

Christian Schulz

Nachweis der Erdbebensicherheit bei hohen Talsperren (Erddämme) mit numerischen Methoden

Masterarbeit

BEI GRIN MACHT SICH IHR WISSEN BEZAHLT



- Wir veröffentlichen Ihre Hausarbeit, Bachelor- und Masterarbeit
- Ihr eigenes eBook und Buch - weltweit in allen wichtigen Shops
- Verdienen Sie an jedem Verkauf

Jetzt bei www.GRIN.com hochladen
und kostenlos publizieren



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Impressum:

Copyright © 2013 GRIN Verlag
ISBN: 9783656429982

Dieses Buch bei GRIN:

<https://www.grin.com/document/214559>

Christian Schulz

**Nachweis der Erdbebensicherheit bei hohen Talsperren
(Erddämme) mit numerischen Methoden**

GRIN - Your knowledge has value

Der GRIN Verlag publiziert seit 1998 wissenschaftliche Arbeiten von Studenten, Hochschullehrern und anderen Akademikern als eBook und gedrucktes Buch. Die Verlagswebsite www.grin.com ist die ideale Plattform zur Veröffentlichung von Hausarbeiten, Abschlussarbeiten, wissenschaftlichen Aufsätzen, Dissertationen und Fachbüchern.

Besuchen Sie uns im Internet:

<http://www.grin.com/>

<http://www.facebook.com/grincom>

http://www.twitter.com/grin_com



Master-Thesis

Nachweis der Erdbbensicherheit bei hohen
Talsperren (Erddämme) mit numerischen Methoden

von
Christian Schulz

19.02.2013

Kurzfassung

Der Nachweis der Erdbebensicherheit ist in Deutschland für Talsperren ebenso wie für konventionelle Bauwerke erforderlich, sofern sich diese innerhalb einer Erdbebengefährdungszone befinden. Bei sogenannten hohen Erddämmen, die eine Dammhöhe $h \geq 40 \text{ m}$ aufweisen, ist der Nachweis der Erdbebensicherheit im Allgemeinen auf der Grundlage von dynamischen Berechnungsverfahren durchzuführen.

Diese Arbeit untersucht numerische Methoden, auf deren Grundlage das dynamische Verhalten von hohen Talsperren (Erddämmen), beim Nachweis der Erdbebensicherheit, simuliert werden kann. Im Zuge dessen werden zunächst die Anforderungen an den Nachweis der Erdbebensicherheit sowie die möglichen dynamischen Berechnungsverfahren beschrieben. Ebenso werden die bei der Modellbildung anzusetzenden Randbedingungen erläutert.

Diese Arbeit basiert auf Parameterstudien, die unter Anwendung des Zeitschrittverfahrens durchgeführt werden. Anhand dieser wird untersucht, wie das dynamische Verhalten eines Erddammes bei einer Erdbebensimulation, mit den derzeitigen Möglichkeiten numerischer Berechnungsmethoden sowie durch die Beschreibung des Materialverhaltens, möglichst wirklichkeitsnah abgebildet werden kann. Auf der Grundlage der durch die Parameterstudien gewonnenen Erkenntnisse wird ein Vorschlag entwickelt, wie beim Nachweis der Erdbebensicherheit an hohen Erddämmen vorgegangen werden kann. Bei dieser Vorgehensweise werden sowohl numerische als auch bodenmechanische Berechnungsmethoden eingesetzt. Die beschriebene Vorgehensweise beim Nachweis der Erdbebensicherheit wird anhand eines Beispiels verdeutlicht.

Abstract

Earthquake analyses are required in Germany for all constructions within earthquake vulnerable areas, both for conventional structures and in particular for dam constructions. Specifically, for large earth embankment dams with heights $h \geq 40 \text{ m}$, earthquake analyses have to be performed using dynamic simulation methods.

This thesis reviews numerical Methods to simulate the dynamic behaviour of large earth embankment dams, and applies these for the purpose of earthquake analysis. In this context, requirements for earthquake analysis are discussed, as well as the currently available dynamic calculation methods that can be used in earthquake analysis. Also, boundary conditions, that have to be considered in the process, are described.

This work is based on parameter studies, using a time step analysis. Investigations were made to find out how dynamic behaviour of earth embankment dams during earthquake situations could be predicted as realistically as possible by the simulations. In these investigations, the current possibilities of numerical calculation methods and of specifying the material behaviours were considered. Based on the results of the parameter studies, a procedure for earthquake analysis of large earth embankment dams is being proposed. This procedure includes numerical simulation methods as well as soil-mechanical calculation methods. The proposed procedure for earthquake analysis of large earth embankment dams is discussed in detail using a specific example.

Aufgabenstellung

Master- Thesis

Herr Christian Schulz

Nachweis der Erdbebensicherheit von hohen Talsperren (Erddämme) mit numerischen Methoden

Die Sicherheitsüberprüfung von bestehenden Erddämmen in Deutschland erfordert u.a. eingehende Untersuchungen zur Sicherheit der Bauwerke bei Erdbebenbeanspruchung. Der Sachverhalt ist komplex und erfordert in der Regel Berechnungen nach der Finite-Element- Methode. Zur Vorgehensweise liegen Vorschläge in Veröffentlichungen und einigen wenigen Merkblättern vor. Ein allgemeingültiges Regelwerk besteht jedoch noch nicht.

Dem Kandidaten wird zur Erweiterung des allgemeinen Kenntnisstandes die Aufgabe gestellt, numerische Grundsatzuntersuchungen zur Thematik durchzuführen. Im Einzelnen sind folgende Punkte zu bearbeiten:

1. Literaturrecherche und Darstellung des allgemeinen Kenntnisstandes zur dynamischen Beanspruchung von Erddämmen bei Erdbebenbelastung.
2. Durchführung von numerischen Berechnungen an einem Modelldamm unter vereinfachender Annahme eines zweidimensionalen ebenen Systems.
3. Untersuchung des Einflusses von unterschiedlichen Annahmen zum Berechnungsmodell (Netzgröße, Diskretisierung des Untergrundes etc.).
4. Ausarbeitung eines Vorschlages zum Nachweis von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Erddämmen bei Erdbebenbelastung.

Symbolverzeichnis

Griechische Buchstaben

ε	Dehnung
ε_{dyn}	Dynamische Dehnung
ε_{el}	Elastische Dehnung
ε_{pl}	Plastische Dehnung
η	Abstimmverhältnis $\eta = \Omega/\omega$ (im Abschnitt 1.2)
η	Verbleibende Sicherheit ($\eta = 1/\mu$)
γ	Sicherheitsbeiwert (global)
$\gamma_{0,7}$	Scherdehnung $\gamma_{0,7}$ bei $0,7 \cdot G_0$
γ_s	Scherdehnung
λ	Lamé-Konstante (bei der allgemeinen Wellengleichung im elastischen Vollraum)
λ_R	Wellenlänge der Rayleigh-Welle ($\lambda_R = c_R/f$)
μ	Ausnutzungsgrad
μ	Lamé-Konstante (bei der allgemeinen Wellengleichung im elastischen Vollraum)
ν	Querdehn- bzw. Poissonzahl
ν_{dyn}	Dynamische Poissonzahl
σ	Spannung (Normalspannung)
σ_{dyn}	Dynamische Spannung
σ_m	Mittlere Hauptspannung ($\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$)
ω	Kreisfrequenz bzw. Winkelgeschwindigkeit
ω_0	Kreisfrequenz des ungedämpften Systems
ω_D	Kreisfrequenz des gedämpften Systems
Ω	Erregerfrequenz
φ'	Effektiver Reibungswinkel
φ_{crit}	Kritischer Reibungswinkel
φ_{max}	Maximaler Reibungswinkel

