, unvollständiger Dichtschleier	581
B.4.7	Szenario U_F : Durchlässige Dichtschürze, unvollständiger Dichtschleier	583
B.4.8	Szenario U_G : Sehr undurchlässige Dichtschürze/Dichtung, unvollständiger Dichtschleier	585
C	Innere Erosionsprozesse	586
C.1	No-Erosion-Filter(NEF)-Test	586
C.1.1	Versuchsaufbau	586
C.1.2	Vorbereitung des Basismaterials	586
C.1.3	Vorbereitung des Filtermaterials	587
C.1.4	Versuchsdurchführung und Auswertung	588
C.2	Continuing-Erosion-Filter(CEF)-Test	589
C.3	Preformed-Slot-Test	590
C.4	Konventioneller Basis-Filter-Test	590
C.5	Slurry-Test	591
D	Statistische Verteilungen	592
D.1	Überblick	592
D.2	Gleichverteilung	592
D.3	Dreiecksverteilung	594
D.4	Normalverteilung	595
D.5	Lognormalverteilung	597
D.6	Exponentialverteilung	598
D.7	Rayleighverteilung	601
D.8	Gumbelverteilung	603
E	Fehlerbäume des Stauanlagenversagens und Modellkomponenten	606
E.1	Überblick	606
E.2	Hauptmodul Hydrologie	608
E.3	Hauptmodul Seismologie	620
E.4	Hauptmodul Hangrutschung	625
E.5	Hauptmodul Stauanlagenversagen oberstrom	628

Verzeichnis der Formelzeichen und Symboleⁱ

Risikogrundlagen, Versagensmechanismen und Wahrscheinlichkeiten (Kapitel 2, 3 und 4)

β	Zuverlässigkeitsindex (β -Wert)	-
β_Z	Schiefekoeffizient der Zufallsvariablen Z	-
χ_i	Ordnungszahl bei der <i>Mellin-Transformation</i> für $X_i^{c_i}$	-
δ_Z	Variationskoeffizient der Zufallsvariablen Z	-
ϵ_Z	Exzess der Zufallsvariablen Z	-
η	Sicherheitsbeiwert	-
γ_Z	Kurtosis der Zufallsvariablen Z	-
μ_Z	Mittelwert der Zufallsvariablen Z	-
ω_i	Frequenz (<i>Fourier-Transformation</i>)	-
σ_Z	Standardabweichung der Zufallsvariablen Z	-
BHQ_i	Bemessungshochwasserzufluss	L^3T^{-1}
C	Charakteristische Funktion (<i>Fourier-Transformation</i>)	-
c_i	Konstanten	-
$E[\cdot]$	Erwartungswert der Zufallsvariablen Z	-
$F(\cdot)$	Verteilungsfunktion	-
$f(\cdot)$	Verteilungsdichtefunktion	-
G	Grenzzustand	-
h_f	Fließtiefe	L
k	Ordnung eines statistischen Moments	-
m	Anzahl an Realisierungen einer Zufallsvariablen	-
m_f	Anzahl der zum Versagen führenden Realisierungen einer Zufallsvariablen	-
$M_{Z,k}$	Zentralmoment k -ter Ordnung der Zufallsvariablen Z	-
n	Anzahl von Zufallsvariablen	-

ⁱ Aufgrund des Umfangs der Arbeit und der spezifischen, in der Fachliteratur und in Normenwerken etablierten Verwendung von Formelzeichen und Symbolen wird eine themenbezogene Definition vorgenommen. Hierdurch sollen Überschneidungen und damit Inkonsistenzen vermieden werden.

P	Wahrscheinlichkeit	-
P_a	Annualisierte Wahrscheinlichkeit	T^{-1}
q_U	Spezifischer Überstrom über Dammkrone	L^2T^{-1}
R	Widerstand (<i>Resistance</i>)	-
r'	Realisierung des Widerstands im Standardnormalraum	-
r'_* / s'_*	Koordinaten des <i>design point</i> im Standardnormalraum	-
S	Einwirkungen (<i>Stress</i>)	-
s'	Realisierung der Einwirkungen im Standardnormalraum	-
$T_{M,Y}$	<i>Mellin-transformierte</i> Verteilungsdichtefunktion der Zufallsvariablen Y	-
t_U	Überströmdauer über Dammkrone	T
v_f	Fließgeschwindigkeit	LT^{-1}
X_i	Zufallsvariable	-
Y	Zufallsvariable	-
Z	Zufallsvariable	-
Z_{Hi}	Hochwasserstauziel	L
Z_{RS}	Zuverlässigkeit	-
Hydrologische und hydraulische Mechanismen (Kapitel 5)		
α_Q	Reduktionskoeffizienten des Durchflusses bei Entlastungsanlagen	-
$\bar{h}_{w,i}$	Mittlere Wassertiefe im Sektor i	L
$\bar{h}_{We,i}$	Mittlere Wellenhöhe im Sektor i	L
\bar{l}_{We}	Mittlere Wellenlänge	L
\bar{T}_{We}	Mittlere Wellenperiode	T
β	Winkel zwischen Windrichtung und Streichlänge	$^\circ$
β_Q	Exponent für Reduktionskoeffizienten des Durchflusses bei Entlastungsanlagen	-
Δt_{Br}	Zeitraum einer Breschenbildung	T
Δt_E	Erosionsdauer	T
$\frac{1}{\lambda_t}$	Erwartungswert eines Zeitraums im <i>constant rate model</i>	T
λ_{HS}	Reibungsbeiwert nach HARTUNG-SCHEUERLEIN	-
μ	Mittelwert	-

μ_A	Ausflussbeiwert	-
μ_u	Überfallbeiwert	-
ω_q	Stochastische Variable im Zusammenhang mit dem Windwellenüberschlagen	-
Ψ	Variablenvektor	-
ρ_s	Korndichte	ML^{-3}
ρ_w	Fluiddichte	ML^{-3}
σ	Standardabweichung	-
τ_{krit}	kritische Schubspannung	$ML^{-1}T^{-2}$
θ	Sektorwinkel	°
φ	Innerer Reibungswinkel eines Bodens	°
ϑ_D	Neigungswinkel der Dammböschung	°
ξ_0	Kennzahl für brechende Wellen	-
A_f	Durchflossener Querschnitt	L^2
A_{GA}	Querschnittsfläche des Grundablasses	L^2
a_i	Spektralfaktoren der Sektoren i	-
b_u	Breite eines Überfalls	L
C_s	Schleppkoeffizient	-
D_c	Charakteristischer Korndurchmesser	L
d_{GA}	Durchmesser eines Grundablasses	L
D_m	Maßgebender Korndurchmesser	L
D_w	Wirksamer Korndurchmesser	L
f_R	Rauheitsbeiwert für wasserseitige Dammböschungen	-
f_v	Einflussfaktor für vertikal platzierte Wellenabweiser	-
f_β	Einflussfaktor zur Berücksichtigung von nicht frontal zulaufenden Wellen	-
f_B	Einflussfaktor zur Berücksichtigung der Wirkung von Bermen	-
F_G	Gewichtskraft	MLT^{-2}
F_H	Hangabtriebskraft	MLT^{-2}
F_R	Reibungskraft	MLT^{-2}
F_S	Strömungskraft	MLT^{-2}
$Fr_{f,krit}$	Kritische Froudezahl	-

G	Grenzzustand	-
g	Erdbeschleunigung	LT^{-2}
h_f	Fließtiefe	L
$h_{f,gr}$	Grenztiefe	L
$h_{f,s}$	Belüftete Fließtiefe auf einer Böschung	L
h_{FB}	Freibord	L
h_{GA}	Achshöhe eines Grundablasses	L
h_{Kr}	Höhenlage der Dammkrone	L
h_{Sp}	Speicherwasserstand	L
h_u	Überstau- bzw. Überfallhöhe	L
$h_{We,Au,2\%}$	Wellenaufbauhöhe mit Überschreitungswahrscheinlichkeit von 2%	L
$h_{We,Au}$	Wellenaufbauhöhe an der Dammböschung	L
h_{We}	Windwellenhöhe	L
h_{Wi}	Windstauhöhe	L
h_w	Ruhewassertiefe	L
HQ_x	Bemessungshochwasserzufluss mit Wiederkehrperiode x	L^3T^{-1}
I_{hydr}	Hydraulischer Gradient	-
I_S	Sohlneigung	-
k_D	Koeffizient für Durchlässigkeit der wasserseitigen Dammböschung	-
k_R	Koeffizient für Rauheit der wasserseitigen Dammböschung	-
K_{geom}	Beiwert zur Berücksichtigung geometrischen Einflusses auf Schüttungsstabilität	-
k_{st}	Rauheitsbeiwert nach SRICKLER	$\text{L}^{1/3}\text{T}^{-1}$
l_{We}	Wellenlänge	L
m	Böschungsneigung (luftseitig)	-
n_f	Formfaktor für die Breite (Fülle) einer Zuflussganglinie	-
n_A	Anzahl von Ausfällen	-
P	Wahrscheinlichkeitswert	-
P_A	Ausfallwahrscheinlichkeit	-
P_L	Lagerungsfaktor für eine Schüttung	-
P_U	Überschlagswahrscheinlichkeit von Wellen	-

P_V	Überschreitungswahrscheinlichkeit für ein kritisches Wellenüberschlagsvolumen -	
pp_{D_i}	Siebdurchgang bei Korndurchmesser (Sieblochdurchmesser) D_i	%
Q_k	Kapazität von Entlastungsanlagen	L^3T^{-1}
Q_{Ent}	Entlastungsströme einer Talsperre	L^3T^{-1}
Q_{HW}	Speicherzufluss im Hochwasserfall	L^3T^{-1}
Q_s	Hochwasserscheitelzufluss zum Stauraum	L^3T^{-1}
$q_{We,U}$	Spezifischer Überschlagsstrom über eine Dammkrone	L^2T^{-1}
S	Streichlänge im Stauraum	L
s	Koeffizient zur Berücksichtigung des Luftgehalts in einer Strömung	-
t_A	Zeitpunkt eines Deckschichtaufbruchs	T
t_a	Anstiegszeit einer Hochwasserganglinie	T
U_f	Benetzter Umfang	L
v_f	Fließgeschwindigkeit	LT^{-1}
$v_{f,s}$	Belüftete Fließgeschwindigkeit	LT^{-1}
V_{Sp}	Speicherinhalt	L^3
$V_{We,U}$	Wellenüberschlagsvolumen über Dammkrone	L^3
w_{10}	Windgeschwindigkeit mit Wiederholungszeitraum von 10 (bis 50) Jahren	LT^{-1}
Z_{RS}	Zuverlässigkeit	-

Seismologie (Kapitel 6)

$(N_1)_{60cs}$	Schlagzahl aus Bohrlochrammsondierungen (<i>clean-sand</i>)	-
$(N_1)_{60}$	Schlagzahl aus Bohrlochrammsondierungen	-
α	Winkel zwischen Scherfuge und Wirkungsrichtung der Erdbebenersatzlast	°
α_A	Absorptionskoeffizient	L^{-1}
α_N	<i>clean-sand</i> -Faktor zur Umrechnung von Schlagzahlen	-
α_R	Regressionsparameter nach GUTENBERG-RICHTER	-
α_{r_d}	Empirischer Parameter zur Berechnung des Abminderungsfaktors r_d	-
$\bar{\tau}$	Mittlere dynamische Scherspannung	$ML^{-1}T^{-2}$
β	Tangentenwinkel im Gleitkörperschwerpunkt zur Horizontalen	°
β_N	<i>clean-sand</i> -Faktor zur Umrechnung von Schlagzahlen	-

