

Kurze Zusammenfassung allgemeiner Grundsätze für die Einbeziehung von dynamischen Ereignissen in Standsicherheitsnachweise für nachhaltig sanierte Kippenböschungen des Braunkohlenbergbaus Ostdeutschlands

Nur zur Information (www.ecm-ing.com) / Keine Berechnungsvorschrift
Dr.-Ing. Michael Lersow

1 Grundlagen:

Bei gefluteten oder in Flutung stehenden **Tagebaurestlöchern (TRL)** handelt es sich um einen Einstau von großen Mengen an Wasser, die auch als Stauanlagen geführt werden. **Die Kippenböschungen fungieren hier als Erdämme eines Wasserspeichers.** Die entstehenden oder bereits vorhandenen **Tagebaurestseen Ostdeutschlands** erfüllen alle Kriterien einer Stauanlage¹. Manche von ihnen werden direkt als solche genutzt – **Wasserspeicher Lohsa II** oder andere als solche angelegt – **Geiseltalsee** – und späterhin umgewidmet, siehe Tab. 1.

Die **Zuverlässigkeit von Stauanlagen** ist aufgrund des meist sehr hohen Schadenspotenzials von großer Bedeutung. **DIN 19700²** fordert im Zusammenhang mit der nachzuweisenden Zuverlässigkeit auch die Überprüfung der Erdbebensicherheit. Sonderregelungen für Hochwasserrückhaltebecken, Staustufen, Pumpspeicherbecken, Sedimentationsbecken sind in **DIN 19700-12 bis DIN 19700-15** behandelt, so dass diese Vorschriften für den Nachweis einer Langzeitstandsicherheit von nachhaltig sanierten Kippenböschungen des Braunkohlenbergbaus unter Einbeziehung von dynamischen Einwirkungen Anwendung finden muss³.

Tagebaurestsee/Wasserspeicher		Concordiasee	Geiseltalsee	Talsperre	Rappbode-Talsperre (Größte Talsperre Deutschlands)
Flutungsendstand/Einstaulamelle					
Wasserstand	[mNN]	103	98,05	Höhe über Gründungssohle [m]	106
Seewasservolumen	[Mio m ³]	183	409	Stauraum ² [Mio m ³]	109,08 ¹
Seefläche	[Mio m ²]	5,95	18,42	Wasserfläche [Mio m ²]	3,90 ²
Maximale Tiefe	[m]	62,0	78	Maximale Tiefe [m]	86,5
Mittlere Tiefe	[m]	32,8	23	Mittlere Tiefe [m]	k.A. ³
Seebodenprofil-Entwicklung ⁴				-	k.A.
¹ Einschließlich Totraum; ² Vollstau; ³ vom temporären Wasseranfall im Einzugsgebiet abhängig; ⁴ Verschnitt mittels Geo Referenzsystem z.Z. nur intern					

Tab. 1: Vergleich von Tagebaurestseen und Talsperren in Sachsen-Anhalt

Unter einer dynamischen Einwirkung, insbesondere auf Kippenböschungen des Braunkohlenbergbaus, sind nicht nur Erdbeben zu verstehen, sondern auch⁴:

Gebirgsschläge: ergeben sich beim plötzlichen Einbruch natürlicher oder künstlicher Hohlräume im Untergrund. Langsam entstehende Setzungen (durch bergbauliche Einwirkungen -

¹ LMBV mbH (2001): Empfehlungen und Bemessungsgrundlagen für die Gestaltung von Tagebaurestseen, Berlin/Senftenberg, Frankfurt (Oder)/Freiberg/Dresden

² Sonderregelungen für Hochwasserrückhaltebecken, Staustufen, Pumpspeicherbecken, Sedimentationsbecken: DIN 19700-12 bis DIN 19700-15

³ RWE power muss für seine Tagebau- und späteren Seeböschungen den Nachweis vorlegen, dass diese während der Befüllung und auch im Endzustand erdbebensicher sind. Auch Grundlage: Merkblatt 58: „Berücksichtigung von Erdbebenbelastungen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen“, LUA NRW, Essen 2006

⁴ Damit wird die ganze Palette möglicher dynamischer Ereignisse abgedeckt. Bei diesen dynamischen Ereignissen besteht allerdings ein Unterschied zum Lastfall „Erdbeben“, eine Wiederkehrperiode für diese dynamischen Ereignisse lässt sich nicht wirklich sicher voraussagen.

Bergsenkungsgebiet) ergeben zwar keine dynamischen Einwirkungen, können aber – sofern sie die Aufstandsfläche eines Absperrbauwerkes betreffen – zu gravierenden Schäden führen.

Sprengungen in der unmittelbaren Umgebung, siehe auch Sprengverdichtung.

Tiefenverdichtungsverfahren⁵: wie Sprengverdichtungen, Rütteldruckverdichtungen, Fallplattenverdichtungen etc. Deren Verwendung wird in der Sanierungstechnologie – dem Abschlussbetriebsplan geregelt.

Stauinduzierte Beben: Insbesondere beim ersten Einstau eines Staubeckens können aus der Änderung der Kluftwasserdrücke Erdbeben entstehen. Stauinduzierte Beben wurden bislang erst ab einer Höhe des Absperrbauwerkes von 100 m beobachtet.

Bei Tagebaurestlöchern können Vorgänge ähnlich eines hydraulischen Grundbruches ebenfalls einen Kollaps des Gesamtsystems bewirken.

Einzelnachweise bei dynamischen Einwirkungen, Nachweis der Dauerhaftigkeit:

- Böschungsbruchsicherheit
- Versagen der Haldenaufstandsfläche (Grundbruchsicherheit)
- Hydraulischer Grundbruch
- Bodenverflüssigung

Bei Dämmen ist neben der Erstellung von Tragsicherheitsnachweisen im Lastfall Erdbeben zusätzlich zu überprüfen, ob die Gefahr einer Bodenverflüssigung gegeben ist etc.

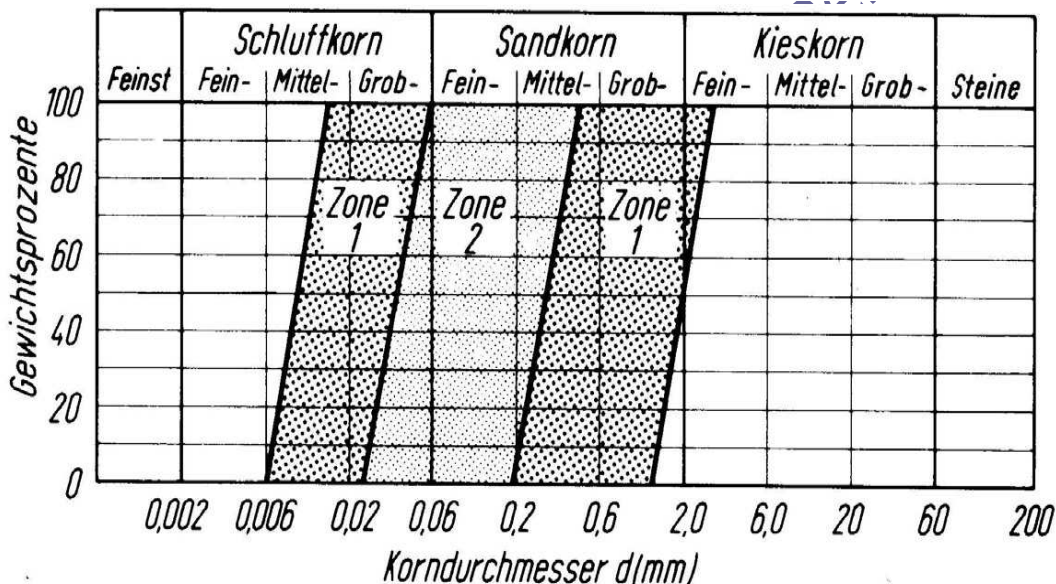


Abb. 1: Verflüssigungsgefährdete Kornverteilungsbereiche, aus Berücksichtigung von Erdbebenbelastungen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen. Merkblatt 58, Ministerium für Umwelt und Naturschutz²⁹, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Landesumweltamt, Essen 2006

2 Gefährdungen durch Erdbeben

2.1 Nachweis der Erdbebensicherheit von Stauanlagen (Wasserspeicher) nach DIN 19700 T10, Umfang der erforderlichen Nachweise:

- Erdbebenfall 1 (Betriebserdbeben: „BtE“)
- Erdbebenfall 2 (Bemessungserdbeben: „BmE“)
- Beurteilung des verbleibenden Restrisikos bei Überschreitung von BmE.

Erdbebenfall 1 – Betriebserdbeben (BtE)

Der Erdbebenfall 1 dient dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit der Stauanlage. Die Stauanlage (Wasserspeicher) muss dem Betriebserdbeben ohne

⁵ Die aufgeführten Tiefenverdichtungsverfahren entsprechen alle dem Stand der Technik und können demzufolge in den Sanierungstechnologien von Kippenböschungen Anwendung finden. Dennoch bewirken sie dynamische Initiale, die auch schon zu Kippenrutschungen geführt haben. Dies ist kein Widerspruch, sondern es wird lediglich darauf hingewiesen, dass deren Einsatz im jeweiligen Anwendungsfall genau recherchiert werden muss.

Nutzungsbeschränkungen widerstehen. Falls bei einem Erdbebenereignis die bei den Nachweisen des Betriebserdbebens berücksichtigten Beschleunigungen überschritten werden, ist nach dem Erdbebenereignis eine besondere Überprüfung der Stauanlage erforderlich. Eine besondere Überprüfung beinhaltet im vorliegenden Fall mindestens eine zusätzliche visuelle Kontrolle des Absperrbauwerkes und der Einzelbauwerke, die Durchführung von Sondermessungen einschließlich Auswertung sowie eine Überprüfung der Verschlüsse.

Erdbebenfall 2 – Bemessungserdbeben (BmE)

Der Erdbebenfall 2 dient dem Nachweis der Standsicherheit⁶ der Stauanlage (Wasserspeicher). Die Stauanlage muss dem Bemessungserdbeben ohne globales Versagen widerstehen. Insbesondere darf die Standsicherheit der Böschungen und Dämme nicht gefährdet werden; die Entleerungsmöglichkeit der Stauanlage nach einem Bemessungserdbeben ist zu bewerten⁷. Das Auftreten lokaler Schäden kann toleriert werden; in jedem Fall ist nach einem derartigen Erdbebenereignis eine besondere Überprüfung der Stauanlage erforderlich.

Die Intensität des Bemessungserdbebens ist höher als die des Betriebserdbebens und tritt am Standort der Stauanlage äußerst selten auf. Die zu berücksichtigenden Auftretenshäufigkeiten der beiden Erdbebenfälle 1 und 2 sind in DIN 19700-11 festgelegt. **Grundsätzlich gilt, dass an Standorten, an denen der Bemessungswert der Bodenbeschleunigung a_g des Bemessungserdbebens 4 % der Erdbeschleunigung unterschreitet, auf Nachweise gegenüber Erdbeben verzichtet werden darf, wenn nicht anderweitig verursachte erdbebenähnliche Beanspruchungen (z.B. Gebirgsschläge, Sprengungen, anlageninduzierte Seismizität) mit größeren Beschleunigungswerten auftreten können. Demzufolge sollte, z.B. wegen des untertägigen Braunkohlen-Altbergbaus, bei Tagebaurestseen nie auf diesen Nachweis verzichtet werden.**

Restrisiko

Das verbleibende Risiko bei Überschreiten des Bemessungserdbebens ist zu bewerten und in Abhängigkeit von den standortspezifischen Bedingungen durch flankierende, nachnutzungsseitige und/oder restriktive Maßnahmen ausreichend zu vermindern.

Als flankierende Maßnahme können das Langzeitmonitoring, ein Alarm- (Melde-)system und/oder ein Notfallplan dienen.

In der Regel finden als bewährte Nachweismöglichkeiten zertifizierte, allgemein anerkannte Rechenverfahren Anwendung. Selbstverständlich sind auch neu- und weiterentwickelte Verfahren zulässig, wenn diese mindestens gleichwertig und wissenschaftlich anerkannt sind.

Die Überprüfung der Erdbebensicherheit von Stauanlagen soll von Fachleuten erfolgen, die sowohl über entsprechende Kenntnisse im Wasserbau als auch im Erdbebeningenieurwesen verfügen. Für die Zwecke einer Erdbebengefährdungsanalyse⁸ ist das seismische Potenzial eines Erdbebengebietes zu beschreiben, um auf dieser Grundlage für den Standsicherheitsnachweis ein Bemessungserdbeben definieren können. Es eignen sich hierfür grundsätzlich die nachfolgenden zwei Definitionen:

Maximum Credible Earthquake:

The maximum earthquake that appears capable of occurring under the known tectonic framework⁹.

⁶ Standsicherheit, hier: Fähigkeit eines geotechnischen Bauwerkes und seiner Bestandteile, die Gesamtstabilität sowie einen für die anzunehmenden Einwirkungen ausreichenden Widerstand entsprechend einer festgelegten, erforderlichen Zuverlässigkeit zu gewährleisten.

⁷ Ein großvolumiger Austritt der eingestauten Wasserlamelle, so dass große Teile der angrenzenden Umgebung überflutet werden, ist für einen Tagebaurestsee der worst case (GAU).

⁸ Erdbebengefährdung, Maß dafür, wie häufig an einem bestimmten Ort eine bestimmte Erdbebenstärke erreicht oder überschritten wird

⁹ Kramer, St.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering; Upper Saddle River, N. J.(Prentice Hall) und Reiter, L. (1990): Earthquake Hazard Analysis – Issues and Insights, pp. 80-82. – Columbia University Press.

- The largest earthquake that can reasonably be expected to occur based on known geologic and seismologic data¹⁰.

Maximum **Considered** Earthquake:

- The Maximum Considered Earthquake ground motions are defined as the maximum level of ground shaking that is considered as reasonable to design normal structures to resist ... against collapse¹¹.
- ... taken as shaking with a 2 % chance of exceedance in 50 years (2,500-year return period)¹².
- ... [provides] collapse protection against the rare, but possible, 2 % in 50 years ground motion⁵.

Der Begriff des Maximum **Credible** Earthquake entstammt der **deterministischen Erdbebengefährdungsanalyse**. Es ist das stärkste Erdbeben, das unter den gegebenen tektonischen Verhältnissen im jeweiligen Gebiet denkbar ist. Dieses Worst-Case-Ereignis ist nicht mit einer Eintrittsrate verbunden, d.h. es kann in dem einen Gebiet im Mittel alle 200 Jahre, in dem anderen Gebiet alle 10.000 Jahre auftreten.

