



Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen

Teil C3: Erdbebensicherheit

Die letzte Fassung ersetzt die früheren Fassungen

Version	Abänderung	Datum
2.0	Totalrevision der BWG Richtlinie 2002 und des Basisdokuments zur Erdbebensicherheit von März 2003	1.2.2016



Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Energie, Sektion Aufsicht Talsperren, 3003 Bern

Erarbeitung

Arbeitsgruppe Revision Richtlinie Teil C3 "Erdbebensicherheit":

- P. Brenner, Weinfelden
- D. Fäh, Schweizerischer Erdbebendienst SED
- S. Malla, Axpo Power AG
- P. Oberhuber, VERBUND Hydro Power GmbH
- R. Panduri, Bundesamt für Energie BFE
- R. Radogna, Ofima SA
- M. Schwager, Bundesamt für Energie BFE
- T. Weber, STUDER ENGINEERING GmbH
- M. Wieland, Vorsitz ICOLD Erdbebenkomitee

Abnahme

Kerngruppe Revision Richtlinie:

- A. Baumer, Schweizerisches Talsperrenkomitee STK
- R. Boes, ETH Zürich, Institut für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW
- G. Darbre, Bundesamt für Energie BFE
- S. Gerber, Bundesamt für Energie BFE
- H. Meusburger, Konferenz der kantonalen Bau-, Planungs- und Umweltdirektoren BPUK
- T. Oswald, Bundesamt für Energie BFE
- B. Otto, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband SWV
- R. Panduri, Bundesamt für Energie BFE
- M. Perraudin, Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE
- A. Schleiss, EPF Lausanne, Labor für Wasserbau LCH
- A. Truffer, Konferenz der kantonalen Energiedirektoren EnDK

Durch die Geschäftsleitung des BFE am 1. Dezember 2015 verabschiedet.

Datum

Ersterscheinung (Version 2.0): 1. Februar 2016



Inhaltsverzeichnis Teil C3

1. Einleitung.....	4
1.1. Notwendigkeit eines Erdbebensicherheitsnachweises	4
1.2. Vereinfachte Erdbebensicherheitsnachweise für kleinere Stauanlagen.....	4
2. Verhaltensziele und Nachweise	4
2.1. Allgemeines Verhaltensziel für die Stauanlage	4
2.2. Verhaltensziele für Nebenanlagen	5
2.3. Verhaltensziele für den Stauraum	5
3. Stauanlagenklassen.....	5
3.1. Allgemeine Einteilung in Stauanlagenklassen	5
3.2. Stauanlagen zum Schutz vor Naturgefahren.....	6
3.3. Stauhaltungsdämme von Flusstauhaltungen.....	6
4. Einwirkungen	7
4.1. Allgemeines	7
4.2. Erdbebeneinwirkung	7
4.3. Anmerkungen für Mauern und Wehre	7
4.4. Anmerkungen für Dämme	7
5. Materialkennwerte.....	8
5.1. Allgemeines	8
5.2. Anmerkungen für Mauern und Wehre	8
5.3. Anmerkungen für Dämme	9
6. Nachweismethodik.....	10
6.1. Allgemeines	10
6.2. Anmerkungen für Gewichtsmauern und Wehre.....	11
6.3. Anmerkungen für Bogenmauern	13
6.4. Anmerkungen für Dämme	15
7. Besonderheiten und Ausnahmen	16
7.1. Vereinfachter Erdbebensicherheitsnachweis für kleinere Gewichtsmauern.....	16
7.2. Vereinfachter Erdbebensicherheitsnachweis für kleinere Dämme.....	17
7.3. Sicherheit nach dem Erdbeben	19
7.4. Aktive Verwerfungen	19
8. Zusammenstellung der klassenspezifischen Anforderungen	20
9. Literaturhinweise.....	21



1. Einleitung

1.1. Notwendigkeit eines Erdbebensicherheitsnachweises

Ein Erdbebensicherheitsnachweis ist für alle Stauanlagen notwendig, insbesondere:

- bei Neu- oder Umbauten im Rahmen eines Plangenehmigungsverfahrens;
- für bestehende Stauanlagen, wenn noch kein Erdbebensicherheitsnachweis vorliegt;
- wenn dies zur Berücksichtigung von Änderungen des Standes von Wissenschaft und Technik notwendig ist;
- wenn dies zur Berücksichtigung von Änderungen der Annahmen eines vorgängigen Erdbebensicherheitsnachweises notwendig ist.

Die bisher gemäss den Methodiken im Basisdokument zum Nachweis der Erdbebensicherheit [BWG, 2003a] erfolgreich erbrachten Nachweise gelten auch unter den Anforderungen in diesem Richtlinienenteil als erbracht.

1.2. Vereinfachte Erdbebensicherheitsnachweise für kleinere Stauanlagen

Sind die Voraussetzungen gemäss Abschnitt 7.1 oder 7.2 erfüllt, so darf der Erdbebensicherheitsnachweis für die Absperrbauwerke von kleineren Stauanlagen diesen Abschnitten entsprechend in vereinfachter Form geführt werden.

2. Verhaltensziele und Nachweise

2.1. Allgemeines Verhaltensziel für die Stauanlage

Das Ziel des Erdbebensicherheitsnachweises einer Stauanlage ist darzulegen, dass infolge Erdbebeneinwirkung ein Versagen der Anlage, welches zu einem unkontrollierten Wasserfluss führt, ausgeschlossen werden kann.

Schäden wie auch bleibende Verformungen, welche die Sicherheit der Stauanlage nicht gefährden, sind zulässig.

Die anzusetzende Erdbebeneinwirkung ist in Abschnitt 4.2 präzisiert.

Die Erhaltung der Betriebstüchtigkeit der Stauanlage nach dem Erdbeben ist kein Verhaltensziel im Sinne der Stauanlagensicherheit.



2.2. Verhaltensziele für Nebenanlagen

Zur Erfüllung des Verhaltensziels der Stauanlage unter Erdbebeneinwirkung ist bezüglich der Erdbebensicherheit der sicherheitsrelevanten Nebenanlagen aufzuzeigen:

- dass die Ablass- und Entlastungsorgane nicht derart strukturell beschädigt werden, dass sich ein unkontrollierter Wasserausfluss ereignen kann;
- wie unmittelbar nach dem Erdbeben mit Hilfe der Ablass- und Entlastungsorgane oder auf andere Weise die Entleerung des Stauraums sowie die Ableitung eines verminderten Zuflusses (Definition gemäss Teil C2¹⁾, Hochwassersicherheit) noch möglich ist;
- dass die Funktionstüchtigkeit der Instrumentierung, welche für die Erkennung eines drohenden Versagens unerlässlich ist, nach der Erdbebeneinwirkung erhalten bleibt oder rasch wiederhergestellt werden kann; die Identifikation dieser Instrumentierung ist Teil des Erdbebensicherheitsnachweises.