β_R	Regressionsparameter nach GUTENBERG-RICHTER	-
β_{r_d}	Empirischer Parameter zur Berechnung des Abminderungsfaktors r_d	-
$\Delta t_{a_{EB,i}}$	Dauer eines Erdbebenpulses i mit Beschleunigung a_{EB}	T
Δt_{EB}	Dauer eines Erdbebenereignisses	T
ϵ_i	Volumenbezogenes Setzungsverhältnis einer Schicht i	-
η_L	Sicherheitsbeiwert der Liquefaktion	-
η_{dyn}	Dynamischer Sicherheitsbeiwert	-
η_{stat}	Statischer Sicherheitsbeiwert der Böschungsstabilität	-
γ_I	Bedeutungsbeiwert der Amplifikation	-
γ_i	Regressionsparameter der Magnituden-Intensitäts-Beziehung	-
μ	Mittelwert	-
ω_{GK}	Winkelgeschwindigkeit eines Gleitkörpers auf kreisförmiger Scherfuge	$^{\circ}\text{T}^{-1}$
Ψ	Untergrundparameter	-
σ	Standardabweichung / Standardfehler	-
$\sigma'_{A,v}$	Effektive vertikale Normalspannung aus Auflast	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$
$\sigma_{A,v}$	Totale Spannungen aus Auflast	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$
τ_u	Undrainierte Scherfestigkeit	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$
τ_m	Mobilisierbare Scherfestigkeit	$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$
ν_{GK}	Verformungswinkel eines Gleitkörpers auf kreisförmiger Scherfuge	$^{\circ}$
φ	Innerer Reibungswinkel	$^{\circ}$
φ_u	Innerer Reibungswinkel des undrainierten Bodens	$^{\circ}$
ϑ	Winkel einer Scherfuge zur Horizontalen	$^{\circ}$
a_R	Regressionsparameter nach GUTENBERG-RICHTER	-
$a_{EB,h}$	Horizontale Erdbebenbeschleunigung	LT^{-2}
$a_{EB,v}$	Vertikale Erdbebenbeschleunigung	LT^{-2}
b_i	Breite einer Lamelle i	L
b_R	Regressionsparameter nach GUTENBERG-RICHTER	-
CRR_x	<i>Cyclic Resistance Ratio</i> bei Magnitude x	-
CSR_x	<i>Cyclic Resistance Ratio</i> bei Magnitude x	-

f_b	Korrekturbeiwert für den Bohrlochdurchmesser	-
f_e	Korrekturbeiwert für die aufgebrachte Rammenergie	-
F_G	Kraft aus Eigengewicht	MLT^{-2}
f_n	Auflastbedingter Korrekturbeiwert	-
f_r	Korrekturbeiwert für die Länge der Führungseinrichtungen	-
f_s	Korrekturbeiwert für die Bauart der Sonde	-
f_α	Korrekturfaktor für geneigtes Gelände	-
f_σ	Korrekturfaktor für Einflüsse aus Auflast	-
F_{EB}	Erdbebensatzlast	MLT^{-2}
f_M	Skalierungsfaktor für von $M_W = 7,5$ abweichende Momentenmagnituden	-
G	Grenzzustand	-
g	Erdbeschleunigung	LT^{-2}
h_{Kr}	Höhenlage der Dammkrone	L
I	(Erdbeben)Intensität	-
I_0	Epizentralintensität	-
I_A	Arias-Intensität	LT^{-1}
I_{MM}	Modifizierte Mercalli-Intensitäten	-
I_{MSK}	Intensität nach MEDVEDEV-SPONHEUER-KARNIK	-
l_V	Länge einer Verwerfung	M
M	(Erdbeben)Magnitude	-
M_G	Masse eines Gleitkörpers	M
M_L	Lokale Magnitude	-
m_S	Schichtmächtigkeit	L
M_W	Momentenmagnitude	-
$M_{t,EB}$	Treibendes Moment infolge Erdbeben	ML^2T^{-2}
n_g	Grenzielfaches der Erdbeschleunigung g in Bezug auf die Böschungsstabilität	-
n_{EB}	Anzahl der Schwingungsamplituden	-
N_{SPT}	Schlagzahl im <i>Standard Penetration Test</i>	-
P	Wahrscheinlichkeitswert	-
P_a	Jährliche Überschreitungswahrscheinlichkeit	T^{-1}

p_A	Atmosphärendruck	$ML^{-1}T^{-2}$
R	Hypozentraldistanz	L
r	Epizentraldistanz	L
r_d	Tiefen- und magnitudenabhängiger Abminderungsfaktor für Auflastspannungen	-
r_m	Skalierungsfaktor für den CSR -Wert	-
r_{EB}	Hebelarm des Gleitkörpers in Bezug auf die Wirkrichtung von a_{EB}	L
s	Setzungen (Gesamtsetzungen)	L
s_u	Ungleichförmige Setzung	L
$s_{GK,B}$	Gleitkörperverschiebungen (aus Böschungsinstabilität)	L
$s_{GK,L}$	Gleitkörperverschiebungen (aus Liquefaktion)	L
s_{GK}	Gleitkörperverschiebungen	L
s_{Kr}	Setzungen der Dammkrone	L
t_0	Zeitpunkt des Beginns eines Pulses	T
t_1	Zeitpunkt des Ausklingens eines Pulses	T
t_2	Zeitpunkt des Wiedererreichens der Ruhelage	T
t_H	Herdtiefe	L
t_{Bo}	Tiefe im Boden	L
t_{GK}	Tiefe der Gleitkörperscherfuge vertikal zur Böschung	L
$T_{S,EB}$	Schwingungsperiode	T
T_{stat}	Tangentialkraft in einer Scherfuge (statischer Fall)	MLT^{-2}
$T_{u,dyn}$	Undrainierte Scherkraft in einer Scherfuge, dynamisch mobilisierbar	MLT^{-2}
Z_M	Zufallsvariable der Magnitude	-

Massenbewegungen in den Stauraum (Kapitel 7)

$\Delta t_{We,U}$	Überschlagsdauer einer Welle	T
δ_{dyn}	Dynamischer Bodenreibungswinkel	°
δ_{stat}	Statischer Reibungsbeiwert	L
η_{stat}	Sicherheitsbeiwert der Böschungsstabilität	-
λ	Relativer spezifischer Sedimenttransport	-
ρ_s	Korndichte	ML^{-3}

ρ_w	Fluiddichte	ML^{-3}
τ_{akt}	Aktuell wirkende Schubspannung	$ML^{-1}T^{-2}$
τ_{krit}	Kritische Schubspannung	$ML^{-1}T^{-2}$
ϑ_r	Neigung der Rutschungsebene zur Horizontalen	°
$\vartheta_{D,OW}$	Neigung der oberwasserseitigen Dammböschung zur Horizontalen	°
ξ	Winkel zwischen Eintrittsvektor und Wellenausbreitungsrichtung	°
$a_{EB,krit}$	Kritische Erdbebenbeschleunigung	LT^{-2}
a_{We}	Wellenamplitude	L
b_r	Breite der Rutschung	L
c	Überfallbeiwert	-
c_b	Korrekturbeiwert für die Kronenbreite	-
c_w	Proportionalitätsfaktor für die Wellenenergie	-
$c_{\vartheta_{D,OW}}$	Korrekturbeiwert für die Böschungsneigung	-
c_{We}	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit	LT^{-1}
d_c	Charakteristischer Korndurchmesser	L
d_r	Absolute Dicke einer Rutschungsmasse	L
d'_r	Relative Dicke einer Rutschungsmasse, bezogen auf Ruhewassertiefe	-
f	Äquivalenter Reibungsbeiwert, Fahrböschung	-
Fr_r	Froudezahl einer Rutschungsmasse	-
G	Grenzzustand	-
g	Erdbeschleunigung	LT^{-2}
h_{Au}	Wellenauflaufhöhe an einem Damm	L
$h_{f,U}$	Fließtiefe auf Krone bzw. luftseitiger Dammböschung	L
h_{FB}	Höhe des Freibords im Stauraum	L
h_{Kr}	Kronenhöhe	L
$h_{r,f}$	Maximale Fallhöhe der Rutschungsmasse	L
$h_{w,0}$	Ruhewassertiefe am Eintrittspunkt einer Rutschung	L
h_{We}	Wellenhöhe	L
h_w	(Ruhe-)Wassertiefe	L

I_A	Arias-Intensität	LT^{-1}
l_r	Länge der Rutschungsstrecke	L
l_{Kr}	Kronenlänge	L
$l_{r,A}$	Maximale Auslauflänge einer Rutschung	L
l_{We}	Wellenlänge	L
m_s	Geschiebetrieb	$ML^{-1}T^{-1}$
q_s	Spezifischer Sedimenttransportstrom	L^2T^{-1}
q_U	Spezifischer Überstrom	L^2T^{-1}
$q_{We,U}$	Spezifischer Überstrom für eine Welle	L^2T^{-1}
s	Setzung / Verformung	L
T_{We}	Wellenperiode	T
U_{We}	Ursell-Zahl	-
V_r	Rutschungsvolumen	L^3
v_r	Rutschungsgeschwindigkeit	LT^{-1}
$v_{f,U}$	Geschwindigkeit des überlaufenden Wasserpolsters	LT^{-1}
$v_{r,0}$	Anfängliche Rutschungsgeschwindigkeit	LT^{-1}
$V_{We,U}$	Wellenüberschlagsvolumen über Dammkrone	L^3
$v_{We,U}$	Wellenüberschlagsgeschwindigkeit	LT^{-1}
v_{WK}	Fließgeschwindigkeit des Wasserkörpers	LT^{-1}
x	Entfernung vom Rutschungseintritt	L
Z	Zufallsvariable	-

Veragen oberstromiger Stauanlagen und sonstige Gefährdungen (Kapitel 8)

β_i	Regressionskoeffizienten (für $h_{w,B}$ und V_w)	-
δ	Regressionskoeffizient	-
η	Abflussbeiwert	-
κ_L	Dämpfungsfaktor für den Scheitelabfluss	-
ν	Dispersionskoeffizient	-
b	(Mittlere) Talbreite	L
b_B	Breschenbreite	L

BFF	Breschenbildungsfaktor (<i>Breach Formation Factor</i>)	-
$c_{We,i}$	Absolute Wellengeschwindigkeit	LT^{-1}
d	Maß für die Dispersionslänge	L
Fr_i	Froude-Zahl	-
g	Erdbeschleunigung	LT^{-2}
h_f	Fließtiefe	L
h_{FB}	Freibord	L
$h_{w,B}$	Stauspiegel oberhalb der Breschensohlage	L
$h_{w,i}$	Wassertiefe	L
h_{We}	Wellenhöhe	L
I_{UW}	Sohlneigung unterwasserseitig einer Stauanlage	-
k_{st}	Beiwert nach GAUCKLER-MANNING-STRICKLER	$L^{1/3}T^{-1}$
L	Entfernung von Bruchstelle	L
L_0	Fließlänge für den Abfall der Gerinnesohle um h_f	L
L_D	Fließstrecke zwischen versagender und betrachteter Stauanlage	L
L_u	Charakteristisches Längenmaß (<i>ultimate distance</i>)	L
l_{We}	Wellenlänge (sinusförmige Welle)	L
$n_{f,B}$	Formfaktor des Breschendurchflusshydrographen	-
$n_{f,L}$	Formfaktor des Hydrographen in Entfernung L von Bruchstelle	-
Q_L	Durchfluss durch Talquerschnitt in Entfernung L von Bruchstelle	L^3T^{-1}
Q_B	Durchfluss durch eine Bresche	L^3T^{-1}
t_B	Zeit nach Bruch des Absperrbauwerks	T
t_L	Zeit nach erstem Hydrographenanstieg in Entfernung L von Bruchstelle	T
t_w	Zeitpunkt der vollständigen Stauraumentleerung	T
$t_a(L)$	Endzeitpunkt des Anstiegs des Hydrographen in Entfernung L von Bruchstelle	T
$t_{B,\alpha}$	Endzeitpunkt des Anstiegs des Hydrographen des Breschendurchflusses	T
T_{We}	Wellenperiode (sinusförmige Welle)	T
V_L	Durchflussvolumen am Talquerschnitt in Entfernung L von Bruchstelle	L^3
$v_{f,i}$	Fließgeschwindigkeit	LT^{-1}

v_f	(Mittlere) Fließgeschwindigkeit	LT^{-1}
V_w	Stauvolumen	L^3
w_i	Relative Wellengeschwindigkeit	LT^{-1}
w_u	Schwallwellengeschwindigkeit	LT^{-1}
x	Entfernung von der Bruchstelle einer Vorsperre	L

Geostatische Versagensmechanismen und Sickerströmungsberechnung (Kapitel 9)