In der **probabilistischen¹³ Gefährdungsanalyse** wird dagegen der Begriff des Maximum **Considered** Earthquake verwendet. Ein grundsätzlicher Unterschied zwischen den beiden Begriffen besteht darin, dass das Maximum Credible Earthquake die Stärke eines Bebens selbst bezeichnet, während sich das Maximum Considered Earthquake auf die Erdbebeneinwirkung am jeweiligen Standort bezieht. Die entsprechende Wiederkehrperiode beträgt rechnerisch 2.475 Jahre, üblicherweise wird eine Periode von 2.500 Jahren als „runder“ Wert verwendet.

2.2 Deterministische¹⁴ Gefährdungsberechnung

Deterministische Verfahren betrachten die Einwirkung eines oder weniger Bemessungserdbeben an einem gegebenen Standort. Die Vorgehensweise bei der deterministischen Gefährdungsberechnung besteht aus vier Schritten:

1. Identifizierung aller potenziellen Erdbebenquellen, die auf den Standort einwirken können.
2. Bestimmung der jeweils kürzesten Entfernung zwischen Quelle und Standort.
3. Bestimmung des Bebens mit der maximalen Einwirkung am Standort aus allen Quellen in der jeweils kürzesten Entfernung.
4. Quantifizierung der Einwirkung mit Hilfe einer Abnahmebeziehung, die den Zusammenhang zwischen Erdbebenstärke und der Entfernung einerseits und dem Bodenbewegungsparameter am Standort andererseits wiedergibt.

Nachteil der deterministischen Gefährdungsberechnung ist, dass ein einzelnes Beben die Ergebnisse bestimmt und die Auswahl dieses Bemessungsbebens je nach Bearbeiter unterschiedlich sein kann. Außerdem führt sie häufig zu einer Überdimensionierung der Bemessung im Vergleich zur probabilistischen Gefährdungsberechnung.

2.3 Probabilistische Gefährdungsberechnung

Bei der probabilistischen Gefährdungsanalyse basiert die Bemessung nicht auf einem oder wenigen einzelnen Beben. Die Vorgehensweise besteht aus vier Schritten¹⁵ und⁸:

1. Identifizierung aller potentieller Erdbebenquellen, die auf den Standort einwirken können. Dabei kann es sich um die Lokationen früherer Erdbeben handeln, die als Punktquellen

¹⁰ Day, R. W. (2002): Geotechnical Earthquake Engineering Handbook, pp. 5.33-5.41. – McGraw-Hill.

¹¹ Leyendecker, E. V., Hunt, R. J., Frankel, A. D. & Rukstales, K. S. (2000): Development of Maximum Considered Earthquake Ground Motion Maps. – Earthquake Spectra 16 (1): 21-38.

¹² Holmes, W.T. (2000): The 1997 NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. – Earthquake Spectra 16 (1): 101-114.

¹³ Aus probabilistischen oder stochastischen Modellen erhält man Ergebnisse über die Auftretenswahrscheinlichkeiten von manifesten, beobachtbaren Ereignissen oder diese Modelle liefern für bestimmte Eingabedaten unterschiedliche Ausgabedaten (Zufallsmechanismus).

¹⁴ Ein Modell heißt deterministisch, wenn eine eindeutige Beziehung zwischen Eingabedaten und Ausgabedaten besteht

¹⁵ Thenhaus, P. C. & Campbell, K. W. (2003): Seismic Hazard Analysis. – In: Earthquake Engineering Handbook, eds.: Chen, W.-F. & Scawthorn, CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D. C.

behandelt werden oder zusammengefasst durch Gitterzellen oder Erdbebenzonen repräsentiert werden, in denen das Auftreten eines Bebens an jedem Ort gleich wahrscheinlich ist. Darüber hinaus können auch aktive Verwerfungen, an denen in historischer Zeit kein Beben aufgetreten ist, die aber durch paläoseismische Untersuchungen als potenzielle Quellen erkannt wurden, in Form von Linienquellen oder bei Berücksichtigung der Tiefenerstreckung als Flächenquellen einbezogen werden.

2. Vorgabe einer Magnituden-Häufigkeitsbeziehung für jede Quelle. Es werden also alle relevanten Bebenstärken je nach ihrer Überschreitensrate einbezogen.
3. Vorgabe einer Abnahmebeziehung, aus der die Einwirkung am Standort für jede Kombination von Erdbebenstärke und Entfernung berechnet werden kann, einschließlich ihrer Standardabweichung.
4. Aufsummierung aller Einwirkungen aus den verschiedenen Quellen und den Überschreitensraten verschiedener Bebenstärken in jeder Quelle. Daraus ergeben sich Überschreitensraten des Standortparameters, also z.B. Überschreitensraten als Funktion der Beschleunigung oder der Standortintensität. Da diese Berechnungen normalerweise numerisch erfolgen, liegen diese Beziehungen gewöhnlich in Form von Tabellen vor oder werden grafisch als Gefährdungskurven dargestellt.

Die probabilistische Gefährdungsberechnung erlaubt es auch, Unsicherheiten in den Eingangsdaten zu berücksichtigen. So genannte aleatorische Unsicherheiten sind die Folge der Streuung natürlicher Prozesse, z.B. unterschiedliche Herdvorgänge bei einem Erdbeben oder die Streubreite der Abnahmebeziehung. Sie werden durch Standardabweichungen im Rechenformalismus berücksichtigt. So genannte epistemische Unsicherheiten entstehen durch mangelnde Kenntnis der Eingangsgrößen. So ist oft nicht bekannt, welche Abnahmebeziehung die lokalen Gegebenheiten am besten repräsentiert, oder welche Maximalmagnitude ein Herdgebiet generieren kann. In solchen Fällen können verschiedene Szenarien durchgerechnet und mit Hilfe eines logischen Baumes zu einer Gesamtlösung kombiniert werden. Wenn man annimmt, dass die Erdbeben in einem Gebiet voneinander unabhängig auftreten – sich also nicht gegenseitig beeinflussen oder „triggern“ –, dann kann man den zeitlichen Ablauf der Erdbebenstätigkeit mathematisch mit Hilfe der statistischen Poissonverteilung beschreiben. Dadurch können die Wiederkehrperioden bzw. Überschreitensraten am Standort auch als Überschreitenswahrscheinlichkeiten ausgedrückt werden. Die Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren entspricht einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren, die von 2 % in 50 Jahren einer Wiederkehrperiode von 2.475 Jahren. Wenn man direkt von Wiederkehrperioden ausgeht, werden gewöhnlich die „runden“ Werte 500 und 2.500 Jahre verwendet. **Die probabilistische Gefährdungsberechnung hat sich bei geotechnischen Bauwerken durchgesetzt. Dazu sollten auch die für die Wiedernutzbarmachung stabilisierten Kippenböschungen von Tagebaurestlöchern, insbesondere für den Fall des Einstauens, gehören. Die probabilistische Methode kommt auch dem Auftreten von Erdbeben allgemein am nächsten, denn die meisten der renommierten Seismologen vertreten die Ansicht, dass sich Erdbeben grundsätzlich nicht vorhersagen lassen. Jedes große Beben beginnt genau so wie ein Mikroben an einem einzelnen Punkt, dem Hypozentrum. Der Bruchvorgang beim Mikroben stoppt dann wieder, der beim großen Beben jedoch nicht. Hier liegt möglicherweise chaotisches Verhalten der Gesteinsmechanik im Spannungsfeld der Erdkruste vor, ähnlich wie beim Klima eine kleine Ursache große Wetterphänomene verursachen kann (Theorie des Chaos).**

2.4 Die Erstellung von Sicherheitsnachweisen im Lastfall Erdbeben setzt voraus, dass folgende für eine Berechnung erforderliche Eingangsgrößen bekannt sind:

- Geometrie des Absperrbauwerkes
- Materialeigenschaften
- Untergrundverhältnisse
- Hydrogeologische Verhältnisse des Standortes
- Belastung. Neben den „normalen Lasten“ müssen die Einwirkungen infolge Erdbeben mit der entsprechenden Wiederkehrperiode bekannt sein

3 Erdbebenzonen, standortspezifische Auswahl von Betriebserdbeben und Bemessungserdbeben

3.1 Erdbebenzonen

Die Intensität eines Bebens bestimmt man, indem die an der Erdoberfläche sichtbaren und fühlbaren Auswirkungen des Bebens mit den Angaben einer Skala, der Intensitätsskala, verglichen werden. In Europa wird derzeit die zwölfstufige „EMS-98-Skala“ („European Macroseismic Scale 1998“) verwendet. Liegt eine ausreichende Anzahl von Beobachtungen vor, kann man die Gebiete

Intensität	Definition	Beschreibung typischer Effekte
I	Nicht verspürt	Nicht fühlbar
II	Vereinzelt verspürt	Von wenigen ruhenden Personen in Häusern verspürt.
III	Schwach	In Häusern von einigen Personen verspürt. Ruhende Personen empfinden ein leichtes Schwingen oder zittern.
IV	Weitgehend bemerkt	In Häusern von vielen Personen verspürt, im Freien nur von sehr wenigen. Einige Personen erwachen. Fenster Türen und Geschirr klappern.
V	Stark	In Häusern von den meisten Personen verspürt, im Freien nur von wenigen. Einige Personen erschrecken. Gebäude zittern an allen Stellen. Hängende Gegenstände schwingen deutlich hin und her. Kleine Gegenstände werden verschoben. Türen und Fenster öffnen und schließen sich.
VI	Leichte Schäden	Viele Personen erschrecken und laufen ins Freie. Einige Gegenstände fallen zu Boden. Viele Häuser erleiden leichte nicht-strukturelle Schäden wie Putzrisse und das Herunterfallen von Putzteilen.
VII	Schäden	Die meisten Personen erschrecken und laufen ins Freie. Möbel werden versetzt und viele Gegenstände auf Regalen fallen zu Boden. Viele solide gebaute Häuser erleiden moderate Schäden: schmale Risse in Wänden, Herunterfallen von Putz und von Schornsteinteilen; einige ältere Gebäude weisen große Risse in Wänden und das versagen nicht versteifter Wände auf.
VIII	Schwere Schäden	Viele Personen haben Schwierigkeiten zu stehen. Viele Häuser haben breite Risse in Wänden, Herunterfallen von Putz und von Schornsteinteilen; einige alte Gebäude weisen große Risse in Wänden und das Versagen nichtversteifter Wände auf.
IX	zerstörend	Allgemeine Panik Viele schwache Gebäude stürzen ein. Auch solide gebaute Häuser zeigen schwere Schäden: erhebliches Versagen von Wänden, teilweise strukturelles Versagen.
X	sehr zerstörend	Viele solide gebaute Häuser stürzen ein.
XI	verwüstend	Die meisten solide gebauten Häuser stürzen ein, auch einige auf Erdbeben ausgelegte Gebäude werden zerstört.
XII	vollständig verwüstend	Fast alle über- und unterirdischen Bauwerke werden zerstört oder schwer beschädigt (Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört).

Tab.2: „EMS-98-Skala“ - „European Macroseismic Scale 1998“, Herausgeber Gottfried Grünthal, Luxembourg 1998

gleicher Intensität durch Linien, die Isoleisten¹⁶, abgrenzen. Aus der räumlichen Intensitätsverteilung lassen sich die Lage des Epizentrums¹⁷ und die Herdtiefe ableiten. Die Intensitätswerte sind abhängig von den Beschleunigungen, die im Epizentralgebiet auftreten. In der Abb. 2 sind diese grafisch dargestellt und in der Tab. 2 sind die Auswirkungen nach der zwölfstufigen EMS-98-Skala verbal beschrieben.

Für die Erstellung von Sicherheitsnachweisen für den Lastfall Erdbeben ist die EMS-98-Skala nicht geeignet. In DIN 4149:2005 sind die Erdbebengebiete Deutschlands in Zonen¹⁸ eingeteilt, denen jeweils Intensitäts- und Beschleunigungswerte zugeordnet sind. Sie berücksichtigt auch die jeweiligen Untergrundverhältnisse, die zu einer Verstärkung oder Abminderung der Beschleunigungen führen können.

DIN 4149:2005 legt Erdbebeneinwirkungen zugrunde, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren einmal erreicht oder überschritten werden (Wiederkehrperiode 475 Jahre). Sie gibt für die Erdbebenzonen 1 bis 3 Intensitäten und horizontale Effektivbeschleunigungen aufgrund

¹⁶ Isoleisten verbinden Punkte gleicher Intensität. Es handelt sich um Isolinien

¹⁷ Epizentrum, Punkt auf der Erdoberfläche über dem Mittelpunkt der Bruchzone des Erdbebens

¹⁸ Erdbebenzone, Geographisches Gebiet mit konstantem Bemessungsbeben.

probabilistischer Berechnungen vor. Aus der Zuordnung eines Standortes zu einer Erdbebenzone, einer geologischen Untergrundklasse und einer Baugrundklasse können die Bemessungswerte aus DIN 4149:2005 entnommen werden.

Für Anlagen, von denen bei Schäden durch Erdbeben eine zusätzliche Gefährdung für die Bevölkerung ausgehen kann, gilt DIN 4149:2005 nicht. Hierfür ist ein höheres Sicherheitsniveau anzusetzen. **Dies trifft auch auf Tagebaurestseen mit ihren großen Einstaulamellen zu.** Gemäß DIN 19700-10 sind große Talsperren der Klasse 1 gegen Erdbebeneinwirkungen mit einer Wiederkehrperiode¹⁹ von 2.500 Jahren sicher auszulegen, Talsperren der Klasse 2 gegen Erdbebeneinwirkungen mit einer Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren. Die Wiederkehrperiode von 2.500 Jahren entspricht in etwa einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2 % in 50 Jahren. Im Vergleich zu DIN 4149:2005 werden bei DIN 19700-10 also nicht Überschreitenswahrscheinlichkeiten vorgegeben sondern Wiederkehrperioden. Über die Verfahrensweise zur Ermittlung der Erdbebeneinwirkungen macht DIN 19700-10 keine weiteren Angaben. Eine Einteilung in Zonen mit Angabe von Bemessungswerten enthält DIN 19700-10 nicht.

3.2 Bemessungswerte der Bodenbeschleunigungen

Den Erdbebenzonen sind Bemessungswerte der Bodenbeschleunigung zugeordnet, die für die jeweilige Referenzintensität der Zone als Effektivbeschleunigung auf felsigem Untergrund ermittelt worden sind. Die Grenzbereiche zwischen den Erdbebenzonen 0 – 1 – 2 – 3 entsprechen Isolinien mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren für die Intensitäten 6,0 – 6,5 – 7,0 – 7,5 der EMS (Europäische Makroseismische Skala)²⁰. Die Wiederkehrperiode von 475 Jahren, die einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren entspricht, ist die Referenz-Wiederkehrperiode für die harmonisierten Erdbebengefährdungskarten gemäß Eurocode 8.