Das Verhalten von weiteren Nebenanlagen (z.B. Wasserentnahmen) ist in die Überlegungen einzubeziehen, sofern das Versagen dieser Nebenanlagen unter Erdbebeneinwirkung die Sicherheit der Stauanlage beeinträchtigen könnte.

2.3. Verhaltensziele für den Stauraum

Zur Erfüllung des Verhaltensziels der Stauanlage unter Erdbebeneinwirkung ist aufzuzeigen, dass infolge potentieller Massenbewegungen im Bereich des Stauraums die Sicherheit des Absperrbauwerks, der sicherheitsrelevanten Nebenanlagen und der Unterlieger (infolge überschwappenden Wassermassen) nicht beeinträchtigt ist.

Als potentielle Massenbewegungen sind insbesondere Hangrutschungen, das Abgleiten von instabilen Uferzonen, Felsstürze, Blockstürze und Gletscherabbrüche zu betrachten.

3. Stauanlagenklassen

3.1. Allgemeine Einteilung in Stauanlagenklassen

Die einzelnen Stauanlagen werden zum Zweck der Überprüfung der Erdbebensicherheit in drei Klassen eingeteilt, an welche unterschiedliche Anforderungen gestellt werden.

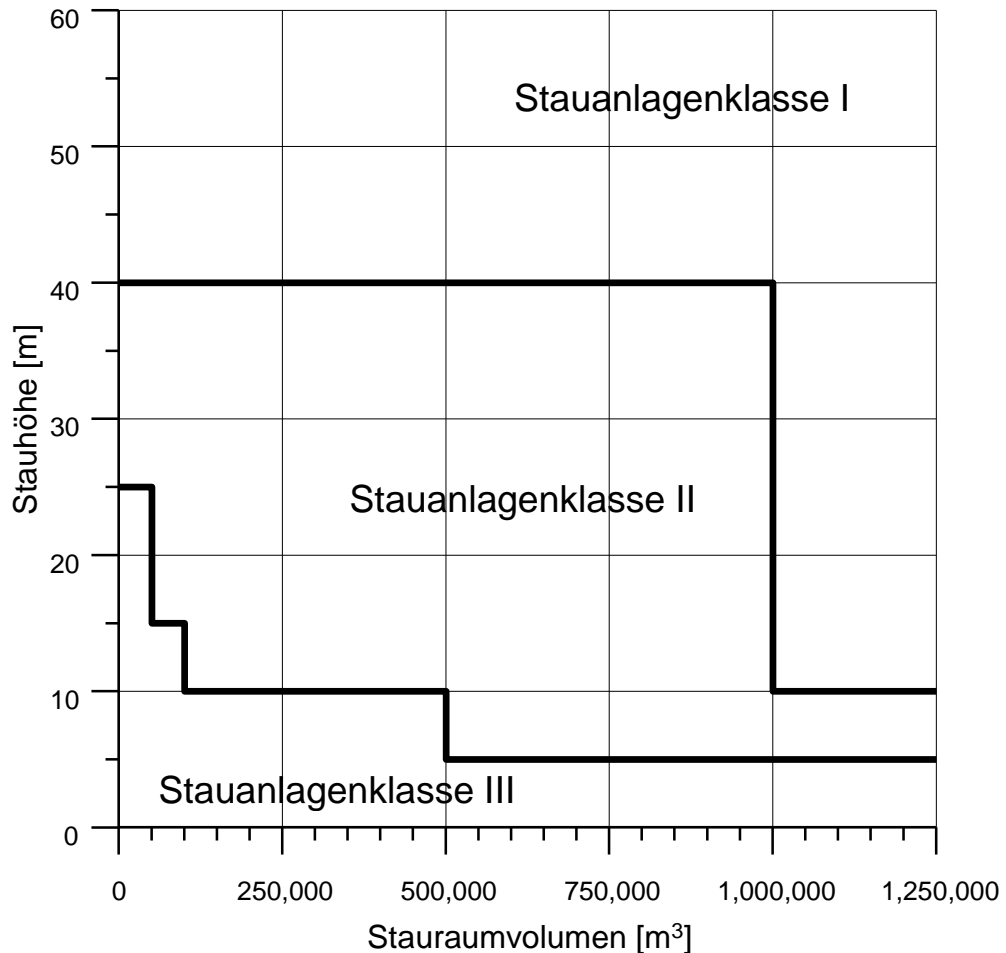
Die Einteilung in Klassen erfolgt nach folgenden Kriterien:

- Stauanlagen der Klasse I sind solche, welche die Kriterien von Art. 18 Abs. 1 Bst. a oder Bst. b StAV erfüllen.
- Stauanlagen der Klasse II sind solche mit einer Stauhöhe grösser oder gleich 5 m, welche das Grössenkriterium von Art. 3 Abs. 2 StAG erfüllen und nicht der Klasse I zugeteilt werden.
- Stauanlagen der Klasse III sind solche, welche das Grössenkriterium von Art. 3 Abs. 2 StAG nicht erfüllen oder eine Stauhöhe bis zu 5 m aufweisen.

¹⁾ Teil C2 der revidierten Richtlinie, welcher die Hochwasserereignisse präzisieren wird, ist noch nicht publiziert. Bis zu dessen Publikation ist der anzusetzende verminderte Zufluss nach Rücksprache mit der zuständigen Aufsichtsbehörde festzulegen.



In Figur 1 sind die Stauanlagenklassen bezüglich Stauhöhe und Stauroumvolumen, nach den entsprechenden Definitionen in Teil A, grafisch dargestellt.



Figur 1: Definition der drei verschiedenen Stauanlagenklassen

3.2. Stauanlagen zum Schutz vor Naturgefahren

Stauanlagen zum Schutz vor Naturgefahren, die nur ausnahmsweise Wasser aufstauen, werden in die Stauanlagenklasse III eingeteilt, unabhängig von ihrer Stauhöhe und ihrem Stauvolumen.

3.3. Stauhaltungsdämme von Flusstauhaltungen

Stauhaltungsdämme einer Flusstauhaltung werden in die Stauanlagenklasse III eingeteilt, vorbehaltlich anderslautenden strengeren Anforderungen der Aufsichtsbehörde, der Konzessionsbehörde oder von Drittbehörden.



4. Einwirkungen

4.1. Allgemeines

Die gemäss Abschnitt 4.2 anzusetzende Erdbebeneinwirkung ist eine extreme Einwirkung, die mit den Normallastfällen gemäss Teil C1²⁾ zu kombinieren ist. Die Verformungen und Beanspruchungen aus den statischen Einwirkungen bilden die Anfangsbedingungen für die Erdbebenanalyse.

Es genügt in der Regel, für den Erdbebensicherheitsnachweis den Zustand des vollen Sees zu betrachten. Dabei ist der Wasserspiegel beim für die Stauhöhe massgebenden Niveau nach Teil A anzunehmen. Falls ein Teileinstau zu einem ungünstigeren Verhalten des Absperrbauwerks unter Erdbebeneinwirkung führen könnte, so sind auch Zustände mit Teileinstau zu beurteilen und gegebenenfalls nachzuweisen.