(x_i, y_i)	Mittelpunktskoordinaten von Gleitkreisen	L
β_M	Beiwert nach MIKHAILOW	-
β_U	Beiwert nach UGINCHUS	-
Δh_w	Potentialverlust entlang einer Randstromlinie	L
Δu_i	Bodenkörperbezogener Porenwasserüberdruck infolge Konsolidierung	$ML^{-1}T^{-2}$
η	Sicherheitsbeiwert der erdstatischen Bemessung	-
κ_i	Faktoren zur Einbindung stark gekrümmter Stromlinien	-
λ	Leakage-Parameter	-
λ_i	Faktoren zur Einbindung stark gekrümmter Stromlinien	-
λ_{ER}	Widerstandsbeiwert in der Erosionsröhre	-
ρ_s	Korndichte	ML^{-3}
ρ_w	Fluiddichte	ML^{-3}
φ_i	Bodenkörperbezogener Reibungswinkel	$^\circ$
ϑ_D	Neigungswinkel der dichtenden Zone im Dammkörper zur Horizontalen	$^\circ$
ϑ_i	Bodenkörperbezogener Tangentialwinkel zur Waagerechten	$^\circ$
b_i	Breite einer Lamelle	L
C	Modellfaktor nach OLIVIER	-
c_i	Bodenkörperbezogene Kohäsion in Scherfuge	$ML^{-1}T^{-2}$
d_D	Mittlere Dicke der dichtenden Schicht im Dammkörper	L
d_L	Mächtigkeit eines durchströmten Bodenkörpers	L
D_m	Maßgebender Korndurchmesser	L
D_{50}	50 % Fraktilwert der Korngrößenverteilung	L
$d_{De,v}$	Vertikal gemessene Mächtigkeit der luftseitigen Dammdeckschicht	L

d_{ER}	Erosionsröhrendurchmesser	L
d_{Sch}	Mächtigkeit einer Dichtschürze	L
E_{ij}	Erddruckkräfte zwischen Bodenkörpern (Erdsäule mit $b = 1$ m)	MT^{-2}
$F_{G,i}$	Bodenkörperbezogene Gewichtskraft (Erdsäule mit $b = 1$ m)	MT^{-2}
f_{max}	Maximierte Zielfunktion	-
F_P	Von außen auf Bodenkörper wirkende Kräfte (Erdsäule mit $b = 1$ m)	MT^{-2}
$F_{U,i}$	Bodenkörperbezogene Porenwasserdruckkräfte (Erdsäule mit $b = 1$ m)	MT^{-2}
$F_{U,i}$	Reaktionskräfte in einer Scherfuge (Erdsäule mit $b = 1$ m)	MT^{-2}
G	Grenzzustand	-
g	Erdbeschleunigung	LT^{-2}
$h_{f,v}$	Vertikal gemessene Fließtiefe auf luftseitiger Dammböschung	L
$h_{w,A}$	Sickerlinienniveau am Eintritt in den Untergrund	L
$h_{w,B}$	Sickerlinienniveau oberwasserseitig eines Dichtschleiers	L
$h_{w,C}$	Sickerlinienniveau unterhalb eines Dichtschleiers	L
$h_{w,D}$	Sickerlinienniveau unmittelbar luftseitig einer dichtenden Zone	L
$h_{w,E}$	Sickerlinienniveau am Eintritt in Drainage	L
$h_{w,S,w}$	Wasserseitige Eintrittshöhe der Sickerlinie in dichtende Dammzone	L
$h_{w,x}$	Hydraulische Druckhöhe in einem Bodenkörper an Stationierung x	L
h_w	Druckniveau im Stauraum	L
i	Hydraulischer Gradient	-
k_f	Durchlässigkeit eines Bodens	LT^{-1}
$k_{f,De}$	Durchlässigkeit der luftseitigen Dammdeckschicht	LT^{-1}
$k_{f,D}$	Durchlässigkeit einer dichtenden Schicht im Dammkörper	LT^{-1}
$k_{f,L}$	Mittlere Durchlässigkeit Untergrund und eingestauter Dammkörper	LT^{-1}
$k_{f,S,l}$	Durchlässigkeitsbeiwert des luftseitigen Stützkörpers	LT^{-1}
$k_{f,S,w}$	Durchlässigkeitsbeiwert des wasserseitigen Stützkörpers	LT^{-1}
$k_{f,Sch}$	Durchlässigkeit einer Dichtschürze	LT^{-1}
l_D	Horizontale Projektion des eingestauten Bereichs der dichtenden Zone	L
$l_{B,b}$	Horizontale Entfernung zwischen Dammkrone und luftseitigem Fußpunkt	L

l_{chrom}	Chromosomenlänge im genetischen Algorithmus	-
$l_{Dr,l}$	Abstand des Dichtungsfußes (luftseitig) vom Sickerlinieneintritt in Drainage	L
$l_{Dr,UW}$	Länge der Sickerlinie in Drainage (homogener Damm)	L
l_{Dr}	Länge der Sickerlinie bis zum Eintrittspunkt in Drainage (homogener Damm)	L
l'_{Dr}	Ersatzlänge für homogene Dämme	L
l_{ER}	Erosionsröhrenlänge	L
l_{inf}	Infiltrationsweg	L
$l_{S,w}$	Abstand der Dichtzone von der wasserseitigen Dammböschung	L
l_{Scher}	Bruchzonenlänge entlang der Böschungslängsachse	L
l_{Sch}	Länge einer Dichtschürze	L
m	Wasserseitige Neigung der Dammböschung	-
m_D	Mittlere Neigung der dichtenden Zone im Dammkörper	-
m_L	Luftseitige Neigung der Dammböschung	-
M_h	Zusätzliche haltende Momente (Erdsäule mit $b = 1$ m)	MLT^{-2}
M_t	Zusätzliche treibende Momente (Erdsäule mit $b = 1$ m)	MLT^{-2}
n_{bit}	Zahl binärer Bits im genetischen Algorithmus	-
n_{gen}	Anzahl von Generationen im genetischen Algorithmus	-
n_{pop}	Populationsgröße im genetischen Algorithmus	-
n_{turn}	Zahl von Elternteilen in Turnirselektion	-
P	Versagenswahrscheinlichkeit	-
P_L	Lagerungsfaktor einer Steinschüttung	-
p_{mut}	Mutationswahrscheinlichkeit	-
q	Durchsickerung des Dammkörpers und Untergrunds	L^2T^{-1}
q_+	Infiltration in Dammkörper	L^2T^{-1}
q_D	Spezifischer Durchfluss durch die Dichtung	L^2T^{-1}
q_B	Spezifischer Durchfluss eines Bodens	L^2T^{-1}
Q_{ER}	Durchfluss durch eine Erosionsröhre	L^3T^{-1}
q_{inf}	Infiltration durch luftseitige Dammböschung	L^2T^{-1}
q_{krit}	Kritischer spezifischer Durchfluss durch Bodenkörper	L^2T^{-1}

q_L	Durchsickerung eines Dichtschleiers	L^2T^{-1}
q_L	Durchsickerung im leitenden Untergrund	L^2T^{-1}
r	Gleitkreisradius	L
s	Gesamtsetzungen	L
s_0	Sofortsetzungen	L
s_1	Primär- bzw. Konsolidationssetzungen	L
s_2	Sekundär- bzw. Kriechsetzungen	L
T_i	Bodenkörperbezogene Tangentialkraft	MLT^{-2}
t_{DS}	Einbindtiefe eines Dichtschleiers in leitenden Untergrund	L
T_{HSF}	Tangentialkraft in einer Hauptscherfuge (Erdsäule mit $b = 1$ m)	MT^{-2}
u_i	Bodenkörperbezogener Porenwasserdruck	$ML^{-1}T^{-2}$
u_i	Bodenkörperbezogener Porenwasserdruck in Lamelle i	$ML^{-1}T^{-2}$
v	Fließgeschwindigkeit im Untergrund	LT^{-1}
v_f	Filtergeschwindigkeit im Untergrund	LT^{-1}
v_{ER}	Strömungsgeschwindigkeit in einer Erosionsröhre	LT^{-1}
v_{GK}	Gleitkörpergeschwindigkeit	LT^{-1}
x	Horizontale Raumkoordinate	L

Innere Erosionsprozesse und Basis-Filter-Systeme (Kapitel 10 und 11)

α_i	Winkel zwischen Schwerkrafttrichtung und der Strömungsrichtung	$^\circ$
β_j	Logistische Regressionsparameter	-
χ_{HL}	Prüfgröße des Hypothesentests nach HOSMER-LEMESHOW	-
Δd_{ER}	Erosionsröhrenaufweitung	L
$\Delta h_{w,krit}$	Kritischer Potentialunterschied zwischen Wasser- und Luftseite	L
Δh_w	Potentialunterschied zwischen Wasser- und Luftseite eines Staubauwerks	L
δ_t	Wandreibungswinkel in Tiefe t	$^\circ$
ϵ_d	Prozentuale Aufweitung einer Erosionsröhre	-
$\epsilon_{g,i}$	Grenzwert der prozentualen Aufweitung einer Erosionsröhre für die Kategorie i	-
η	Schleppspannungskoeffizient nach WHITE	-
γ'	Wichte des Bodens unter Auftrieb	$ML^{-2}T^{-2}$

γ_s	Kornwichte	$ML^{-2}T^{-2}$
γ_y	Wichte des Bodens (feucht oder unter Auftrieb)	$ML^{-2}T^{-2}$
γ_w	Wichte des Wassers	$ML^{-2}T^{-2}$
$\gamma_{x,t}$	Wichte des Bodens in Tiefe t (feucht oder wassergesättigt)	$ML^{-2}T^{-2}$
κ	Permeabilität des durchströmten Bodens	L^2
κ_i	Regressionsparameter der klassischen Regression	-
ν	Kinematische Viskosität	L^2T^{-1}
ψ	Abstandsverhältnis für Filter- und Basiserdstoff	-
ρ_s	Korndichte	ML^{-3}
$\rho_{d,max}$	Maximalwert der Trockendichte (Proctordichte)	ML^{-3}
ρ_d	Trockendichte	ML^{-3}
$\rho_{s,Ad}$	(Scheinbare) Korndichte unter Einfluss von Adhäsionskräften	ML^{-3}
σ	Totale Spannungen	$ML^{-1}T^{-2}$
τ_{krit}	Kritische Schubspannung	$ML^{-1}T^{-2}$
Θ	Bettungswinkel nach VAN LOON	°
φ_t	Innerer Reibungswinkel des Bodens in Tiefe t	°
ϑ	Neigung einer Scherfuge	°
ξ	Reduktionsfaktor nach ZIEMS bzw. WITTMANN	-
a, b, c	Halbachsen eines Ellipsoids	L
A_f	Oberfläche eines Feinkornskeletts	L^2
A_g	Oberfläche eines Grobkornskeletts	L^2
b_{KS}	Breite eines Kernschnitts	L
c	Kohäsion	$ML^{-1}T^{-2}$
C_c	Krümmungszahl eines Bodens	-
c_H	Faktor nach HAZEN	-
c_{KK}	Parameter für die Beziehung nach KOZENY-CARMAN	-
c_{Lane}	Sickerlinienfaktor nach LANE	-
D	Allgemeiner Korndurchmesser	L
D_w	Wirksamer Korndurchmesser	L

