

Thomas Hölzl

Standicherheit von Staudämmen

Grundlagen, Berechnungen und Beispiele

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

Standsicherheit von Staudämmen

Thomas Ferdinand Hölzl

Standicherheit von Staudämmen

Grundlagen, Berechnungen und Beispiele

Thomas Ferdinand Hölzl
Schiefling am Wörthersee
Kärnten, Österreich

ISBN 978-3-658-27815-1 ISBN 978-3-658-27816-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-27816-8>

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020, korrigierte Publikation 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Lektorat: Dr. Daniel Fröhlich

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Mit Standsicherheitsnachweisen an Staudämmen befasse ich mich seit 8 Jahren. Durch meine berufliche Tätigkeit in einem österreichischen Energieversorgungsunternehmen wurde ich im Jahr 2011 erstmalig mit der Materie vertraut gemacht und habe seither zahlreiche Standsicherheitsberechnungen an Staudämmen durchgeführt.

Diese Tätigkeit erweckte in mir großes Interesse für das gesamte Fachgebiet, sodass ich 2012 den Entschluss fasste, ein technisches Studium zu beginnen. Während meiner ganzen Studienzzeit an der TU Wien (Bachelor) und an der Universität für Bodenkultur in Wien (Master) habe ich die Schwerpunkte auf die Geotechnik und den konstruktiven Wasserbau gelegt.

Je mehr ich mich im Laufe der Jahre mit dem Dammbau beschäftigt habe, desto deutlicher wurde mir auch, wie komplex und umfangreich die Materie tatsächlich ist.

Da ich aber aus der Praxis in das Studium gekommen bin, war es mir ein großes Anliegen für meine Diplomarbeit über die Standsicherheitsberechnung von Staudämmen [23] gewesen, den roten Faden nie zu verlieren und eine möglichst praxisnahe Aufbereitung der theoretischen Grundlagen, im Sinne eines Nachschlagwerkes, zu erreichen.

Das vorliegende Werk gibt im Wesentlichen den Inhalt meiner Diplomarbeit wieder, wobei bei der Überarbeitung die Leserfreundlichkeit im Vordergrund stand und Untersuchungen durch praktische Beispiele mit anleitendem Charakter ersetzt wurden.

Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle bei Professor Wu und Professor Tschernutter, die mich bei der Arbeit betreut haben und mir mit ihrem Rat und Erfahrungsschatz zur Seite gestanden sind, sowie beim Springer Verlag, bei Herrn Dr. Fröhlich für die rasche und unkomplizierte Verwirklichung dieses Buchprojektes.

Für Diskussionen und Anregungen zum Inhalt stehe ich gerne zur Verfügung: thoelzl@gmx.net

Schiefling am Wörthersee
März 2019

Thomas Ferdinand Hölzl

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Begriffe	3
3	Grundlagen der Standsicherheitsberechnung	9
3.1	Aufbau einer Standsicherheitsuntersuchung.....	9
3.1.1	Geotechnisches Modell.....	9
3.1.2	Bemessung.....	11
3.1.3	Beurteilung der Standsicherheit.....	11
3.2	Normen und Richtlinien.....	12
3.2.1	Österreich.....	12
3.2.2	Deutschland.....	13
3.2.3	Schweiz.....	14
3.3	Sicherheitskonzepte.....	14
3.3.1	Unsicherheiten und deren Berücksichtigung durch Sicherheitskonzepte.....	16
3.3.2	Deterministisches Sicherheitskonzept.....	16
3.3.3	Semi-probabilistisches Sicherheitskonzept.....	17
3.3.4	Probabilistisches Sicherheitskonzept.....	17
3.3.5	Sensitivitätsanalyse.....	18
3.4	Bemessung nach Eurocode 7 – semi-probabilistisches Sicherheitskonzept.....	20
3.4.1	Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	20
3.4.2	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	23
3.4.3	Nachweisverfahren.....	24
3.4.4	Schadensfolgeklassen.....	25
3.4.5	Charakteristische Werte.....	26
3.4.6	Bemessungswerte.....	33