ρ	Dichte
τ	Schub- bzw. Scherspannung
Θ	Volumetrische Dehnungsanteile bei der allgemeinen Wellengleichung im elastischen Vollraum ($\Theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$)
ζ	Dämpfung (Lehr'sches Dämpfungsmaß) in [%]

Kleine lateinische Buchstaben

a	Beschleunigung
a_g	Bodenbeschleunigung bzw. Spitzen-Bodenbeschleunigung
a_{gR}	Referenzwert der Spitzen-Bodenbeschleunigung gemäß DIN EN 1998-1
a_h	Spitzenwert der horizontalen Bodenbeschleunigung
$a(t)$	Beschleunigung als Funktion der Zeit
c	Kohäsion
c'	Effektive Kohäsion
c	Wellengeschwindigkeit (allgemein)
c_P	Wellengeschwindigkeit der Primärwelle
c_R	Wellengeschwindigkeit der Rayleigh-Welle
c_S	Wellengeschwindigkeit der Sekundärwelle
d	Dämpfungskoeffizient
d	Durchmesser (bezogen auf eine Bodenprobe)
d_k	kritische Dämpfung
e	Porenzahl
e	Euler'sche Zahl (im Abschnitt 1.2)
f	Fließbedingung
f	Frequenz
f_0	Grundfrequenz (1. Eigenfrequenz bzw. Eigenwert)
g	Erdbeschleunigung
h	Dammhöhe
k	Durchlässigkeit
k	Federkonstante bzw. -steifigkeit
l	Länge (bezogen auf eine Bodenprobe)
m	Masse
p	mittlere Spannung $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$
q	Spannungsdeviator $q = \sigma_1 - \sigma_3$

q	Verhaltensbeiwert gemäß DIN EN 1998-1
t	Zeit
Δt	Zeitintervall (Inkrement)
v	Geschwindigkeit
$v(t)$	Geschwindigkeit als Funktion der Zeit
\hat{y}	Amplitude
x	Auslenkung bzw. Relativverschiebung
x	Strecke (im Abschnitt 1.2.1)
\dot{x}	Geschwindigkeit
\ddot{x}	Beschleunigung
x_B	Bodenverschiebung
\ddot{x}_B	Bodenbeschleunigung im Fall des fußpunkterregten Einmassenschwingers
\ddot{x}_{B0}	Ausgangswert der Bodenbeschleunigung im Fall des fußpunkterregten Einmassenschwingers
\ddot{x}_m	Mittlere Bodenbeschleunigung im Intervall Δt im Fall des fußpunkterregten Einmassenschwingers
$x_h(t)$	Homogener Lösungsansatz der allgemeinen Bewegungsgleichung
$x_p(t)$	Partikulärer Lösungsansatz der allgemeinen Bewegungsgleichung bei Belastung
x_T	Gesamtverschiebung des fußpunkterregten Einmassenschwingers ($x_T = x_B + x$)
z	Einflusstiefe der Rayleigh-Welle

Große lateinische Buchstaben

A_0	Amplitude der Grundresonanzfrequenz
C	Impedanzverhältnis
C	Konstante (bei der Herleitung der freien gedämpften Schwingung)
D	Dämpfung (Lehr'sches Dämpfungsmaß) in %
E	Elastizitätsmodul
E	Beanspruchung bzw. Einwirkung nach DIN EN 1997
E_s	Steifemodul
E_{sd}	Dynamischer Steifemodul
$E_{s,dyn}$	Dynamischer Steifemodul
F	Äußere Kraft

F	Fließfläche
$F(t)$	Angreifende Kraft (zeitvariabel)
F_0	Erregerkraft der harmonischen Erregung ($F(t) = F_0 \cdot \sin(\Omega \cdot t)$)
F_D	Dämpferkraft ($F_D = d \cdot \dot{x}$)
F_F	Federkraft ($F_F = k \cdot x$)
F_I	Trägheitskraft ($F_I = m \cdot \ddot{x}$)
G	Schubmodul
G_0	Schubmodul bei sehr kleinen Scherdehnungen
G_d	Dynamischer Schubmodul
G_{dyn}	Dynamischer Schubmodul
$G_{d,max}$	Maximalwert des dynamischen Schubmodul
G_{d0}	Dynamischer Schubmodul bei sehr kleinen Scherdehnungen
H	Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht
I	Impedanz ($I = \rho \cdot v_S \cdot \cos \Theta$)
I_D	Bezogene Lagerungsdichte
I_P	Plastizitätszahl
M_0	Seismisches Moment
M_L	Lokal Magnitude
M_S	Oberflächenmagnitude
M_W	Momentmagnitude
N	Lastwechselzahl
PGA_{50Hz}	Spitzenbodenbeschleunigung gemäß DIN 19700 bei $T = 0,02$ s bzw. $f = 50$ Hz
R	Resultierender Widerstand nach DIN EN 1997
S	Untergrundfaktor gemäß DIN EN 1998-1
S_r	Sättigungsgrad
T	Periode oder Schwingungsdauer
T	Wiederkehrperiode eines Erdbebenereignisses in [a]
T_s	Stationäre Dauer künstlich generierter Beschleunigungs-Zeitverläufe
V	Vergrößerungsfaktor bzw. dynamische Vergrößerungsfunktion
W	Elastische Energie
ΔW	Dissipierte Energie

Mathematische Operaden

$[D]$	Dämpfungsmatrix
$[K]$	Steifigkeitsmatrix
$[M]$	Massenmatrix
$[P]$	Matrix der äußeren Kräfte
$\{x\}$	Vektor (hier: Verschiebungsvektor)
∇^2	Laplace-Operator (bei der allgemeinen Wellengleichung im elastischen Vollraum) ($\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$)

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen der Bodendynamik	1
1.1	Einführung Bodendynamik	1
1.2	Grundlagen der Dynamik - Schwingungen	4
1.2.1	Begriffe und Bewegungsdifferenzialgleichung	4
1.2.2	Einmassenschwinger	8
1.2.3	Mehrmassenschwinger	21
1.2.4	Nicht-lineare Massenschwinger	23
1.3	Wellenausbreitung	26
1.3.1	Wellentypen	26
1.3.2	Wellenausbreitung im elastischen Raum	29
1.3.3	Wellenausbreitung im elastischen Halbraum	30
1.3.4	Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten	31
1.3.5	Dämpfung der Wellenenergie	33
1.3.6	Energieanteil der Wellentypen	34
2	Materialverhalten von Böden bei dynamischen Einwirkungen	37
2.1	Einführung	37
2.2	Beschreibung des dynamischen Materialverhaltens - Stoffmodelle	38
2.2.1	Linear-äquivalente Stoffmodelle	39
2.2.2	Anwendung elastoplastischer Stoffmodelle in der Bodendynamik	40
2.2.3	Prinzipieller Aufbau elastoplastischer Stoffmodelle	43
2.2.4	Berücksichtigung kleiner Scherdehnungen	48
2.3	Dynamische Einflussgrößen	50
2.3.1	Bodenphysikalische Eigenschaften	53
2.3.2	Ansatz dynamischer Bodenkennwerte in numerischen Berechnungen	65
2.4	Bodenverflüssigung	67
2.4.1	Das Phänomen der Bodenverflüssigung	67
2.4.2	Abschätzung des Verflüssigungspotenzials	69