$d_{ER,End}$	Endwert des Durchmessers einer Erosionsröhre	L
d_{ER}	Erosionsröhrendurchmesser	L
$D_{g/f,j}$	Korngröße der Kornfraktion j (Grobkorn- (g) bzw. Feinkornfraktion (f))	L
d_{Kern}	Durchmesser eines Dammkerns	L
$D_{s,max}$	Durchmesser des größten suffusionsgefährdeten Korns	L
D_{WP}	Korngröße im Wendepunkt der Sieblinie	L
d_{xB}	Basiskorndurchmesser (x Massen-% sind feiner)	L
D_{xF}	Filterkorndurchmesser (x Massen-% sind feiner)	L
D_x	Korndurchmesser eines beliebigen Bodens (x Massen-% sind feiner)	L
e	Porenzahl	-
$e_{Sgh,t}$	Siloerddruckspannung aus Eigenlast in Tiefe t (horizontal)	$ML^{-1}T^{-2}$
$e_{Sh,t}$	Siloerddruckspannung in Tiefe t (horizontal)	$ML^{-1}T^{-2}$
$e_{Srh,t}$	Siloerddruckspannung aus Reibung in Tiefe t (horizontal)	$ML^{-1}T^{-2}$
$f_i(\cdot)$	Trendfunktion	-
$F_{C,S}$	Kohäsionskraft in einer Scherfuge	MLT^{-2}
$F_{G,S}$	Gewichtskraft in einer Scherfuge	MLT^{-2}
$F_{G,t}$	Gewichtskraft in Tiefe t	MLT^{-2}
F_N	Kraft normal zu einer Scherfuge	MLT^{-2}
$F_{R,S}$	Reibungskraft in einer Scherfuge	MLT^{-2}
$F_{R,t}$	Reibungskraft in Tiefe t	MLT^{-2}
f_s	Durchgangsfaktor zur Beschreibung der Struktur von Porenkanälen	-
$F_{W,ER}$	Wasserdruckkraft in einer Erosionsröhre	MLT^{-2}
G	Grenzzustand	-
g	Erdbeschleunigung	LT^{-2}
h	Höhe über Dammaufstandsfläche	L
h_{Kern}	Höhenerstreckung eines Dammkerns	L
h_{Kr}	Höhenlage der Dammkrone (über Dammaufstandsfläche)	L
h_{Riss}	Höhe eines Risses im Kern über Dammaufstandsfläche	L
$h_{w,OW}$	Hydraulische Druckhöhe oberwasserseitig eines Staubauwerks	L

$h_{w,S,w}$	Sickerlinienhöhe über Dammaufstandsfläche im wasserseitigen Stützkörper	L
$h_{w,UW}$	Hydraulische Druckhöhe unterwasserseitig eines Staubauwerks	L
i	Hydraulischer Gradient	-
I_{Disp}	Dispersivitätskategorie	-
I_{HET}	Index des <i>Hole Erosion Test</i>	-
i_{krit}	Kritischer hydraulischer Gradient	-
I_P	Plastizitätszahl	-
I_{SET}	Index des <i>Slot Erosion Test</i>	-
k_f	Durchlässigkeit eines beliebigen Bodens	LT ⁻¹
$K_{0g,t}$	Erdruchdruckbeiwert in Tiefe t	-
$k_{f,F}$	Durchlässigkeit des Filtermaterials	LT ⁻¹
$K_{Sh,t}$	Siloerddruckbeiwert in Tiefe t	-
L_F	Eindringtiefe eines Partikels in einen Filterkörper	L
l_{ER}	Erosionsröhrenlänge	L
$l_{S,h}$	Horizontale Sickerweglänge	L
$l_{S,v}$	Vertikale Sickerweglänge	L
l_S	Länge einer Scherfuge	L
m_A	Mächtigkeit des Aquifers	L
m_D	Mächtigkeit der Deckschicht	L
M_i	Merkmal der Gruppe/Kategorie i	-
n	Porosität	-
n_B	Porosität des Basiserdstoffs	-
n_F	Porosität des Filtererdstoffs	-
$n_{g/f}$	Porosität der Grobkorn- (g) und Feinkornfraktion (f)	-
$P(\cdot)$	Bedingter Wahrscheinlichkeitswert	-
pp_{yB}	Siebdurchgang bei Basiskorngröße y	%
pp_{yF}	Siebdurchgang bei Filterkorngröße y	%
Q_{End}	Endwert des Durchflusses durch Erosionsröhren	L ³ T ⁻¹
Q_{Riss}	Durchfluss durch Erosionsröhren bzw. Risse	L ³ T ⁻¹

R	Determinationskoeffizient der Regression	-
R_N	Pseudowert nach NAGELKERKE für den Determinationskoeffizienten R	-
Re_k	Kornreynoldszahl	-
S_r	Sättigungszahl	-
T	Tortuosität	-
t	Tiefe unter Dammkrone	L
t_{krit}	Kritische Tiefe unter Dammkrone	L
u	Porenwasserdruck	$ML^{-1}T^{-2}$
U_B	Ungleichförmigkeitszahl eines Basiserdstoffs	-
U_F	Ungleichförmigkeitszahl eines Filtererdstoffs	-
v	Regressand	-
v_r	Reibungsgeschwindigkeit	LT^{-1}
v_s	Partikelsinkgeschwindigkeit	LT^{-1}
v_f	Filtergeschwindigkeit	LT^{-1}
w	Wassergehalt	-
w_i	Regressor	-
w_L	Fließgrenze	-
w_p	Ausrollgrenze	-
w_{opt}	Optimaler Wassergehalt nach Proctor	-
X_j	j -te Prädiktorvariable der logistischen Regression	-
x_j	Realisierung der j -ten Prädiktorvariablen der logistischen Regression	-
Z	Hilfsvariable der logistischen Regression	-
z	Realisierung der Hilfsvariablen der logistischen Regression	-

Überwachungsmaßnahmen an Stauanlagen (Kapitel 12)

Δt_A	Ausfallfreies Intervall	T
λ	Ausfallrate	T^{-1}
$f(\cdot)$	Verteilungsdichtefunktion	-
n	Anzahl an Ausfallereignissen	-
P	Wahrscheinlichkeit	-
t_n	Endzeitpunkt eines Betrachtungszeitraums für Ausfallereignisse	T

Probabilistisches Versagensmodell (Kapitel 13)

α_{ES}	Faktor zur Definition der kritischen Ausdehnung von Erosion/Suffosion	-
ρ_s	Korndichte	ML^{-3}
ρ_w	Dichte des Wassers	ML^{-3}
d	Rohrdurchmesser	L
D_x	Fraktilwert der Korngrößenverteilung mit Siebdurchgang x %	L
I	Neigung der Rohrachse	-
L_P	Periodenlänge generierter Zufallszahlenreihen	-
$l_{ES,krit}$	Kritische Längenausdehnung für die Erosion/Suffosion	L
l_{wl}	Abstand zweier Referenzpunkte zwischen Wasser- und Luftseite	L
n	Manningbeiwert	$TL^{-1/3}$
Q	Durchfluss	L^3T^{-1}
S_r	Sättigungszahl	-
w	Wassergehalt	-
y	Realisierte Zufallszahl	-
z_i	Realisierungen von Zufallszahlen	-

Unsicherheiten (Kapitel 14)

β	Zuverlässigkeitsindex (β -Wert)	-
δ	Variationskoeffizient	-
$\Gamma_p^2(\cdot)$	Varianzreduktionsfunktion	-
μ	Mittelwert	-
ω	Längenmaß	L
$\psi_{p,i}$	Fluktuationsskala in Raumrichtung i	L^i
ρ	Korrelation	-
σ	Standardabweichung	-
A^*	Teilfläche des Bodenkörpers (bspw. im Querschnitt)	L^2
g_d	Deterministischer Anteil einer geotechnischen Kenngröße	-
g_s	Stochastischer Anteil einer geotechnischen Kenngröße	-
k_v	Anzahl an Teilvolumina in einem Gesamtvolumen	-

l_{ij}	Entfernung zwischen zwei Dammquerschnitten	L
p	Punktwert eines geotechnischen Parameters	-
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit	-
p_V	Quasi-Punktwert eines geotechnischen Parameters (Bezug zu Volumen dV)	-
R	Widerstand (<i>Resistance</i>)	-
$r_{j,k}$	Abstand zweier Messpunkte, -flächen oder -volumina	L
S	Einwirkungen (<i>Stress</i>)	-
u	Laufvariable	-
V^*	Teilvolumen des Bodenkörpers	L ³
v_p	Mittlere Parameterwert eines geotechnischen Parameters in Volumen V^*	-
V_{ges}	Bodenvolumen (Gesamtvolumen)	L ³
x_m	Messgröße	-
y_m	Messgröße	-
Z_A	Absenzziel	L
Z_i	Zufallsvariable (gleichzeitig Zuverlässigkeitsfunktion)	-
Z_S	Stauziel	L

Verzeichnis der Abbildungen

1.1	Übergeordneter Aufbau der Arbeit	7
2.1	Wirkungskette eines Stauanlagenversagens	17
2.2	<i>RAPID</i> -Verfahren, angepasst zur Risikobetrachtung von Stauanlagen	18
2.3	Externer und interner Ursachenraum für mögliche Gefährdungen von Stauanlagen, hier einer Talsperre	19
2.4	Exemplarische Versagensmechanismen und resultierende Versagenswahrscheinlichkeit als Summe der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Mechanismen (Die offenen Punkte stellen positive Ausgänge, d. h. keine Versagensereignisse dar)	21
2.5	Differenzierung der hydraulischen Phänomene und Festlegung des Schadensgebiets für die Risikobetrachtung	23
2.6	Trennung zwischen Überschwemmungsschäden und Totalschäden als Resultat kombiniert hydrostatisch-hydrodynamischer Einwirkungen (Bildquellen: MÜNCHENER RÜCK, 2003; RUHRVERBAND, 1988)	26
2.7	Zusammenhang zwischen Fließtiefe h_f und Fließgeschwindigkeit v_f für die Definition des hydrodynamisch bedingten Schädigungsgrads für Ziegel- und Mauerwerksbauten (modifiziert nach MAIJALA et al., 2001)	28
2.8	Ökonomischer Gesamtwert der ökologischen Umwelt (nach WBGU, 1999)	32
2.9	Risikomatrix zur Bestimmung linguistisch bewerteter Risiken	34
2.10	<i>f-N-Diagramm</i> zur Bewertung der Risikoakzeptanz in Bezug auf den Verlust auf Menschenleben sowie <i>ALARP</i> -Prinzip (nach ANCOLD, 1998)	37
2.11	Handlungen der an einer Alarmierung der Bevölkerung beteiligten Personengruppen (nach MAIJALA et al., 2001)	39
2.12	Kosten-Nutzen (Risikominderung) Betrachtung	42
2.13	<i>Farmer-Kurven</i> für verschiedene Risiken (nach AYYUB, 2003)	44
3.1	Definition von Ereignissen im Rahmen von Prozessen bzw. Ereignisabläufen sowie eines Mechanismus	48
3.2	Schematische Darstellung der Elemente eines Einflussdiagramms als Werkzeug zur übergeordneten, groben Strukturierung eines Problems bzw. der groben Beschreibung eines Versagensmechanismus	50
3.3	Elemente eines Ereignisablaufdiagramms zur induktiven Beschreibung der zwischen einem Initialereignis und mehreren Endereignissen/Endzuständen definierten Mechanismen entsprechend DIN 25419 (1985): 1) einfache Verzweigung mit zwei disjunkten Ereignissen 2) abschließende (exklusive) <i>ODER</i> -Verknüpfung	51
3.4	Elemente eines Fehlerbaums zur deduktiven Beschreibung der Zusammenhänge der zwischen mehreren Initialereignissen und einem Endereignis definierten Mechanismen entsprechend DIN 25424-1 (1981) und DIN 25424-2 (1990): 1) <i>UND</i> -Verknüpfung 2) <i>ODER</i> -Verknüpfung	52