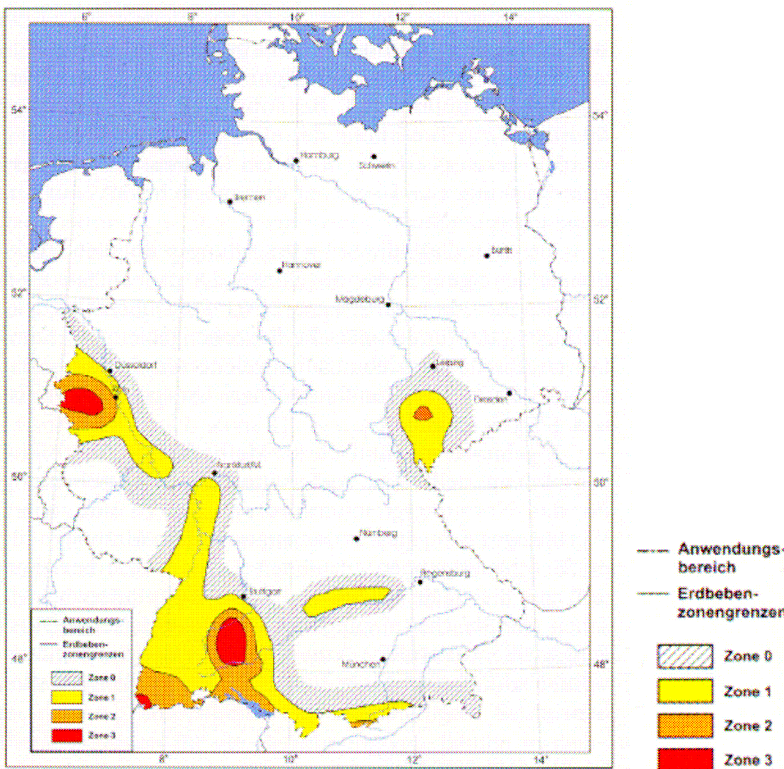


Abb. 2: Erdbebenzonen der DIN 4149 [1]
Quelle: DIN 4149: 2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten

Die Anwendung der Norm beschränkt sich auf die Zonen 1 bis 3. D.h., grundsätzlich gilt, dass an Standorten, an denen der Bemessungswert

Bodenbeschleunigung a_g des Bemessungserdbebens 4 % der Erdbeschleunigung unterschreitet, auf Nachweise gegenüber Erdbeben

verzichtet werden darf, wenn nicht anderweitig verursachte erdbebenähnliche Beanspruchungen (z.B. Gebirgsschläge, Sprengungen, anlageninduzierte Seismizität) mit größeren Beschleunigungswerten auftreten können. **Demzufolge sollte (darf) z.B. wegen des untertägigen Braunkohlen-Altbergbaus bei Tagebaurestlöchern, insbesondere wenn diese zur Nachnutzung eingestaut werden, nie auf diesen Nachweis verzichtet werden!**

¹⁹ Wiederkehrperiode, Zeitdauer innerhalb der bei sehr langer Beobachtungsdauer eine gewisse Erdbebenstärke im Mittel einmal erreicht oder überschritten wird
²⁰ Grünthal, G., Bosse, C.: Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland – Erdbebenzonenkarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8. Forschungsbericht, Geo Forschungszentrum Potsdam 1996

Es ist schon beachtenswert, dass bei der Auslegung und Gestaltung der seeseitigen

Erdbebenzone	Intensitätsintervalle	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung a_g [ms^{-2}]
0	$6 \leq I < 6,5$	-
1	$6,5 \leq I < 7,0$	0,4
2	$7,0 \leq I < 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

Kippenböschung einerseits auf einen dynamischen Standsicherheitsnachweis verzichtet wird, andererseits bei der langwierigen Ursachensuche für das Böschungsversagen immer wieder die Möglichkeit in den Fokus gerückt wird, dass ein dynamisches Ereignis zum Versagen des Nachterstoffer Böschungssystem geführt haben könnte. Es ist zu hoffen, dass nunmehr einerseits ein dynamischer

Tab.3: Zuordnung von Intensitätsintervallen und Bemessungswerten der Bodenbeschleunigung zu den Erdbebenzonen nach DIN 4149: 2005-04

Standsicherheitsnachweis für Tagebaurestlöcher Regelfall wird, andererseits größere Investitionen in den Aufbau eines Langzeitmonitoring getätigt werden, mit einem Frühwarnsystem zur Erkennung von bisher unbekanntem Gefahren bzw. von Anzeichen, die auf ein Versagen hinweisen können.

Eine allgemeine Überlegung dazu wäre, auch der Erdbebenzone 0 einen Bemessungswert der Bodenbeschleunigung a_g zu zuweisen. Diese ließe sich wie folgt begründen:

Erdbeschleunigung $g=9,81 \text{ ms}^{-2}$ davon 4% entspricht $a_g = 0,3924 \text{ ms}^{-2}$. Dieser Wert könnte zunächst für die Erdbebenzone 0 für den dynamischen Standsicherheitsnachweis der Tagebaurestlöcher in dieser Erdbebenzone allgemein zum Ansatz gebracht werden. Allerdings müssen weitere Überlegungen in den Bemessungswert für den konkreten Nachweisfall einfließen, dies soll weiter unten ausgeführt werden.

3.3 Allgemeines Sicherheitskonzept aus der DIN 19700, insbesondere für Tagebaurestlöcher, die für die Nachnutzung mit einer Einstaulamelle geflutet werden (sind)

In DIN 4149:2005 sind die Erdbebengebiete Deutschlands in Zonen eingeteilt, denen jeweils Intensitäts- und Beschleunigungswerte zugeordnet sind. Sie berücksichtigt auch die jeweiligen Untergrundverhältnisse, die zu einer Verstärkung oder Abminderung der Beschleunigungen führen können. Zudem ist nachzuweisen, dass die Zuverlässigkeit des Absperrbauwerkes nicht durch Einzelbauteile und -bauwerke, die im Zusammenhang mit dem Absperrbauwerk stehen, ungünstig beeinflusst wird. Gleiches gilt sinngemäß für die Staubeckenhänge sowie für Böschungen. Die Vorgehensweise bei der Erstellung der erforderlichen Sicherheitsnachweise für Stauanlagen ist grundsätzlich in DIN 19700-11 erläutert. DIN 19700-11 ist zwar zunächst für Talsperren anzuwenden, in den Teilen 12-15 der DIN 19700 (Hochwasserrückhaltebecken, Staustufen, Pumpspeicherbecken, Sedimentationsbecken) wird aber hinsichtlich der Durchführung der Sicherheitsnachweise auf Teil 11 verwiesen.

Bei der Überprüfung der Tragsicherheit ist nachzuweisen, dass ein ausreichender Sicherheitsabstand des Tragwerks gegenüber Versagen vorhanden ist.

Die Tragwiderstände werden durch Kennwerte festgelegt, die die Verformbarkeit, Festigkeit, Durchlässigkeit und den allgemeinen Zustand von Absperrbauwerk und Untergrund sowie die Wirksamkeit von baulichen Einrichtungen beschreiben. Es wird zwischen drei Tragwiderstandsbedingungen unterschieden:

- Tragwiderstandsbedingung A wahrscheinliche Bedingung
- Tragwiderstandsbedingung B wenig wahrscheinliche Bedingung
- Tragwiderstandsbedingung C unwahrscheinliche Bedingung

Im Rahmen der Standsicherheitsnachweise für nachhaltig sanierte Kippenböschungen sollten die folgende Kriterien, analog DIN 19700-11, überprüft werden,:

- **Aufnahme der Spreizspannungen in der Böschungsaufstandsfläche**
- **Versagen der Haldenaufstandsfläche (Grundbruchsicherheit)**
- **Standsicherheit der Böschung, Verformungsverhalten**
- **Hydraulischer Grundbruch, Erosionssicherheit (innere Erosion, Suffosion etc.)**
- **Bodenverflüssigung**

Die Standsicherheit von Böschungen, insbesondere der seeseitigen Kippenböschungen, ist nach DIN 1054 (gültige Sicherheitsnachweise in der [Geotechnik](#)) und DIN 4084 (geforderte globale Sicherheiten, siehe auch Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte in DIN 1054:2005) nachzuweisen.

Erdbebeneinwirkungen sind gekennzeichnet durch die Intensität sowie durch die Charakteristik und die Höhe der Bodenbeschleunigung. Bei Talsperren der Klasse 1 ist die Erstellung eines seismologischen Gutachtens erforderlich; bei Talsperren der Klasse 2 sind diesbezüglich Vereinfachungen erlaubt (vgl. Abschnitt 4.1).

3.4 Vorschlag eines Konzeptes für Tagebaurestlöcher in Ostdeutschland analog DIN 19700-11 als Regelnachweis

Vorbemerkung

Es sollen die Standsicherheitsnachweise, insbesondere für die seeseitigen Kippenböschungen, für das Betriebserdbeben (Lastfall 2) und für das Bemessungserdbeben (Lastfall 3) geführt werden. Vor Durchführung der Nachweise ist eine Festlegung der Stärke des zu berücksichtigenden Erdbebens erforderlich. Von Bedeutung hierbei ist neben den geologisch-tektonischen Verhältnissen die Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. Wiederkehrperiode des Bebens. Bei Erdbebenzone 0 sollte der Bemessungswert der Bodenbeschleunigung $a_g \leq 0,3924 \text{ ms}^{-2}$ **festgesetzt werden.**

Wiederkehrperiode

Infolge eines Erdbebens entstehen Beanspruchungen der Kippenböschungen. Die Beanspruchungen sind umso größer, je größer die Intensität eines Erdbebens ist. Die Intensität eines Erdbebens ist u.a. abhängig von der Wiederkehrperiode. Je länger die Wiederkehrperiode, desto höher ist die anzunehmende Intensität des Erdbebens.

Bei der Festlegung der Wiederkehrperiode wird auf die von Talsperren der Klasse 1 (große Talsperren) verwiesen. Folgende Wiederkehrperioden sind anzusetzen:

a) Bemessungserdbeben

Talsperren der Klasse 1: $T=2.500a$ (Eintrittswahrscheinlichkeit 4×10^{-4})

b) Betriebserdbeben

Talsperren der Klasse 1: $T=500a$ (Eintrittswahrscheinlichkeit 2×10^{-3})

Die Wahl der Wiederkehrperiode für das Betriebserdbeben beruht nicht auf Sicherheitsüberlegungen, sondern berücksichtigt die Nutzungstauglichkeit in der Nachnutzungsperiode von Tagebaurestlöchern bzw. für die Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit. Diese sollte mit einem Frühwarnsystem begleitet werden. Wird eine kürzere Wiederkehrperiode (kleineres Erdbeben) zum Ansatz gebracht, ist zu beachten, dass dies zwangsläufig zu kleineren Alarmwerten führt. D.h., bereits bei einem sehr kleinen dynamischen Ereignis würde Alarm ausgelöst werden. Dies kann gewollt sein, muss aber bedacht werden.

Grundsätzliche Nachweismöglichkeiten

Absperrbauwerke von Talsperren der Klasse 1

Bei Tagebaurestlöchern (große Einstaulamelle) sollte der folgende Ansatz gewählt werden:

Die Standsicherheitsnachweise sind mit dynamischen Berechnungsmodellen zu führen. Weiterhin ist analog Hochwasserrückhaltebecken

- Das Bemessungserdbeben in Kombination mit dem Wasserdruck und der Strömungskraft bei Dauerstauziel anzusetzen.

Bei Kippenböschungen von Tagebaurestseen, insbesondere der seeseitigen, sind Nachweise mit dem Bemessungserdbeben bei temporär veränderlicher Einstaulamelle sowie Bezug auf die jeweilige GW-Situation zu führen und in zeitlichen Abständen zu wiederholen. Dies führt letztendlich zu einer Verifizierung des Nachweisverfahrens, da gleichzeitig ein Abgleich zwischen den vorhandenen Zustandsgrößen und den Ergebnissen aus den Nachweisverfahren stattfindet. Die möglichen Belastungen (Einwirkungen), insbesondere auf das seeseitige Böschungssystem, sind in einer Belastungstabelle (Matrix) aufzuführen und fortzuschreiben. Langzeitstandsicherheitsnachweise sind abschließend sowohl mit dem Betriebserdbeben als auch dem Bemessungserdbeben bei maximaler Einstaulamelle zu führen. (Berücksichtigung der Schwankungen in der Höhe der Einstaulamelle, siehe auch Tabelle 2 und Tabelle 3). **Das Potenzial einer Bodenverflüssigung bei dynamischer Beanspruchung ist besonders zu untersuchen.**

Besondere Bedeutung für die Standsicherheit von Kippenböschungen bei dynamischen Einwirkungen haben in die Böschung eingebaute „Einzelbauwerke“ (insbesondere nach deren Endprofilierung und Stabilisierung), die im Zusammenhang mit dem geotechnischen Bauwerk als solches gebracht werden müssen und die dieses ungünstig beeinflussen, siehe auch DIN 19700 . Die unter 3.3 aufgeführten Kriterien sind daraufhin zu prüfen, siehe auch eingebaute Slipanlage (2008) und großvolumiger Bodenaustausch (2009) im Nachterstedter Böschungssystem.