3	Erdbeben	71
3.1	Einführung	71
3.2	Erdbebeneinwirkung	71
3.2.1	Entstehung von Erdbeben	71
3.2.2	Erdbebenstärke	75
3.3	Einfluss lokaler Standortbedingungen - Baugrundsichtung	81
3.3.1	Ausbreitung von Erdbebenwellen im geschichteten Untergrund	83
3.3.2	Verstärkungseffekte von Erdbebeneinwirkungen im geschichteten Untergrund	84
3.4	Auswirkungen von Erdbeben auf Stauanlagen - Erddämme	90
4	Erdbebenbeanspruchung von hohen Erddämmen (Stand der Technik)	93
4.1	Einführung	93
4.2	Nachweis der Erdbebensicherheit bei hohen Erddämmen	94
4.2.1	Nachweise und Sicherheitskonzept nach DIN 19700	94
4.2.2	Umfang erforderlicher Nachweise im Lastfall Erdbeben	99
4.3	Ermittlung der Erdbebeneinwirkung	103
4.3.1	Klassifizierung der Untergrundverhältnisse	103
4.3.2	Ermittlung der Bodenbeschleunigung nach DIN EN 1998-1	105
4.3.3	Ermittlung der Bodenbeschleunigung für die Wiederkehrperioden gemäß den Anforderungen der DIN 19700	108
4.4	Dynamische Berechnungsverfahren bei hohen Erddämmen unter Erdbebenbelastung	109
4.4.1	Antwortspektrenverfahren	110
4.4.2	Zeitschrittverfahren	114
4.4.3	Böschungstabilität	117
4.4.4	Prinzipielle Vorgehensweise beim Nachweis der Erdbebensicherheit an hohen Erddämmen	120
4.5	Modellbildung bei dynamischen Berechnungsverfahren	122
4.5.1	Antwortspektrenverfahren	123
4.5.2	Zeitschrittverfahren	123
4.6	Spannungszustände von Erddämmen unter Erdbebeneinwirkung	127
4.6.1	Dynamischer Spannungszustand	127
4.6.2	Einflüsse auf dynamische Spannungszustände	129
4.7	Schwingverhalten von hohen Erddämmen	132
4.7.1	Verwendung von Eigenfrequenzen	132

4.7.2	Ermittlung von Eigenfrequenzen von Erddämmen	134
4.7.3	Bandbreite der Eigenfrequenzen hoher Erddämme ($h \geq 40 m$)	139
4.7.4	Eigenformen von Erddämmen	141
4.8	Zusammenfassung zum Stand der Technik zur Erdbebenbeanspruchung von hohen Erddämmen	143
4.8.1	Nachweis der Erdbebensicherheit bei hohen Erddämmen . . .	143
4.8.2	Ermittlung der Erdbebeneinwirkung	144
4.8.3	Dynamische Berechnungsverfahren bei hohen Erddämmen unter Erdbebenbelastung	146
4.8.4	Modellbildung bei dynamischen Berechnungsverfahren	149
4.8.5	Spannungszustände von Erddämmen unter Erdbebeneinwirkung	152
4.8.6	Schwingverhalten von hohen Erddämmen	153
5	Parameterstudien	155
5.1	Untersuchungsprogramm	155
5.2	Grundlagen der Parameterstudien	157
5.2.1	Dammgeometrie und Untergrundverhältnisse	157
5.2.2	Berechnungsprogramm und Randbedingungen	158
5.2.3	Erdbebenbeanspruchung und -zeitverläufe	161
5.3	Parameterstudie - Modellbildung	169
5.3.1	Einführung	169
5.3.2	Mächtigkeit des Untergrundes	169
5.3.3	Modellbreite	175
5.3.4	Ansatz des spezifischen Eigengewichts im Untergrund	181
5.3.5	Überprüfung der erforderlichen Modellbreite	196
5.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Parameterstudie zur Modellbildung	198
5.4	Parameterstudie - Netzdiskretisierung	202
5.4.1	Einführung	202
5.4.2	Einfluss des Detaillierungsgrades	202
5.4.3	Einfluss der Netzfeinheit	218
5.4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Parameterstudie Netzdiskretisierung	225
5.5	Parameterstudien zu weiteren Ansätzen bei der Modellbildung	227
5.5.1	Einführung	227
5.5.2	Ansatz der Materialdämpfung	227

5.5.3	Ansatz einer Wassermasse	235
5.5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Parameterstudie zu weiteren Ansätzen bei der Modellbildung	253
5.6	Parameterstudie elastoplastische Stoffmodelle bei dynamischer Beanspruchung	255
5.6.1	Einführung	255
5.6.2	Ansatz elastoplastischer Stoffmodelle	257
5.6.3	Empfehlung zum Ansatz elastoplastischer Stoffmodelle bei dynamischen Berechnungen	271
5.7	Alternativer Ansatz der Erdbebenbeanspruchung	274
5.7.1	Einführung	274
5.7.2	Vorschlag eines alternativen Ansatzes der Erdbebenbeanspruchung	275
5.7.3	Empfehlung zur Anregung des Berechnungsmodells	283
5.8	Wahl des Berechnungsmodells	284
5.8.1	Einführung	284
5.8.2	Berechnungsausschnitt und Randbedingungen	284
5.8.3	Berechnungsnetz	284
5.8.4	Materialdämpfung	285
5.8.5	Ansatz des Wasserstandes und Strömungskräfte	285
5.8.6	Materialverhalten und Erdbebenverläufe	286
5.9	Untersuchungen des dynamischen Verhaltens von hohen Erddämmen	289
5.9.1	Untersuchungen	289
5.9.2	Verteilung der Antwortbeschleunigungen im Dammkörper	289
5.9.3	Verformungen	293
5.9.4	Spannungszustände	298
6	Nachweis der Erdbebensicherheit	315
6.1	Einführung	315
6.2	Vorschlag zur Vorgehensweise beim Nachweis der Erdbebensicherheit	316
6.2.1	Grundlagenermittlung	316
6.2.2	Modellbildung	318
6.2.3	Erdbebensimulation	321
6.2.4	Nachweis der Standsicherheit	321
6.2.5	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	325
6.2.6	Nachweis der Betriebssicherheit	326

6.2.7	Nachweis der Erdbebensicherheit	327
6.3	Beispiel einer Erdbebensimulation an einem hohen Erddamm	328
6.3.1	Berechnungsgrundlagen	328
6.3.2	Berechnungsannahmen	333
6.3.3	Ergebnisse der numerischen Berechnung	337
6.3.4	Nachweis der Erdbebensicherheit	338
6.3.5	Nachweis der Gebrauchstauglichkeit	343
6.3.6	Nachweis der Betriebssicherheit	343
7	Zusammenfassung	345
8	Glossar	349
	Literaturverzeichnis	359