3.5	Verknüpfung von Fehlerbaum und Ereignisablaufdiagramm	53
3.6	Hierarchische Struktur möglicher Detailstufen einer Risikobetrachtung in Abhängigkeit von den verfügbaren Informationen (nach KREUZER, 2000)	56
3.7	Einflussdiagramm für die möglichen Ursachen eines Dammversagens . . .	61
3.8	Einflussdiagramm für die hydrologische Belastung einer Stauanlage und ein daraus potentiell resultierendes Versagen (in Anlehnung an STEDINGER et al., 1996)	63
3.9	Ereignisablaufdiagramm für multiple Versagensmechanismen infolge verschiedener Speicherzuflüsse. BHQ = Bemessungshochwasserzufluss. Die schwarzen Punkte stellen Versagensereignisse dar (nach SALMON & HARTFORD, 1995a)	64
3.10	Einflussdiagramm eines Versagens infolge seismisch induzierter Liquefaktion (nach LEE et al., 1998)	65
3.11	Schematischer Versagenspfad einer inneren Erosion durch einen Dammkörper (nach FOSTER & FELL, 1999b)	68
3.12	Fehlerbaum der Rissbildung und des hydraulischen Aufbruchs durch den Kern (nach FOSTER & FELL, 1999b)	69
3.13	Ereignisablaufdiagramm für eine Rissbildung in Dammlängsrichtung. V) Versagen, S) Schaden, B) Betrieb (IDEL, 1988)	70
3.14	Detailliertes Vorgehen zur Erstellung eines probabilistischen Versagensmodells	75
4.1	Verteilungsdichtefunktion und Verteilungsfunktion sowie statistische Kennwerte der Verteilung (μ_Z : Mittelwert; σ_Z : Standardabweichung; β_Z : Schiefe; γ_Z : Kurtosis)	81
4.2	Verteilung von Einwirkungen und Widerständen zur Herleitung der Versagenswahrscheinlichkeit in der Grenzzustandsgleichung (nach SCHNEIDER, 1994)	87
4.3	Schematische Darstellung der Stützstellendefinition in der <i>Rosenblueth's point estimate method</i> für den univariaten Fall (nach TUNG, 1999)	89
4.4	Verteilungsdichtefunktion der Zuverlässigkeit $Z = R - S$ und Versagenswahrscheinlichkeit $P(Z < 0)$ sowie der Zuverlässigkeitsindex β	92
4.5	Zuverlässigkeitsindex β im Standardnormalraum	93
4.6	Aufteilung der Verteilungsdichtefunktion in k Abschnitte mit identischem Wahrscheinlichkeitsinhalt $\frac{1}{k}$ im Rahmen der <i>Stratified Sampling</i> Methoden sowie Verteilung der Repräsentanten in den Abschnitten, differenziert nach <i>Latin-Hypercube Sampling</i> und <i>Descriptive Sampling</i>	99
4.7	Funktionsweise des <i>Latin-Hypercube Sampling</i> bei der Zusammenstellung der Eingangsvariablen von k Simulationen zur Generierung von Realisierungen der Zielgröße, gezeigt am Beispiel der $n = 3$ Eingangsvariablen X_1, X_2 und X_3	100
4.8	Verteilungsdichtefunktion der Versagenswahrscheinlichkeit $P(Z < 0)$ und deren Mittelwert μ_P für ein beispielhaftes Zuverlässigkeitsproblem „Überströmen einer Dammkrone“	103

5.1	Einflussdiagramm der extern bedingten, zu einem Dammüberströmen führenden Versagensmechanismen eines Damms. Hervorgehoben dargestellt ist der kombinierte hydrologisch-hydraulisch-erosive Versagensmechanismus unter Einbindung der Windwellenphänomene	107
5.2	Parametervariation am Modell von SINNIGER et al. (1985) zur Charakterisierung einer Hochwasserganglinie	111
5.3	Schematischer Modellierungsgang zur Bestimmung der Überströmwahrscheinlichkeit einer Dammkrone (nach POHL, 1997). * kennzeichnet eine Transformation einer Zufallsgröße	112
5.4	Definitionsskizze zum Wellenauflauf bei Staudämmen (nach DVWK 246, 1997)	114
5.5	Stauoberfläche und Streichlänge zur Ermittlung der Windwellenkennwerte (nach DVWK 246, 1997)	115
5.6	Deckschichtaufbruch zum Zeitpunkt t_A und fortschreitende Dammkörpererosion über die Dauern $\Delta t_{E,i}$ als Folge von überschlagenden Wellen	120
5.7	Umrechnung eines kritischen Überschlagsvolumens $V_{We,\ddot{U},krit}$ über die Dammkrone in einen kritischen Überstrom $q_{We,\ddot{U},krit}$ über die Krone und entlang der luftseitigen Dammböschung	122
5.8	Hydraulische Bestandteile zur Breschenmodellierung, ergänzt um die Aspekte der Speichersimulation im Hochwasserfall	131
5.9	Kraftansatz nach SHIELDS (1936) auf ein umströmtes Partikel auf geneigter Ebene	134
5.10	Anpassung einer Lognormalverteilung mit $\mu_{\Delta t_{Br}} = 2,2$ und $\sigma_{\Delta t_{Br}} = 2,6$ sowie einer Exponentialverteilung mit $\mu_{\Delta t_{Br}} = \sigma_{\Delta t_{Br}} = 2,2$ an die Verteilungsfunktion der Breschenbildungszeit bei Dämmen, basierend auf 41 Versagensereignissen von Dämmen unterschiedlichen Aufbaus (Daten von MACDONALD & LANGRIDGE-MONOPOLIS, 1984; SINGH & SCARLATOS, 1988; WALDER & O'CONNOR, 1997)	141
5.11	Numerisch zeitdiskrete Modellierung der Speicherfüllung unter Berücksichtigung von Hochwasserentlastung, Grundablass und Kronenüberstrom bei einer adaptiven Zeitschrittsteuerung. Die Punkte stellen Stützstellen der Berechnung dar	143
5.12	Einflussdiagramm des hydrologisch-hydraulischen Versagens eines Staudamms	144
6.1	Einflussdiagramm der seismischen Versagensmechanismen eines Damms. Hervorgehoben dargestellt sind die Teilversagensmechanismen, welche im Rahmen der Arbeit Berücksichtigung finden	148
6.2	Definitionsskizze für die Entfernungsgrößen zwischen Damm und Erdbebenebenepizentrum bzw. -Hypozentrum	150
6.3	Kornverteilungsbereiche für Böden mit Neigung zur Liquefaktion: 1) Während des Niigata-Bebens verflüssigte Sande 2) Umhüllende von 19 Sanden aus Japan 3) nach Laborversuchen (nach FINN, zitiert in BWG, 2003)	155

6.4	Abhängigkeit des volumenbezogenen Setzungsverhältnis wassergesättigter Sande von der Schlagzahl $(N_1)_{60}$ und dem $CSR_{7,5}$ (nach TOKIMATSU & SEED, 1987; USACE, 1990)	162
6.5	Definitionsskizze für eine nach NEWMARK (1965) am Gleitkörperschwerpunkt angreifende kritische Erdbebenbeschleunigung $a_{EB,krit}$	166
6.6	Zusammenhang zwischen Überschreitung der kritischen Erdbebenbeschleunigung, Geschwindigkeit des Gleitkörpers und resultierende Verformung (nach WILSON & KEEFER, 1983)	167
6.7	Kraftansatz an einer Lamelle i zur Berücksichtigung der Erdbebenerstlast $n'_g \cdot F_{G,i}$ nach NEWMARK (1965) im Gleitkreisverfahren nach BISHOP 169	
6.8	Beschleunigungspuls in einer Blockstruktur zur Ermittlung der Gleitkörperverschwindigkeit v_{GK} über die Zeit t	170
6.9	Einflussdiagramm des seismischen Versagens eines Staudamms	175
7.1	Einflussdiagramm der extern bedingten hydraulischen Versagensmechanismen eines Damms mit hervorgehobenem Teilmechanismus der Massenbewegung in einen Stauraum bis zum Überströmen	179
7.2	Hangbewegungen im Bereich von Stauraumhängen	180
7.3	Empirisch ermittelte Verschiebungsmaße eines Gleitblocks infolge Erdbebens für verschiedene kritische Erdbebenbeschleunigungen $a_{EB,krit}$, berechnet mittels der Gleitblockmethode nach NEWMARK (nach JIBSON, 1993)	182
7.4	Impulswellentypen: a) nichtlineare oszillierende Welle; b) nichtlineare Welle im Übergangsbereich; c) solitone bzw. soliton-ähnliche Welle; d) transiente Bore	183
7.5	Wesentliche Kenngrößen zur Beschreibung von Rutschungsmasse und Impulswellen ($h_w = h_{w,0}$ ist Ruhewassertiefe am Eintrittspunkt)	183
7.6	Zu bearbeitende Aspekte im Rahmen der Beschreibung der durch Rutschungen ausgelösten Impulswellenphänomene und der damit zusammenhängenden Effekte am Dammbauwerk	185
7.7	Definition des äquivalenten dynamischen Reibungsbeiwerts (Fahrböschung) sowie Regressionsbetrachtung zwischen f und Rutschungsvolumen V_r für 204 historische Hangrutschungen (COROMINAS, 1996)	188
7.8	Ansatz des äquivalenten dynamischen Reibungsbeiwerts f (Fahrböschung) in Abhängigkeit des Rutschungsvolumens	189
7.9	Definitionsskizze für die Wellentranslation in einem Stauraum	194
7.10	Impulswellenaufbau und -überschlagen am Dammbauwerk mit sukzessiver Erosion der Dammkrone entsprechend der zu den Wellen korrespondierenden Erosionsstufen 1 bis 3	196
7.11	Einflussdiagramm des Teilversagensmechanismus der Hangrutschungen in einem Stauraum	199

8.1	Einflussdiagramm der extern bedingten hydraulischen Versagensmechanismen eines Damms mit hervorgehobenem Teilmechanismus des oberstromigen Stauanlagenversagens und dem daraus resultierenden hohen Stauspiegel als Folge der hydraulischen Belastung	203
8.2	Zu bearbeitende Aspekte im Rahmen der Ableitung der hydraulischen Belastung einer Stauanlage durch Versagen einer oberstromigen Stauanlage	204
8.3	Dämpfung des dimensionslosen Breschendurchflussscheitels über die dimensionslose Entfernung von der Dammbuchstelle bei identischem Stauvolumen und unveränderter Talgeometrie (nach PONCE et al., 2003)	210
8.4	Dämpfung des Scheitels und Ganglinien einer Dammbuchwelle in verschiedenen Entfernungen L vom Dammbauwerk für einen Stauraum mit $V_w = 100 \text{ hm}^3$ und $h_{w,B} = 60 \text{ m}$ in einem Tal mit mittlerer Breite $b = 500 \text{ m}$, einer mittleren Sohlneigung $I_{UW} = 0,001$ und einer Rauheit $k_{st} = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$	213
8.5	Verlauf von Wasserspiegel und Charakteristiken für den Bruch einer zwei-seitig eingestauten Stauwand nach STOKER (nach BOLLRICH, 1989)	215
8.6	Einflussdiagramm des Versagens einer oberstromigen Stauanlage bzw. einer Vorsperre	218
9.1	Dammkernbewegungen in Talquerrichtung, 1) Bewegungen während der Bauphase 2) Bewegungen zwischen Beendigung der Bauphase und erstem Einstau (nach WILSON, 1973)	223
9.2	Versagensformen einer Hohlraumverfüllung durch ein ausgedehntes Scherversagen mit flächiger Setzung (links) und durch ein lokales Versagen mit Bildung eines Sackungstrichters (rechts) (nach VAUGHAN, 2000b)	224
9.3	Definitionsskizze für den Kraftansatz beim Blockgleit-Verfahren (nach DIN 4084, 2002)	230
9.4	Suche nach der minimalen Sicherheit η mittels Gradientenverfahren entlang von $n = 10$ an zufälligen Startpunkten beginnenden Suchpfaden	235
9.5	Ablaufschema des genetischen Algorithmus zum Auffinden des Gleitkreises mit der geringsten Sicherheit	238
9.6	Suche nach der minimalen Sicherheit η mittels genetischem Algorithmus: $n_{gen} = 14$ (Generationen), $n_{pop} = 10$ (Anzahl paralleler Populationen), $p_{mut} = 0,05$ (Mutationswahrscheinlichkeit)	239
9.7	Szenarien der Dammdurch- und Unterströmung: H) Homogener Damm Z) Zonierter Damm auf undurchlässigem Untergrund U_i) Dammkörper auf durchlässigem Untergrund bei Variation von Länge und Durchlässigkeit von oberwasserseitigen Dichtschürzen und der Existenz bzw. Einbindetiefe von Dichtschleiern im Untergrund	242
9.8	Infiltration in den luftseitigen Dammkörper bei Existenz einer Deckschicht (links) und für einen unbedeckten Stützkörper (rechts)	244