4.2. Erdbebeneinwirkung

Für den Erdbebensicherheitsnachweis von bestehenden Stauanlagen darf die Erdbebeneinwirkung gemäss dem Basisdokument zum Nachweis der Erdbebensicherheit [BWG, 2003a] (im dortigen Abschnitt „Teil B – Nachweisbeben“) angesetzt werden. Für den Erdbebensicherheitsnachweis im Rahmen eines Plangenehmigungsgesuches ist die anzusetzende Erdbebeneinwirkung nach Rücksprache mit der zuständigen Aufsichtsbehörde festzulegen³⁾.

4.3. Anmerkungen für Mauern und Wehre

Der dynamische Einfluss des gestauten Wassers ist zu berücksichtigen (vgl. Abschnitte 6.2 und 6.3).

Der in der Kontaktfuge zwischen Absperrbauwerk und Untergrund oder an Bruchflächen im Untergrund wirkende Auftrieb ist für den Stabilitätsnachweis unter Erdbebeneinwirkung analog zum statischen Fall zu berücksichtigen. Liegen keine durch Messungen bestätigten Werte des Auftriebs vor, so ist (in Abwesenheit eines Injektionsschirmes oder hydrogeologischen Störungen) ein linearer Druckverlauf von der Wasserseite zur Luftseite anzunehmen.

Ist auf Grund der Erdbebeneinwirkung von einer Veränderung der Auftriebsverhältnisse auszugehen, so ist die Stabilität nach dem Erdbeben unter diesen veränderten Bedingungen nachzuweisen.

4.4. Anmerkungen für Dämme

Der dynamische Einfluss des gestauten Wassers darf für Dämme vernachlässigt werden. Ein allfälliger Porenwasserüberdruckaufbau infolge der Erdbebeneinwirkung ist zu berücksichtigen.

²⁾ Teil C1 der revidierten Richtlinie, welcher die Lastkombinationen und die Sicherheitsfaktoren präzisieren wird, ist noch nicht publiziert. Bis zur entsprechenden Publikation gelten die Lastkombinationen gemäss den Tabellen 3, 4 und 5 des „Basisdokuments zur konstruktiven Sicherheit“ [BWG, 2002].

³⁾ Am 1. September 2015 hat der Schweizerische Erdbebendienst (SED) die neue Erdbebengefährdung der Schweiz publiziert. Die Übernahme dieser neuen Erdbebengefährdung für die vorliegende revidierte Richtlinie wird zur Zeit durch das BFE geprüft.



5. Materialkennwerte

(Anmerkung: Das vorliegende Kapitel wird nach der Publikation des Richtlinienanteils C1 allenfalls überarbeitet werden.)

5.1. Allgemeines

Für den Erdbebensicherheitsnachweis ist die Unsicherheit in den Materialparametern gemäss den Grundsätzen in Teil C1⁴⁾ zu berücksichtigen.

Die notwendigen Materialparameter sind in der Regel durch Labor- und Feldversuche zu bestimmen. Dabei sind für die zu bestimmenden Materialparameter repräsentative Versuche zu wählen. Versuchsergebnisse aus der Bauzeit können herangezogen werden. Liegen solche nicht vor oder sind sie mangelhaft, so sind neue Versuche durchzuführen.

Die Materialparameter können auch aus Messbeobachtungen am Bauwerk rückgerechnet werden, falls aufgezeigt werden kann, dass die Rückrechnung zur Bestimmung der notwendigen Materialparameter geeignet ist.

Für bestehende Stauanlagen der Klasse III dürfen die Materialparameter unter Verwendung von Literaturangaben oder von Angaben vergleichbarer Bauwerke abgeschätzt werden. Werden die Festigkeitskennwerte so abgeschätzt, müssen sie mit einem Faktor 1.2, die (echte) Kohäsion jedoch mit einem Faktor 2.0 abgemindert werden (vgl. auch [BFE, 2014]).

Bezüglich des Aufbaus des Untergrunds und dessen geotechnischen Eigenschaften gelten analoge Anmerkungen wie für die Bestimmung der Materialparameter.

5.2. Anmerkungen für Mauern und Wehre

Das Raumgewicht des Betons ist durch Messungen zu bestimmen oder es ist für den jeweiligen Nachweisschritt ein konservativer Wert für das Raumgewicht anzunehmen.

Die statische Zugfestigkeit des Betons f_{ts} (in MPa) darf für Stauanlagen der Klasse III als Funktion der statischen Druckfestigkeit f_{cs} (in MPa) aus der Beziehung $f_{ts} = 3 / 8 \cdot f_{cs}^{2/3}$ abgeschätzt werden, wobei der basierend auf dieser Abschätzung verwendete Wert für f_{ts} höchstens 3 MPa betragen darf.

Die dynamischen Festigkeitskennwerte des Betons dürfen empirisch mittels Erhöhung der entsprechenden statischen Werte um 30 % abgeschätzt werden. Der dynamische Elastizitätsmodul des Betons darf mittels Erhöhung des statischen Moduls um 25 % abgeschätzt werden.

Für den Gleitsicherheitsnachweis entlang der Aufstandsfläche dürfen die statischen Kennwerte der Scherfestigkeit angesetzt werden.

⁴⁾ Teil C1 der revidierten Richtlinie ist noch nicht publiziert. Bis zur entsprechenden Publikation gelten die Grundsätze des „Basisdokuments zur konstruktiven Sicherheit“ [BWG, 2002].



Die Dämpfungsrage für den unbewehrten Beton kann bei linearen visko-elastischen Analysen zu 5 % angenommen werden.

5.3. Anmerkungen für Dämme

Für Stauanlagen der Klasse I sind statische wie auch dynamische Bodenkennziffern durch Versuche zu ermitteln. Es ist ein Stoffgesetz zu berücksichtigen, welches geeignet ist, das Verhalten des Bodens unter zyklischer Beanspruchung zu beschreiben. In der Regel genügt es, mit linear-äquivalenten Kennziffern zu rechnen.

Für Stauanlagen der Klasse II und III genügen statische Kennziffern, gemäss der in Kapitel 6 präzisierten Nachweismethodik.

Ist von einem vollkommen drainierten Verhalten auszugehen, so erfolgt die Analyse in effektiven Spannungen. Bei dieser Analyse gelten die folgenden Grundsätze:

- Allgemein ist von der Restscherfestigkeit auszugehen, es sei denn, die Entfestigung wird durch das verwendete Stoffgesetz berücksichtigt.
- In der Regel soll keine Kohäsion angesetzt werden, es sei denn, diese lässt sich durch Laborversuche begründen. Hierzu ist insbesondere darzulegen, dass die Laborversuche sowohl bei vollkommen drainierten Bedingungen als auch unter den im Dammkörper herrschenden Spannungen durchgeführt wurden.