3.5 Messeinrichtungen

Wie bereits erläutert, müssen die Kippenböschungen, insbesondere von Tagebaurestseen, einem Betriebserdbeben ohne Nachnutzungseinschränkungen (Gewährleistung der öffentlichen Sicherheit) widerstehen. Bei allen Kippenböschungen von Tagebaurestseen für die ein Nachweis des Betriebserdbebens Bestandteil des Abschlussbetriebsplanes ist, hat der Eigentümer des Tagebaurestsees Sorge dafür zu tragen, dass er informiert wird, wenn ein Erdbeben mit einer Stärke größer der des Betriebserdbebens aufgetreten ist. Ein entsprechendes Konzept hierzu muss vom Eigentümer des Tagebaurestsees erstellt und mit der Aufsichtsbehörde abgestimmt werden. wird Gegenstand des Abschlussbetriebsplanes Gegebenenfalls ist ein eigenes Schwingungsmessgerät aufzustellen. An Standorten mit größerer seismischer Aktivität sollte überprüft

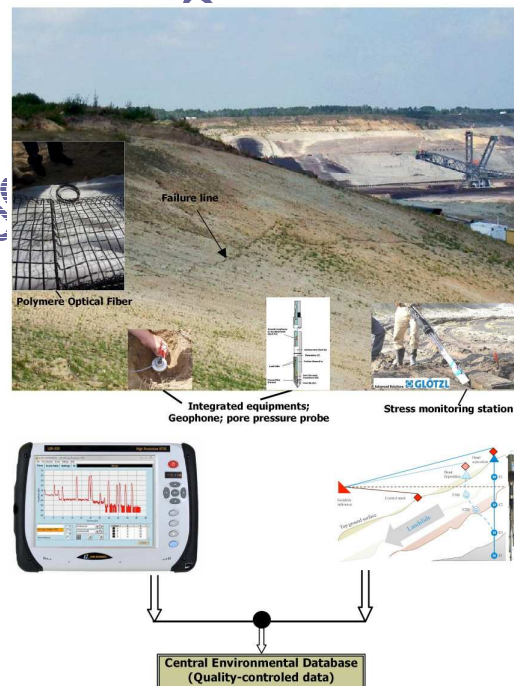


Abb. 3: Prinzip einer standortspezifischen Monitoringstation mit zentraler Datenerfassungs- und Auswertungseinheit (Umweltdatenbank) – Frühwarnsystem²¹

werden, ob die Installation eines weiteren Messgerätes notwendig wird. So wird es auch möglich, bei Erdbeben (Schwingfrequenzen, Dämpfung etc.) mit den Ergebnissen der Standsicherheitsnachweise zu vergleichen und damit zu verifizieren. Ergänzt werden kann das Konzept durch mobile Messgeräte, mit denen das Schwingverhalten der Kippenböschungen während besonderer, vorübergehender Ereignisse (z.B. Sprengungen während der Sanierung) gut überwacht werden kann.

Grundsätzlich sind an Seismometer zur permanenten Überwachung von Kippenböschungen von Tagebaurestlöchern die folgenden Mindestanforderungen zu stellen:

- automatische Aufzeichnung von Messwerten ab einem vorzugebenden Schwellenwert
- Messung von Beschleunigungen in drei Richtungen
- Messung auch großer Beschleunigungen („Starkbeben“)
- Ausreichend hohe Abtastrate und Auflösung
- Alarmierungsfunktion

Für ein Begleit- und Langzeitmonitoring mit Frühwarnsystem²¹ für nachhaltig sanierte Kippenböschungen ließe sich die folgende Anordnung vorstellen, siehe Abb. 3²¹.

3.6 Erdbebeneinwirkung

Die Bestimmung der Erdbebeneinwirkung in DIN 4149 basiert auf folgenden Neuentwicklungen:

- Probabilistische Erdbebenzonenkarte, Abb. 2
- Bemessungswerte der Bodenbeschleunigungen als Effektivbeschleunigungen, Tab. 3
- **Die Effektivbeschleunigung ist das 0,7 fache der Spitzenbeschleunigung**
- Elastisches Antwortspektrum mit Berücksichtigung von Baugrund und geologischem Untergrund, Abb. 4
- Geologische Untergrundklassen, Tab. 4 und Abb. 5, 6

3.7 Elastisches Antwortspektrum

Mit dem elastischen Antwortspektrum wird die Beschleunigung eines linearelastischen Einmassenschwingers mit der Eigenschwingzeit T (s) angegeben. Die Ordinate des elastischen Antwortspektrums $S_e(T)$ in DIN 4149 spiegelt verschiedene Einflussgrößen wider

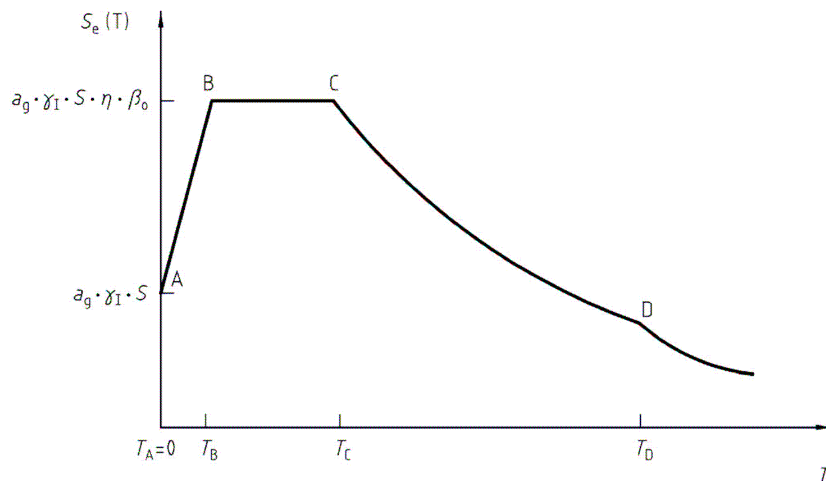


Abb. 4: Elastisches Antwortspektrum²²

Für Eigenperioden im Plateaubereich gilt:

$$S_e(T) = a_g \cdot \gamma_I \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \quad (\text{für } T_B \leq T \leq T_C) \quad [1]$$

mit: a_g : Bemessungswert der Bodenbeschleunigung je nach Erdbebenzone

β_0 : Verstärkungswert der Spektralbeschleunigung, $\beta_0 = 2,5$ für 5% Dämpfung

η : Dämpfungswert ($\eta = 1,0$ für 5% Dämpfung)

γ_I : Bedeutungswert in Abhängigkeit der Bedeutung des Bauwerks für den Schutz der Allgemeinheit

$\gamma_I = 1,0$ z.B. Wohngebäude

$\gamma_I = 1,2$ z.B. Schulen, große Wohnanlagen

$\gamma_I = 1,4$ z.B. Krankenhäuser

γ_I entspricht im Prinzip einem Sicherheitsfaktor, mit dem die Beschleunigungen ggf. erhöht werden.

S: Untergrundparameter

Dieser Parameter wird in Abhängigkeit des geologischen Untergrunds (R,T,S) und des Baugrunds (A,B,C) bestimmt (vgl. Abb. 4). Mit dem Baugrund wird der oberflächennahe Untergrund bis zu

²¹ M. Lersow; Sichere und langzeitstabile Verwahrung von Tailings ponds, insbesondere aus der Uranerzaufbereitung; Geotechnik 33 (2010) Nr.4, S 351-369, VGE Verlag GmbH, Essen

²² DIN 4149: 2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, Normenausschuss im Bauwesen (NABau) im DIN – April 2005, Berlin

einer Tiefe von etwa 20 m, mit dem geologischen Untergrund der Bereich ab einer Tiefe von 20 m bezeichnet.

Untergrundverhältnisse	S	T _B [s]	T _C [s]	T _D [s]
A-R	1,00	0,05	0,20	2,0
B-R	1,25	0,05	0,25	2,0
C-R	1,50	0,05	0,30	2,0
B-T	1,00	0,1	0,30	2,0
C-T	1,25	0,1	0,40	2,0
C-S	0,75	0,1	0,50	2,0

Baugrundklassen:

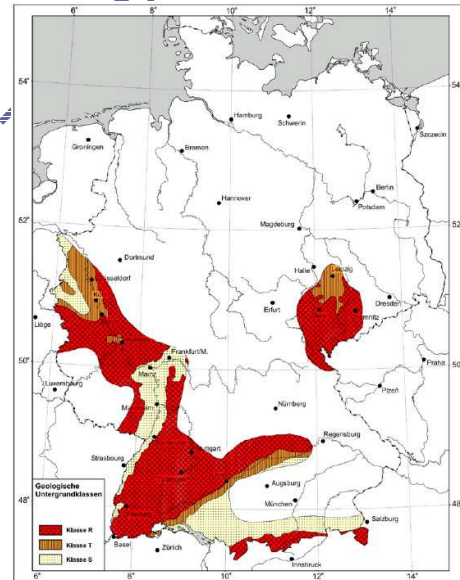
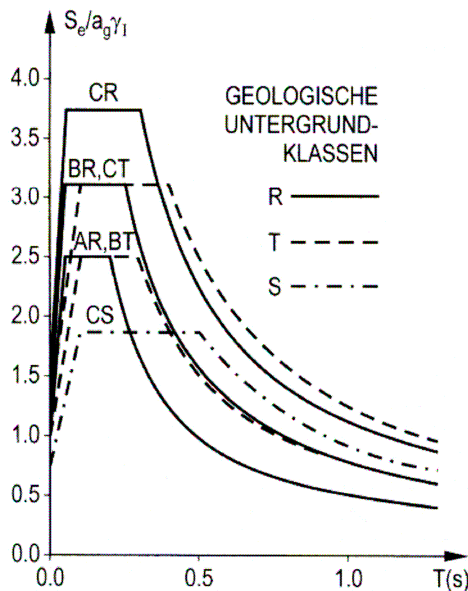
- A: Feste bis mittelfeste Gesteine
- B: Lockergesteine, grobkörnig
- C: Lockergesteine, feinkörnig

Geologische Untergrundklassen:

- R: Fels, Festgestein
- T: Flache Sedimentbecken und Übergangszonen
- S: Tiefe Sedimentbecken

Tab. 4: Werte für den Untergrundparameter S²²

In DIN 4149 wird über den unmittelbaren Baugrund hinaus der Einfluss des geologischen Untergrunds auf den Spektralwert (Ordinate, Frequenzbereich) erfasst. Der Felsuntergrund (R) führt zu schmalen Spektren mit höheren Spektralwerten, während die tiefen und mächtigen Sedimentbecken (S) mit ihrer Absorptionswirkung zu niedrigeren Spektralwerten über einem breiten Frequenzbereich führen. In Abb. 5 sind die Spektren für die einzelnen Untergrund-Baugrundkombinationen, in Abb. 6 die geologischen Unterklassen in Deutschland dargestellt.



Karte der geologischen Untergrundklassen in Deutschland

Abb.5: links, Elastische Antwortspektren für verschiedene Untergrundverhältnisse;
Abb.6: rechts, Karte der geologischen Unterklassen in Deutschland

Beispiel: In der Abb.7 ist für den geographischen Punkt (Lat: 51.81°; Lon.:11.34°; Alt.:0km) das elastische Antwortspektrum für die Unterklassen (T,S) dargestellt. Dieser Punkt befindet sich auf der verunfallten Nachterstedter Böschung, im Areal der ehemaligen Slipanlage.

Sowohl die 2008 errichtete Slipanlage als auch die bis April/2009 erfolgte großvolumige Auskoffnung einer Kontamination im Bereich der ehemaligen Brikettfabrik mit nachfolgendem Bodenaustausch und Rütteldruckverdichtung (schwebender Einbau) sind in das geotechnische Umweltbauwerk (sanierte Kippenböschung: Hochkippe mit Stützanschüttung, Profilierung und Stabilisierung etc.) eingebaute „Einzelbauwerke“. Nach DIN 19700 ist nachzuweisen, dass die Zuverlässigkeit der nachhaltig sanierten Kippenböschung nicht durch Einzelbauwerke, die im Zusammenhang mit der Kippenböschung stehen, ungünstig beeinflusst wird.

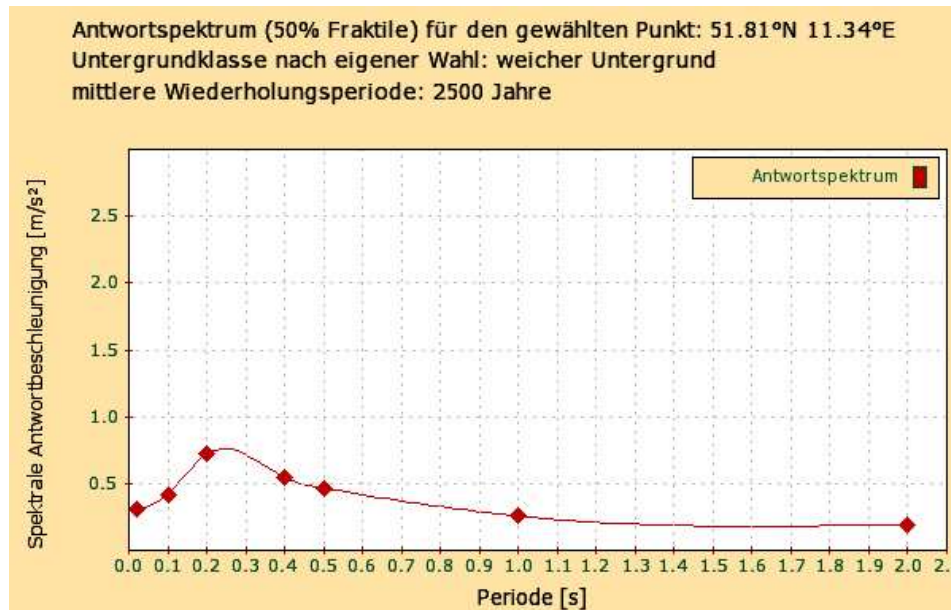


Abb.7: Antwortspektrum für den geographischen Punkt (Lat: 51.81; Lon.:11.34; Alt.:0)

Der Eigentümer des Nachterstedter Böschungssystem, die LMBV mbH, gibt in einer Antwort auf eine entsprechende Fragestellung Folgendes zur Kenntnis, Quelle: <http://www.lmbv.de/pages/layout1sp.php?idpage=2103#1.5>

„... Insbesondere wurde dabei die Stabilität der Böschung in engen Zeitabständen überprüft. In Abhängigkeit vom erreichten Wasserspiegel des Concordiasees wurden in den Jahren 1997, 1998, 2001, 2003, 2006, und 2008 Untersuchungen durchgeführt, mit denen die Stabilität der Böschung bei dynamischer Belastung überprüft wurde. Zwei Tests fanden 2008 unmittelbar in der Nähe der Unglücksstelle statt. Dabei waren keine Auffälligkeiten festzustellen.“

Die beachtenswerten Aussagen der LMBV mbH darin sind:

- **Es wurden dynamische Ereignisse bei Standsicherheitsuntersuchungen betrachtet und in engen Zeitabständen wiederholt.**
- **Die letzten Tests fanden 2008 statt. Ob auch mit Simulationen bei verschiedenen dynamischen, ortsveränderlichen Einwirkungen die daraus folgenden verschiedenen Antworten (Verhalten) des Böschungssystem nachgebildet wurden, ist nicht bekannt.**
- **Die beiden eingebauten Einzelbauwerke – Slipanlage und großvolumiger Bodenaustausch – wurden bei Standsicherheitsnachweisen mit Berücksichtigung dynamischer Einwirkungen auf das Nachterstedter Böschungssystem, wie in DIN 19700 verlangt, nicht einbezogen²³.**

Aus Abb. 6 ergibt sich für den geographischen Punkt (Lat: 51.81°; Lon.:11.34°; Alt.:0km) und die Unterklassen (T,S):

- ▶ $S_e = 0,75 \text{ ms}^{-2}$ mit $T_B = 0,2\text{s}$; $T_C = 0,3\text{s}$ und $T_D = 2,0\text{s}$. Die Untergrundverhältnisse können danach mit B-T, siehe Tab. 4, eingestuft werden.
- ▶ Aus Gl. [1], mit der der Kippenböschung zugeordneten Parametern: $\gamma_I = 1,4$; $\eta = 1,0$ für 5% Dämpfung und $\beta_0 = 2,5$ für 5% Dämpfung, lässt sich $a_g = 0,214 \text{ ms}^{-2}$ ermitteln. Die Spitzenbeschleunigung ist damit $a_s = 0,3057 \text{ ms}^{-2}$. Aus dem Plateaubereich von 0,1 s ergibt sich eine Bemessungsfrequenz von 10 Hz.