9.9	Kritischer spezifischer Durchfluss durch einen luftseitigen Stützkörper aus gebrochenem Granit in Abhängigkeit vom maßgebenden Korndurchmesser D_m und unterschiedlichen Dammböschungsneigungen m , ermittelt mit dem Modell von OLIVIER (1967)	247
10.1	Einflussdiagramm der inneren Erosion in einem Dammkörper oder dessen Untergrund. Grau hinterlegte Elemente werden im vorliegenden Kapitel behandelt	251
10.2	Potentielle Erosionsbereiche in einem Damm bzw. Dammuntergrund	253
10.3	Grundlegende Formen der hydraulisch bedingten Bodenveränderung nach ZIEMS (1969): 1) Kontakterosion 2) Suffosion 3) Röhren-/Risserosion	254
10.4	Einflussdiagramm für die Entstehung von inneren Erosionen	256
10.5	Definitionsskizze zum Siloerddruck und der Ausbildung der horizontalen Siloerddruckspannungen $e_{sh,t}$	260
10.6	Ursachen setzungsinduzierter Risse und hydraulischer Aufbrüche in Dammkernen (nach TRUSCOTT, 1977)	263
10.7	Gewölbewirkungen als Ursachen von geringen effektiven Spannungen bzw. Rissbildungen in Dammkernen. Links: Großmaßstäbliche Gewölbewirkung am Querschnitt des Sylvensteinspeichers, 1) schräg verlaufender Riss 2) Gewölbeabtragung und horizontaler Riss (BEIER et al., 1979). Rechts: Kleinmaßstäbliche Gewölbewirkung im Bereich einer topographischen Unstetigkeit im Dammuntergrund, 1) gewachsener Fels 2) Gewölbeabtragung 3) Zone niedriger Erddruckspannungen (nach SHERARD, 1986)	264
10.8	Einflussdiagramm der Initiierung einer inneren Erosion durch eine Fehlstelle in einer Querung	267
10.9	Einflussdiagramm der Initiierung einer Fugenerosion entlang von massiven Einbauten in einem Dammkörper	268
10.10	Systemskizze des hydraulischen Deckschichtaufbruchs (nach DIN 19712, 1997)	271
10.11	Schematische Darstellung der Möglichkeiten einer gefilterten gegenüber einer ungefilterten Erosion (erweitert nach FOSTER & FELL, 1999b)	272
10.12	Einflussdiagramm des Versagensmechanismus Kontakterosion und Suffosion	274
10.13	Schematische Darstellung der Fließvektoren und Schichtungsverhältnisse für Haupttypen der Kontakterosion zwischen feinem und grobem Erdstoff	280
10.14	Auswertung der in so genannten CEF-Tests gemessenen Erosionsverluste für Kernmaterialien unterschiedlicher Dämme, charakterisiert über das Korngrößenspektrum 0,075 mm bis 1,18 mm (nach Begrenzung auf $d_{100B} = 4,75$ mm), dargestellt in Abhängigkeit des 15%-Fraktilwerts D_{15F} eingesetzter Filter (nach FOSTER & FELL, 2001)	283

10.15	Vergleich des hydraulischen Erosionskriteriums für horizontale schichtenparallele Grundwasserströmung für lineares und nicht lineares Widerstandsgesetz nach WITTMANN (1980) in Abhängigkeit unterschiedlicher $k_{f,F}$ -Werte [%s]	285
10.16	Einflussdiagramm des Versagensmechanismus Rissbildung im Kern	289
10.17	Einflussdiagramm des Versagensmechanismus Piping im Dammkörper oder Dammuntergrund	293
10.18	Geometrische Annahmen zum Pipingmodell von WEIJERS & SELLMEIJER (1993)	296
10.19	Entkoppelte Betrachtung der Stabilität von Erosionsröhren und der Entwicklung von Setzungsbildern an der Dammoberfläche, dargestellt im schematischen Längsschnitt eines Damms	297
10.20	Definitionsskizze für das Kräftegleichgewicht an dem oberhalb einer Erosionsröhre befindlichen Erdkörper im Dammlängsschnitt	299
10.21	Definitionsskizze für das Kräftegleichgewicht innerhalb der Scherfuge am Rutschungskörper im Fall des Zusammenbruchs einer Erosionsröhre sowie schematische Darstellung der Absenkung an der Dammkrone	301
10.22	Einflussdiagramm der inneren Erosion	306
11.1	Systemskizze eines Basis-Filter-Systems zwischen oberwasserseitigem (OW) und unterwasserseitigem (UW) Stützkörper eines Damms sowie Prozess der Selbstfiltration durch Bildung von Partikelbrücken	311
11.2	Abhängigkeit zwischen Filterdurchlässigkeit $k_{f,F}$ und Fraktilwert D_{15F} für variierende Verdichtungsarbeit in durchgeführten <i>NEF-Tests</i> (nach DELGADO, 2000)	322
11.3	Gegenüberstellung von D_{15F} und d_{85B} für 479 Basis-Filter-Tests (davon 132 <i>Standard NEF-Tests</i> von DELGADO, 2000) sowie den Filterkriterien von SHERARD & DUNNIGAN (1989) und aus eigener Betrachtung	328
11.4	Gegenüberstellung von D_{15F} und d_{85B} für 660 Basis-Filter-Tests sowie neuem konservativem Filterkriterium	329
11.5	Gegenüberstellung von $k_{f,F}$ und $pp_{0,075B}$ für 472 Basis-Filter-Tests	331
11.6	Gegenüberstellung von $k_{f,F}$ und $pp_{0,075B}$ für 653 Basis-Filter-Tests	333
11.7	Kategorisierung der Ergebnisse von Laborversuchen zu Basis-Filter-Systemen (nach FOSTER & FELL, 2001)	335
11.8	Regressionsbetrachtung der Kombination D_{15F} mit d_{85B} für 132 <i>Standard NEF-Tests</i> in vier Kategorien der Aufweitung einer initialen Erosionsröhre	340
11.9	Regressionsbetrachtung der Kombination D_{15F} mit d_{85B} für 318 <i>NEF-Tests</i> in vier Kategorien	341
11.10	Erosionsausmaß im Vergleich zu den Grenzen der ausgeprägten und kontinuierlichen Erosion nach FOSTER & FELL (2001), D_{15F} gegen d_{85B} für <i>Standard NEF-Tests</i>	341
11.11	Regressionsbetrachtung der Kombination $k_{f,F}$ mit $pp_{0,075B}$ für 313 <i>NEF-Tests</i> in vier Kategorien	343

11.12	Regressionsbetrachtung der Kombination $k_{f,F}$ mit $pp_{0,075B}$ für 313 <i>NEF-Tests</i> in vier Kategorien, inklusive angepasster Regressionsfunktionen . . .	345
11.13	Erosionsausmaße im Vergleich zu den Grenzen der ausgeprägten und kontinuierlichen Erosion nach FOSTER & FELL (2001), aus D_{15F} errechnete $k_{f,F}$ gegen $pp_{0,075B}$	346
11.14	An FOSTER & FELL (1999a) orientierte Regressionsbetrachtung der Kombination $\frac{D_{15F}}{d_{85B}}$ mit $pp_{0,005B}$ für 199 <i>NEF-Tests</i> der Bodenklasse I in vier Kategorien	347
11.15	Logistische Regression zur Beschreibung von Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten von Datenpunkten im Werteraum (X_1, X_2) zu vorgegebenen Kategorien <i>A</i> und <i>B</i>	352
11.16	Verteilungsdichten der $k_{f,F}$ -Residuen (links) sowie $\ln(k_{f,F})$ -Residuen (rechts) für jeweils 568 Datenpunkte	355
11.17	Konsistenter und inkonsistenter Verlauf der $P_{A,i} = P_{B,i} = 0,5$ Linie in Bezug auf die Trendverläufe der Kategorien A_i und B_i	356
11.18	Durchführung einer logistischen Regression in einzelnen Abschnitten mit dem Ziel der Erfassung lokaler Eigenschaften von Kategorienübergängen	358
11.19	Logistische Regressionsfunktionen residualer $\ln(k_{f,F})$ in Abhängigkeit von $pp_{0,075B}$	362
11.20	Logistische Klassifizierung für hohe (links) und vergleichsweise geringe prädiktive Effizienz (rechts) der Klassifizierung. Beide Modelle weisen eine hohe prädiktive <i>probabilistische</i> Effizienz auf	364
11.21	Wahrscheinlichkeitsdichte und zugehörige logistische Regressionsfunktion für das Erosionsausmaß $\epsilon_g = 100\%$ in Abhängigkeit residualer $\ln(k_{f,F})$, 472 Datenpunkte	365
11.22	Wahrscheinlichkeitsdichte und zugehörige logistische Regressionsfunktion für das Erosionsausmaß $\epsilon_g = 250\%$ in Abhängigkeit residualer $\ln(k_{f,F})$, 598 Datenpunkte	368
11.23	Abbildung der probabilistischen Struktur an den Kategoriengrenzen $\epsilon_g = 25\%$ (oben), $\epsilon_g = 100\%$ (mitte) und $\epsilon_g = 250\%$ (unten) für 78 <i>NEF-</i> und <i>CEF-Tests</i> zu Validierungszwecken	369
11.24	Häufigkeitsverteilung und zugehörige logistische Regressionsfunktion für die Wahrscheinlichkeit einer kontinuierlichen Erosion in Abhängigkeit residualer $\ln(k_{f,F})$	371
11.25	Wahrscheinlichkeitslinien $P = 0,1$, $P = 0,5$ und $P = 0,9$ einer kontinuierlichen Erosion für Basis-Filter-Systeme mit $k_{f,F}$ und $pp_{0,075B}$	372
11.26	Linien gleicher Wahrscheinlichkeit für die Erosionsausmaße $\epsilon_d = 250\%$ und $\epsilon_d = 500\%$ und Einordnung eines Basis-Filter-Systems mit $k_{f,F} = 0,5 \text{ cm/s}$ und $pp_{0,075B} = 80\%$	383
11.27	Abhängigkeit des quasi-stationären Durchflusses vom Durchmesser der Fehlstelle nach Beendigung der <i>NEF-Tests</i> nach 20 <i>min</i> (Daten aus DELGADO, 2000)	385
11.28	Einflussdiagramm der Entstehung erhöhter Kerndurchströmungen als Folge einer Instabilität des Basis-Filter-Systems	386

12.1	Zentrale Organisationsform und Maßnahmenplanung in Bezug auf mögliche unerwünschte Ereignisse, ergänzt durch eine Überwachung an der Stauanlage	389
12.2	Fehlerbaum des Ausbleibens einer Maßnahme als Reaktion auf ein außergewöhnliches Ereignis. Schattiert sind die Maßnahmen an der Stauanlage dargestellt	392
12.3	Fehlerbaum einer kombinierten <i>personellen</i> und <i>automatisierten</i> Datenerhebung an einer Stauanlage	393
12.4	Fehlerbaum einer kombinierten <i>personellen</i> und <i>automatisierten</i> Detektion an einer Stauanlage (automatisierte Komponenten sind dunkel hinterlegt, <i>Mf</i> ist ein verknüpfendes Eingangs- bzw. Ausgangssignal	395
12.5	Fehlerbaum für eine Sofortmaßnahmen an der Stauanlage als Reaktion auf eine identifizierte Anomalie	396
12.6	Fehlerbaum einer Meldung sowie Übertragung von Informationen und erhobenen Daten an die Betreiberzentrale	396
12.7	Fehlerbaum der Identifikation einer Anomalie in der Betreiberzentrale	397
12.8	Fehlerbaum der Findung und Anweisung von Maßnahmen in der Zentrale und deren Kommunikation zur Stauanlage	398
13.1	Erzeugung von beliebig verteilten Zufallszahlen z aus $(0,1)$ -gleichverteilten Zufallszahlen z^* durch Invertierung der Verteilungsfunktion F_Z	414
13.2	Einbindung der Hauptmodule in den prinzipiellen Ablauf des Modells <i>PrEDaF</i>	416
13.3	Modulare Substruktur eines Hauptmoduls im probabilistischen Versagensmodell <i>PrEDaF</i>	418
13.4	Hauptmodul <i>Hydrologie</i>	421
13.5	Hauptmodul <i>Seismologie</i>	423
13.6	Hauptmodul <i>Hangrutschung</i>	424
13.7	Hauptmodul <i>Stauanlagenversagen oberstrom</i>	424
13.8	Diskretisierung des Dammquerschnitts in ein Gitter aus äquidistanten horizontalen und vertikalen Schnitten und Vorgehen bei der Betrachtung der Kontakterosion an einem ausgewählten vertikalen Schnitt	427
13.9	Automatisierte Analyse möglicher Pipingpfade, abhängig von möglichen hydraulischen Aufbruchstellen unterwasserseitig des Damms	427
13.10	Konvergenz der in <i>Monte-Carlo</i> -Simulationen aufgezeichneten Mittelwerte an die wahren Mittelwerte $Q_{Mellin} = 40,99$ (erstes Validierungsbeispiel) und $y_{Mellin} = 31.727$ (zweites Validierungsbeispiel) für die ersten 20.000 Berechnungsschritte	430
14.1	Unterschiedliche Typen von Modellunsicherheiten (KORTENHAUS, 2003)	438
14.2	Beispielhafte jährliche Verteilung und Verteilungsdichte des initialen Speicherwasserstands h_0 für einen Betriebsraum mit $Z_A = 120$ m und $Z_S = 140$ m	443