Abbildungsverzeichnis

1.1	Harmonische ungedämpfte Schwingung einer Masse	5
1.2	Punkt auf sich drehender Scheibe - Kreisfrequenz	6
1.3	Allgemeiner Einmassenschwinger mit angreifender Kraft	7
1.4	Freier ungedämpfter Einmassenschwinger	8
1.5	Freier gedämpfter Einmassenschwinger	10
1.6	Schwingverhalten unterschiedlicher Dämpfungen (nach [48])	12
1.7	Harmonisch erregter Einmassenschwinger	14
1.8	Arten der Krafterregung (nach [73])	15
1.9	Darstellung der Vergrößerungsfunktion V in Abhängigkeit vom Abstimmverhältnis η und dem Dämpfungsverhältnis D (nach [35])	18
1.10	Fußpunkterregter Einmassenschwinger	19
1.11	Harmonisch erregter Einmassenschwinger	22
1.12	Darstellung möglicher Wellentypen (nach [48])	28
1.13	Spannungskomponenten eines Quaders im elastischen (Voll-) Raum (nach [32])	29
1.14	Wellenausbreitung im elastischen Halbraum an einem Kreisfundament (nach [79])	34
1.15	Messtechnisch aufgenommene Bodenverschiebung bei einem Erdbebenereignis mit Kennzeichnung des Eintretens unterschiedlicher Wellentypen (nach [32])	35
2.1	Schematische Darstellung einer Spannungs-Dehnungs-Beziehung unter statischer und zyklischer Belastung (in Anlehnung an [48] und [49])	39
2.2	Schematische Darstellung elastoplastischer Bodenmodelle im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (nach [71])	44
2.3	Spannungs-Dehnungs-Beziehung eines Spannungspunktes in Abhängigkeit von der Fließbedingung f (nach [71])	44
2.4	Allgemeine zwei-dimensionale Darstellung der Zusammenhänge der Fließregel (nach [71])	45

2.5	Darstellung einer Fließfläche im p-q-Diagramm sowie im Hauptspannungsraum (nach [71])	46
2.6	Schematische Darstellung des möglichen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens elastoplastischer Stoffmodelle (nach [71])	47
2.7	Darstellung des Verfestigungsverhaltens elastoplastischer Stoffmodelle im Hauptspannungsraum (nach [68])	47
2.8	Charakteristisches Verhalten des Schubmoduls in Abhängigkeit typischer Scherdehnungen γ_s (nach [63])	48
2.9	Darstellung der erforderlichen Bodenkennwerte zur Beschreibung der Steifigkeit in Abhängigkeit von der Scherdehnung γ_s (nach [23]) . . .	49
2.10	Verstärkung des dynamischen Steifemoduls in Abhängigkeit des statischen Steifemoduls bei Lockergesteinsböden (nach [33])	54
2.11	Größenordnung der sich ergebenden Scherdehnungen γ_s bei unterschiedlichen dynamischen Belastungen (nach [40])	56
2.12	Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dynamischem Schubmodul G_d und der Schubdehnung γ_s (in Anlehnung an [83]) . .	57
2.13	Verlauf der Abminderung des Schubmoduls in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl I_P (nach [22])	58
2.14	Abschätzung der Größe des bezogenen Schubmoduls in Abhängigkeit von der Schubdehnung γ_s (nach [33])	59
2.15	Einfluss von Porenzahl e und Normalspannung σ_3 auf den Schubmodul G_0 (nach [81])	60
2.16	Einfluss von Porenzahl e auf den bezogenen Schubmodul im Bereich $10^{-6} < \gamma_s < 10^{-3}$ (nach [81])	61
2.17	Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Materialdämpfung D und dem dynamischen Schubmodul G_d in Abhängigkeit von der Schubdehnung γ_s (nach [40])	62
2.18	Schematische Darstellung einer Hysteresenschleife (in Anlehnung an [33])	63
2.19	Abschätzung der Größe der Materialdämpfung D in Abhängigkeit von der Schubdehnung γ_s (nach [33])	64
2.20	Auswirkung der Bodenverflüssigung - Kippen von Gebäuden (aus [48])	67
2.21	Abschätzung der Gefahr einer Bodenverflüssigung anhand der Kornverteilung mit Darstellung verflüssigungsempfindlicher Zonen (nach [16])	70

3.1	Verschiebungen der Plattenränder und Bereiche potenzieller Erdbeben im Bereich einer Subduktionszone (aus [48])	73
3.2	Begrifflichkeiten zur Beschreibung des Erdbebenherdes (nach [48]) .	74
3.3	Bruchbewegungen des Erdbebenherdes in der Verwerfungsfläche (nach [48])	74
3.4	Vergleich der unterschiedlichen Magnitudenverläufe (aus [48])	79
3.5	Aufnahme des Geschwindigkeits-Zeitverlaufs eines Erdbebens an zwei Messstationen auf unterschiedlichem Untergrund (nach [32])	82
3.6	Schematische Darstellung der Begrifflichkeit von Bodenbewegungen in Abhängigkeit von der Standortbedingung (nach [32])	82
3.7	Schematische Ausbreitung der Raumwellen vom Erdbebenherd zur Geländeoberfläche	84
3.8	Darstellung des vereinfachten Baugrundmodells zur Beschreibung des Verstärkungseffektes im geschichteten Boden (in Anlehnung an [50])	85
3.9	Schematische Darstellung des Verstärkungseffektes im geschichteten Baugrund mit Darstellung des Einflusses aus Dämpfung und Schichtmächtigkeit (nach [50] und [15])	87
3.10	Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse einer Modellrechnung mit unterschiedlichen Schichtmächtigkeiten des Lockergesteins in Form von Beschleunigungs-Zeitverläufen (nach [32])	89
3.11	Schematische Darstellung der Verstärkung der Beschleunigungsantworten (in Form von Antwortspektren) bei unterschiedlichen Untergrundverhältnissen (nach [13])	89
4.1	Grafische Darstellung der Erdbebengefährdungsgebiete für Nachweise an hohen Talsperren nach DIN 19700 (nach [43])	101
4.2	Darstellung der Untergrundklassen bezogen auf die Erdbebenzonen in Deutschland (nach [10])	105
4.3	Darstellung der Erdbebenzonen in Deutschland (nach [10])	106
4.4	Schematische Darstellung eines Antwortspektrums für eine Wiederkehrperiode $T = 2.500 a$ gemäß DIN 19700 (nach [60])	110
4.5	Beispielhafte Darstellung eines Antwortspektrums (Untergrundklasse R) nach DIN 19700 im Vergleich mit einem eingehängten Antwortspektrum (B-R) nach DIN EN 1998-1 - Wiederkehrperiode $T = 500 a$	114