Die Erdbebeneinwirkung lässt sich somit für einen Standort zonen- und untergrundabhängig mit einem Antwortspektrum beschreiben, siehe Abb. 8.

²³ Obwohl der Autor hier nunmehr das Problem dynamischer Einwirkungen – Lastfall Erdbeben - behandelt, will er damit nicht zum Ausdruck bringen, dass er der These anhaftet, dass der Lastfall Erdbeben die Schadensursache sei. Als letzter Auslöser (Initial) für ein bis zu diesem Zeitpunkt durch verschiedene Einwirkungen bereits labil gewordenes Böschungssystem könnte eine dynamische Anregung aber durchaus verantwortlich gewesen sein.

Bedeutungskategorie	Bauwerke	Bedeutungsbeiwert γ_I
I	Bauwerke von geringer Bedeutung für die öffentliche Sicherheit, z. B. landwirtschaftliche Bauten usw.	0,8
II	Gewöhnliche Bauten, die nicht zu den anderen Kategorien gehören, z. B. Wohngebäude	1,0
III	Bauwerke, deren Widerstandsfähigkeit gegen Erdbeben im Hinblick auf die mit einem Einsturz verbundenen Folgen wichtig ist, z. B. große Wohnanlagen, Verwaltungsgebäude, Schulen, Versammlungshallen, kulturelle Einrichtungen, Kaufhäuser usw.	1,2
IV	Bauwerke, deren Unversehrtheit während des Erdbebens von Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit ist, z. B. Krankenhäuser, wichtige Einrichtungen des Katastrophenschutzes und der Sicherheitskräfte, Feuerwehrhäuser usw.	1,4

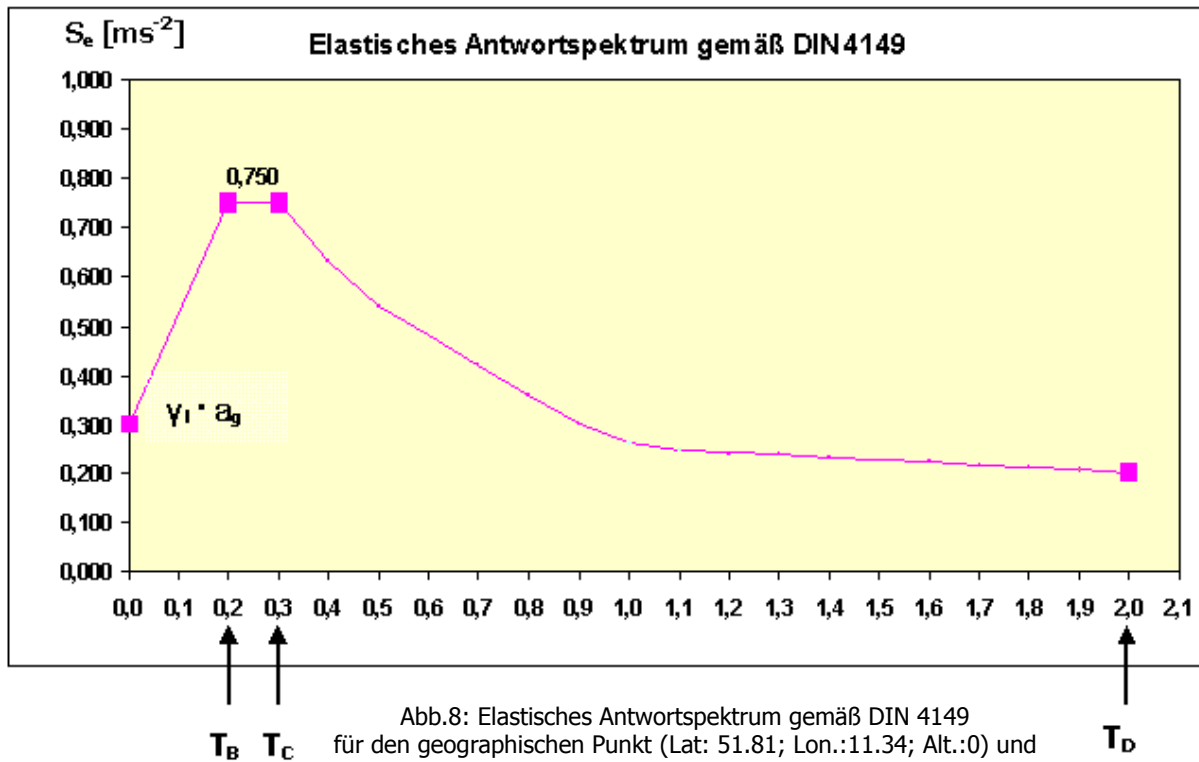
Tab.5: Bedeutungsbeiwerte γ_I nach DIN 4149:2005-04

Für den Standort mit den Ortskoordinaten: Lat: 51.81; Lon.:11.34; Alt.:0, die einen Punkt auf der verunfallten Nachterstedter Böschung, im Areal der ehemaligen Slipanlage, festlegen, ist mit der Abb. 7 das elastisches Antwortspektrum, gemäß DIN 4149, für ein Bemessungsbeben dargestellt. Die dazu erforderlichen Stützwerte sind, wie oben dargestellt, ermittelt.

4 Aufbau, Berechnung, Bemessung von standsicher zu sanierenden Kippenböschungen

4.1 Aufbau, Bemessung

Von einer standsicheren Böschung, so auch standsicher sanierten Kippenböschungen, wird erwartet, dass sie auch Extremereignisse - besonders hohe Grundwasserstände oder starken Sickerwasseranfall, tiefreichende Frost-Tau-Wechsel, Erdbeben, Erschütterungen oder kleine



Veränderungen in der Morphologie schadensfrei ertragen kann²⁴. Rutschungen können zu Katastrophen oder Folgeerscheinungen mit beträchtlichen negativen Auswirkungen führen, wenn Menschen und Bauwerke von Rutschungen mitgerissen bzw. verschüttet werden, oder wenn Rutschmassen in Gewässern Flutwellen auslösen. Standsicher sanierte Kippenböschungen sind deshalb auch immer gegen Wellenschlag auszulegen.

Falls in der Böschung sich im Laufe der Zeit bereits Schwächezonen herausgebildet haben und/oder geologisch vorgegebene Schwächezonen vorhanden sind, bestimmen diese weitgehend die Kinematik des Versagens. Dies trifft auch auf den Lastfall Erdbeben zu.

Aufbau von standsicheren Kippenböschungen – Grundanforderungen:

- ▶ Als ein Grundprinzip für standsicher aufgebaute Kippenböschungen ist deshalb herauszustellen, dass diese so aufgebaut, profiliert, stabilisiert und in den Standort eingefügt werden, dass sich Schwächezonen nicht ausbilden können und/oder nicht bereits geologisch vorgezeichnet sind. Dem Materialeinsatz kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.
- ▶ Insbesondere bei den seeseitigen Kippenböschungen von Tagebaurestseen sind Maßnahmen der Beeinflussung auf Art und Umfang der zuzitenden Wasser vorzuhalten:
 - insbesondere bei Tagebaurestsee, die in geomorphologisch ausgeprägten Beckenlagen errichtet werden,
 - insbesondere, um auf den Zufluss, die Druckverhältnisse und deren Entwicklung von GW-Leitern in der Umgebung dieser Böschungen Einfluss nehmen zu können,
- ▶ Standortspezifische Profilierung und Stabilisierung (z.B. durch Bewehrung z.B. mit Geokunststoffen, durch Tiefenverdichtungsmaßnahmen etc.) des Böschungssystems, der Böschungsneigungen, der Stützanschüttungen, der Symmetrieachsen etc.
- ▶ Insbesondere für den Lastfall Erdbeben ist zu beachten, dass durch den Einbau von Einzelbauwerken in die Böschungen, insbesondere in Kippenböschungen, Einfluss genommen wird auf:
 - die Standsicherheit, insbesondere in den Hauptrichtungen, bei Drehung des Hauptspannungstensors,
 - den Lastabtrag nach dynamischer Einwirkung,
 - die Ausbildung von Massenexzentrizität etc.
- ▶ Geeignete Ausbildung der Böschungsaufstandsfläche, Vermeidung von großen Setzungsgradienten, von Erdfällen, von Unterschieden in der Böschungsanregung über die Aufstandsfläche, etc.

4.2 Berechnungsverfahren

4.2.1 Quasi-statische Berechnungen

Basis

- Bemessungswert der horizontalen und vertikalen Bodenbeschleunigung (effektive Beschleunigungen)
- Angabe, ob ein Erhöhungsfaktor für die senkrecht zueinander stehenden Beschleunigungsrichtungen zu berücksichtigen ist, oder bereits im Bemessungswert enthalten ist.
- Ggf. Hinweise auf Besonderheiten.

Zu berücksichtigen in Bezug auf Tagebaurestseen

Quasi-statische Berechnungen stellen ein vergleichsweise wenig aufwändiges Verfahren zum Nachweis gegenüber Erdbebenbelastungen dar. Wie bereits erläutert, dürfen quasi-statische Berechnungen bei Absperrbauwerken bis zu einer Höhe von 40 m angewandt werden. In der Regel liegen die Ergebnisse derartiger Berechnungen auf der sicheren Seite. Zur Durchführung der Berechnungen ist eine Beschleunigung anzusetzen, die einheitlich auf die ganze Sperre wirkt. Die Höhe dieser Beschleunigung ist wie folgt geregelt:

Anmerkung: Der Begriff „Bodenbeschleunigung“ wurde DIN 19700-11 entnommen; für die Nachweise maßgebend ist der Bemessungswert der Bodenbeschleunigung.

²⁴ Veröffentlichte Vorlesungsskripte; Böschungen und Geländesprünge; TU München, Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau; <http://www.lrz.de/~t5412cs/webserver/webdata/download/skript/vorl-g-o.pdf>

Talsperren der Klasse 1, Höhe des Absperrbauwerkes > 40 m
 Staumauern: 2,5-facher Wert der Bodenbeschleunigung
 Staudämme: 1,0-facher Wert der Bodenbeschleunigung
 jedoch Sedimentationsbecken: 1,5-facher Wert der Bodenbeschleunigung

Erläuterung:

Durch den Faktor 2,5 bei Staumauern wird berücksichtigt, dass die maßgebenden Eigenfrequenzen bei höheren Staumauern häufig im Bereich des Anregungsspektrums von Erdbeben liegen. Die dann auftretenden Resonanzeffekte werden durch diesen Faktor pauschal berücksichtigt. Bei Staudämmen wird davon ausgegangen, dass die Eigenfrequenz des Dammes so niedrig ist, dass keine Resonanzeffekte auftreten. Es lässt sich zeigen, dass der Ansatz des Faktors 1,0 gerechtfertigt ist, wenn die Eigenschwingdauer eines Dammes näherungsweise über 0,4 s liegt (bzw. die Eigenfrequenz unter 2,5 Hz). Der Faktor 1,5 bei Sedimentationsbecken stellt einen zusätzlichen Sicherheitsfaktor dar, der berücksichtigen soll, dass bei einem Sedimentationsbecken z.T. keine eindeutigen Verhältnisse hinsichtlich der Geometrie und des Aufbaus des Absperrbauwerkes sowie hinsichtlich der Belastung vorliegen.

Unter 3.4 wurde aufgezeigt, dass bei Tagebaurestlöchern (große Einstaulamelle) die Standsicherheitsnachweise mit dynamischen Berechnungsmodellen zu führen sind. Weiterhin ist analog Hochwasserrückhaltebecken

- **Das Bemessungserdbeben in Kombination mit dem Wasserdruck und der Strömungskraft bei Dauerstauziel anzusetzen.**
- **Für die seeseitigen Kippenböschung ist aufgrund der Möglichkeit des Abrutschen von mehreren Mill. m³ Böschungsmassen in das wassergefüllte Restloch ein Nachweis auf Wellenschlag anzuschließen.**

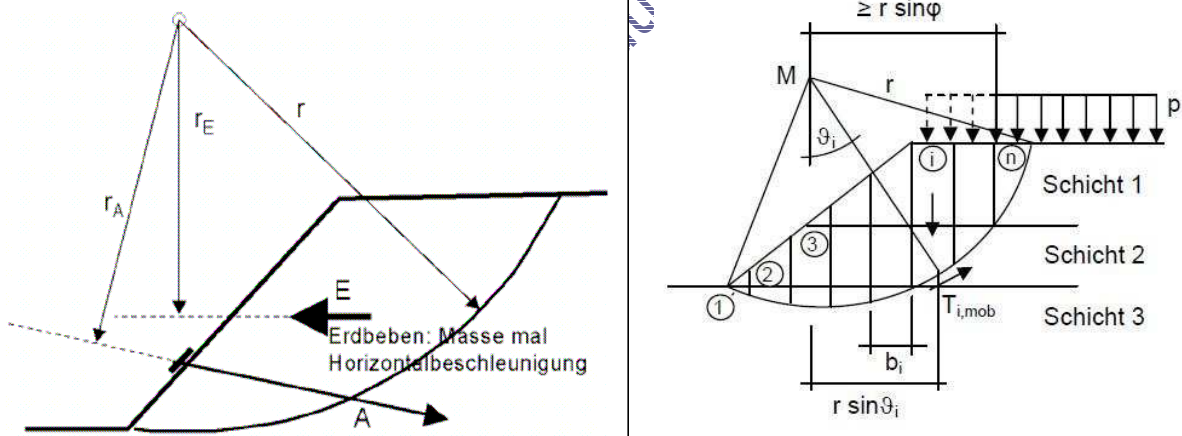


Abb.9: links: Horizontalbeschleunigung aus Erdbeben und das daraus resultierende Moment $E \cdot r_E$ für Standsicherheitsnachweis nach Krey/Bishop (Lamellenverfahren)²⁴

Abb.10: rechts: Einteilung des Gleitkreises in Lamellen

Allgemeiner Berechnungsansatz^{24,25}:
$$\mu = \frac{\sum G_i \cdot \sin \vartheta_i + E \cdot r_E / r - A \cdot r_A / r}{\sum \frac{(G_i - b_i \cdot u_i) \tan \varphi'_{i,d} + b_i \cdot c'_{i,d}}{\cos \vartheta_i + \mu \cdot \sin \vartheta_i \cdot \tan \varphi'_{i,d}}} \quad [2]$$

Bedeutung der darin verwandten Formelzeichen:

i - Lamelle; d - dezimiert; G – Gewichtskraft; A – Auftriebskraft; φ - Winkel der inneren Reibung, c – Kohäsion; ϑ - Richtungswinkel der Lamelle, μ - Ausnutzungsgrad

²⁵ Mögliche Strömungskräfte S nicht einbezogen, da nur unvollständig in A berücksichtigt.

Strömungskraft S:
$$S = \rho_w \cdot g \cdot h \cdot i \quad [3a]$$

Durchflussmenge Q:
$$Q = k_F \cdot A \cdot \frac{h}{w} = v_F \cdot A \quad [3b]$$

Bedeutung der darin verwandten Formelzeichen:

k_F – Durchlässigkeit, A – gesamte Flächen (Porenraum und Matrix), i – hydraulisches Gefälle, h – auftriebswirksame Höhe.

Beispiel: Bei einem Starkregen von nur einer Stunde Dauer muss entsprechend hydrologischen Daten für **Nachterstedt** mit einer Regenspende von bis zu (60 – 80) l je Stunde und m^2 gerechnet werden. Dies erfordert einen Abfluss von $Q = 0,07 \text{ m}^3/\text{h} = 1,944 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Bei einem Durchlässigkeitsbeiwert k_F von z.B. $1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ und einem Gefälle von 1 : 2,5 führt dies zu einer durchströmten (und auftriebswirksamen) Höhe h von 4,861 m und einer Strömungskraft von $S \approx 20 \text{ kN/m}^2$ Böschungfläche (horizontale Projektionsfläche), sofern nicht zusätzlich Wasser aus anderen Einzugsgebieten durch die maßgebende Fläche fließen muss, z.B. aus den GW-Leiter.

Es wird allerdings empfohlen bei quasi-statischen Berechnungen zumindest Vergleichsberechnungen mit FEM-Programmen durchzuführen.

4.2.2 Dynamische Berechnungen Basis

- Bemessungs-Antwortspektrum einschließlich Angabe der Bodenbeschleunigung für horizontale und vertikale Richtung (effektive Beschleunigungen).
Das Spektrum muss Bauwerksdämpfungen von 5% und 10% berücksichtigen.
- Angabe, ob ein Erhöhungsfaktor für die senkrecht zueinander stehenden Beschleunigungsrichtungen zu berücksichtigen ist, oder bereits im Bemessungsspektrum enthalten ist.
- Ggf. Hinweise auf Besonderheiten.

4.2.2.1 Antwortspektrumsverfahren²⁶

Berechnungen mit der Antwortspektrumsmethode sind wirklichkeitsnäher als quasi-statische Berechnungen und ermöglichen ein genaueres Erfassen des Bauwerksverhaltens bei Erdbebenbelastung. Der Rechenaufwand ist größer. Berechnungen mit der Antwortspektrumsmethode werden angewandt, wenn die Anwendung quasi-statischer Berechnungen nicht mehr zulässig ist (Bauwerke mit einer Höhe von mehr als 40 m) oder wenn eine ausreichende Tragsicherheit mit quasi-statischen Berechnungen nicht bestätigt werden kann. Tragwerke können als Schwingsysteme dargestellt werden. Sie sind jedoch keine Einmassenschwinger, sondern haben nahezu unendlich viele Schwingmöglichkeiten. Erster Schritt bei Berechnungen mit dem Antwortspektrumsverfahren ist die Bestimmung des Eigenschwingverhaltens des Tragwerks. Bei Absperrbauwerken werden üblicherweise die ersten fünf Eigenformen und Eigenfrequenzen berechnet, da hieraus die maßgeblichen Beanspruchungen des Tragwerks resultieren. Übertragenerweise gilt dies auch für Tagebaurestseen. Untersuchungen mit Initialversuchen zur Ermittlung Antwortverhaltens von Kippenböschungen sind u.a. von der LMBV mbH beauftragt, ausgeführt und ausgewertet worden.^{27, 28}

Für die berechneten Eigenfrequenzen kann die „Antwort“ aus dem Bemessungs- Antwortspektrum entnommen werden. Nachdem das Antwortspektrum nur für Einmassenschwinger gilt, müssen die Beschleunigungen für die einzelnen Massepunkte des Tragwerks mit einem speziellen Verfahren ermittelt werden.

²⁶ **Antwortspektrum:** Ein Antwortspektrum gibt die maximale Amplitude (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verformung) von Einmassenschwingern auf eine transiente Bodenbewegung bei vorgegebener Dämpfung wieder.

²⁷ „Auswertung von Initialversuchen 2004 und Fortschreibung der Standsicherheitseinschätzungen in Uferbereichen am Restloch Mortka und Silbersee (Tagebau Werminghoff II)“, GUB. GmbH im Auftrage der LMBV mbH, Zwickau, 2005

²⁸ W. Hüls u.a. „Einsatz der Beobachtungsmethode zur Standsicherheitsuntersuchung setzungsfließgefährdeter Böschungen in der Lausitz“, Geotechnik 29(2006) Nr. 3, S. 256-262

Belastungsmatrix für insbesondere seeseitige Böschungssysteme von Tagebaurestseen			
Einwirkungen	Permanent	zeitlich begrenzt	Einfluss auf die Standsicherheit
Eigengewicht	x		
Verkehrs- und Auflast	x	x	
Einzelbauwerke (Sonderbauwerke)	x	x	Insbesondere bei Errichtung nach Endprofilierung und/oder -stabilisierung
Frost-Tau-Wechsel	x	x	
Kleinere Setzungsgradienten in der Aufstandsfläche	x	x	
etc.	---	---	---
Konsolidationssetzungen	x	x	
Böschungskriechen	x	x	
Innere Erosion	x		
Eisdruck		x	
etc.	---	---	---
Dyn. Anregungen über die Aufstandsfläche		x	
Veränderung des SW-spiegels		x	
Betriebsbeben		x	
Auftrieb			
Strömungskraft	x	x	
Statischer Druck aus Böschungswasser		x	
Schwallwellen (Wellenschlag)		x	
etc.	---	---	---
Bemessungsbeben		x	

Tab.6: Beispiel einer Belastungsmatrix für seeseitige Böschungssysteme von Tagebaurestseen analog DIN 19700

4.2.2.2 Zeitschrittverfahren

Berechnungen mit dem Zeitschrittverfahren ermöglichen eine relativ genaue Abbildung des zeitlichen Verlaufs der Beanspruchung eines Bauwerks. Die Ergebnisse sind entsprechend genauer und in der Regel günstiger als bei Berechnungen mit der Antwortspektrummethode. Der Rechenaufwand ist jedoch deutlich höher. Derartige Berechnungen stellen die Ausnahme dar und werden üblicherweise nur angewandt, wenn bei Tragwerken mit einem nichtlinearen Materialverhalten eine wirklichkeitsnahe Tragwerksberechnung erforderlich ist oder wenn eine ausreichende Tragsicherheit mit einfacheren Nachweismethoden nicht bestätigt werden kann. Bei einer Berechnung nach dem Zeitschrittverfahren muss die Erdbebenenerregung in Form eines oder mehrerer Zeitverläufe der Bodenbeschleunigung gegeben sein.

In der Regel deckt ein an einem speziellen Standort tatsächlich aufgetretener Erdbebenzeitverlauf nicht das an diesem Standort grundsätzlich mögliche Frequenzspektrum eines Erdbebens ab. Es ist deshalb nicht zulässig, ausgehend von einem bekannten Erdbebenzeitverlauf, die Erdbebensicherheit eines Bauwerks nachzuweisen. Üblicherweise wird der für den jeweiligen Standort charakteristische Erdbebenzeitverlauf künstlich generiert. Dies kann durch entsprechende Auswertung einer ausreichenden Anzahl tatsächlich aufgetretener Zeitverläufe erfolgen. Sofern für den jeweiligen Standort ein Bemessungs-Antwortspektrum als seismische Lastannahme gegeben ist, kann hieraus ein repräsentativer Erdbebenzeitverlauf generiert werden, siehe Abb.11.

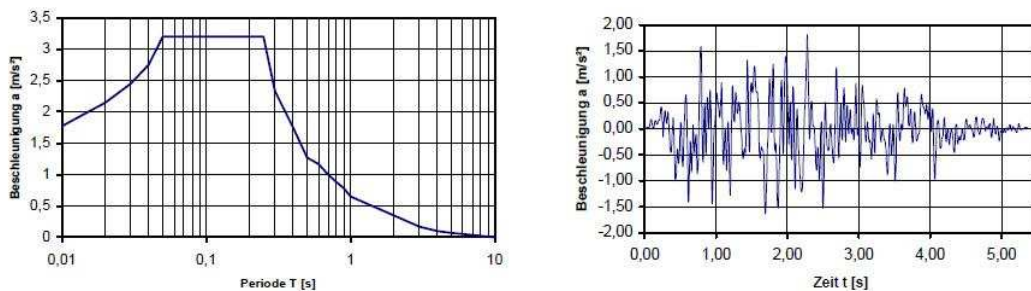


Abb.11: links: Bemessungsspektrum, rechts: zugehöriger künstlich generierter Beschleunigungs-Zeitverlauf

Wichtig hierbei ist, dass der Frequenzgehalt des Zeitverlaufs im Wesentlichen mit dem des Bemessungsspektrums übereinstimmt. Falls von einem Bemessungs-Antwortspektrum mit effektiven Beschleunigungen ausgegangen wird (Regelfall), ist vorab mit dem Faktor 1/0,7 eine Umrechnung des Spektrums auf Spitzenbeschleunigungen erforderlich. Die Länge des Zeitverlaufs ist standortabhängig, üblicherweise wird von 5 bis 10 Sekunden ausgegangen.

Die Beschleunigungen des für die Berechnungen zu verwendenden Zeitverlaufs werden in kleine Zeitschritte aufgeteilt, sodass innerhalb des einzelnen Zeitschrittes die Belastung nahezu konstant ist. Durch die Beschleunigung im ersten Zeitschritt erfährt die Konstruktion eine Auslenkung und auch eine Geschwindigkeit; im zweiten Zeitschritt werden durch die dazugehörige Beschleunigung die Geschwindigkeit und die Auslenkung vergrößert. Falls im dritten Zeitschritt die Beschleunigung sich umgekehrt hat, wird die Geschwindigkeit des Tragsystems kleiner, bis sie sich ebenfalls umkehrt. Durch eine Vielzahl von Rechenoperationen kann das tatsächliche Schwingverhalten eines solchen Tragsystems nachgerechnet werden. Die größten Schnittgrößen (oder Verformungen), die sich im Laufe der Zeitschritte ergeben, sind für die Beurteilung der Standsicherheit maßgebend.

4.2.2.3 Dekonvolutionsberechnung

Bei einer Modellierung des Tragwerks im Rahmen einer FE-Berechnung kann es durch das elastische Verhalten des Untergrundes bei der Berechnung der Beschleunigungswerte des Tragwerks zu einer Überschätzung der Beschleunigungen am Bauwerk und im Untergrund kommen. Es werden dann im Rahmen der dynamischen Berechnungen beispielsweise Beschleunigungen an der Geländeoberkante ermittelt, die höher sind als die vorgegebenen Freifeldbeschleunigungen im Bemessungsspektrum. Dies führt zu Ergebnissen, die zwar auf der sicheren Seite liegen, aber dementsprechend auch ungünstiger sind. Mittels einer sogenannten Dekonvolutionsberechnung besteht die Möglichkeit, das Bemessungsspektrum von der Geländeoberkante auf die Unterkante des verwendeten FE-Modells zu transformieren, sodass dann eine gute Übereinstimmung der Beschleunigungen an der Geländeoberkante mit den Freifeldbeschleunigungen des Bemessungsspektrums erreicht wird. Man erhält in Abhängigkeit vom Rechenmodell ein modifiziertes Antwortspektrum. Dekonvolutionberechnungen können in Kombination mit Berechnungen nach der Antwortspektrummethode und bei Zeitverlaufsberechnungen durchgeführt werden.

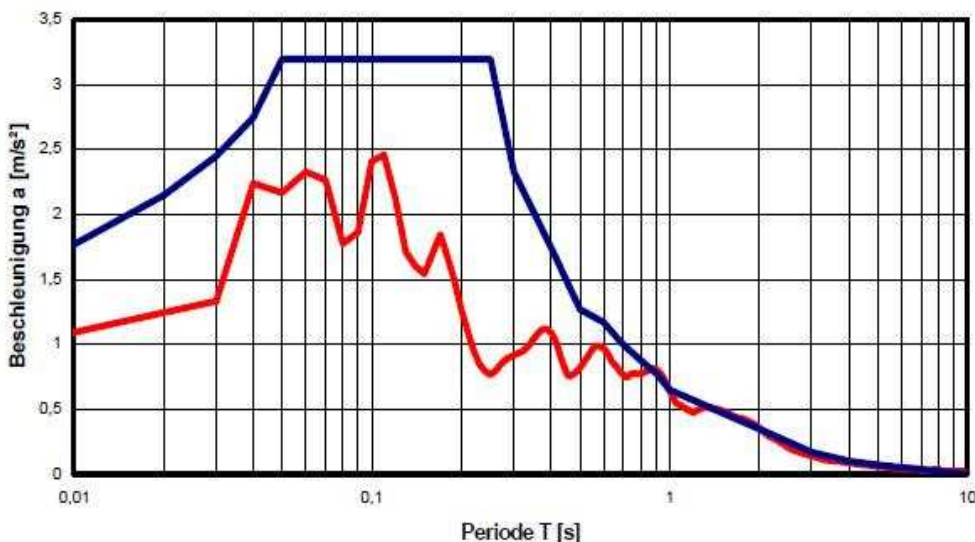


Abb.12: Bemessungsspektrum und durch Dekonvolutionberechnung modifiziertes Antwortspektrum

Ziel der Berechnung ist die Erstellung eines rechenmodellspezifischen Antwortspektrums. In der Regel ergibt sich ein günstigeres Antwortspektrum, sodass eine derartige Berechnung sinnvoll sein kann, wenn mittels herkömmlicher Berechnungen eine ausreichende Tragsicherheit des Bauwerks nicht nachweisbar ist. Dekonvolutionsberechnungen sind vergleichsweise aufwändig und setzen entsprechende Fachkenntnisse voraus. Im Normalfall werden Dekonvolutionsberechnungen nicht durchgeführt.