14.3	Unsicherheiten in der Schätzung von Bodeneigenschaften (nach PHOON & KULHAWY, 1999a)	445
14.4	Variabilität von geotechnischen Kenngrößen in einem vertikalen Bodenprofil und Aufteilung in stochastischen und deterministischen Anteil (links) sowie Aufteilung des Bodenkörpers in einzelne Zonen (Schichten) ähnlicher Genese (rechts)	447
14.5	Korrelation und Varianzreduktion für ein eindimensionales <i>Gauss'sches</i> und ein <i>Exponentielles</i> Korrelationsmodell in x -Richtung unter Annahme einer Fluktuationslänge $\psi_{p,x} = 10$ m	457
14.6	Darstellung zweier Querschnitte A und B durch einen Dammkörper mit unterschiedlicher Geometrie und Zusammensetzung	460
15.1	Repräsentativer Querschnitt des im Rahmen des Fallbeispiels betrachteten Dammbauwerks (<i>Basisvariante</i>)	466
15.2	Repräsentativer Querschnitt des im Rahmen des Fallbeispiels für die Variante <i>Plus 1</i> betrachteten Dammbauwerks	475
15.3	Repräsentativer Querschnitt des im Rahmen des Fallbeispiels für die Variante <i>Plus 5</i> betrachteten Dammbauwerks	478
15.4	Repräsentativer Querschnitt des im Rahmen des Fallbeispiels für die Variante <i>Dichtschiefer</i> betrachteten Dammbauwerks	482
15.5	Wirkung einer Varianzreduktion auf die Versagenswahrscheinlichkeit am Beispiel der Verteilungsdichtefunktion der Zuverlässigkeit: Verringerung (Fall A mit $P_f < 0,5$, links) und Vergrößerung (Fall B mit $P_f > 0,5$, rechts)	490
B.1	Definitionsskizze zur Sickerströmungsberechnung für einen homogenen Damm auf undurchlässigem Untergrund	572
B.2	Definitionsskizze zur Sickerströmungsberechnung für einen zonierten Damm auf undurchlässigem Untergrund	573
B.3	Definitionsskizze zur Sickerströmungsberechnung für einen zonierten Damm auf durchlässigem Untergrund	576
B.4	Faktoren zur Betrachtung des Durchflusses unter einem unvollständigen Dichtschiefer (nach UGINCHUS, 1966)	582
C.1	Versuchsaufbau des <i>NEF-Tests</i> (SHERARD & DUNNIGAN, 1985)	587
D.1	Verteilungsfunktion und Verteilungsdichtefunktion ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) einer Gleichverteilung mit $\mu_Z = 10$ und $\sigma_Z = 5$	593
D.2	Verteilungsfunktion und Verteilungsdichtefunktion ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) einer Dreiecksverteilung mit $\mu_Z = 10$ und $\sigma_Z = 5$	595
D.3	Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) der Normalverteilung (<i>Gaußverteilung</i>) und Lognormalverteilung mit $\mu_Z = 10$, $\sigma_Z = 5$ und Verschiebungsparameter $z_0 = 0$ (Lognormalverteilung)	596

D.4	Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) der Lognormalverteilung mit 1) $\mu_Z = 10, \sigma_Z = 5$ und Verschiebungsparameter $z_0 = 0$, 2) $\mu_Z = 17,5, \sigma_Z = 5, z_0 = 7,5$ und 3) $\mu_Z = 17,5, \sigma_Z = 5, z_0 = 0$	598
D.5	Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) der Exponentialverteilung mit $\mu = 10$ und $\sigma = 10$ bzw. $\mu = 5$ und $\sigma = 5$	600
D.6	Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) der Exponentialverteilung mit 1) $\mu_Z = 10, \sigma_Z = 10$ und Verschiebungsparameter $z_0 = 0$, 2) $\mu_Z = 17,5, \sigma_Z = 10, z_0 = 7,5$ und 3) $\mu_Z = 17,5, \sigma_Z = 17,5, z_0 = 0$	600
D.7	Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) der Rayleighverteilung mit $\mu_Z = 10, \sigma_Z = 5,23$ und Verschiebungsparameter $z_0 = 0$	602
D.8	Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) der Rayleighverteilung mit 1) $\mu_Z = 10, \sigma_Z = 5,23$ und Verschiebungsparameter $z_0 = 0$, 2) $\mu_Z = 17,5, \sigma_Z = 5,23, z_0 = 7,5$ und 3) $\mu_Z = 17,5, \sigma_Z = 9,15, z_0 = 0$	602
D.9	Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) der Gumbelverteilung mit $\mu = 10$ und $\sigma = 22,22$ bzw. $\mu = 2,25$ und $\sigma = 5$ sowie Verschiebungsparameter $z_0 = 0$	604
D.10	Verteilungsfunktionen und Verteilungsdichtefunktionen ($f(z) \equiv f_Z(z)$, $F(z) \equiv F_Z(z)$) der Gumbelverteilung mit 1) $\mu_Z = 10, \sigma_Z = 22,22$ und Verschiebungsparameter $z_0 = 0$, 2) $\mu_Z = 17,5, \sigma_Z = 22,22, z_0 = 7,5$ und 3) $\mu_Z = 17,5, \sigma_Z = 38,88, z_0 = 0$	604
E.1	Kurzzeichen in Fehlerbäumen entsprechend DIN 25424-1 (1981)	606
E.2	Grundstruktur des Hauptmoduls <i>Hydrologie</i> in ausführlicher Fehlerbaumdarstellung und Einbindung der separat dargestellten Versagens- und Teilmodule $V1, V2, V4, T1, T2, T3$ und $T4$ im Hinblick auf das Gesamtversagen der Stauanlage durch Breschenbildung	608
E.3	Fehlerbaum für den kritischen Anstieg des Stauspiegels als Speicherreaktion auf einen hohen bzw. extremen Zufluss (Teilmodul $T1$)	610
E.4	Fehlerbaum für die Infiltration von überströmendem Wasser in die luftseitige Deckschicht und die resultierende hohe Sickerlinie (Teilmodul $T2$)	612
E.5	Fehlerbaum für die Erosion des Dammkörpers (Versagensmodul $V1$)	613
E.6	Fehlerbaum für die Ausspülung am luftseitigen Dammfuß (Versagensmodul $V2$)	614
E.7	Fehlerbaum der inneren Erosion unter Einfluss der Sickerwasserströmung (Teilmodul $T3$)	615

E.8 Fehlerbaum des geotechnischen Versagens / Geostatik (Teilmodul T_4) . . .	617
E.9 Fehlerbaum für die Rissbildung in einem dichtenden Element eines Staudamms (Teilmodul T_5)	619
E.10 Grundstruktur des Hauptmoduls <i>Seismologie</i> in ausführlicher Fehlerbaumdarstellung und Einbindung der separaten Versagens- und Teilmodule $V_1, V_2, V_4, T_2, T_3, T_4$ und T_6 im Hinblick auf das Gesamtversagen der Stauanlage durch Breschenbildung	620
E.11 Fehlerbaum des Erdbebenereignisses und direkte Auswirkungen am Standort der Stauanlage (Teilmodul T_6)	621
E.12 Fehlerbaum der Liquefaktion (Teilmodul T_7)	622
E.13 Fehlerbaum des erdbebeninduzierten Böschungsbruchs (Teilmodul T_8) . . .	623
E.14 Grundstruktur des Hauptmoduls <i>Hangrutschung</i> in ausführlicher Fehlerbaumdarstellung und Einbindung der separaten Versagens- und Teilmodule V_1, V_2, V_4, T_2, T_4 und T_9 im Hinblick auf das Gesamtversagen der Stauanlage durch Breschenbildung	625
E.15 Fehlerbaum der Entstehung von Impulswellenphänomenen am Absperrbauwerk (Teilmodul T_9)	626
E.16 Grundstruktur des Hauptmoduls <i>Stauanlagenversagen oberstrom</i> in ausführlicher Fehlerbaumdarstellung und Einbindung der separaten Versagens- und Teilmodule $V_1, V_2, V_4, T_2, T_3, T_4, T_{10}$ und T_{11} im Hinblick auf das Gesamtversagen der Stauanlage durch Breschenbildung .	628
E.17 Fehlerbaum des Versagens einer Stauanlage oberstrom (Teilmodul T_{10}) .	629
E.18 Fehlerbaum des Vorsperrenversagens (Teilmodul T_{11})	630

Verzeichnis der Tabellen

2.1	Kriterien zur Beurteilung der Gefährdung von Menschen in fließendem Wasser (nach BWK, 2005)	27
2.2	Kriterien zur Beurteilung der Gefährdung von Gebäuden aus Ziegel- und Mauerwerk in fließendem Wasser (nach BWK, 2005)	27
2.3	Empfohlene Werte zur Abschätzung der Verluste an Menschenleben, bezogen auf die Risikobevölkerung, in Abhängigkeit von der Vorwarnzeit und der Einstellung der Bevölkerung gegenüber dem Ereignis (nach GRAHAM, 1999)	29
2.4	Matrix ausgewählter Minderungsmaßnahmen zur Verringerung von Stauanlagenrisiken	39
2.5	Mögliche Strukturierung eines Notfallplans, aufgeteilt nach internen Maßnahmen des Betreibers bzw. anderer Verantwortlicher und externen Maßnahmen zur Alarmierung	41
3.1	Gesamtversagensstatistik für große Talsperren nach Fertigstellung und im Betrieb befindlich (Dammbauwerke), bis zum Jahr 1986 (Daten von FOSTER et al., 1998, bezogen auf die Summe $\Sigma = 127$)	57
4.1	Qualitative Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit einer Stauanlage in Bezug auf die Bauwerksstatik, basierend auf der Füllungshistorie. Höhere Punktzahlen bedeuten höhere Wahrscheinlichkeit (nach USBR, 2001)	82
4.2	Überführung linguistischer Wertekategorien in numerische Wahrscheinlichkeiten (HARTFORD & BAECHEER, 2004)	84
4.3	Gegenüberstellung verschiedener quantitativer Methoden zur Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten	95
5.1	Einflussfaktoren f_R zur Berücksichtigung von Rauheiten auf der wasserseitigen Böschung eines Damms (MEER, 2002)	118
5.2	Kombinierter Faktor zur Berücksichtigung von Böschungsdurchlässigkeit und Böschungsrauhheit $k_D \cdot k_R$ (LEHMKÜHLER, 1997; DVWK 246, 1997)	118
5.3	Zusammenstellung bestehender Ansätze für die Ausfallwahrscheinlichkeit von technischen Anlagen	126
5.4	Ausfallraten von Teilsystemen eines Wehrfelds mit Zugsegment bei angenommener jährlicher Betriebsstundenzahl von 12 h und 720 Stellvorgängen (KALENDA, 1990)	128
5.5	Nach U.S. Soil Conservation Service zulässige Fließgeschwindigkeiten $v_{f,Gras,krit}$ in mit dauerhaftem Gras bewachsenen Gerinnen in m/s (nach CHOW, 1959)	136

6.1	Koeffizienten α_N und β_N zur Umrechnung der Schlagzahl $(N_1)_{60}$ in die <i>clean-sand</i> Schlagzahl $(N_1)_{60cs}$ in Abhängigkeit vom Feinkornanteil $pp_{0,075}$ (YOUDE et al., 2001)	159
6.2	Skalierungsfaktor r_m in Abhängigkeit von der Erdbebenmagnitude M_W (nach TOKIMATSU & SEED, 1987)	161
10.1	Subjektiv-quantitative Bewertungsmöglichkeit der bedingten Wahrscheinlichkeit einer Rissbildung in einer dichtenden Dammzone in Abhängigkeit vom Böschungbewuchs bzw. der Wühltierbeobachtung	256
10.2	Vereinfachte Verteilung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Rissen in Dichtungselementen über die Dammhöhe	257
10.3	Qualitativ bewertete Einflüsse auf die Wahrscheinlichkeit einer konzentrierten Dammdurchströmung für Querungen (nach FOSTER & FELL, 1999b)	268
10.4	Zur Bewertung der Suffosionsneigung verwendete Ansätze (geometrische Kriterien gelten für alle Strömungsvektoren)	279
10.5	Vorgeschlagene Kriterien zur Charakterisierung der Grenze der ausgeprägten Erosion bei Basiserdstoffen mit $d_{100B} \leq 4,75$ mm (FOSTER & FELL, 2001)	282
10.6	Zur Bewertung der Kontakterosionsneigung verwendete Ansätze	287
10.7	Klassifikationsschlüssel des Index I_{SET} im Hinblick auf qualitative Erosionsgeschwindigkeiten von Böden bei konzentrierter Durchströmung (WAN & FELL, 2002)	292
10.8	Gewichteter Sickerlinienfaktor c_{Lame} für verschiedene Bodenarten eines durchlässigen Untergrunds (DAVIDENKOFF, 1970)	294
10.9	Üblicher Zeitbedarf für Entstehung und Fortentwicklung von inneren Erosionsprozessen (nach FELL et al., 2001, 2003)	304
11.1	Auswahl empirischer geometrischer Filterkriterien	313
11.2	Datengrundlage an Basis-Filter-Tests für die Bodenklassen 1 und 2 (in Anlehnung an FOSTER & FELL, 1999a)	326
11.3	Empirische Beziehungen zur Berechnung der Filterdurchlässigkeit $k_{f,F}$ aus Verdichtungsdauer in <i>NEF-Test</i> und Korngröße D_x	330
11.4	Kategorien zur Bewertung der Erosion in 340 von DELGADO (2000) durchgeführten <i>NEF-Tests</i>	339
11.5	Determinationskoeffizienten der Regressionsanalyse für nach Erosionsausmaße kategorisierte Basis-Filter-Systeme	344
11.6	Trendfunktionen f_i zur Beschreibung der Kategoriengrenzen zwischen (A, i) und (B, i) , gleichbedeutend mit der Zuordnungswahrscheinlichkeit $P_{A,i} = P_{B,i} = 0,5$	360
11.7	Angepasster Parameter $\beta_{1,i,j}$ der logistischen Regressionsanalyse für Basiserdstoffe unterschiedlicher Feinkornanteile $pp_{0,075B}$	361
11.8	Erreichte prädiktive Effizienzen [%] bei der logistischen Regression für Basiserdstoffe unterschiedlicher Feinkornanteile $pp_{0,075B}$	364

11.9	Prüfgröße χ_{HL}^2 nach HOSMER-LEMESHOW zur Bewertung der Güte der probabilistischen Modellierung der Kategorizuweisung	367
11.10	Prüfgröße χ_{HL}^2 nach HOSMER-LEMESHOW zur Bewertung des aus 78 NEF- bzw. CEF-Tests bestehenden Validierungsdatensatzes	368
11.11	Logistische Regressionsparameter $\beta_{j,i}$ für die analysierten Kategorien- grenzen	375
11.12	Beispielhafte probabilistische Betrachtung eines Basis-Filter-Systems mit $k_{f,F} = 0,1$ cm/s und $pp_{0,075B} = 80\%$ zur Bestimmung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit $P(\epsilon_d < \epsilon_g \ln(k_{f,F}), pp_{0,075B})$ diskreter Erosionsausmaße ϵ_g	384
12.1	Wahrscheinlichkeit des Übersehens einer Anomalie für n -tägliche Kontrollen durch eine Person und in Abhängigkeit vom i -ten Kontrollgang nach Auftreten der Anomalie (nach SWAIN & GUTTMANN, 1983)	401
12.2	Fehlerwahrscheinlichkeiten bei Ablesung von Anzeigen und Ausdrucken sowie beim Aufschrieb (nach SWAIN & GUTTMANN, 1983)	402
12.3	Fehlerwahrscheinlichkeiten bei Ablesung von Normbereichsanzeigen (nach SWAIN & GUTTMANN, 1983)	402
12.4	Klassifizierung allgemeiner Aufgaben / Aktionen und Schätzung der damit zusammenhängenden Unzuverlässigkeiten (nach WILLIAMS, 1986) (zitiert in CHAO & ISHII, 2004)	403
12.5	Multiplikatoren zur Anpassung von Fehlerwahrscheinlichkeiten an spezielle Rahmenbedingungen von Handlungen (nach WILLIAMS, 1986) (zitiert in CHAO & ISHII, 2004)	404
12.6	Wahrscheinlichkeit eines Fehlers bei paralleler Erteilung von mehreren detaillierten mündlichen Anweisungen (nach SWAIN & GUTTMANN, 1983)	405
13.1	Teil- und Untermodule des Modells <i>PrEDaF</i>	419
13.2	Versagensmodule des Modells <i>PrEDaF</i>	420
13.3	Gegenüberstellung von Berechnungen mit <i>Mellin-Transformation</i> und <i>Monte-Carlo-Simulation</i> für ein einfaches Beispiel einer Rohrleitung (TUNG, 1999)	430
13.4	<i>Mellin-Transformation</i> und <i>Monte-Carlo-Simulation</i> für eine nichtlineare Gleichung unter Verwendung von drei statistischen Verteilungstypen	431
14.1	Ansatz multiplikativer Modellunsicherheiten für ausgewählte Parameter im Gesamtmodell <i>PrEDaF</i>	440
14.2	Ausgewählte stochastische Parameter zur Modellierung der externen Gefährdungen	442
14.3	Statistische Kennwerte für Parameter zur Betrachtung der Liquefaktionsneigung von Böden (nach GUTIERREZ et al., 2002)	444
14.4	In der Literatur referenzierte Verteilungstypen, Mittelwerte μ und Variationskoeffizienten δ geotechnischer Parameter	449

14.5	Statistische Kennwerte von Parametern des Modells von WEIJERS & SELMEIJER (1993) (TAW, 1999; OUMERACI & KORTENHAUS, 2002; VROUWENVELDER & STEENBERGEN, 2003)	451
14.6	Veränderung der Standardabweichung σ_v von im Intervall $(-1, 1)$ gleichverteilten und über unterschiedliche Klassengrößen n_v gemittelten Zufallszahlen. k_v ist die Zahl der Messwerte („Größe des Mittelungsvolumens“), welche zur Bestimmung von σ_v verfügbar sind	454
14.7	Vertikale und horizontale Fluktuationenlängen verschiedener geotechnischer Parameter (nach PHOON & KULHAWY, 1999a)	458
15.1	Charakterisierung der verwendeten Bodentypen anhand der Mittelwerte für Kohäsion c , Reibungswinkel φ , Porosität n , Wassergehalt w und Schlagzahl N_{SPT}	467
15.2	Kenngrößen des beispielhaft betrachteten instabilen Hangbereichs	469
15.3	Kenngrößen der beispielhaft betrachteten oberstromigen Stauanlage und des von einer Bruchwelle durchströmten Tals zwischen den Stauanlagen	470
15.4	Variationskoeffizienten und Standardabweichungen der Wahrscheinlichkeit P für $m = 100$ Mio. <i>Monte-Carlo</i> -Simulationen (nach Gleichung 4.16)	471
15.5	Versagenswahrscheinlichkeiten der <i>Basisvariante</i> für die vier externen Gefährdungen und insgesamt	472
15.6	Aufschlüsselung der hydrologisch bedingten Versagensereignisse in einzelne Endereignisse für die <i>Basisvariante</i>	473
15.7	Versagenswahrscheinlichkeiten der Variante <i>Plus 1</i> im Vergleich zur <i>Basisvariante</i> für die vier externen Gefährdungen und insgesamt	476
15.8	Aufschlüsselung der hydrologisch bedingten Versagensereignisse in einzelne Endereignisse für die Variante <i>Plus 1</i>	476
15.9	Versagenswahrscheinlichkeiten der Variante <i>Plus 5</i> im Vergleich zur <i>Basisvariante</i> und zur Variante <i>Plus 1</i> für die vier externen Gefährdungen und insgesamt	478
15.10	Aufschlüsselung der hydrologisch bedingten Versagensereignisse in einzelne Endereignisse für die Variante <i>Plus 5</i>	479
15.11	Versagenswahrscheinlichkeiten der Variante <i>Dichtschleier</i> im Vergleich zur <i>Basisvariante</i> für die vier externen Gefährdungen und insgesamt	483
15.12	Aufschlüsselung der hydrologisch bedingten Versagensereignisse in einzelne Endereignisse für die Variante <i>Dichtschleier</i>	483
15.13	Angesetzte Wahrscheinlichkeiten zur Abbildung der Überwachungsmaßnahmen	485
15.14	Versagenswahrscheinlichkeiten der Variante <i>Überwachung</i> im Vergleich zur <i>Basisvariante</i> für die vier externen Gefährdungen und insgesamt	487
15.15	Aufschlüsselung der hydrologisch bedingten Versagensereignisse in einzelne Endereignisse für die Variante <i>Überwachung</i>	488
15.16	Zusammenführung der Versagenswahrscheinlichkeiten für die vier externen Gefährdungen für die <i>Basisvariante</i> und die vier Minderungsmaßnahmen (in $\frac{1}{4}$)	488

15.17	Gesamtversagenswahrscheinlichkeiten für die <i>Basisvariante</i> und die vier Minderungsmaßnahmen	489
15.18	Versagenswahrscheinlichkeiten der Variante <i>Zonierung</i> im Vergleich zur <i>Basisvariante</i> für die vier externen Gefährdungen und insgesamt	491
15.19	Aufschlüsselung der hydrologisch bedingten Versagensereignisse in einzelne Endereignisse für die Variante <i>Zonierung</i>	492
A.1	Ansätze für die mittleren jährlichen Versagenswahrscheinlichkeiten P_{DK} , P_{UG} und P_{DU} der inneren Erosion (FOSTER et al., 1998, für Talsperren mit einer Betriebsdauer > 5 a)	566
A.2	Wichtungsfaktoren f_{DKj} für die Modifikation der ereignisstatistisch ermittelten Wahrscheinlichkeiten für eine innere Erosion durch einen Dammkörper (modifizierte Auswahl nach FOSTER et al., 1998)	567
A.3	Wichtungsfaktoren f_{UGj} für die Modifikation der ereignisstatistisch ermittelten Wahrscheinlichkeiten für eine innere Erosion durch einen Dammuntergrund (modifizierte Auswahl nach FOSTER et al., 1998)	568
A.4	Wichtungsfaktoren f_{DUj} für die Modifikation der ereignisstatistisch ermittelten Wahrscheinlichkeiten für eine innere Erosion von einem Dammkörper in den Dammuntergrund (modifizierte Auswahl nach FOSTER et al., 1998)	569
C.1	Versuchsrandbedingungen für das Basismaterial beim <i>Standard NEF-Test</i> nach SHERARD & DUNNIGAN (1985)	588
C.2	Versuchsrandbedingungen für das Filtermaterial beim <i>Standard NEF-Test</i> nach SHERARD & DUNNIGAN (1985)	589
E.1	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Hauptmodul <i>Hydrologie</i>	609
E.2	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T1</i>	611
E.3	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T2</i>	612
E.4	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Versagensmodul <i>V1613</i>	616
E.5	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Versagensmodul <i>V2614</i>	616
E.6	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T3</i>	618
E.7	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T4</i>	619
E.8	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T5</i>	622
E.9	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T6</i>	623
E.10	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T7</i>	624
E.11	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T8</i>	627
E.12	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T9</i>	630
E.13	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T10</i>	631
E.14	Im Modell <i>PrEDaF</i> verwendete Modellansätze für das Teilmodul <i>T11</i>	631