4.6	Schematische Darstellung eines künstlich generierten Beschleunigungs-Zeitverlaufes	115
4.7	Schematische Darstellung der Überlagerung eines künstlich generierten Beschleunigungs-Zeitverlaufes im Antwortspektrum mit dem Vorgabe-Antwortspektrum	117
4.8	Prinzipieller Ablauf beim Nachweis der Erdbebensicherheit mit dynamischen Nachweisverfahren (nach [37])	121
4.9	Definition von V-förmigen Tälern (nach [37])	125
4.10	Geometrie des Modelldamms zur Untersuchung bestimmter Einflüsse auf die dynamischen Spannungszustände eines Erddammes (nach [59])	127
4.11	Zeitverlauf der Scherdehnungen γ_s zur Untersuchung der ungünstigsten Spannungen im Dammkörper (nach [59])	128
4.12	Veränderung der Schubspannungsverteilung (in $[kN/m^2]$) im Dammquerschnitt unter Erdbebeneinwirkung (nach [59])	129
4.13	Einfluss der Lagerungsdichte auf die Schubspannungsverteilung (in $[kN/m^2]$) im Dammquerschnitt bei dynamischer Belastung (nach [59])	130
4.14	Einfluss der Wasserauflast auf die Schubspannungsverteilung (in $[kN/m^2]$) im Dammquerschnitt bei dynamischer Belastung (nach [59])	131
4.15	Beispielhafte Darstellung eines Antwortspektrums mit Darstellung der Antwortbeschleunigungen in Abhängigkeit unterschiedlicher Eigenwerte	138
4.16	Bestimmung der Grundfrequenz f_0 (nach [64])	140
4.17	Vergleich der 1. - 5. Eigenform ohne und mit Berücksichtigung des spezifischen Eigengewichts im Untergrund (nach [86])	142
5.1	Querschnitt des verwendeten Modelldammes und Darstellung der Untergrundsituation	157
5.2	Antwortspektrum mit einer Wiederkehrperiode $T = 500 a$ für den gewählten Standort des Modelldammes (nach [60])	163
5.3	Antwortspektrum mit einer Wiederkehrperiode $T = 2.500 a$ für den gewählten Standort des Modelldammes (nach [60])	163
5.4	Eingehängtes Antwortspektrum mit einer Wiederkehrperiode $T = 500 a$ für den gewählten Standort des Modelldammes	164
5.5	Eingehängtes Antwortspektrum mit einer Wiederkehrperiode $T = 2.500 a$ und 10%-iger Dämpfung für den gewählten Standort des Modelldammes	164

5.6	Künstlich erzeugter Erdbebenverlauf des im Rahmen der Parameterstudien verwendeten Testbebens	165
5.7	Künstlich erzeugter Erdbebenverlauf des im Rahmen der Parameterstudien verwendeten Betriebserdbebens	165
5.8	Künstlich erzeugter Erdbebenverlauf des im Rahmen der Parameterstudien verwendeten Bemessungserdbebens	166
5.9	Überlagerung des Antwortspektrums aus dem horizontalen Verlauf des Bemessungserdbebens mit dem zugehörigen eingehängten Antwortspektrum	166
5.10	Ergebnis der Untersuchung der Modelltiefe - Horizontale Verschiebung Dammkrone	171
5.11	Ergebnis der Untersuchung der Modelltiefe - Horizontale Verschiebung Dammsohle	171
5.12	Ergebnis der Untersuchung der Modelltiefe - Vertikale Verschiebung Dammkrone	172
5.13	Ergebnis der Untersuchung der Modelltiefe - Vertikale Verschiebung Dammsohle	172
5.14	Ergebnis der Untersuchung der Modelltiefe - Resultierende Beschleunigungen an der Dammsohle	174
5.15	Schematische Darstellung der Lage des Auswertungspunktes bei der Ermittlung der erforderlichen Modellbreite	176
5.16	Ergebnis der Untersuchung der Modellbreite - Horizontale Beschleunigung Modellbreite 3B	178
5.17	Ergebnis der Untersuchung der Modellbreite - Vertikale Beschleunigung Modellbreite 3B	178
5.18	Ergebnis der Untersuchung der Modellbreite - Horizontale Beschleunigung Modellbreite 4B	179
5.19	Ergebnis der Untersuchung der Modellbreite - Vertikale Beschleunigung Modellbreite 4B	179
5.20	Ergebnis der Untersuchung der Modellbreite - Horizontale Beschleunigung Modellbreite 5B	180
5.21	Ergebnis der Untersuchung der Modellbreite - Vertikale Beschleunigung Modellbreite 5B	180
5.22	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vergleich der horizontalen Beschleunigung (5B A-40 F0)	185

5.23	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vergleich der vertikalen Beschleunigung (5B A-40 F0)	185
5.24	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vergleich der horizontalen Beschleunigung (5B A-40 F5)	186
5.25	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vergleich der vertikalen Beschleunigung (5B A-40 F5)	186
5.26	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Horizontale Beschleunigung (Variation v01)	188
5.27	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vertikale Beschleunigung (Variation v01)	188
5.28	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Horizontale Beschleunigung (Variation v02)	189
5.29	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vertikale Beschleunigung (Variation v02)	189
5.30	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Horizontale Beschleunigung (Variation v03)	190
5.31	Ergebnis der Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vertikale Beschleunigung (Variation v03)	190
5.32	Ergebnis der ergänzenden Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Horizontale Beschleunigung (Variation v01)	193
5.33	Ergebnis der ergänzenden Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vertikale Beschleunigung (Variation v01)	193
5.34	Ergebnis der ergänzenden Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Horizontale Beschleunigung (Variation v03)	194
5.35	Ergebnis der ergänzenden Untersuchung des spezifischen Eigengewichts - Vertikale Beschleunigung (Variation v03)	194
5.36	Ergebnis der Überprüfung der Modellbreite - Horizontale Beschleunigung (Variation v02)	197
5.37	Ergebnis der Überprüfung der Modellbreite - Vertikale Beschleunigung (Variation v02)	197
5.38	Erforderliche Mindestabmessungen des Berechnungsmodells zur Simulation der Erdbebenbeanspruchung des Dammkörpers	199
5.39	Schematische Darstellung der Auswertungspunkte - Parameterstudie Einfluss des Detaillierungsgrades	205
5.40	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Vergleich horizontaler Beschleunigungen (Dammkrone Punkt A)	206

5.41	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Vergleich vertikaler Beschleunigungen (Dammkrone Punkt A)	206
5.42	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Horizontale Beschleunigung des Dammkörpers	208
5.43	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Vertikale Beschleunigung des Dammkörpers	208
5.44	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Horizontale Verformung des Dammkörpers	209
5.45	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Vertikale Verformung des Dammkörpers	209
5.46	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Horizontale Beschleunigung der Dichtwand	212
5.47	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Vertikale Beschleunigung der Dichtwand	212
5.48	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Horizontale Verformung der Dichtwand	213
5.49	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Vertikale Verformung der Dichtwand	213
5.50	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Frequenzverhalten des Dammkörpers (horizontale Beschleunigung)	214
5.51	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Frequenzverhalten des Dammkörpers (vertikale Beschleunigung)	214
5.52	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Horizontale Spannungen σ_{xx} - Referenzmodell (MD 5B A-40 F0 v01)	216
5.53	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Horizontale Spannungen σ_{xx} - Vereinfachtes Modell (MD 5B A-40 F0 v04)	216
5.54	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Vertikale Spannungen σ_{yy} - Referenzmodell (MD 5B A-40 F0 v01)	217
5.55	Ergebnis der Untersuchung des Detaillierungsgrades - Vertikale Spannungen σ_{yy} - Vereinfachtes Modell (MD 5B A-40 F0 v04)	217
5.56	Ausschnitt des verwendeten finite Elemente Netzes zur Untersuchung der Netzfeinheit - Netz grob (ca. 1.500 Elemente)	219
5.57	Ausschnitt des verwendeten finite Elemente Netzes zur Untersuchung der Netzfeinheit - Netz mittelfein (ca. 1.700 Elemente)	219
5.58	Ausschnitt des verwendeten finite Elemente Netzes zur Untersuchung der Netzfeinheit - Netz fein (ca. 3.500 Elemente)	220