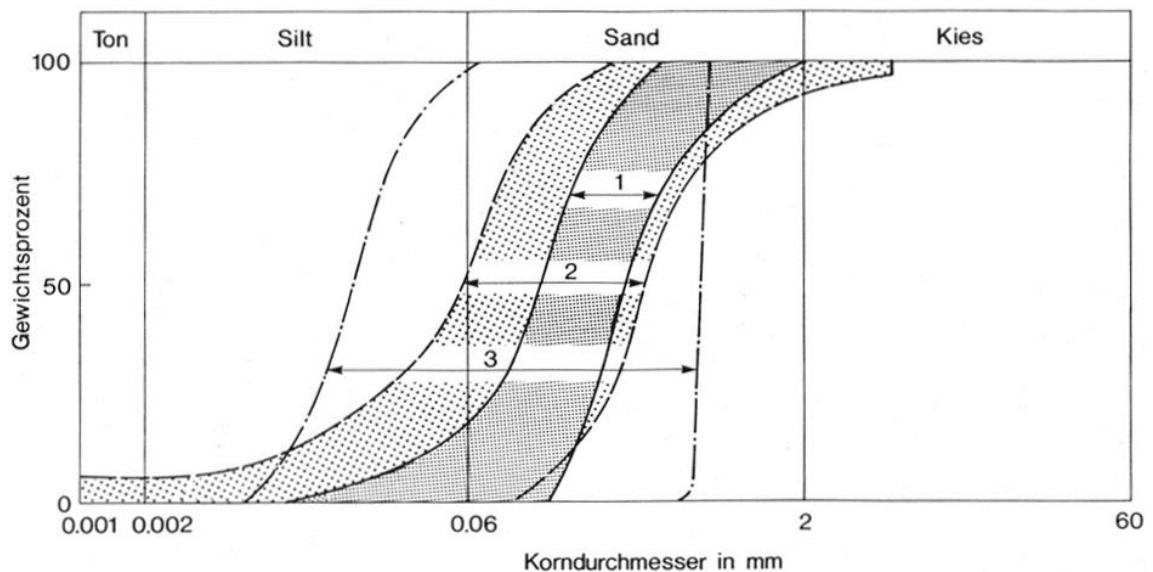
Ist von einem undrainierten (oder teildrainierten) Verhalten auszugehen, so kann die Analyse entweder in totalen oder in effektiven Spannungen erfolgen:

- Bei einer Analyse in totalen Spannungen kann die undrainierte Scherfestigkeit unter zyklischer Beanspruchung für Dämme der Klasse II und III zu 80 % der statischen undrainierten Scherfestigkeit angenommen werden [Makdisi-Seed, 1978]; für Dämme der Klasse I ist diese durch dynamische Versuche zu ermitteln.
- Bei einer Analyse in effektiven Spannungen ist sicherzustellen, dass der Einfluss der Porenwasserüberdrücke korrekt durch das Stoffgesetz abgebildet ist. Die mobilisierte undrainierte Scherfestigkeit ist auf Plausibilität zu prüfen.

Unter zyklischer Belastung können insbesondere bei Feinsanden in gesättigtem Zustand erhebliche Porenwasserüberdrücke induziert werden. Dies ist dann der Fall, wenn alle folgenden Bedingungen erfüllt werden:

- die Korngrössenverteilungskurve des Materials liegt zwischen 10 % und 90 % Gewichtsprozent innerhalb des Bereiches "2" der Figur 2;
- die Steilheit C_u der Korngrössenverteilungskurve (Ungleichförmigkeitszahl d_{60} / d_{10}) ist kleiner als 2;
- das Material ist gesättigt;
- die Lagerungsdichte D_r beträgt weniger als 0.5.

Der Einfluss dieser erdbebeninduzierten Porenwasserüberdrücke ist dann in einer Analyse in effektiven Spannungen zu berücksichtigen.



Figur 2: Kornverteilungsbereiche von Böden, die sich verflüssigen können [Finn, 1972]

6. Nachweismethodik

6.1. Allgemeines

Das Vorgehen zum Nachweis der Erdbebensicherheit umfasst generell folgende Schritte:

- Schritt 1) **Modellbildung:** Die Modellbildung hat Untergrund, Absperrbauwerk und Stausee zu berücksichtigen.
Der geologische und geotechnische Aufbau des Untergrundes sowie die mechanischen Eigenschaften des Absperrbauwerks und des Untergrundes sind zu ermitteln.
Anlagenspezifische Besonderheiten (wie z.B. Schwachstellen, die Abfolge von Injektionen und Betonieretappen beim Bau oder besondere Vorkommnisse beim Bau) sind in der Modellbildung zu berücksichtigen, sofern diese einen massgebenden Einfluss auf den Erdbebensicherheitsnachweis haben können. Auch Messresultate aus der regelmässigen Überwachung sind zu berücksichtigen.
- Schritt 2) **Analyse:** Das Verhalten der Stauanlage für Zustände während und nach dem Erdbeben ist zu untersuchen. In der Analyse des Verhaltens während des Erdbebens sind unter Berücksichtigung der Erdbebeneinwirkung die bleibende Verformungen und Schäden an der Anlage zu ermitteln. In der Analyse des Verhaltens nach dem Erdbeben sind die daraus hervorgehenden Auswirkungen zu untersuchen. Insbesondere sind allfällige bleibende Verformungen, Schäden, Porenwasserüberdrücke und Änderungen der Auftriebsverhältnisse zu berücksichtigen.

Das Verfahren für die Analyse des Verhaltens während des Erdbebens soll der Stauanlagenklasse entsprechend gewählt werden; i.A. gelten folgende minimalen Anforderungen:



- Für Stauanlagen der Klasse I: dynamische Zeitverlaufsberechnung an einem Finite-Elemente-Modell
- Für Stauanlagen der Klasse II: Antwortspektrenverfahren (bzw. bei Dämmen vereinfachtes Antwortspektrenverfahren unter Berücksichtigung mehrerer Eigenformen)
- Für Stauanlagen der Klasse III: quasi-statische Verfahren (bzw. Berücksichtigung der ersten Eigenform)

Schritt 3) Interpretation und Beurteilung:

Das Verhalten während des Erdbebens und das Verhalten nach dem Erdbeben sind hinsichtlich der Erreichung der Verhaltensziele gemäss Abschnitt 2 zu beurteilen.

Sind allfällige Massnahmen nach einem Erdbeben vorgesehen, so ist als Bestandteil des Erdbebennachweises zusätzlich die Sicherheit der sich ergebenden Zustände zu beurteilen⁵⁾. Dabei gelten die Sicherheitsfaktoren gemäss Abschnitt 7.3.

Schritt 4) Verfeinertes Analyseverfahren oder Massnahmenplanung: Falls die Erdbebensicherheit von Stauanlagen der Klasse II oder III mit dem der Stauanlagenklasse entsprechenden Analyseverfahren nicht nachgewiesen werden kann, kann diese nach dem Verfahren einer tieferen Klasse erbracht werden. Ist letzteres ebenfalls nicht möglich, so sind bauliche Ertüchtigungsmassnahmen oder betriebliche Massnahmen notwendig.

6.2. Anmerkungen für Gewichtsmauern und Wehre

Modellbildung:

Der dynamische Einfluss des gestauten Wassers darf vereinfacht durch mitschwingende, starr gekoppelte Wassermassen, zum Beispiel nach [Westergaard, 1931], berücksichtigt werden. Diese sind als Massenpunkte in das Modell einzuführen und wirken senkrecht zur wasserseitigen Oberfläche des Bauwerks.

Bei Gewichtsmauern ist in der Regel eine zweidimensionale Betrachtung am massgebenden Querschnitt ausreichend. In engen Tälern oder bei variablen Untergrundverhältnissen sind verschiedene Querschnitte zu betrachten, gegebenenfalls ist eine dreidimensionale Betrachtung notwendig. Besondere Beachtung ist den Widerlagerbereichen zu schenken.

Bei Wehren ist in der Regel ein dreidimensionales Modell notwendig, welches mindestens einen Pfeiler und die Hälfte der je angrenzenden Wehröffnungen umfasst. Werden Bauwerkselemente (wie Wehrbrücken, Antriebe usw.) in der Modellbildung nicht berücksichtigt, so ist die Wirkung dieser Elemente auf das Verhalten des Bauwerks nachvollziehbar darzulegen.

⁵⁾ Wenn beispielsweise eine rasche Absenkung des Stauraums unmittelbar nach dem Erdbebenereignis vorgesehen ist, ist der Sicherheitsnachweis nach dem Erdbeben unter gleichzeitiger Berücksichtigung eines allfälligen Porenwasserüberdruckaufbaus im Bodenmaterial zu erbringen.



Stauanlagen der Klasse I:

- Das Finite-Elemente-Modell hat auch den Untergrund zu umfassen. Der Untergrund darf masselos modelliert werden. Falls das Modell die Masse des Untergrunds berücksichtigt, so ist insbesondere auf die korrekte Modellierung der Randbedingungen zu achten.

Stauanlagen der Klasse II:

- Das Modell hat auch den Untergrund zu umfassen, entweder durch Modellierung mit finiten Elementen analog dem Vorgehen für Klasse I, oder durch eine dem Untergrund äquivalente Bettung.

Stauanlagen der Klasse III:

- Der Untergrund darf als starr angenommen werden.

Analyse:

Bei Gewichtsmauern genügt es, eine einzige horizontale Erdbebenanregung zu berücksichtigen, nämlich diejenige senkrecht zur Mauerachse. Bei Wehren ist zusätzlich die Anregung in Richtung der Mauerachse zu berücksichtigen und das Verhalten des Absperrbauwerks in dieser Richtung mindestens mit einem vereinfachten Modell zu beurteilen. Die Vertikalanregung ist wie unten beschrieben zu berücksichtigen.

Es ist ein Gleitsicherheitsnachweis entlang potentieller Gleitflächen zu führen. Wird die Kohäsion berücksichtigt, so ist die Kontaktfläche unter Berücksichtigung von allfälligen klaffenden Fugen oder Rissen entsprechend zu reduzieren.

Die Berechnung von allfälligen Gleitverschiebungen entlang potentieller Gleitflächen kann mit der Newmark-Methode [Newmark, 1965] erfolgen.

Der Kippsicherheitsnachweis ist erbracht, wenn die Resultierende zu jeder Zeit im Querschnitt angreift und ein lokaler Bruch ausgeschlossen werden kann. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ist aufzuzeigen, dass trotz der resultierenden Bewegung die Verhaltensziele nach Abschnitt 2 erfüllt sind.

Stauanlagen der Klasse I:

- Die Vertikalanregung ist zu berücksichtigen.
- Es ist auch ein Spannungsnachweis zu führen.

Stauanlagen der Klasse II:

- Die Vertikalanregung ist zu berücksichtigen.
- Es ist auch ein Spannungsnachweis zu führen.

Stauanlagen der Klasse III:

- Die Vertikalanregung darf vernachlässigt werden.
- Auf einen Spannungsnachweis darf verzichtet werden.



Interpretation und Beurteilung:

Sind bleibende Gleitverschiebungen nach der Erdbebeneinwirkung zu erwarten, so sind insbesondere folgende Punkte zu beurteilen:

- Allfällige Änderung der Auftriebsverhältnisse, zum Beispiel infolge beschädigter oder abgescherter Drainagen oder Abdichtungselemente im Untergrund.
- Integrität der Dichtungselemente am Bauwerk.
- Schäden und Beanspruchungen an Elementen, welche mit dem Bauwerk verbunden sind (insbesondere Entlastungs- und Ablassstollen und weitere Nebenanlagen).

6.3. Anmerkungen für Bogenmauern

Modellbildung:

Der dynamische Einfluss des gestauten Wassers darf vereinfacht durch mitschwingende, starr gekoppelte Wassermassen, zum Beispiel nach [Westergaard, 1931], berücksichtigt werden. Diese sind als Massenpunkte in das Modell einzuführen und wirken senkrecht zur wasserseitigen Oberfläche des Bauwerks.

Es ist ein dreidimensionales Modell notwendig.

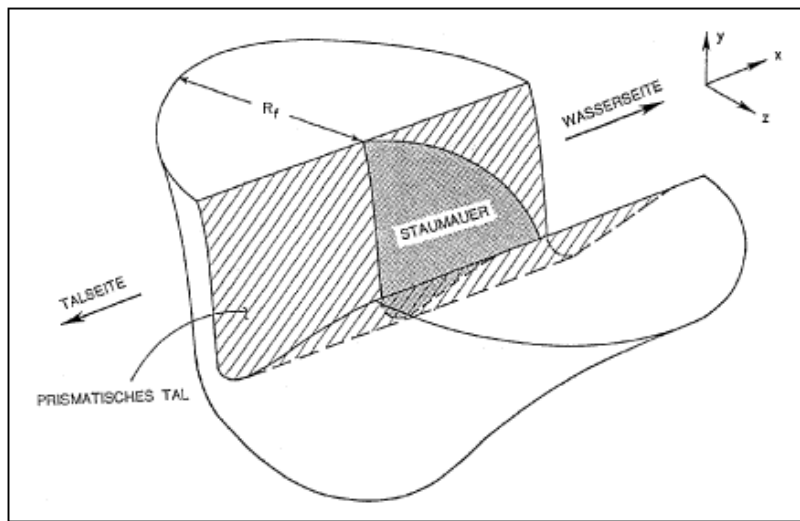
Stauanlagen der Klasse I:

- Das Finite-Elemente-Modell hat auch den Untergrund zu umfassen. Der Untergrund darf masselos modelliert werden. Falls das Modell die Masse des Untergrunds berücksichtigt, so ist insbesondere auf die korrekte Modellierung der Randbedingungen zu achten.

Die Modellgrösse muss folgende Mindestabmessungen in Abhängigkeit der Steifigkeiten des Betons und des Untergrundes aufweisen (vgl. Figur 3):

$$\begin{aligned} R_f &> 1.0 \cdot H && \text{für } E_b / E_s = 1.0 \\ R_f &> 1.5 \cdot H && \text{für } E_b / E_s = 0.5 \\ R_f &> 2.0 \cdot H && \text{für } E_b / E_s = 0.25 \end{aligned}$$

Mit E_s : Elastizitätsmodul des Betons; E_b : Elastizitätsmodul des Untergrundes;
 H : Höhe des Absperrbauwerks; R_f : räumliche Modellausdehnung des Untergrundes



Figur 3: Modellgrösse

Stauanlagen der Klasse II und III:

- Das Modell hat auch den Untergrund zu umfassen, entweder durch Modellierung mit finiten Elementen analog dem Vorgehen für Klasse I, oder durch eine dem Untergrund äquivalente Bettung.

Analyse:

Nebst den Anregungen in zwei Horizontalrichtungen muss auch die Vertikalanregung berücksichtigt werden, ausser bei Bogenmauern der Klasse III.

Bei hohen lokalen Beanspruchungen sind Rissbildungen und Fugenöffnungen zu berücksichtigen. Die Fundations- und Widerlagerbereiche bedürfen hierbei besonderer Beachtung.

Interpretation und Beurteilung:

Bei der Interpretation der Resultate aus einer linear-viskoelastischen Analyse, insbesondere der berechneten Zugspannungen, sind die effektiven Struktureigenschaften (wie Blockfugen, allfällige Rissbildung im Mauerkörper etc.) sowie die möglichen Auswirkungen einer Überschreitung der Materialfestigkeit zu berücksichtigen. Namentlich bei hohen rechnerischen Zugspannungen in Bogenrichtung ist davon auszugehen, dass diese in den Blockfugen nicht übertragen werden können. Es darf dann folgende Prozedur für eine weitergehende Analyse angewendet werden:

- Das Öffnen der Fugen in den stark beanspruchten Bereichen ist anzunehmen. In diesen Bereichen erfolgt die Lastabtragung während des Erdbebens nicht über Bogen-, sondern über Konsolenwirkung der einzelnen Mauerblöcke.
- Das Verhalten des gerissenen bzw. aufgelösten Bauwerks (Beanspruchung, Verformung, Stabilität) unter der Erdbebeneinwirkung ist anschliessend zu untersuchen.



6.4. Anmerkungen für Dämme

Modellbildung:

Bei Dämmen ist in der Regel eine zweidimensionale Betrachtung am massgebenden Querschnitt ausreichend. In engen Tälern oder bei variablen Untergrundverhältnissen sind verschiedene Querschnitte zu betrachten. Besondere Beachtung ist den Widerlagerbereichen zu schenken.

Die Foundation eines Dammes darf als starr angenommen werden, wenn ein ausreichender Steifigkeitsunterschied zwischen Dammmaterial und Foundation vorliegt.

Analyse:

Stauanlagen der Klasse I:

- In der Analyse des dynamischen Verhaltens des Dammkörpers ist die Vertikalanregung zu berücksichtigen.
- Es ist in der Regel zulässig, die Berechnung der Beschleunigungen und die Berechnung der Verformungen entkoppelt durchzuführen.
- Bleibende Verformungen können mit der Newmark-Methode berechnet werden [Newmark, 1965]. Dabei darf zum Zweck der Berechnung der Gleitverschiebungen die vertikale Komponente der Beschleunigung vernachlässigt werden.

Stauanlagen der Klasse II:

- In der Analyse des dynamischen Verhaltens des Dammkörpers ist die Vertikalanregung zu berücksichtigen.
- Die Beschleunigung im massgebenden Bruchkörper, wie auch allfällige bleibende Verformungen können z.B. nach [Makdisi-Seed, 1978] oder nach [Bray-Travasrou, 2007] abgeschätzt werden.

Stauanlagen der Klasse III:

- Die Vertikalanregung darf vernachlässigt werden.
- Es darf angenommen werden, dass die Beschleunigung im massgebenden Bruchkörper gleich 1.5 Mal der maximalen horizontalen Bodenbeschleunigung beträgt.
- Allfällige bleibende Verformungen können z.B. nach [Makdisi-Seed, 1978] oder nach [Bray-Travasrou, 2007] abgeschätzt werden.



Interpretation und Beurteilung:

Sind bleibende Verformungen nach der Erdbebeneinwirkung zu erwarten, so sind insbesondere folgende Punkte zu beurteilen:

- Der verbleibende Freibord muss auch im deformierten Zustand genügend gross sein, sodass die Sicherheit des Dammes gewährleistet werden kann.
- Innere Erosion muss auch im deformierten Zustand ausgeschlossen werden können.
- Bei Dämmen mit Oberflächendichtung ist die Integrität der Dichtung zu beurteilen. Ist davon auszugehen, dass die Dichtung beschädigt werden kann, so sind die daraus entstehenden Gefährdungen für den Damm (wie innere Erosion und veränderte Stabilitätsverhältnisse) zu beurteilen.
- Bei Dämmen mit Erdkerndichtung kann die Gefahr der inneren Erosion nach der bleibenden Verformung ausgeschlossen werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten sind:
 - a) Zwischen den einzelnen Dammzonen sind die Filterkriterien weiterhin eingehalten.
 - b) Der Kern ist immer noch genügend überdeckt und besteht aus Material, welches die aufgezwungenen Verformungen ohne wesentliche Änderung der Durchlässigkeitseigenschaften mitmachen kann.
 - c) Die Restdicke der Filter- und Drainageschichten im deformierten Zustand beträgt mindestens die Hälfte der Dicke im undeformierten Zustand.

7. Besonderheiten und Ausnahmen

7.1. Vereinfachter Erdbebensicherheitsnachweis für kleinere Gewichtsmauern

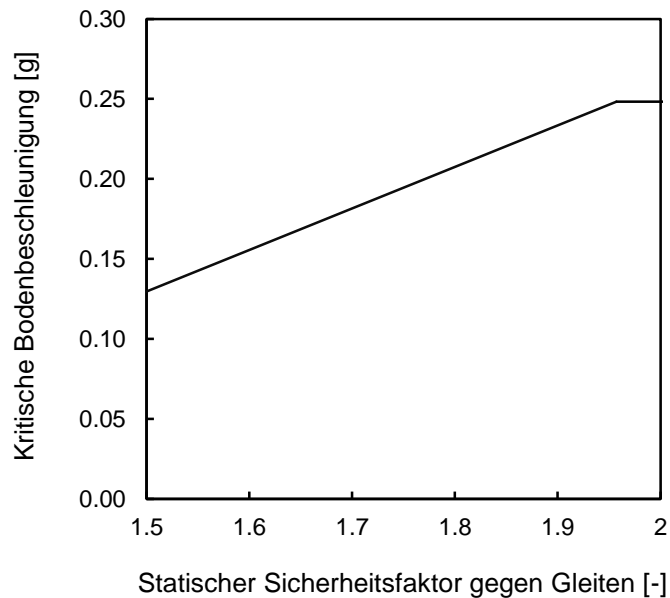
Falls eine kleinere Gewichtsmauer der Stauanlagenklasse III sämtliche nachfolgenden Kriterien erfüllt, darf davon ausgegangen werden, dass der Erdbebensicherheitsnachweis für das Absperrbauwerk dadurch erbracht ist:

- Die maximale horizontale Bodenbeschleunigung der am Standort anzunehmenden Erdbebeneinwirkung ist nicht grösser als die kritische Bodenbeschleunigung ermittelt aus Figur 4 in Abhängigkeit des statischen Sicherheitsfaktors gegen Gleiten.
- Für die statischen Normlastfälle gemäss Teil C1 ist der erforderliche Sicherheitsfaktor erreicht ⁶⁾ und für dieselben treten in der Fundationsfläche nur Druckspannungen auf, d.h. die Resultierende der zu berücksichtigenden Kräfte liegt im Kern des Querschnitts.
- In den erbrachten statischen Nachweisen wurde weder ein allfälliges Ansteigen der Aufstandsfläche gegen die Luftseite hin noch ein Erddruck auf der Luftseite berücksichtigt.
- Der Querschnitt der Gewichtsmauer ist näherungsweise dreiecksförmig.
- Die Basisbreite der Aufstandsfläche ist nicht grösser als 4/5 der Mauerhöhe.
- Die Gewichtsmauer ist luftseitig nicht eingestaut.

⁶⁾ Teil C1 der revidierten Richtlinie, welcher die Lastkombinationen und die Sicherheitsfaktoren präzisieren wird, ist noch nicht publiziert. Bis zur entsprechenden Publikation gilt für die Normlastfälle der statische Sicherheitsfaktor von 1.5 gemäss den Tabellen 6 und 7 des „Basisdokuments zur konstruktiven Sicherheit“ [BWG, 2002].



- Es ist nicht davon auszugehen, dass sich die Auftriebsverhältnisse auf Grund der Erbebeneinwirkung verändern.



Figur 4: Kritische Bodenbeschleunigung abhängig vom statischen Sicherheitsfaktor gegen Gleiten

Es ist gleichwohl aufzuzeigen, dass die Stauanlage die weiteren Verhaltensziele gemäss Abschnitt 2 erfüllt. Insbesondere ist die Erfüllung der Verhaltensziele für Nebenanlagen und Stauraum nachzuweisen.

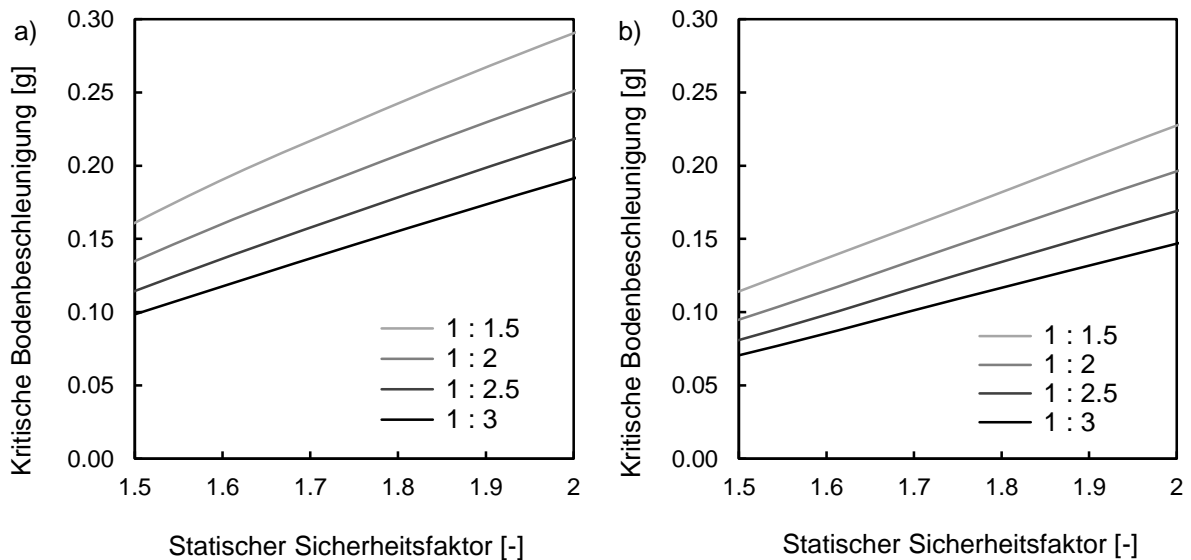
7.2. Vereinfachter Erdbebensicherheitsnachweis für kleinere Dämme

Falls ein kleinerer Damm der Stauanlagenklasse III sämtliche nachfolgenden Kriterien erfüllt, darf davon ausgegangen werden, dass der Erdbebensicherheitsnachweis für das Absperrbauwerk dadurch erbracht ist:

- Die maximale horizontale Bodenbeschleunigung der am Standort anzunehmenden Erbebeneinwirkung ist nicht grösser als die kritische Bodenbeschleunigung ermittelt aus Figur 5 in Abhängigkeit des statischen Sicherheitsfaktors, der Böschungsneigung und der Sättigung der Böschung:
 - Ist die Dammböschung nicht wassergesättigt, so kommt unter Annahme drainierter Verhältnisse Figur 5a zur Anwendung.
 - Ist die Dammböschung gesättigt, ist die kleinere der beiden kritischen Bodenbeschleunigungen ermittelt aus den Figuren 5a und 5b massgebend. Figur 5b berücksichtigt undrainierte Verhältnisse durch eine Stabilitätsanalyse in totalen Spannungen; der zu verwendende statische Sicherheitsfaktor ist daher für die im Erdbebenfall anzunehmende undrainierte Scherfestigkeit zu ermitteln.



- Der erforderliche Sicherheitsfaktor für die Böschungsstabilität unter den statischen Normallastfällen gemäss Teil C1⁷⁾ ist erreicht (mit Ausnahme dünner, oberflächennaher Bruchkörper).
- Die Neigung der wasserseitigen Böschung ist nicht steiler als die Neigung der luftseitigen Böschung.
- Sowohl für das Dammmaterial wie für die Foundation muss nicht mit einem erheblichen erdbebeninduzierten Porenwasserdruckaufbau gerechnet werden. Die Beurteilung erfolgt gemäss Abschnitt 5.3.
- Dammverformungen beeinträchtigen weder die kurzfristige noch die langfristige Dichtigkeit des Absperrbauwerks nach dem Erdbeben:
 - Es gibt keine Oberflächendichtung oder starre Dichtungselemente.
 - Es gibt keine starren Durchdringungen oder Elemente, die eine Rissbildung im Dammkörper verursachen und somit innere Erosion begünstigen können.



Figur 5: Kritische Bodenbeschleunigung abhängig vom statischen Sicherheitsfaktor für die Böschungsstabilität und der Böschungsneigung: a) für drainierte Bedingungen, b) für undrainierte Bedingungen.