Abb. 12 zeigt beispielhaft ein auf die Geländeoberkante bezogenes Bemessungsspektrum und das rechenmodellabhängige, durch Dekonvolutionsberechnung modifizierte Antwortspektrum. Die Durchführung von Dekonvolutionsberechnungen erfolgt mit speziellen Rechenprogrammen.

4.2.2.4 Berechnung an einem Blockmodell

Berechnungen an einem Blockmodell werden zur Abschätzung der Verformungen entlang einer Schwächezone oder eines Risses in einer Staumauer durchgeführt. Verformungen können hierbei in Form von Verschiebungen und/oder Kippbewegungen auftreten.

Risse oder Schwächezonen in einer Staumauer können entweder bereits vorhanden sein oder können infolge eines Erdbebens erwartet werden. Meist werden Berechnungen an einem Blockmodell als Ergänzung zu Spannungsanalysen gemäß.

Zweck der Berechnungen ist es, in kritischen Bereichen mit bereits vorhandener oder rechnerischer Rissbildung die Tragsicherheit durch vertiefende Analysen zu verifizieren. Unter Verwendung von Beschleunigungs-Zeitverläufen wird an einem Starrkörpermodell die Tiefe von klaffenden Fugen und ggf. der Drehwinkel bei Kippbewegungen oder die Größe von Verschiebungen berechnet. Die Durchführung von Berechnungen an einem Blockmodell erfolgt mit speziellen Rechenprogrammen.

4.3 Berechnungen/Stand sicherheitsnachweise von stabilisierten Kippenböschungen (Dämme) von Tagebaurestseen

4.3.1 Zur allgemeinen Beachtung

Bei Tagebaurestsee (Absperrbauwerken von Talsperren der Klasse 1) ist beim Bemessungserdbeben, wie dargelegt, von einer Wiederkehrperiode von 2.500 Jahren auszugehen. Bei Tagebaurestsee ist deshalb immer, wie für Anlagen außerhalb der Erdbebenzonen, siehe Abb.2, die Erstellung eines seismologischen Gutachtens erforderlich, dieses muss Bestandteil des Abschlussbetriebsplanes werden. In Abhängigkeit vom geplanten Nachweisverfahren, das vom Ersteller der Nachweise gewählt wird, muss ein seismologisches Gutachten mindestens die im Folgenden genannten Aussagen beinhalten. Die Wiederkehrperioden sind entsprechend DIN 19700 anzusetzen und vom Ersteller der Nachweise vorzugeben. Allerdings ist für große, tiefe Tagebaurestseen, wenn diese analog Talsperren der Klasse 1 behandelt werden, immer eine dynamische Berechnung zu wählen. Dem quasi-statischen Nachweis einen dynamischen Nachweis gegenüber zu stellen ist sinnvoll, da innerhalb des Abschlussbetriebsplanverfahrens für zu sanierende Kippenareale ohnehin umfangreiche Stand sicherheitsnachweise gefordert sind, bis hin zum Nachweis der Langzeitstand sicherheit mit entsprechendem Langzeitmonitoring.

In der Anlage ist ein **Schema für Tragsicherheitsnachweise gegenüber Erdbeben für Tagebaurestlöcher (TRS) nach DIN 19700-12 vorgestellt.**

4.3.2 Erforderliche Eingangsgrößen für eine Berechnung:

- Aufbau und Gestaltung (Geometrie) Kippenareals, insbesondere des seeseitigen Kippenareals des TRS,
- Materialeigenschaften (Einbaumaterial)
- Untergrundverhältnisse/ Aufstandsfläche der Kippenböschungen/Altbergbau etc.
- Hydrogeologische Verhältnisse/GW-Leiter und Eigenschaften des Standortes
- Geohydraulische Bedingungen/Raster der Stützstellen/digitales Grundwasserinformationssystem etc.
- Einwirkungen/Belastungen auch die Einwirkungen infolge Lastfall Erdbeben mit der entsprechenden Wiederkehrperiode
- etc.

Bei der Ermittlung der Beanspruchung infolge Lastfall „Erdbeben“ sind folgende Grundsätze zu beachten:

Materialverhalten

- Verformungsverhalten des Untergrundes ist zu berücksichtigen.
- Es ist von dynamischen Elastizitätsmodulen auszugehen. Diese sind von geotechnischem Fachpersonal zu bestimmen. Es ist weitestgehend auf „Literaturwerte“ zu verzichten.

- Der Untergrund ist ohne Masse anzusetzen.
- Bei der Berechnung des Eigenschwingverhaltens ist es derzeit zumeist nur möglich linear elastisches Materialverhalten zu berücksichtigen.
- Für das Dammbaumaterial ist die folgende Materialdämpfung anzusetzen:
Betriebserdbeben: $\delta = 5\%$
Bemessungserdbeben: $\delta = 10\%$

Hinweis: Die aufgeführten Anmerkungen zum Materialverhalten sind für die vereinfachten, quasi-statischen Berechnungen nicht relevant.

Erdbebenanregung

- Bei den Berechnungen sind effektive Beschleunigungswerte zu verwenden; (Ausnahme: Zeitschrittverfahren).
- Die Horizontalbeschleunigung ist senkrecht zur Dammachse wirkend anzunehmen. Die Beschleunigungswerte sind zur Berücksichtigung der horizontalen Einwirkungen in zwei zueinander senkrechten mit dem Faktor 1,1 zu erhöhen (Höhe des gesamten Böschungssystem beachten). Analog Sedimentationsbecken ist für die Bemessungsbeschleunigung der 1,5-fache Wert der Bodenbeschleunigung anzusetzen.
- Es sind die vertikalen Beschleunigungen zu berücksichtigen (Höhe des gesamten Böschungssystem und Beschaffenheit des Untergrundes/Aufstandsfläche beachten).

Mitschwingendes Speichervolumen

Eine Berücksichtigung dieses Effekts ist jedoch in der Regel nicht erforderlich, da die Höchstwerte der horizontalen und der vertikalen Beschleunigungen normalerweise nicht zusammenfallen und die Auswirkungen deshalb gering sind.

Zusätzlich sind folgende Kriterien zu überprüfen:

Bodenverflüssigung

Insbesondere bei den seeseitigen Böschungssystemen ist neben der Erstellung von Tragsicherheitsnachweisen im Lastfall „Erdbeben“ zusätzlich zu überprüfen, ob die Gefahr einer Bodenverflüssigung gegeben ist. Grundsätzlich gefährdet sind Sande mit Kornverteilungskurven im Bereich der Zone 2 entsprechend in Abb.1.

Insbesondere bei den seeseitigen Böschungssystemen ist zusätzlich abzuschätzen, ob die bei einem Erdbeben auftretenden Verformungen zu Beeinträchtigungen der Zuverlässigkeit des Dammes führen können.

- Die Gefahr innerer Erosion ist auszuschließen, bzw. im Nachweisverfahren zu berücksichtigen.
- Die Tragsicherheit muss auch im verformten Zustand gewährleistet sein.

Für den Fall, dass die Standsicherheitsnachweise ergeben haben, dass im Erdbebenfall instabile Gleitkörper vorhanden sind, ist eine Berechnung der zu erwartenden Gleitverschiebungen zwingend erforderlich. Die Auswirkungen dieser Verschiebungen auf das gesamte Böschungssystem sind dann zu beurteilen. Zudem sollten Zeitverläufen der Verschiebungen ermittelt werden (Kriechbruch).

4.3.3 Beispiel: Nachweis der Erdbebensicherheit eines Dammbauwerkes

4.3.3.1 Modell eines seeseitigen Böschungssystem eines Tagebaurestsees,

Annahmen und Voraussetzungen

a) Vorbemerkung

Im Allgemeinen werden Standsicherheitsnachweise im Lastfall „Erdbeben“ für Dammbauwerke als quasistatische Berechnung und beim dynamischen Nachweis mit dem Antwortspektrumsverfahren durchgeführt. Dies kann auf die seeseitigen Böschungssysteme von Tagebaurestseen übertragen werden. Zunächst muss das seeseitige Böschungssystem in einem Model abgebildet werden, Abb.13.

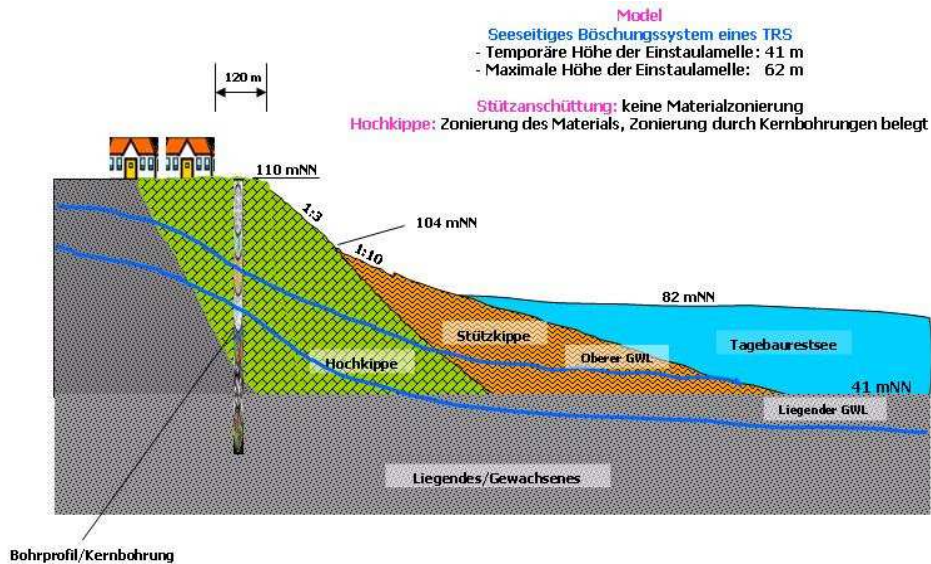


Abb. 13: Querschnitt einer seeseitigen Modellböschung eines TRS, unfertig

Im Schadensfall wird aus dem Davor-Danach-Vergleich über eine Rückrechnung auf die Schadensursache geschlossen.



Eingeschlossen darin ist, ob ein dynamisches Ereignis den Kollaps des Systems ursächlich bewirkt haben könnte. Die in der Abb. 14 vorgestellte Vermessung des kollabierten Nachterstedter Böschungssystems in verschiedenen Schnittebenen hat das Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI), ein Service des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD) im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), bereits am 14. August 2009, 13:08 CEST, in der **cross section map**, vorgestellt und für jedermann zugänglich gemacht, siehe

Abb. 14: Nachterstedt Davor-Danach-Vergleich, Quelle: Zentrum für Satelliten-gestützte Kriseninformation ZKI, <http://www.zki.dlr.de/activations/list>

<http://www.zki.dlr.de/activations/list>. Der Davor-Danach-Vergleich³⁰ kann in einzelnen Schnitten durchgeführt werden und zu einem räumlichen Modell verschnitten werden. Die vorliegenden Koordinaten

werden dann in ein Berechnungsmodell übertragen, so wie in http://www.erddruck.de/pdf/erddruck_webvariante.pdf vorgelegt, siehe Abb. 15.

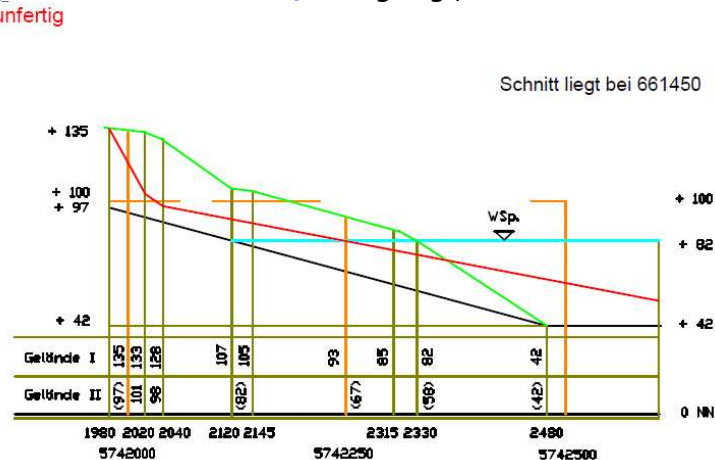


Abb.15: Modell Davor-Danach-Vergleich schnittweise Übertragung der Daten aus der Fernerkundung, Quelle: http://www.erddruck.de/pdf/erddruck_webvariante.pdf

³⁰ Jede Rutschung lässt nach Aufmessen der Geometrie und Feststellung der Randbedingungen hinsichtlich Einwirkungen und des Aufbaues des Gleitkörpers Rückschlüsse auf die Scherfestigkeit des abgerutschten Materials in der Bruchfuge zu.

b) Materialkennwerte, beispielhaft

Kennwerte	Hochkippe		Stützanschüttung		Gewachsenes	
Wichte γ/γ'	Zone 1 (...)	21 / 11 kN/m ³	Keine Zonierung	19 / 10 kN/m ³	Keine Zonierung	22 / 12,5 kN/m ³
E-Modul statisch/ dynamisch E_s/E_d		200 MN/m ³ / 500 MN/m ³		150 MN/m ³ / 450 MN/m ³		250 MN/m ³ / 600 MN/m ³
Winkel der inneren Reibung ϕ		35°		32°		37°
Kohäsion c		10 kN/m ²		0 kN/m ²		8 kN/m ²
Querdehnzahl v		0,20		0,20		0,25
Durchlässigkeit k_f		10 ⁻⁴ ms ⁻¹		10 ⁻⁴ ms ⁻¹		10 ⁻⁵ ms ⁻¹
Wichte γ/γ'	Zone 2 (...)					
E-Modul statisch/ dynamisch E_s/E_d						
Winkel der inneren Reibung ϕ						
Kohäsion c						
Querdehnzahl v						
Durchlässigkeit k_f						
Wichte γ/γ'	Zone 3 (...)					
E-Modul statisch/ dynamisch E_s/E_d						
Winkel der inneren Reibung ϕ						
Kohäsion c						
Querdehnzahl v						
Durchlässigkeit k_f						

Tab. 7: Zonierung der Materialkennwerte nach Abb.13: Querschnitt einer seeseitigen Modellböschung eines TRS, unfertig

c) Lastannahmen

Siehe Tab.6, mit Bemessungserdbeben, allen Belastungssituationen und Flutungsstände (Einstaulamelle); temporäre Einstauhöhe: 41,0m / Endseewasserspiegel: 62,0 m

Analog Talsperren Klasse 1: Betriebserdbeben: Wiederkehrperiode 500a; Bemessungserdbeben: Wiederkehrperiode: 2.500a

Erdbebenbeanspruchung: Bemessungsspektrum, siehe auch Abb.8 (effektive Beschleunigungen); Bodenbeschleunigung 0,3 m/s² aus Abb.7; analog Sedimentationsbecken ist für die Bemessungsbeschleunigung der 1,5-facher Wert der Bodenbeschleunigung anzusetzen. Die Erstellung eines **seismologischen Gutachtens** ist erforderlich.

Die Bodenbeschleunigung liegt bei 0,30 m/s², der Plateaubereich reicht von 3,3 bis 5 Hz, dies entspricht einer Schwingdauer von 0,2 bis 0,3 s.

Nachfolgend werden Ergebnisse präsentiert, die aus der Berechnung von Dammbauwerken entnommen sind. Ein Bezug zur TRS soll erst dann erfolgen, wenn die Gutachter des verunfallten Nachterstedter Böschungssystems ihre Ergebnisse präsentiert haben. Dies scheint problemlos möglich, wie hier gezeigt. Die allgemeinen Grundsätze werden dadurch nicht tangiert.

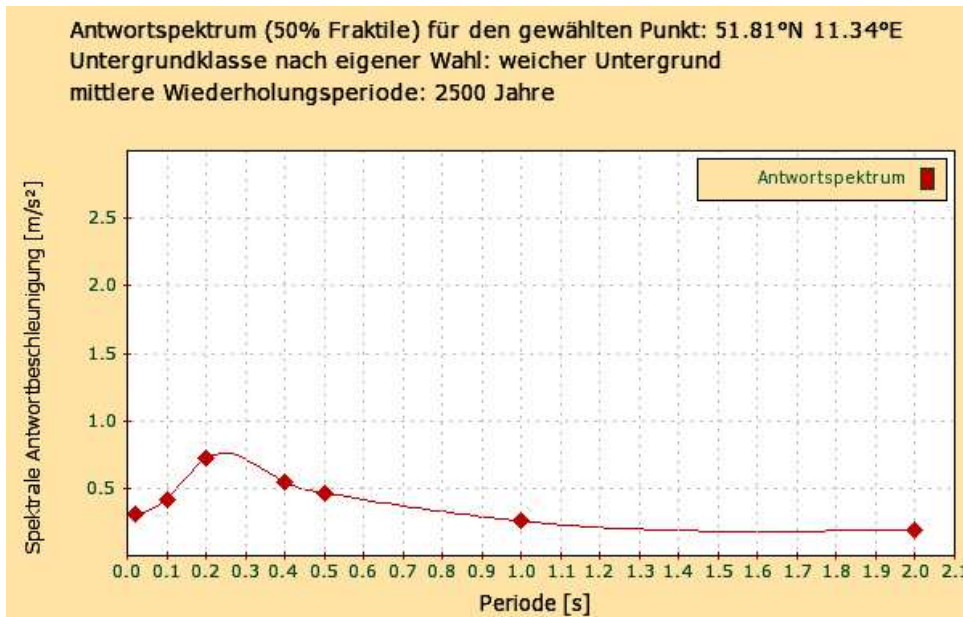


Abb.7: Antwortspektrum für den geographischen Punkt (Lat: 51.81; Lon.: 11.34; Alt.:0),
 [für die Unterklassen (T,S)]

4.3.3.2 Quasistatischer Nachweis

a) Rechenmodell

Die Berechnungen werden nach herkömmlichen Methoden als Gleitflächenmethode (Bishop, Janbu) unter Berücksichtigung der Durchströmung des Böschungssystems durchgeführt. Das allgemein verwandte Rechenmodell siehe Abb. 9 und 10. Materialkennwerte, allgemeine Lasten siehe 4.3.3.1

b) Erdbebenbelastung

Bei TRS ist analog den Sedimentationsbecken eine Horizontalbeschleunigung anzusetzen, die dem 1,5-fachen Wert der Bodenbeschleunigung entspricht. Die in den Berechnungen zu berücksichtigende Beschleunigung beträgt damit $0,45 \text{ m/s}^2$.

c) Berechnungsergebnisse

Die folgende Abb.16 zeigt beispielhaft den ungünstigsten Gleitkreis bei Annahme einer Beschleunigung zur Luftseite eines Dammbauwerkes und nach oben. Der Sicherheitsbeiwert beträgt 1,48 und liegt damit über dem zulässigen Wert von $1,1^{29}$. Materialkennwerte, siehe Abb.16, Einwirkungen: nur Erdbebenfall

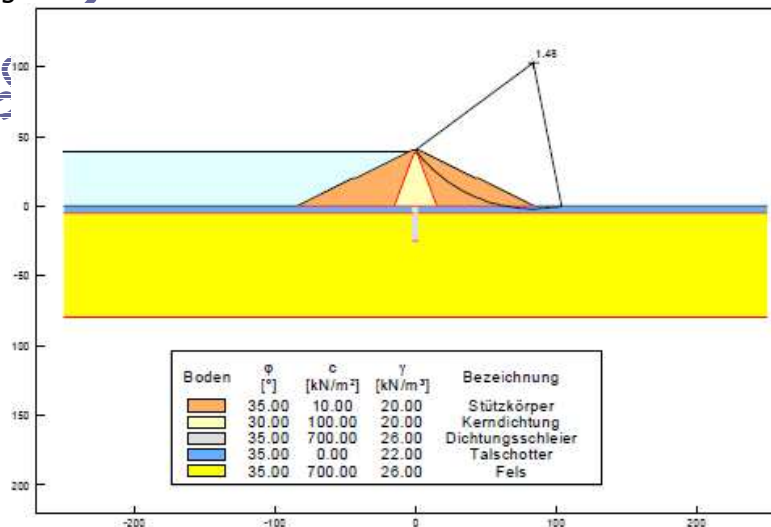


Abb.16: Rechenmodell mit Darstellung des ungünstigsten Gleitkreises unter Berücksichtigung des Bemessungserdbebens²⁹; Sicherheitsbeiwert: 1,48

²⁹ Merkblatt 58: „Berücksichtigung von Erdbebenbelastungen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen“, LUA NRW, Essen 2006

4.3.3 Antwortspektrumsverfahren

a) Rechenmodell

Die Berechnungen werden mit der Methode der Finiten Elemente durchgeführt. Abb.17 zeigt das verwendete Rechenmodell. Materialkennwerte, siehe Abb.16, Einwirkungen: nur Erdbebenfall.

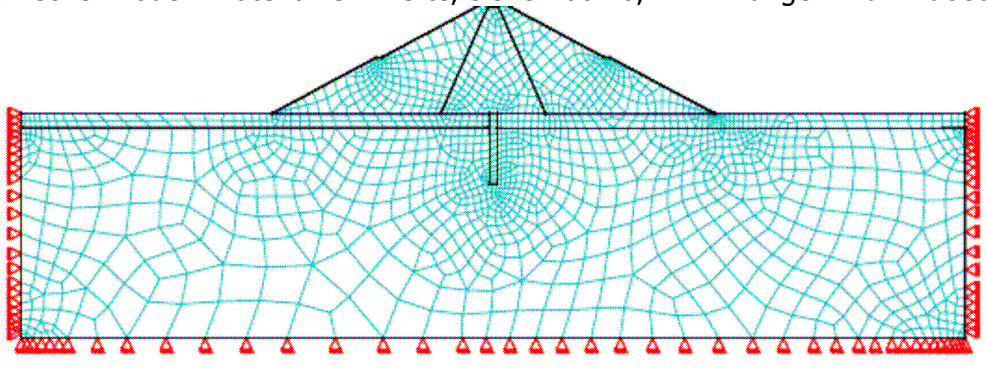


Abb.17: Rechenmodell Böschungssystem mit FE-Methode²⁹

b) Vorgehensweise bei der Berechnung, Berechnungsergebnisse

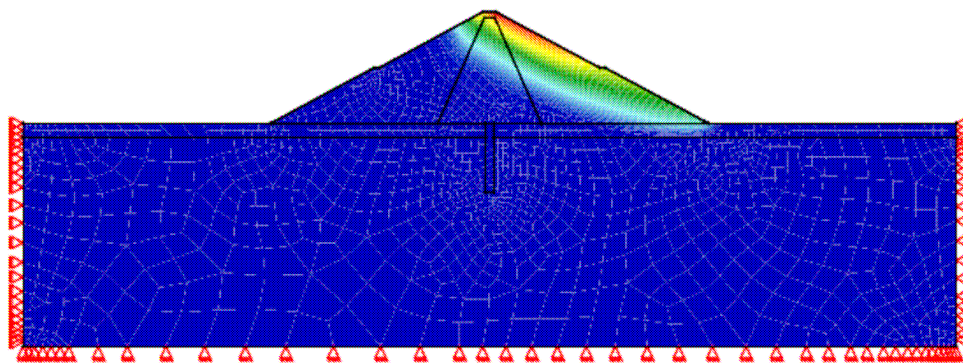


Abb.18: horizontale Verformungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung des Bemessungserdbebens²⁹; Sicherheitsbeiwert: 1,65. Die Bereiche mit den größten Verformungen sind rot dargestellt; die Bereiche ohne bzw. mit geringen Verformungen sind blau dargestellt

In einem ersten Schritt werden die Eigenfrequenzen und die Eigenformen berechnet. Da für derartige Rechenmodelle keine geschlossenen Lösungen vorliegen, werden üblicherweise – wie auch im vorliegenden Fall – numerische Verfahren verwendet. Unter Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens wird anschließend die Standsicherheit berechnet. Abb.18 zeigt die horizontalen Verformungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Annahme einer Beschleunigung zur Luftseite und nach oben. Es ist erkennbar, dass sich im Bruchzustand eine gleitkreisartige Bruchfläche einstellen würde. Die Tragsicherheit beträgt 1,65 und liegt damit etwas höher als bei der Gleitkreisberechnung. Abb.19 zeigt das Verformungsverhalten des Dammbauwerkes im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

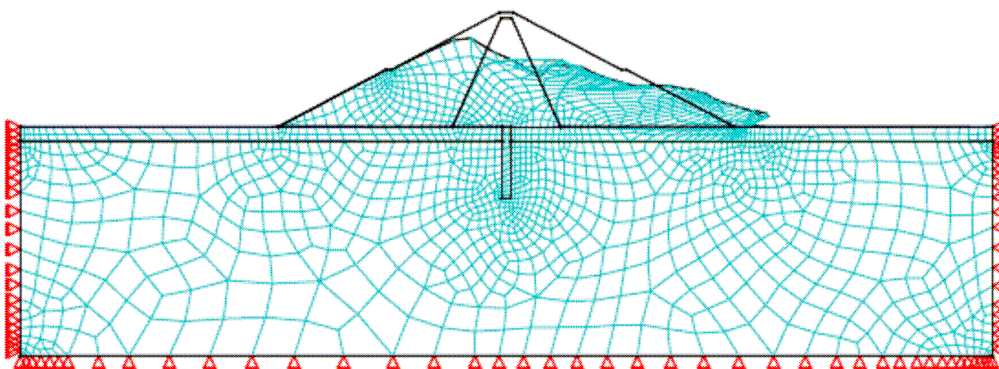


Abb.19: Verschobene Struktur im Grenzzustand der Tragfähigkeit²⁹ (sehr stark überhöht)

Schema: Standsicherheitsnachweise gegenüber Erdbeben für (Kippen-) Böschungen von Tagebaurestseen (TRS) nach DIN 19700-12			
		Große und tiefe Tagebaurestseen (Tiefe, Fläche)	Kleine bis mittlere und flache Tagebaurestseen (Tiefe, Fläche)
Wiederkehrperiode [a]	Bemessungserdbeben (BmE)	2.500	1000
	Betriebserdbeben (BtE)	500	100
Notwendigkeit von Erdbebennachweisen, Ermittlung der Erdbebenlasten		<ul style="list-style-type: none"> • TRS in der Flutungsphase (Einstau): temporäre Standsicherheitsnachweise sind mit dem Bemessungserdbeben, einer temporärer Einstaulamelle sowie Bezug auf die jeweilige GW-Situation in zeitlichen Abständen so zu führen, dass die standortspezifische Situation abgebildet wird. • TRS in der Nachflutungsphase (Dauerstau): Erdbebennachweise sind – falls erforderlich – mit dem Dauerstau zu führen • TRL ohne wesentliche Wasserlammelle (Trockenbecken): Nach DIN 19700-12 sind keine Erdbebennachweise erforderlich. Es wird empfohlen, Nachweise für das Betriebserdbeben zu führen, Nachweis der Gebrauchstauglichkeit. 	
		<ul style="list-style-type: none"> • Tragsicherheitsnachweise stets erforderlich. Für die Zone 0 ist ein Bemessungswert der Bodenbeschleunigung: $\leq 0,3924 \text{ ms}^{-2}$. Das Antwortspektrum für den geographischen Raum soll herangezogen werden • Die Erstellung eines seismologischen Gutachtens ist erforderlich. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tragsicherheitsnachweise sind erforderlich, wenn der Bemessungswert der Bodenbeschleunigung größer als 0,04 g ist. • Vereinfachter Bemessungsansatz • Ermittlung der Erdbebenlasten in Anlehnung an DIN 4149:2005; siehe Abschnitt 4.1.2
Nachweisverfahren		<ul style="list-style-type: none"> • Höhe der Einstaulamelle: H ≤ 25 m Tragsicherheitsnachweise dürfen mit quasistatischen Ersatzlasten geführt werden. Ermittlung der Ersatzlast mit dem 1,5-fachen Wert der Bodenbeschleunigung • Höhe des Absperrbauwerkes: H > 25 m Tragsicherheitsnachweise sind mit dynamischen Berechnungsmodellen zu führen (Antwortspektrumverfahren). 	Tragsicherheitsnachweise dürfen mit quasi-statischen Ersatzlasten geführt werden. Ermittlung der Ersatzlast mit dem 1,5-fachen Wert der Bodenbeschleunigung

Dr.-Ing. M. Lersow - Nur zum persönlichen Gebrauch - Berechnungsschrift