5.59	Ausschnitt des verwendeten finite Elemente Netzes zur Untersuchung der Netzfeinheit - Netz sehr fein (ca. 6.500 Elemente)	220
5.60	Ergebnis der Untersuchung der Netzfeinheit - Vergleich horizontaler Beschleunigungen (Dammkrone Punkt A)	221
5.61	Ergebnis der Untersuchung der Netzfeinheit - Vergleich vertikaler Beschleunigungen (Dammkrone Punkt A)	221
5.62	Ergebnis der Untersuchung der Netzfeinheit - Horizontale Beschleunigung des Dammkörpers	223
5.63	Ergebnis der Untersuchung der Netzfeinheit - Vertikale Beschleunigung des Dammkörpers	223
5.64	Ergebnis der Untersuchung der Netzfeinheit - Horizontale Verschiebung des Dammkörpers	224
5.65	Ergebnis der Untersuchung der Netzfeinheit - Vertikale Verschiebung des Dammkörpers	224
5.66	Schematische Darstellung des Verlaufs der Rayleigh-Dämpfung nach [24]	228
5.67	Darstellung des Verlaufs der gewählten Rayleigh-Dämpfung - Annahme der bisherigen Untersuchungen (5% Dämpfung)	229
5.68	Schematische Darstellung der Auswertungspunkte - Parameterstudie zum Ansatz der Materialdämpfung	230
5.69	Ergebnis der Untersuchung der Materialdämpfung - Angeregte Frequenzen (horizontale Beschleunigung)	232
5.70	Ergebnis der Untersuchung der Materialdämpfung - Angeregte Frequenzen (vertikale Beschleunigung)	232
5.71	Ergebnis der Untersuchung der Materialdämpfung - Angeregte Frequenzen - Ergänzende Untersuchung (horizontale Beschleunigung)	233
5.72	Ergebnis der Untersuchung der Materialdämpfung - Angeregte Frequenzen - Ergänzende Untersuchung (vertikale Beschleunigung)	233
5.73	Verlauf der gewählten Rayleigh-Dämpfung im Betriebserdbeben (5% Dämpfung)	234
5.74	Verlauf der gewählten Rayleigh-Dämpfung im Bemessungserdbeben (10% Dämpfung)	234
5.75	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Angeregte Frequenzen (horizontale Beschleunigung) - Betriebserdbeben	238
5.76	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Angeregte Frequenzen (horizontale Beschleunigung) - Bemessungserdbeben	238

5.77	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Angeregte Frequenzen (vertikale Beschleunigung) - Betriebserdbeben	239
5.78	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Angeregte Frequenzen (vertikale Beschleunigung) - Bemessungserdbeben	239
5.79	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Horizontale Beschleunigung an der Dammkrone - Betriebserdbeben	241
5.80	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Horizontale Beschleunigung an der Dammkrone - Bemessungserdbeben	241
5.81	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Vertikale Beschleunigung an der Dammkrone - Betriebserdbeben	242
5.82	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Vertikale Beschleunigung an der Dammkrone - Bemessungserdbeben	242
5.83	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Horizontale Beschleunigung an der Wasserseite - Betriebserdbeben	244
5.84	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Horizontale Beschleunigung an der Wasserseite - Bemessungserdbeben	244
5.85	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Vertikale Beschleunigung an der Wasserseite - Betriebserdbeben	245
5.86	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Vertikale Beschleunigung an der Wasserseite - Bemessungserdbeben	245
5.87	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Horizontale Beschleunigung an der Luftseite - Betriebserdbeben	246
5.88	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Horizontale Beschleunigung an der Luftseite - Bemessungserdbeben	246
5.89	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Vertikale Beschleunigung an der Luftseite - Betriebserdbeben	247
5.90	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Vertikale Beschleunigung an der Luftseite - Bemessungserdbeben	247
5.91	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - Betriebserdbeben (Wasserstand -2m) .	248
5.92	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - Bemessungserdbeben (Wasserstand -2m)	248
5.93	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - Betriebserdbeben (Wasserstand 20m) .	249
5.94	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - Bemessungserdbeben (Wasserstand 20m)	249

5.95	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - Betriebserdbeben (Stauziel ZV 35m) . . .	250
5.96	Ergebnis der Untersuchung der Wassermasse - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - Bemessungserdbeben (Stauziel ZV 35m)	250
5.97	Schematische Darstellung der Auswertungspunkte - Parameterstudie elastoplastische Stoffmodelle	261
5.98	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Angeregte Frequenzen (horizontale Beschleunigung) - Bemessungserdbeben .	262
5.99	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Angeregte Frequenzen (vertikale Beschleunigung) - Bemessungserdbeben . . .	262
5.100	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Horizontale Beschleunigung an der Dammkrone - Bemessungserdbeben . . .	264
5.101	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Vertikale Beschleunigung an der Dammkrone - Bemessungserdbeben	264
5.102	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - Mohr-Coulomb Modell . . .	265
5.103	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - Hardening-Soil Modell . . .	265
5.104	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Maximale Beschleunigung $ a $ im Dammkörper - HS-Small Modell	266
5.105	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Entwicklung der Scherdehnungen γ_s an der Wasserseite über den Zeitverlauf - Bemessungserdbeben	267
5.106	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Entwicklung der Scherdehnungen γ_s an der Luftseite über den Zeitverlauf - Bemessungserdbeben	267
5.107	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Horizontale Verschiebungen in der Dammachse - Bemessungserdbeben . . .	269
5.108	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Vertikale Verschiebungen in der Dammachse - Bemessungserdbeben	269
5.109	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Horizontale Verschiebungen an der Dammhaut - Bemessungserdbeben	270
5.110	Ergebnis der Untersuchung elastoplastischer Stoffmodelle - Vertikale Verschiebungen an der Dammhaut - Bemessungserdbeben	270
5.111	Beispielhafte Darstellung der Verteilung des initiierten Schubmoduls zum Zeitpunkt $t = 2,5 s$ (HS-Small Modell) - Bemessungserdbeben	272