Es ist gleichwohl aufzuzeigen, dass die Stauanlage die weiteren Verhaltensziele gemäss Abschnitt 2 erfüllt. Insbesondere ist die Erfüllung der Verhaltensziele für Nebenanlagen und Stauraum nachzuweisen.

⁷⁾ Teil C1 der revidierten Richtlinie, welcher die Lastkombinationen und die Sicherheitsfaktoren präzisieren wird, ist noch nicht publiziert. Bis zur entsprechenden Publikation gilt für die Normallastfälle der statische Sicherheitsfaktor von 1.5 gemäss den Tabellen 6 und 7 des „Basisdokuments zur konstruktiven Sicherheit“ [BWG, 2002].



7.3. Sicherheit nach dem Erdbeben

Die Sicherheit der Stauanlage nach der Erdbebeneinwirkung muss langfristig bzw. nach allfällig notwendigen Massnahmen der Sicherheit vor dem Erdbeben gemäss Teil C1⁸⁾ entsprechen.

Kurzfristig, d.h. unmittelbar nach der Erdbebeneinwirkung bis zur Ausführung von allfällig notwendigen Massnahmen, darf die Sicherheit auf nicht unter 80 % der Sicherheitsfaktoren für Normlastfälle und ausserordentliche Lastfälle gemäss Teil C1⁸⁾ sinken. Die extremen Lastfälle können während dieser Zeit ausser Acht gelassen werden. Die Aufsichtsbehörde legt im konkreten Fall fest, wie lange dieser Zustand mit reduzierter Sicherheit geduldet wird.

7.4. Aktive Verwerfungen

Ist eine aktive Verwerfung⁹⁾ am Standort der Stauanlage bekannt, so sind besondere, auf den konkreten Fall abgestimmte Studien durchzuführen.

⁸⁾ Teil C1 der revidierten Richtlinie, welcher die Lastkombinationen und die Sicherheitsfaktoren präzisieren wird, ist noch nicht publiziert. Bis zur entsprechenden Publikation gelten für Normlastfälle und ausserordentliche Lastfälle die statischen Sicherheitsfaktoren von 1.5 resp. 1.3 gemäss den Tabellen 6 und 7 des „Basisdokuments zur konstruktiven Sicherheit“ [BWG, 2002].

⁹⁾ Definition einer „aktiven Verwerfung“ gemäss ICOLD Bulletin Nr. 72 (1989): „A fault, reasonably identified and located, known to have produced historical fault movements or showing geologic evidence of Holocene (11000 years) displacements and which, because of its present tectonic setting, can undergo movement during the anticipated life of man-made structures.“



8. Zusammenstellung der klassenspezifischen Anforderungen

Tabelle 1: Zusammenfassung der minimalen Anforderungen an den Erdbebensicherheitsnachweis von Stauanlagen, sofern diese von der Stauanlagenklasse abhängen.

Thema	Stauanlagenklasse		
	I	II	III
Wiederkehrperiode Erdbeben	10'000 Jahre	5'000 Jahre	1'000 Jahre
Vertikalanregung	Ja	Ja	Nein
Materialparameter	Labor- und Feldversuche (auch aus der Bauzeit), allenfalls Rückrechnung aus Messbeobachtungen	Labor- und Feldversuche (auch aus der Bauzeit), allenfalls Rückrechnung aus Messbeobachtungen	Labor- und Feldversuche (auch aus der Bauzeit), allenfalls Rückrechnung aus Messbeobachtungen; für bestehende Stauanlagen auch aus Literatur oder vergleichbaren Bauwerken
Statische Zugfestigkeit des Betons	bauwerksspezifische Versuche	bauwerksspezifische Versuche	bauwerksspezifische Versuche oder aus der Beziehung (MPa) $f_{ts} = 3 / 8 \cdot f_{cs}^{2/3}$, f_{ts} höchstens 3 MPa
dynamische Bodenkennziffern	bauwerksspezifische Versuche	Erfahrungen aus Literatur oder vergleichbaren Bauwerken	-
Modell für Gewichtsmauern	2D Finite-Elemente-Modell inkl. Untergrund	2D Modell inkl. Untergrund oder Federn	2D Modell, starrer Untergrund
Modell für Wehre	3D Finite-Elemente-Modell inkl. Untergrund	3D Modell inkl. Untergrund oder Federn	3D Modell, starrer Untergrund
Modell für Bogenmauern	3D Finite-Elemente-Modell inkl. Untergrund	3D Modell inkl. Untergrund oder Federn	3D Modell inkl. Untergrund oder Federn
Modell für Dämme	2D Finite-Elemente-Modell	2D Modell	2D Modell
Analyseverfahren allgemein	dynamische Zeitverlaufsberechnung	Antwortspektrenverfahren (bzw. Berücksichtigung mehrerer Eigenformen)	quasi-statische Verfahren (bzw. Berücksichtigung der ersten Eigenform)
Beschleunigung in den massgebenden Gleitkörpern eines Damms	aus Finite-Elementen-Berechnung im Zeitverlauf	mit vereinfachten Verfahren, mit Hilfe des Antwortspektrums	vereinfacht durch Amplifikation der maximalen Bodenbeschleunigung mit dem Faktor 1.5
Spannungsnachweis Gewichtsmauern und Wehre	Ja	Ja	Nein



9. Literaturhinweise

BFE, 2014: Internationale Übersicht über die Anforderungen an die Gleit- und Kippsicherheitsnachweise von Gewichtsmauern, Studie von Dr. Pius Oberhuber im Auftrag des BFE, April 2014.

Bray-Travasariou, 2007: J.D. Bray, T. Travasarou; Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, pp. 381-392, 2007.

BWG, 2002: Bundesamt für Wasser und Geologie; Sicherheit der Stauanlagen, Basisdokument zur konstruktiven Sicherheit, *Berichte des BWG Serie Wasser*, Version 1.0, Biel, 2002.

BWG, 2003a: Bundesamt für Wasser und Geologie; Sicherheit der Stauanlagen, Basisdokument zum Nachweis der Erdbebensicherheit, *Berichte des BWG Serie Wasser*, Version 1.2, Biel, 2003.

BWG, 2003b: Bundesamt für Wasser und Geologie; Sicherheit der Stauanlagen, Richtlinie zum Nachweis der Erdbebensicherheit: Anwendungsbeispiele an Sperren mit kleiner Stauhöhe, *Berichte des BWG Serie Wasser*, März 2003.

Finn, 1972: W.D. Liam Finn; Soil dynamics and liquefaction of sand, *Proceedings of the International Conference on Microzonation for safer Construction-Research and Application*, Seattle, Wash, 1972.

Makdisi-Seed, 1978: F.I. Makdisi, H.B. Seed; Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 104, No. GT7, pp 849-867, 1978.

Newmark, 1965: N.M. Newmark; Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, No. 15(2), pp 139-160, 1965.

Westergaard, 1931: H.M. Westergaard; Water Pressures on Dams During Earthquakes, *American Society of Civil Engineers*, Paper No. 1835, November 1931.