4	Bemessungssituationen und Teilsicherheitsbeiwerte	35
4.1	Bemessungssituationen	35
4.1.1	Regelung in Österreich	35
4.1.2	Regelung in Deutschland	38
4.2	Teilsicherheitsbeiwerte	44
4.2.1	Teilsicherheitsbeiwerte in Österreich	44
4.2.2	Teilsicherheitsbeiwerte in Deutschland	46
5	Einwirkungen und Widerstände	47
5.1	Einwirkungen	47
5.1.1	Ständige Einwirkungen	49
5.1.2	Veränderliche Einwirkungen	49
5.1.3	Wasserdrücke	51
5.1.4	Erdbebenlasten	52
5.2	Widerstände	55
5.2.1	Formulierung des Bruchkriteriums	56
5.2.2	Kohäsion	60
6	Versagensmechanismen an Staudämmen	63
6.1	Versagen durch Böschungsbruch	64
6.1.1	Rotationsförmiges Gleiten	65
6.1.2	Translation auf hangparalleler, ebener Gleitfläche	67
6.1.3	Translation auf ebenen Gleitflächen	67
6.1.4	Bruchmechanismen aus mehreren Gleitblöcken (Mehrkörpermechanismen)	67
6.2	Versagen durch mechanischen Grundbruch	68
6.2.1	Rotationsförmiges Gleiten im Damm und Untergrund	69
6.2.2	Grundbruch am Dammfuß	69
6.2.3	Zusammengesetzte Gleitflächen	70
6.3	Versagen durch Gleiten auf der Aufstandsfläche	70
6.3.1	Abgleiten des Dammes	70
6.3.2	Dammfußgleiten durch die Spreizwirkung	71
6.4	Versagen durch unzulässige Setzungen	71
6.5	Materialtransport durch die Strömungskraft des Wassers	72
6.5.1	Erosion	72
6.5.2	Suffosion	73
6.6	Versagen durch Bodenverflüssigung	74
6.6.1	Statische Bodenverflüssigung – Hydraulischer Grundbruch ...	74
6.6.2	Dynamische Bodenverflüssigung – Liquefaktion	75
6.7	Alterung und Frostsicherheit	77
6.7.1	Langzeitverhalten (insbesondere Langzeitscherfestigkeit)	77
6.7.2	Frostsicherheit (von Korngemischen)	77
6.8	Plastische Verformung durch Erdbebeneinwirkung	78

7	Berechnungsverfahren und Software	79
7.1	Einleitung	79
7.2	Rechnerischer Nachweis gegen hangparalleles Gleiten	81
7.2.1	Grundlagen	81
7.2.2	Lage der Nachweisstelle im homogenen Dammerschüttmaterial	83
7.2.3	Lastfälle mit Sickerwasser und Erdbeben	84
7.3	Nachweis gegen gleitkreisförmige Versagensmechanismen	90
7.3.1	Lamellenverfahren	90
7.3.2	Lamellenfreie Verfahren	103
7.4	Finite-Elemente-Methode für Standsicherheitsberechnungen (φ - c -Reduktion)	103
7.5	Berechnungsverfahren zur Berücksichtigung von Erdbebenbeanspruchungen	105
7.5.1	Pseudo-statische Methode	106
7.5.2	Dynamische Näherungsberechnung	106
7.6	Berechnungsverfahren für weitere Problemstellungen	108
7.6.1	Nachweis der Sicherheit gegen Gleiten in der Dammaufstandsfläche	108
7.6.2	Nachweis der Sicherheit gegen Dammfußgleiten durch Spreizwirkung	109
7.6.3	Nachweis der Sicherheit gegen Grundbruch am Dammfuß	109
7.6.4	Verfahren zur Sickerströmungsberechnung	110
7.6.5	Spannungs- und Verformungsnachweise	111
7.6.6	Berechnungsverfahren zur Untersuchung von Mehrkörpermechanismen	111
7.7	Software	112
8	Unsicherheiten bei dammstatischen Nachweisen	115
8.1	Unsicherheiten	115
8.2	Mögliche Einwirkungen jenseits der Bemessungsannahmen	116
9	Berechnungsbeispiel	119
9.1	Geotechnisches Modell	119
9.1.1	Untergrund	119
9.1.2	Dammaufbau	120
9.1.3	Bodenkennwerte	121
9.1.4	Einwirkungen	124
9.2	Sickerströmungsberechnung	127
9.2.1	Variante 1 – Staudamm mit Oberflächenabdichtung	127
9.2.2	Variante 2 – Staudamm mit Innenkernabdichtung	128

9.3	Nachweis gegen hangparalleles Gleiten (GZT: GEO-3)	129
9.3.1	Luftseite	129
9.3.2	Wasserseite – Variante 1.	131
9.3.3	Wasserseite – Variante 2.	133
9.4	Nachweis der Böschungsstabilität (GZT: GEO-3)	136
9.4.1	Variante 1 – Staudamm mit Oberflächenabdichtung	136
9.4.2	Variante 2 – Staudamm mit Innenkernabdichtung.	142
9.5	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse.	148
9.6	Weitere in Betracht zu ziehende Nachweise	149
10	Parameterstudien	151
10.1	Reibungswinkel φ und Kohäsion c	151
10.2	Wichte γ	154
10.3	Gleitkreiseinschnittstiefe y des maßgebenden Gleitkreises.	155
10.4	Dammhöhe h	157
10.5	Erdbebeneinwirkung a_h/a_v	159
10.6	Lage des Stauwasserspiegels	160
11	Regelneigung für Staudämme	163
11.1	Grundlagen zur Diagrammerstellung.	163
11.2	Anleitung	166
11.3	Diagramme.	169
11.3.1	Kohäsion $c'_k = 0 \text{ kN/m}^2$, Diagramm für alle Dammhöhen gleich	169
11.3.2	Bis 10 m Dammhöhe, Kohäsion $c'_k = 5 \text{ kN/m}^2$	170
11.3.3	Bis 10 m Dammhöhe, Kohäsion $c'_k = 10 \text{ kN/m}^2$	171
11.3.4	10 m bis 30 m Dammhöhe, Kohäsion $c'_k = 5 \text{ kN/m}^2$	172
11.3.5	10 m bis 30 m Dammhöhe, Kohäsion $c'_k = 10 \text{ kN/m}^2$	174
11.3.6	30 m bis 80 m Dammhöhe, Kohäsion $c'_k = 5 \text{ kN/m}^2$	175
11.3.7	30 m bis 80 m Dammhöhe, Kohäsion $c'_k = 10 \text{ kN/m}^2$	176
12	Ausblick und Empfehlungen	177
12.1	Regulatorischer Ausblick.	177
12.2	Staudammspezifischer Ausblick und Empfehlungen.	178
	Erratum zu: Berechnungsbeispiel	E1
	Formelzeichen	183
	Literatur	187
	Stichwortverzeichnis	195

Staudämme sind komplexe Bauwerke mit großem Gefährdungspotenzial. Die Sicherheitsanforderungen sind dementsprechend hoch.

Zur Standsicherheitsberechnung von Staudämmen gibt es in Österreich und in Deutschland eine Vielzahl an Richtlinien und Normen, die zu beachten sind, mit teilweise unterschiedlichem Stand der Technik und Detaillierungsgrad. Auch in der Literatur sind markante Hinweise zur Standsicherheitsberechnung von Staudämmen zu finden.

In dieser Arbeit werden die aktuellen Bemessungsansätze zusammengefasst und theoretisch, im Sinne eines Nachschlagwerkes aufbereitet (Kap. 2, 3, 4, 5, 6, 7, und 8). In Kap. 9 wird die praktische Vorgehensweise an einem Beispiel veranschaulicht.

Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Bemessung nach dem Teilsicherheitskonzept gemäß Eurocode 7. In Deutschland wurde im Juli 2017 das Merkblatt DWA-M 542 [98] erlassen, welches das Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten für Staudämme regelt. Die in Überarbeitung befindliche österreichische Richtlinie zum Nachweis der Standsicherheit von Staudämmen [127] wird ebenfalls um das Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten erweitert. Für die Untersuchung der Böschungstabilität von Dämmen ist in Österreich bereits die ÖNORM B 1997-1-5 [104] anzuwenden.

In Kap. 10 werden darüber hinaus Zusammenhänge verschiedener Parameter bei der Standsicherheitsberechnung von Dämmen veranschaulicht, wobei auf die dort beschriebenen Modellannahmen zu achten ist.

Kap. 11 enthält Diagramme mit denen die Möglichkeit geschaffen wird, Regelsneigungen von Staudämmen bzw. die erforderlichen Festigkeitsparameter des Dammschüttmaterials bei vorgegebener Böschungssneigung unter Berücksichtigung des Erdbebenlastfalls, abzuschätzen.

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Begriffe rund um das Thema der Standsicherheit von Staudämmen definiert.

Talsperre Eine Talsperre ist eine Stauanlage bzw. ein Bauwerk, das über den Querschnitt eines Wasserlaufes hinaus den ganzen Talquerschnitt absperrt. Eine Talsperre kann als Staumauer (Gewichtsstaumauer, Bogenstaumauer, Pfeilerstaumauer) oder als Staudamm ausgeführt sein [59].

Staudamm Ein Staudamm ist eine Talsperre, welche aus Erdbaustoffen oder gebrochenem Felsgestein in Lagen angeschüttet und verdichtet wird. Unterschieden werden (nach *Striegler* [53], S. 20):

- Erddämme, die vorwiegend mit Dammschüttmaterialien aus Lockergestein hergestellt werden, welches grundsätzlich aus den Kornbestandteilen Ton, Schluff, Sand und Kies zusammengesetzt ist,
- Steinschüttdämme, die vorwiegend aus gebrochenem Felsgestein (z. B. Stollenausbruchmaterial) angeschüttet werden, welches aus Kieskorn, Steinen und Blöcken zusammengesetzt ist.

Eine weitere Unterscheidung erfolgt je nach Dammaufbau in [59]:

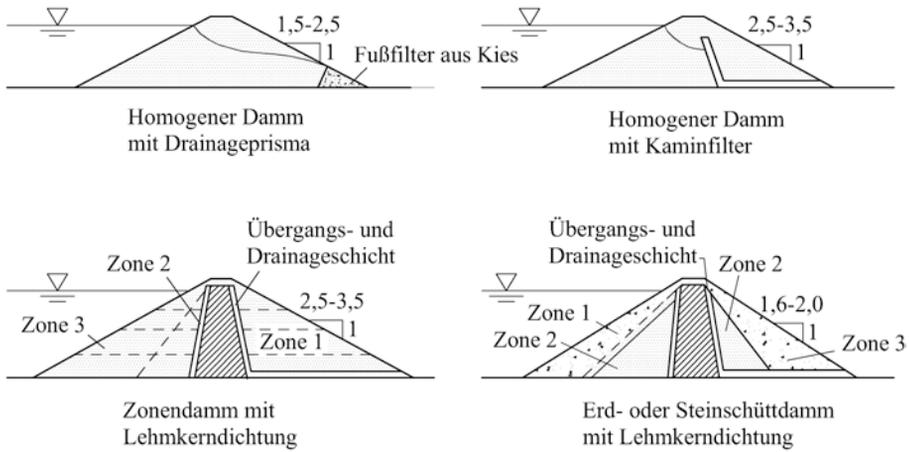
- homogene Dämme,
- gegliederte Dämme (Zonendämme),

und je nach Lage der Dichtung in:

- Dämme mit Außendichtung,
- Dämme mit Innendichtung.

Unterschiedliche Ausführungen werden in Abb. 2.1 beispielhaft veranschaulicht.

Erd- und Steinschüttdämme



Steinschüttdämme

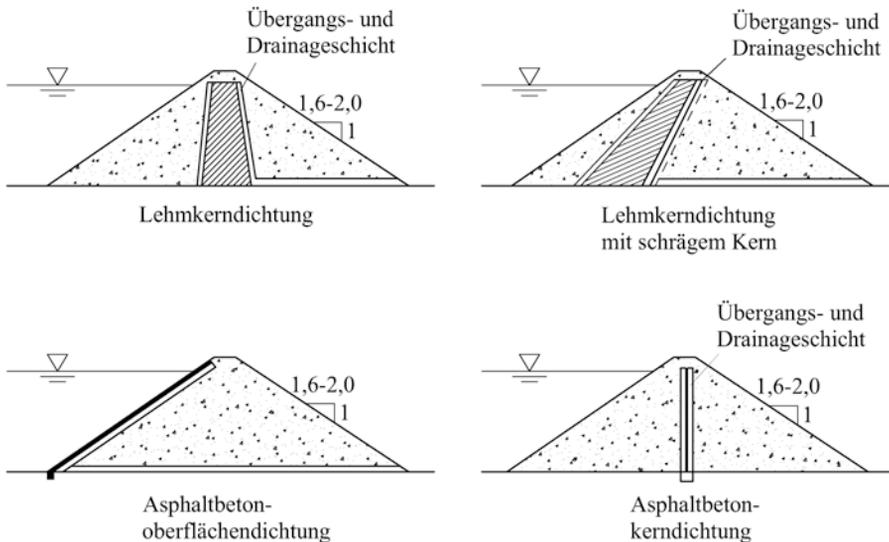


Abb. 2.1 Prinzipskizzen verschiedener Dammtypen von Erd- und Steinschüttdämmen. (Adaptiert nach [54])

Bemessung Mit der Bemessung (bzw. im Zuge der Vorbemessung) erfolgt die Festlegung der Geometrie und der Konstruktionsart des Dammes mit den zur Verfügung stehenden Dammschüttmaterialien, insbesondere muss auch die Lage der Dammabdichtung festgelegt werden. Auch die Wirkung spezieller Maßnahmen, wie z. B. Untergrundverbesserungsmaßnahmen, wird mit einer Bemessung untersucht. Mit der Bemessung wird nachgewiesen, dass der Entwurf eines Dammes, unter Berücksichtigung aller möglichen Einwirkungen, bei gegebenen bodenmechanischen Eigenschaften der Materialien und unter Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten in allen Bemessungssituationen standsicher ist, also maßgebende Grenzzustände nicht überschritten werden (in Anlehnung an EN 1990 [109], 1.5.2.2).

Nach EN 1997-1 ([116], 2.1 (4)) kann eine Bemessung grundsätzlich erfolgen durch:

- eine Berechnung,
- die Anwendung anerkannter Regelwerke,
- Probelastungen und Modellversuche,
- die Beobachtungsmethode.

Beim Entwurf von Staudämmen ist eine Bemessung durch Berechnung immer zu führen.

Berechnung Dazu zählen alle rechnerischen Nachweise, die erforderlich sind, um in jeder Bemessungssituation nachweisen zu können, dass kein maßgebender Grenzzustand überschritten wird. Eine Bemessung durch Berechnung umfasst gemäß EN 1997-1 ([116], 2.4):

- *Einwirkungen, entweder als äußere Kräfte oder als eingeprägte Verschiebungen, z. B. durch Bewegungen im Baugrund;*
- *Eigenschaften der Böden, Gesteine und anderer Materialien;*
- *geometrische Angaben;*
- *Grenzwerte für Verformungen, Rissweiten, Schwingungen usw.;*
- *Rechenmodelle, wie z. B. analytische, halbempirische oder numerische Verfahren* ([116], 2.4.1 (5))

Nachweis oder Standsicherheitsnachweis Beim Nachweis werden die Auswirkungen der Einwirkungen (Beanspruchung E), in einem betrachteten Versagensmechanismus, der zugehörigen Tragfähigkeit der Materialien (Widerstand R) gegenübergestellt. Es muss dabei nachgewiesen werden, dass die Tragfähigkeit größer ist als die Auswirkungen der Einwirkungen ([109], 6.4.2). In diesem Fall ist die Standsicherheit für einen Nachweis gegeben. Bei einer Gleitkreisuntersuchung (ein Berechnungsverfahren gemäß Kap. 7) ist beispielsweise für jeden möglichen bzw. denkbaren Gleitkreis, in jeder Bemessungssituation und im jeweiligen Lastfall, ein Nachweis zu führen.

Gesamtstandsicherheit Ist die Sicherheit gegen Versagen (Bruchzustand) des Dammbauwerkes, infolge einer Überschreitung der Scherfestigkeit des Dammschüttmaterials (Böschungsbruch) und eventuell jener des Untergrundes (Grundbruch). Die Gesamtstandsicherheit kann als Ausnutzungsgrad ausgedrückt werden. Bei der Ermittlung der Gesamtstandsicherheit bestimmt der jeweilige Versagensmechanismus das Rechenmodell ([104], 3.6).

Stand sicherheitsberechnung Zur Stand sicherheitsberechnung zählen alle Nachweise, die nach dem Stand der Technik zu führen sind, um die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Dammbauwerkes in jeder Bemessungssituation nachweisen zu können.

Stand sicherheitsuntersuchung In einer Stand sicherheitsuntersuchung werden alle Ergebnisse der Stand sicherheitsberechnung zusammengefasst und beurteilt. Darüber hinaus sollte eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden.

In der Praxis wird häufig der Begriff „Stand sicherheitsberechnung“ als Synonym verwendet.

Stand sicherheitsbericht In einem Stand sicherheitsbericht werden alle Eingangsdaten, die getroffenen Annahmen und sonstigen Festlegungen beschrieben und entsprechend begründet. Die in der Berechnung angesetzten bodenphysikalischen Eigenschaften werden durch Feld- und Laborversuchsergebnisse untermauert. Die Grundlage einer Stand sicherheitsberechnung stellt das zu beschreibende Geotechnische Modell dar, mit allen geometrischen Angaben, wie z. B. die Schichtung des Untergrundes, der Grundwasserspiegel und der Aufbau des Dammbauwerkes selbst, sowie die geotechnischen Kenngrößen jeder einzelnen Zone. Des Weiteren erfolgt die Beschreibung aller maßgebenden Einwirkungen auf das Dammbauwerk mit Zuordnung zur jeweiligen Bemessungssituation sowie die Beschreibung möglicher Versagensmechanismen und mit welchen Rechenverfahren der Nachweis geführt wird. Nach Durchführung der Stand sicherheitsberechnung bzw. Stand sicherheitsuntersuchung werden die Ergebnisse in der Regel tabellarisch zusammengefasst und abschließend beurteilt.

Bemessungssituation Eine Bemessungssituation gemäß EN 1990 ([109], 1.5.2.2) ist wie folgt definiert: *eine Reihe von physikalischen Bedingungen, ersatzweise für die wirklichen Bedingungen innerhalb eines bestimmten Zeitabschnitts angenommen werden kann, für die die Tragwerksplanung nachweist, dass maßgebende Grenzzustände nicht überschritten werden.* Innerhalb einer Bemessungssituation sind kritische Lastfälle festzulegen [26].

Lastfallklasse Dieser Begriff wurde in früheren Normen und Richtlinien verwendet (z. B. in [127], 2.3) und hat dieselbe Bedeutung wie die Bemessungssituation.

Sensitivitätsanalyse Mit einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Unsicherheiten bzw. der Variabilität von Basisvariablen auf die Standsicherheit eines Staudammes untersucht. Auf diese Weise können Parameter identifiziert werden, durch deren Streuung die Standsicherheit maßgeblich beeinflusst wird (nach [71]). Geotechnische Kenngrößen sind oft unzureichend bekannt oder können auch stark streuen. Solche Effekte können mit der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Es gibt auch entsprechende Software, mit der die Sensitivitätsanalyse einfach durchgeführt werden kann.

Aber auch die Berücksichtigung möglicher Schadstellen fällt unter den Begriff „Sensitivitätsanalyse“ ([127], 2.3).

Die Sensitivitätsanalyse wird auch in Abschn. 3.3.5 behandelt.

Grundlagen der Stand sicherheitsberechnung

3

3.1 Aufbau einer Stand sicherheitsuntersuchung

Eine Stand sicherheitsuntersuchung kann grundsätzlich in 3 Abschnitte gegliedert werden. Der erste Abschnitt befasst sich mit der Erstellung des Geotechnischen Modells und stellt damit die Grundlage der Stand sicherheitsberechnung dar. Im 2. Abschnitt erfolgt die Bemessung des Dammbauwerkes mit ausgewählten Berechnungsverfahren, welche maßgebende Versagensmechanismen modellhaft nachbilden. In der Bemessung werden auch Unsicherheiten, die sich aus den Annahmen im Geotechnischen Modell ergeben, berücksichtigt, z. B. streuende Bodenparameter. Welchen Einfluss Unsicherheiten auf die Stand sicherheit haben können, kann mit einer Sensitivitätsanalyse genauer untersucht werden. Im 3. Abschnitt erfolgt die Beurteilung der Bemessungsergebnisse. Die Stand sicherheit des Bauwerkes wird im Gesamten beurteilt und kritische Lastfälle werden aufgezeigt. Es wird auch auf wesentliche Annahmen im Geotechnischen Modell und auf die daraus resultierenden Unsicherheiten eingegangen, sowie auf die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse.

3.1.1 Geotechnisches Modell

In der ÖNORM B 1997-1-5 ([104], 6) wird das Geotechnische Modell wie folgt definiert: *Ein Geotechnisches Modell beschreibt die Geometrie eines vereinfachten Schichtaufbaus und die charakteristischen Kenngrößen der einzelnen Baugrundsichten. Bei Erstellung des Geotechnischen Modells ist auch der Zusammenhang zwischen den möglichen Versagensmechanismen und dem vorgesehenen Berechnungsverfahren zu berücksichtigen.*

Jedes Dammbauprojekt hat unterschiedlichste Rahmenbedingungen die es zu beachten gilt. Besonderes Augenmerk muss dabei auf folgende 3 Bereiche gerichtet sein (in Anlehnung an ÖNORM B 1997-1-5, [104], 5):

- **Untergrund:** Wie ist der Untergrund aufgebaut (Schichtung, Störungen, Trennflächengefüge, Grundwasserstände, usw.)? Welche boden- bzw. felsmechanischen Eigenschaften hat der Untergrund (Scherparameter, Durchlässigkeit, Lagerungsdichte, Porenanteil, Setzungsverhalten, usw.)? Untergrundabdichtung?
- **Dammaufbau:** Wie ist der Damm zониert (Geometrie) und welche bodenmechanischen und bodenphysikalischen Eigenschaften weisen die einzelnen Zonen auf (Kornverteilung, Scherparameter, Lagerungsdichte, Porenanteil, Feuchtwichte, Durchlässigkeit, usw.)? Welche Funktionen übernehmen die einzelnen Dammmzonen (Trag-, Dicht-, Brems-, Filterfunktion, usw.)?
- **Einwirkungen:** Welche Einwirkungen sind zu erwarten (Eigenlasten, Verkehrslasten, Erdbeben, Stoß-Anprall, Wasserlasten – Lage des Stauziels und Hochwassersituation, Strömungskräfte im Damm und Untergrund, Witterungseinflüsse, Eisdruck, Wellenschlag, militärische Angriffe, usw.)?

Die sich aus den oben angeführten Fragen ergebenden Informationen, stellen ein Minimum an Parametern dar, um ein Geotechnisches Modell erstellen zu können und um in weiterer Folge eine Standsicherheitsberechnung durchführen zu können. In frühen Planungsstadien sind jedoch meist nicht alle Parameter bekannt, hierzu müssen konservative Annahmen getroffen werden, die im weiteren Projektverlauf überprüft werden müssen, um deren Einhaltung sicherzustellen. Ergeben sich Bedingungen, sodass die Einhaltung von getroffenen Annahmen nicht möglich ist, muss die Standsicherheitsberechnung neu durchgeführt werden und gegebenenfalls sind Änderungen am projektierten Damm vorzunehmen, z. B. die Gestaltung von flacheren Dammeigungen.

Wurden alle erforderlichen Informationen zusammengetragen, muss untersucht werden, welche möglichen Versagensmechanismen im Modell auftreten könnten. Für jeden denkbaren Versagensmechanismus muss ein Nachweis erbracht werden.

Das Geotechnische Modell wird grafisch dargestellt und dient als Grundlage für alle weiteren Berechnungen ([104], 6).

In der Praxis wird die Standsicherheit anhand zweidimensionaler Modelle untersucht. Numerische Berechnungen werden zunehmend auch an dreidimensionalen Modellen durchgeführt. Wird ein zweidimensionales Modell angewendet, ist darauf zu achten, dass der maßgebende Dammmquerschnitt betrachtet wird. Der höchste Dammmquerschnitt ist nicht zwingendermaßen auch der ungünstigste Querschnitt. Besonderen Einfluss haben, bei der Wahl des maßgebenden Querschnitts, die Neigung der Dammaufstandsfläche und die Untergrundbeschaffenheit ([42], S. 409). Ist die Untergrundbeschaffenheit über den Talquerschnitt veränderlich, kann es auch erforderlich sein, mehrere zweidimensionale Querschnitte zu untersuchen.

3.1.2 Bemessung

Für jede geotechnische Bemessungssituation (siehe dazu Abschn. 4.1) muss nachgewiesen werden, dass kein maßgebender Grenzzustand überschritten wird ([19], S. 17). Die EN 1997-1 ([116], 2.4, 2.5, 2.6 und 2.7) gibt hierfür folgende Verfahren vor:

- rechnerische Nachweise,
- Anwendung anerkannter Tabellenwerte,
- Probelastungen und Modellversuche und
- Beobachtungsmethode.

Im Staudambau ist für die Bemessung ein rechnerischer Nachweis immer zu führen. Tabellenwerte werden hierbei in der Regel nicht angewendet. Probelastungen und Modellversuche sind ebenfalls zielführend, um spezielle Problemstellungen zu untersuchen, z. B. die Überströmungssicherheit von Staudämmen, usw. Die Beobachtungsmethode kommt jedenfalls zur Anwendung, um das Verhalten des Dammbauwerkes und der Umgebung während der Bauausführung zu überwachen. Die Überwachungseinrichtungen werden bei Staudämmen in der Regel in weiterer Folge kontinuierlich betrieben, um die Talsperrensicherheit während des Betriebes zu gewährleisten.

Die Beobachtungsmethode dient zumeist auch für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit, aber auch der Tragfähigkeit ([104], 9).

Den rechnerischen Nachweisen werden Berechnungsverfahren zugrunde gelegt, welche die möglichen Versagensmechanismen, so wie sie in der Natur auftreten, modellhaft nachbilden. Die Berechnungsverfahren werden in Kap. 7 weitergehend erläutert.

3.1.3 Beurteilung der Standsicherheit

Mit der Beurteilung wird eine Standsicherheitsuntersuchung abgeschlossen. Die Ausgestaltung dieses Abschnittes obliegt im Grunde dem planenden Ingenieur und der konkreten Aufgabenstellung. Dieser Abschnitt sollte grundsätzlich eine übersichtliche Zusammenfassung des Standsicherheitsberichts enthalten und zumindest folgende Punkte behandeln:

- Formulierung der Aufgabenstellung.
- Eine übersichtliche Darstellung der Berechnungsergebnisse, unter Angabe des jeweils angewendeten Rechenverfahrens.
- Besonderheiten bzw. auch Unsicherheiten, die sich aus den Annahmen im Geotechnischen Modell ergeben, sollen zusammengefasst nochmals beschrieben werden.
- Kritische Lastfälle sollen aufgezeigt werden.
- Abschließende Beurteilung der Standsicherheit und gegebenenfalls das Anführen von Maßnahmen zur Erhöhung der Standsicherheit.

3.2 Normen und Richtlinien

Es gibt zahlreiche Regelwerke im Bereich der Geotechnik und des Wasserbaus mit Relevanz für Standsicherheitsnachweise. In den folgenden Abschnitten werden wichtige Regelwerke aus Österreich, Deutschland und der Schweiz angeführt, die bei der Standsicherheitsberechnung von Staudämmen jedenfalls zu beachten sind. Im Einzelfall ist zu prüfen, ob darüber hinaus weitere Regelwerke anzuwenden sind.

3.2.1 Österreich

In Österreich ist ein Gutachten der Staubeckenkommission dann einzuholen, wenn die höchste Dammerhöhung mehr als 15 m über der Gründungssohle liegt oder das gespeicherte Wasservolumen 500.000 m^3 übersteigt ([97], 2.1). Darüber hinaus sind für Dämme im Wasserbau die folgenden Richtlinien der Staubeckenkommission zusätzlich zu den Normen und anderen Regelwerken anzuwenden:

- Richtlinie zum Nachweis der Standsicherheit von Staudämmen, 1996 [127]
- Richtlinie zur Erdbebenberechnung von Talsperren; Band 1–6 [90–95]
- Leitfaden zur Vorlage eines Projektes für die Prüfung in der Staubeckenkommission [97]
- Leitfaden zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperren [96]

Überarbeitungen einzelner Richtlinien sind jedoch in Planung, da das Teilsicherheitskonzept noch nicht berücksichtigt ist.

Darüber hinaus sind folgende Normen zu beachten:

- ÖNORM B 4433: Erd- und Grundbau – Böschungsbruchberechnung [106], diese Norm wurde zwar bereits zurückgezogen, jedoch wird in der noch gültigen Richtlinie der Staubeckenkommission [127] auf diese Norm verwiesen. Das Nachfolgedokument ist das Folgende:
- ÖNORM B 1997-1-5: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1–5: Gesamtstandsicherheit von Böschungen, Hängen und Geländesprüngen [104]
- des Weiteren sind die Eurocodes anzuwenden, speziell die Normen:
 - Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung [109], nach dem Teilsicherheitskonzept
 - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke [110–115]. Auf die einzelnen Einwirkungen auf Dammbauwerke wird in Abschn. 5.1 genauer eingegangen.
 - Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik [103, 104, 116, 117]
 - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben [105, 118, 119]

- Auf internationaler Ebene gibt es auch Regelwerke der „International commission on large dams (ICOLD)“: In der Publikationsreihe „Bulletins“ werden laufend Regelwerke zur Herstellung, Berechnung und Überprüfung von Erd- und Steinschüttdämmen veröffentlicht. Eine Auswahl wichtiger Regelwerke für den Dammbau ist im Folgenden aufgelistet:
 - Bulletin 53: Static analysis of embankment dams [75]
 - Bulletin 59: Dam safety – Guidelines [76]
 - Bulletin 91: Embankment dams. Upstream slope protection – Review and recommendations [77]
 - Bulletin 92: Rock materials for rockfill dams – Review and recommendations [78]
 - Bulletin 95: Embankment dams – Granular filters and drains [79]
 - Bulletin 155: Guidelines for use of numerical models in dam Engineering [80]

3.2.2 Deutschland

Für Planung, Bau, Betrieb und Überwachung von Stauanlagen und Talsperren sind in Deutschland die folgenden Normen anzuwenden:

- DIN 19700-10: Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen [86]
- DIN 19700-11: Stauanlagen – Teil 11: Talsperren [87]

Ebenfalls sind die Eurocodes anzuwenden. Im Bereich der Geotechnik sind dies die Normen:

- DIN EN 1997-1: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln [82] in Verbindung mit dem Nationalen Anhang [83]
- Ergänzende Regelungen zum Eurocode 7 sind enthalten in der DIN 1054 [81]: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1
- Für den rechnerischen Nachweis der Gesamtstandsicherheit ist zudem die DIN 4084 Baugrund – Geländebruchberechnungen [84] anzuwenden.

Darüber hinaus gibt es auch folgende Merkblätter zum Thema der Standsicherheitsberechnung von Staudämmen:

- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: Merkblatt DWA-M 542: Nachweiskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten für Staudämme und Staumauern [98]
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: ATV-DVWK Merkblatt M 502: Berechnungsverfahren für Staudämme Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund [73]

- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) – Merkblatt: Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD) [99]

Von Interesse ist auch der Themenband der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: Stauanlagensicherheit und Folgen bei Überschreitung der Bemessungsannahmen nach DIN 19700 [88].

Die Regelwerke der ICOLD sind auch in Deutschland anzuwenden.

Es ist auch zu prüfen, ob bundesländerspezifische Regelwerke vorliegen, wie z. B. in Baden-Württemberg die Arbeitshilfe zum Nachweis der Erdbebensicherheit von Talsperren und Hochwasserrückhaltebecken [101], usw.

3.2.3 Schweiz

Das Bundesamt für Energie BFE ist in der Schweiz die Aufsichtsbehörde des Bundes über die Sicherheit der Stauanlagen. Die Sektion Aufsicht Talsperren des BFE ist für die großen Anlagen zuständig.

Das Bundesamt für Energie hat sieben Richtlinien über die Sicherheit der Stauanlagen erlassen:

- Teil A: Allgemeines [120]
- Teil B: Besonderes Gefährdungspotenzial als Unterstellungskriterium [121]
- Teil C1: Planung und Bau [122]
- Teil C2: Hochwassersicherheit und Stauseeabsenkung [123]
- Teil C3: Erdbebensicherheit [124]
- Teil D: Inbetriebnahme und Betrieb [125]
- Teil E: Notfallkonzept [126]

3.3 Sicherheitskonzepte

Das deterministische Sicherheitskonzept (globale Sicherheitskonzept) wurde im Zuge der Einführung des Eurocodes [109] vom semi-probabilistischen Sicherheitskonzept (dem Teilsicherheitskonzept) abgelöst.

In Österreich gilt für den Nachweis der Standsicherheit von Staudämmen bis dato die Richtlinie der österreichischen Staubeckenkommission aus dem Jahr 1996 [127]. Das Teilsicherheitskonzept wurde in dieser Richtlinie noch nicht berücksichtigt, eine Überarbeitung ist jedoch bereits geplant. Die anzuwendenden Teilsicherheitsbeiwerte werden durch die nationalen Anhänge zur Eurocode vorgegeben (siehe [103, 104]).

In Deutschland werden in der DIN 19700-11 ([87], 7.1.2.1) globale Mindestsicherheiten angegeben. Die Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes wurde aber bei der