5.112 Künstlich erzeugter Erdbebenverlauf des Betriebserdbebens (auf der Grundlage des Antwortspektrums nach GFZ / DIN 19700)	277
5.113 Künstlich erzeugter Erdbebenverlauf des Bemessungserdbebens (auf der Grundlage des Antwortspektrums nach GFZ / DIN 19700)	277
5.114 Alternativer Ansatz der Erdbebenbeanspruchung - Horizontale Beschleunigung an der Modellunterkante - Bemessungserdbeben	279
5.115 Alternativer Ansatz der Erdbebenbeanspruchung - Vertikale Beschleunigung an der Modellunterkante - Bemessungserdbeben	279
5.116 Alternativer Ansatz der Erdbebenbeanspruchung - Horizontale Beschleunigung an der Dammsohle - Bemessungserdbeben	280
5.117 Alternativer Ansatz der Erdbebenbeanspruchung - Vertikale Beschleunigung an der Dammsohle - Bemessungserdbeben	280
5.118 Alternativer Ansatz der Erdbebenbeanspruchung - Horizontale Beschleunigung an der Dammkrone - Bemessungserdbeben	282
5.119 Alternativer Ansatz der Erdbebenbeanspruchung - Vertikale Beschleunigung an der Dammkrone - Bemessungserdbeben	282
5.120 Gewählter Ausschnitt zur Abbildung des Modelldammes im Berechnungsmodell für die Simulation von Erdbebenereignissen	285
5.121 Ausschnitt des gewählten FE-Netzes mit ca. 6.500 Elementen	285
5.122 Maximale horizontale Antwortbeschleunigungen $a_{x,max}$ im Dammkörper	290
5.123 Minimale horizontale Antwortbeschleunigungen $a_{x,min}$ im Dammkörper	290
5.124 Maximale vertikale Antwortbeschleunigungen $a_{y,max}$ im Dammkörper	291
5.125 Minimale vertikale Antwortbeschleunigungen $a_{y,min}$ im Dammkörper	291
5.126 Maximale resultierende Antwortbeschleunigung $ a_{max} $ im Dammkörper	292
5.127 Maximale horizontale Verschiebung $u_{x,max}$ im Dammkörper	294
5.128 Maximale Setzung $u_{y,min}$ des Dammkörpers	294
5.129 Schematische Darstellung der Auswertungspunkte zur Beschreibung der Verformung der Dichtwand	295
5.130 Relative horizontale Verformung u_x der Dichtwand	297
5.131 Darstellung der relativen horizontalen Verformung u_x der Dichtwand	297
5.132 Relative vertikale Verformung u_y der Dichtwand	298
5.133 Schematische Darstellung der Auswertungspunkte zur Beschreibung der dynamischen Spannungszustände	299

5.134	Zeitlicher Verlauf der Scherdehnungen γ_s im Dammkörper und Markierung der Bereiche zur Untersuchung der dynamischen Spannungszustände	300
5.135	Darstellung ausgewählter horizontaler Spannungszustände im Dammkörper und dem Untergrund	301
5.136	Detaillierte Darstellung ausgewählter horizontaler Spannungszustände im Dammkörper	302
5.137	Darstellung ausgewählter vertikaler Spannungszustände im Dammkörper und dem Untergrund	304
5.138	Detaillierte Darstellung ausgewählter vertikaler Spannungszustände im Dammkörper	305
5.139	Darstellung ausgewählter Schubspannungszustände im Dammkörper und dem Untergrund	308
5.140	Detaillierte Darstellung ausgewählter Schubspannungszustände im Dammkörper	309
5.141	Darstellung der Bereiche mit Festigkeitsüberschreitungen und plastisches Verformungsverhalten im Dammkörper zum Zeitpunkt $t = 0,00$ s	312
5.142	Darstellung der Bereiche mit Festigkeitsüberschreitungen und plastisches Verformungsverhalten im Dammkörper zum Zeitpunkt $t = 1,46$ s	312
5.143	Darstellung der Bereiche mit Festigkeitsüberschreitungen und plastisches Verformungsverhalten im Dammkörper zum Zeitpunkt $t = 3,67$ s	313
5.144	Darstellung der Bereiche mit Festigkeitsüberschreitungen und plastisches Verformungsverhalten im Dammkörper zum Zeitpunkt $t = 5,72$ s	313
6.1	Vorschlag zur Vorgehensweise beim Nachweis der Erdbebensicherheit an hohen Erddämmen	317
6.2	Empfehlung zu Wahl des Berechnungsausschnittes	319
6.3	Vergleich der Antwortbeschleunigungen eines hohen Erddammes mit und ohne Abgeminderten der Scherparameter	323
6.4	Querschnitt des Modelldammes für den beispielhaften Erdbebennachweis	328
6.5	Antwortspektren für den Standort des Modelldammes gemäß [60]	329
6.6	Künstlich erzeugter Beschleunigungs-Zeitverlauf des Betriebserdbebens - Satz 1	330
6.7	Künstlich erzeugter Beschleunigungs-Zeitverlauf des Bemessungserdbebens - Satz 1	330

6.8	Künstlich erzeugter Beschleunigungs-Zeitverlauf des Betriebserdbebens - Satz 2	331
6.9	Künstlich erzeugter Beschleunigungs-Zeitverlauf des Bemessungserdbebens - Satz 2	331
6.10	Künstlich erzeugter Beschleunigungs-Zeitverlauf des Betriebserdbebens - Satz 3	332
6.11	Künstlich erzeugter Beschleunigungs-Zeitverlauf des Bemessungserdbebens - Satz 3	332
6.12	Ergebnis der Erdbebensimulation der Betriebserdbeben - Resultierende Verformung $ u $ des hohen Erddammes	339
6.13	Ergebnis der Erdbebensimulation der Bemessungserdbeben - Resultierende Verformung $ u $ des hohen Erddammes	340
6.14	Ergebnis der Erdbebensimulation der Betriebserdbeben - Resultierende Beschleunigungen $ a_{max} $ des hohen Erddammes	341
6.15	Ergebnis der Erdbebensimulation der Bemessungserdbeben - Resultierende Beschleunigungen $ a_{max} $ des hohen Erddammes	342

Tabellenverzeichnis

1.1	Abweichung der Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Dämpfung D . . .	13
1.2	Arten der dynamischen Krafterregung (in Anlehnung an [40])	15
1.3	Vergleich der Wellengeschwindigkeiten bei unterschiedlicher Dichte ρ .	33
2.1	Übersicht erforderlicher und vorhandener Kennwerte zur Beschreibung des elastoplastischen Materialverhaltens (nach [23], [71] und [75])	42
2.2	Feld- und Laborversuche zur Ermittlung von dynamischen Bodenkennwerten (in Anlehnung an [48] und [90])	52
2.3	Mittlere Kennwerte zur Abschätzung des dynamischen Schubmoduls bei sehr kleinen Scherdehnung G_{d0} (nach [33])	59
2.4	Typische Querdehnzahlen $\nu \approx \nu_{dyn}$ unterschiedlicher Böden (nach [33])	65
3.1	Kurzform der makroseismischen Intensitätsskala EMS-98 inklusive Bodenverflüssigung und der Auswirkungen auf Böschungsinstabilitäten (nach [42])	76
3.2	Intensitäten mit zugeordneter Magnitude (nach [80])	78
3.3	Ergebnisse einer Modellrechnung mit unterschiedlicher Mächtigkeit der Lockergesteinsschicht (nach [32])	88
3.4	Auftretende Böschungsinstabilitäten bei minimaler lokaler Magnitude (nach [47] und [48])	91
4.1	Bemessungssituationen in Abhängigkeit von Lastfall und Tragwiderstandsbedingung (nach [4])	96
4.2	Einwirkungskombinationen bei Erddämmen (nach [4])	98
4.3	Erdbebenzonen und zugeordnete Referenzwerte der Spitzen - Bodenbeschleunigung (nach [10])	107
4.4	Anzusetzender Untergrundparameter zur Bestimmung der standortspezifischen Bodenbeschleunigung (nach [10])	107
4.5	Darstellung der Ergebnisse der Modalanalyse eines mehrstöckigen Rahmens (als Auszug nach [32])	112

4.6	Einfluss des Detaillierungsgrades des Dammkörpers und Schichtmächtigkeit der Lockergesteinsschicht auf die Eigenfrequenzen (nach [86])	136
4.7	Einfluss der Berücksichtigung des spezifischen Eigengewichts im Untergrund auf die Eigenfrequenzen (nach [86])	137
4.8	Antwortbeschleunigungen in Abhängigkeit von der Berücksichtigung des spezifischen Eigengewichts im Untergrund	139
5.1	Bodenkennwerte des Berechnungsmodells als Grundlage für die Parameterstudien	159
5.2	Übersicht der Rechenschritte im Rahmen der Parameterstudien	168
5.3	Modellkonfiguration - Parameterstudie Mächtigkeit des Untergrundes	170
5.4	Modellkonfiguration - Parameterstudie erforderliche Modellbreite	176
5.5	Modellkonfiguration - Parameterstudie zum Ansatz des spezifischen Eigengewichts im Untergrund	182
5.6	Auswirkungen der Abminderung der Wichten des Untergrundes auf die Wellenausbreitung	195
5.7	Erläuterungen der Parametervariationen zur Untersuchung des Einflusses des Detaillierungsgrades im Berechnungsmodell	203
5.8	Angesetzte Bodenkennwerte für die vereinfachte Darstellung des Dammkörpers im Modell MD 5B A-40 F0 v04	204
5.9	Übersicht der im Rahmen der Parameterstudie zu untersuchenden Netzfeinheiten	219
5.10	Wahl der Dämpfungsparameter α und β zur Beschreibung der Materialdämpfung nach Rayleigh	231
5.11	Parameterstudie zum Ansatz der Wassermasse im Berechnungsmodell Variation des Wassereinstaus	235
5.12	Zusammenstellung der ersten maßgeblich angeregten Frequenz des Frequenzspektrums (Grundfrequenz) - Variation des Wassereinstaus	237
5.13	Vergleich der Veränderungen der maximalen Beschleunigungen $ a $ im Dammkörper bei unterschiedlichen Wasserständen gegenüber dem Modell ohne Wassereinstau	251
5.14	Angesetzte Bodenkennwerte in den Berechnungsmodellen der Parameterstudie elastoplastischer Stoffmodelle	258
5.15	Angesetzte Bodenkennwerte im gewählten Berechnungsmodell	287
6.1	Kombination der richtungsabhängigen Beschleunigungskomponenten beim Nachweis der Böschungssicherheit (nach [56])	325

6.2 Bodenkennwerte bei den Erdbebensimulationen am Modelldamm . . . 334

1 Grundlagen der Bodendynamik

1.1 Einführung Bodendynamik

In der Bodendynamik werden zeitabhängige Belastungen und die sich daraus ergebenden Reaktionen des Bodens berücksichtigt. Aufgrund dieser zeitabhängigen Belastungen des Bodens ergeben sich für unterschiedliche Zeitpunkte unterschiedliche Verschiebungen. Da ein physikalischer Zusammenhang zwischen der Verschiebung, der Geschwindigkeit sowie der Beschleunigung einer Masse besteht, ist bei Analysen der Dynamik, somit auch in der Bodendynamik, eine Berücksichtigung von Trägheitskräften erforderlich (vgl. [48]). Ebenso führen dynamische Einwirkungen zu wirksamen und neutralen Spannungszuständen im Boden.

Als eine der wesentlichen Beanspruchungen, mit denen sich die Bodendynamik befasst, sind Erschütterungen, die sich in Form von Wellen im Medium Boden ausbreiten, zu benennen. Neben lastinduzierten Ereignissen, die beispielsweise aus dem Verkehr oder aus Bauvorgängen stammen, sind in diesem Zusammenhang auch die Einflüsse aus Erdbebenereignissen zu berücksichtigen (vgl. [48]). Ebenso werden zyklische Belastungen, beispielsweise von Gründungsbauteilen, behandelt. Diese stellen in der Regel eine komplexe Problemstellung dar. Ferner kann es infolge von zyklischen Belastungen wasserführender Böden zu Porenwasserüberdrücken kommen. Ein bekanntes Phänomen, welches als Resultat auf induzierte Porenwasserüberdrücke auftreten kann, stellt die Bodenverflüssigung dar.

Im Allgemeinen ergeben sich die wesentlichen Herausforderungen der Problemstellungen in der Bodendynamik bei der Modellierung von Belastungsverläufen sowie der Abbildung der Materialeigenschaften (vgl. [48]). Um das dynamische Verhalten des Bodens abzubilden bzw. mathematisch zu beschreiben, ist es erforderlich spezielle Stoffmodelle in den bodendynamischen Anwendungsbereichen zu verwenden.

Diese Stoffmodelle müssen im Wesentlichen

- a.) das Verhalten der Steifigkeit des Bodens unter dynamischer Belastung sowie
- b.) die Festigkeitseigenschaften des Bodens unter dynamischer Belastung und
- c.) die Wechselwirkung von wirksamen und neutralen Spannungen unter dynamischer Belastung beschreiben.

Da die Bodendynamik ein Teilgebiet der Bodenmechanik darstellt, gelten die gleichen Prinzipien wie in der Erdstatik. Die beschriebenen Komplexitäten, durch die Beanspruchungen in der Bodendynamik, führen in der Regel dazu, dass Einflüsse schwieriger abzuschätzen sind (vgl. [48]). Ein Beispiel hierfür stellt der Einfluss von Steifigkeiten dar. Je nach angesetzter Steifigkeit des Materials verändert sich das Frequenzverhalten (vgl. [48]) und somit die Beanspruchung gegenüber dynamischen Belastungen. Daher ist bei Analysen in der Bodendynamik, gegenüber denen in der Erdstatik, in der Regel ein noch sorgfältigeres Vorgehen bei der Abbildung der geologischen Verhältnisse erforderlich. Nach Studer [48] ist der Einsatz von Parameterstudien ein probates Mittel, um eine Aussage zur Empfindlichkeit des Materials gegenüber Parameteränderungen treffen zu können. Diese sind demnach vor Beginn einer Analyse durchzuführen, um Rückschlüsse zu erhalten, durch welche Parameter die Ergebnisse einer Untersuchung maßgeblich beeinflusst werden. Dementsprechend sind diese Parameter in der Modellbildung der Analyse mit Bedacht anzusetzen.

Weiterhin sind in der Bodendynamik in der Regel größere Einflussbereiche von Lasten und Deformationen gegenüber der Erdstatik zu berücksichtigen. Dies begründet sich durch die Wellenausbreitung im Boden. Nach [48] ist die Modelltiefe beispielsweise bei einer dynamischen Setzungsrechnung eines Fundamentes mit dem 5 bis 10-fachen der Fundamentbreite zu wählen. Bei einer statischen Berechnung hingegen beträgt die erforderliche Modelltiefe in etwa der 2– bis 3–fachen Fundamentbreite (vgl. [48]). Ferner müssen bestimmte Randbedingungen bei der Modellbildung verwendet werden, die die Wellenbewegung an den Modellrändern absorbieren, sodass keine ungewollten Reflexionen durch die Modellränder erzeugt werden.

Im Zusammenhang mit der Analyse bodendynamischer Untersuchungen wird seitens [48] eine prinzipielle Vorgehensweise angegeben, welche aber auch allgemein für numerische Analysen in der Bodenmechanik verwendet werden sollte. Diese prinzipielle Vorgehensweise setzt sich aus folgenden Schritten zusammen: