



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN
Ufficio federale dell'energia UFE
Uffizi federal d'energia UFE

Mattnak, <https://www.bfe.admin.ch>



Bachtelweiher, Wald, Kt. ZH, Gander (2021)



TOTALREVISION DER RICHTLINIE TEIL C3 ERDBEBENSICHERHEITSNACHWEISE FÜR SCHÜTTDÄMME



THEMEN

- Ziele des Erdbebensicherheitsnachweises
- Bestimmung der Materialeigenschaften
- Bewertung des Verflüssigungspotenzials
- Analysemethoden
- Interpretation der Ergebnisse
- Besondere Grundsätze zur Verwendung der Beschleunigungszeitverläufen



ZIEL DES ERDBEBENSICHERHEITSNACHWEISES

ALLGEMEIN

- **2.2.1.** Ziel des Erdbebensicherheitsnachweises einer Stauanlage ist es, nachzuweisen, dass während und nach einem Erdbeben ein Versagen der Anlage, das zu einem **unkontrollierten, schadensverursachenden Wasserabfluss** (oder Abfluss von anderem zurückgehaltenem Material bei Stauanlagen zum Schutz vor Naturgefahren, z. B. Geschiebe) aus dem Staauraum führen kann, ausgeschlossen werden kann.
- Es ist anzumerken, dass Schäden, einschliesslich bleibender Verformungen, die die Sicherheit der Stauanlage nicht beeinträchtigen, als akzeptabel gelten.



ZIEL DES ERDBEBENSICHERHEITSNACHWEISES

SCHÜTTDÄMME

- 6.8.2.1. Um das Verhalten eines Schüttdamms bei Erdbeben zuverlässig beurteilen zu können, ist eine angemessene Bewertung der **erwarteten Verformungen infolge des Erdbebens** erforderlich. **Für Schüttdämme aller Stauanlagenklassen** müssen die **berechneten Verformungen** kritisch bewertet werden, wobei der Schwerpunkt auf der Bestimmung der **Verringerung des Freibords** infolge des Erdbebens liegt.

- 6.8.2.2. Ist nach der Erdbebeneinwirkung von **bleibenden Verformungen** auszugehen, sind insbesondere folgende Punkte zu beurteilen:
 - Um eine **Überströmung** des Schüttdammes durch direkte oder indirekte seismische Einwirkungen (z. B. durch Massenbewegung im Stauraum) zu vermeiden, ist ein ausreichend grosser Freibord vorzusehen. Dabei sind erdbebenbedingte Gleitbewegungen und Setzungen der Dammkrone zu berücksichtigen.
 - Auch im verformten Zustand muss **innere Erosion** ausgeschlossen werden.



ZIEL DES ERDBEBENSICHERHEITSNACHWEISES

KEINE PSEUDO - STATISCHE ANALYSE MEHR

- Warum?
 - Vereinfachte Darstellung der Seismischen Einwirkung
 - Bei der pseudo-statischen Analyse wird die seismische Belastung als eine konstante horizontale Kraft behandelt.
 - Limitation: Dieser Ansatz ignoriert die dynamische, zeitlich veränderliche Natur von Erdbeben - einschliesslich Dauer, Frequenzgehalt (Form des Antwortspektrums), Beschleunigungsimpulse und Wellenausbreitung.
 - Kein(e) Hinweis/Abschätzung auf/der bleibender Verformungen (pseudostatische Methoden bewerten nur die Stabilität gegen Gleiten oder Versagen, nicht aber, wie stark sich der Absperrbauwerk verformen wird)
 - Die Erdbebenkoeffizienten stehen in keinem engen Zusammenhang mit tatsächlichen Erdbebenaufzeichnungen oder probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen (PSHA).
 - Keine Möglichkeit zur Kontrolle der Funktionalität nach dem Erdbeben



LEHREN AUS DEN ERDBEBEN VOM 6. FEBRUAR 2023, ERDBEBEN (M7.7 UND M7.6)

- 16 der 17 beschädigten Stauanlagen waren Schüttdämme. Einige mit grossen Schäden.
- Sultansuyu-Damm: Schüttdamm mit Tonkern.
- $H = 60 \text{ m}$, $H_w = 50 \text{ m}$, $L = 721 \text{ m}$, Entfernung zum Epizentrum: 75 km
- PGA: 4.1 m/s^2 , 4.7 m/s^2 , und 3.2 m/s^2
- Beobachtungen:
 - Entlang der Krone und der wasserseitigen Böschung der Stauanlage entstanden ausgedehnte Längsrisse (laterale Ausbreitung + Verflüssigung)
 - Alle seitlichen Bewegungen waren auf die wasserseitige Seite gerichtet.
 - Maximale Kronensetzung: 0.8 m ($\sim 1.3\%$ von H)

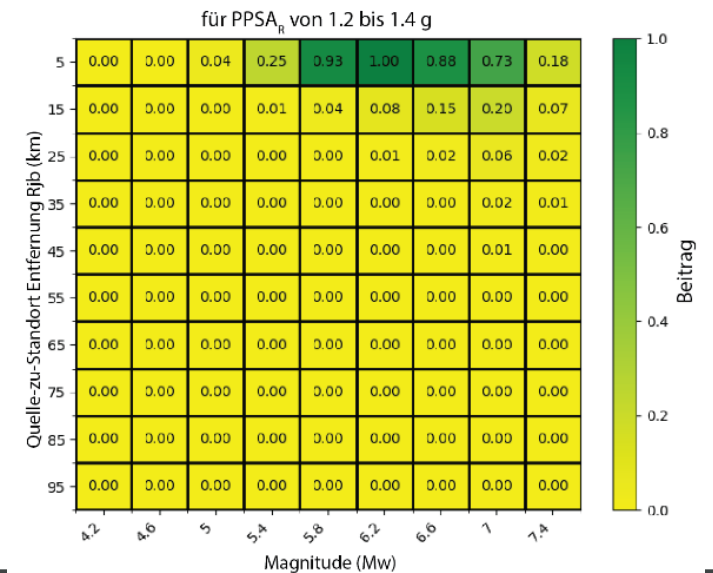
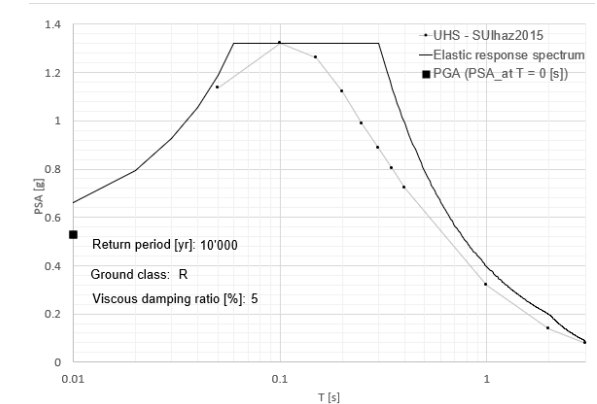
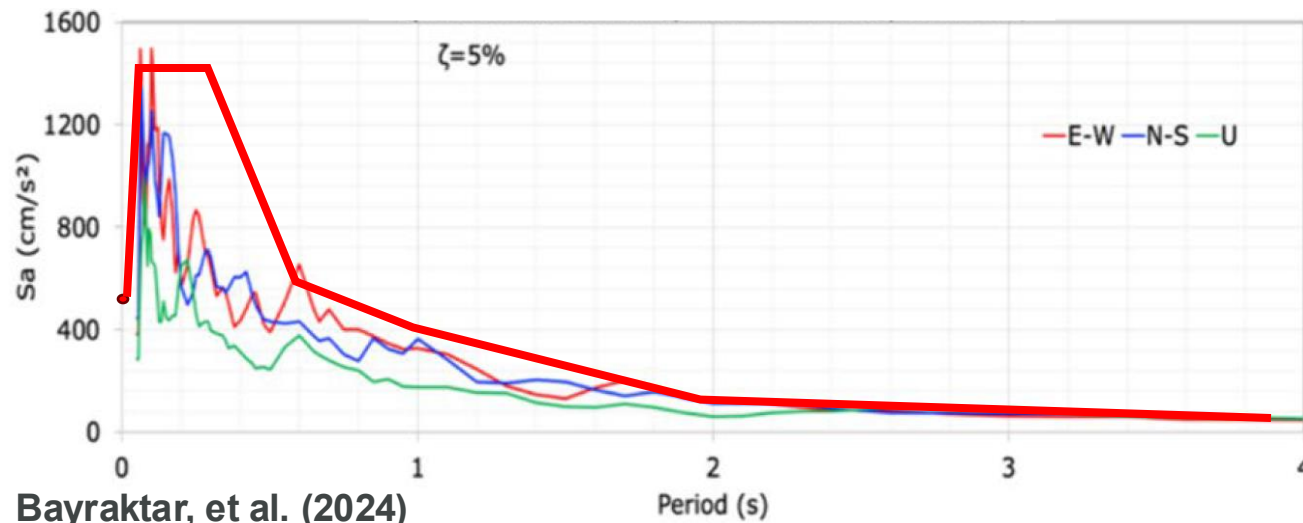


Bayraktar, et al. (2024)



LEHREN AUS DEN ERDBEBEN VOM 6. FEBRUAR 2023, ERDBEBEN (M7.7 UND M7.6)

- Vergleich mit dem C3-Spektrum: 10'000 [J.] für einen Standort in VS für BGK R.





BESTIMMUNG DER MATERIALEIGENSCHAFTEN

ALLGEMEINE PUNKTE FÜR SCHÜTTDÄMME

- 5.3.1. Für Schüttdämme der **Stauanlagenklasse I** sind **statische wie auch dynamische Bodenkennziffern durch Labor- und/oder Feldversuche** zu ermitteln. Es ist ein Stoffgesetz zu berücksichtigen, welches geeignet ist, das Verhalten des Bodens unter dynamischer Beanspruchung zu beschreiben.
- 5.3.2. [...] Der angenommene Wert der **Dämpfung für Schüttdämme** ist mit der **erwarteten Scherdehnung** im Damm und in der Foundation zu verifizieren.
- 5.3.3. Für Schüttdämme der **Stauanlagenklassen II und III** können **statische** Materialkennwerte verwendet werden.
- 5.3.5. Für Schüttdämme ist zwischen **drainiertem und undrainiertem Materialverhalten** zu unterscheiden. Bei undrainiertem Verhalten ist im Unterschied zum drainierten Verhalten insbesondere dem potenziellen Verlust von Scherfestigkeit infolge von Porenwasserüberdrücken Rechnung zu tragen.



BEWERTUNG DES VERFLÜSSIGUNGSPOTENZIALS

ALLGEMEINE KRITERIEN

- 5.3.8.4. In der Regel wird bei Materialien, die mindestens eines der folgenden Kriterien einhalten, davon ausgegangen, dass sie kein Verflüssigungspotenzial aufweisen:
 - Materialien mit geringem Sättigungsgrad,
 - Materialien mit $D_{10} > 2 \text{ mm}$ und Lagerungsdichte $D_r > 50\%$,
 - Materialien mit $D_{70} < 0.063 \text{ mm}$ und Plastizitätsindex (PI) $> 25\%$,
 - Materialien mit Lagerungsdichte $D_r > 75\%$.
- Kann jedoch trotz Erfüllung der vorgenannten Kriterien das Verflüssigungspotenzial nicht abschliessend ausgeschlossen werden, sind detaillierte Untersuchungen erforderlich.



BEWERTUNG DES VERFLÜSSIGUNGSPOTENZIALS

DETAILLIERTE BEWERTUNG

- 5.3.8.5. Das Verflüssigungspotenzial wird in der Regel durch Korrelationen zwischen der **Intensität der zyklischen Belastung** während eines Erdbebens und den infolge von In-situ-Versuchen ermittelten Ergebnissen, die einen Index der **Lagerungsdichte** liefern, ermittelt. Diese Versuche, wie der Standard Penetration Test (**SPT**) oder Cone Penetration Test (**CPT**), helfen bei der Bestimmung der Lagerungsdichte des Bodens und seiner Widerstandsfähigkeit gegen Verflüssigung. Die Beziehung zwischen zyklischer Beanspruchung durch seismische Ereignisse und Dichte ist entscheidend für die Beurteilung des Verflüssigungspotenzials einer bestimmten Stauanlage.
- 5.3.8.6. Alternativ kann das Verflüssigungspotenzial quantitativ bewertet werden, indem die folgenden Methoden kombiniert werden:
 - Laborversuche, z. B. **dynamische Triaxialversuche**.
 - **Finite-Elemente-Modellierung** mit Stoffgesetzen, die das Phänomen des Aufbaus des Porenwasserüberdrucks und der Verflüssigung angemessen darstellen können. Die Parameter des Stoffgesetzes sind so zu kalibrieren, dass sie das hydro-mechanische Verhalten der betreffenden Bodenschichten widerspiegeln.



ANALYSE

SCHÜTTDÄMME DER STAUANLAGENKLASSE III

- **6.3.4.3.1.** Für Stauanlagen der Klasse III: Die möglichen Analysemethoden sind in zwei Unterkategorien unterteilt:
 - a. Gleitblockanalyse unter Verwendung massgebender empirischer Methoden oder analytisch basierter Korrelationsmodelle. Dieser Ansatz gilt für:
 - i. Alle Stauanlagen zum Schutz vor Naturgefahren
 - ii. Stauanlagen, die alle folgenden Bedingungen erfüllen: 1) $PPSA_R < 0.35$ g, 2) die Stauanlage weist keine Anzeichen von sicherheitsrelevanten Schäden auf, 3) die Stauanlage hält die statischen Sicherheitsanforderungen ein, d. h. den normalen Lastfall (Typ 1), wie in Richtlinie Teil C1 beschrieben, und 4) der in Richtlinie Teil C2 festgelegte Hochwassersicherheitsnachweis ist erfüllt.
 - b. Zeitverlaufsberechnung unter Verwendung der äquivalenten linearen Methode, zusammen mit der Gleitblockanalyse. Der Aufbau des Porenwasserüberdrucks ist unter Verwendung vereinfachter Modelle zu berücksichtigen. Dieser Ansatz gilt für alle anderen Schüttdämme der Klasse III, die die Bedingungen von Absatz 6.3.4.3.1.a nicht erfüllen.



ANALYSE

SCHÜTTDÄMME DER KLASSE II STAUANLAGEN

- **6.3.4.3.2.** Für Stauanlagen der Klasse II: Zeitverlaufsrechnung unter Verwendung der **äquivalenten linearen Methode**, zusammen mit der **Gleitblockanalyse**. Der Aufbau des Porenwasserüberdrucks ist zu berücksichtigen.



ANALYSE

SCHÜTTDÄMME DER KLASSE I STAUANLAGEN

- **6.3.4.3.3.** Für Stauanlagen der Klasse I: Zeitverlaufsberechnung unter Verwendung der **äquivalenten linearen Methode**, zusammen mit der **Gleitblockanalyse**. Die potenziellen Auswirkungen des Aufbaus von Porenwasserüberdrücken sind zu berücksichtigen.

- Werden die folgenden beiden Bedingungen nicht eingehalten, ist auch eine **nichtlineare dynamische Verformungsberechnung (Zeitverlaufsberechnung)** unter Verwendung hydromechanischer Stoffgesetze durchzuführen, die eine Modellierung für die Entstehung und Ableitung von Porenwasserüberdrücken ermöglichen:
 - i. Es ist **kein massgebender positiver Porenwasserüberdruck** im Absperrbauwerk und im Untergrund während des Erdbebens zu erwarten;
 - ii. Die durchschnittliche **zyklische Scherdehnung** aufgrund der Erdbebenbelastung bleibt **unter 0.4%**.



ANALYSE

ANDERE GRUNDSÄTZE

- 6.3.4.3.4. Bei der Zeitverlaufsrechnung unter Verwendung der äquivalenten linearen Methode, zusammen mit der Gleitblockanalyse, sind **Sensitivitätsanalysen mit oberen und unteren Grenzwerten für Materialeigenschaften** zu verwenden, um Unsicherheiten zu berücksichtigen.
- 6.3.4.3.5. Bei der Gleitblockanalyse kann die horizontale Komponente der Beschleunigung verwendet werden, die auf den Schwerpunkt der Gleitmasse wirkt; **die Auswirkungen der vertikalen Komponente können vernachlässigt werden.**
- 6.3.4.3.6. Bei der Modellierung unter Verwendung einer nichtlinearen dynamischen Verformungsanalyse (Zeitverlaufsrechnung) sind die Modellparameter der integrierten Stoffgesetze auf der Grundlage von Labor- und/oder Feldversuchen zu kalibrieren. Die Unsicherheiten in den Parametern sind zu bestimmen und zu berücksichtigen. Es wird empfohlen, die Ergebnisse des numerischen Modells anhand bestehender physikalischer Modelle oder relevanter, ausreichend dokumentierter Fälle aus der Literatur zu überprüfen. **Zusätzlich sollen die Ergebnisse der Zeitverlaufsanalyse unter Verwendung der äquivalenten linearen Methode, die mit den Auswirkungen des Aufbaus des Porenwasserüberdrucks integriert ist, als Referenz für den Vergleich dienen.**

INTERPRETATION DER ERGEBNISSE PERMANENTE KRONENSETZUNGEN

- 6.8.2.3. Die zulässigen bleibenden Kronensetzungen, die auf die kombinierten Auswirkungen von Verdichtung, Konsolidierung und Bildung von Gleitflächen aufgrund von Erdbebeneinwirkung zurückzuführen sind, sollten 25% des Sicherheitsfreibords gemäss Definition in Absatz 2.3.2. der Richtlinie Teil C2: Hochwassersicherheit und Stauseeabsenkung nicht überschreiten.

INTERPRETATION DER ERGEBNISSE POTENZIAL FÜR INNERE EROSION

- 6.8.2.6. Bei **Schüttdämmen mit Kerndichtung** kann die Gefahr der **inneren Erosion** nach der bleibenden Verformung ausgeschlossen werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten sind:
 - i. Zwischen den einzelnen Zonen des Dammes wird die Filterfunktionalität weiterhin eingehalten.
 - ii. Die Kerndichtung ist immer noch genügend überdeckt und besteht aus Material, welches die vom Erdbeben ausgelösten Verformungen ohne wesentliche Änderung der Durchlässigkeitseigenschaften ertragen kann.
 - iii. Die Restdicke der Filter- und Drainageschichten im deformierten Zustand beträgt mindestens die Hälfte der Dicke im undeformierten Zustand.

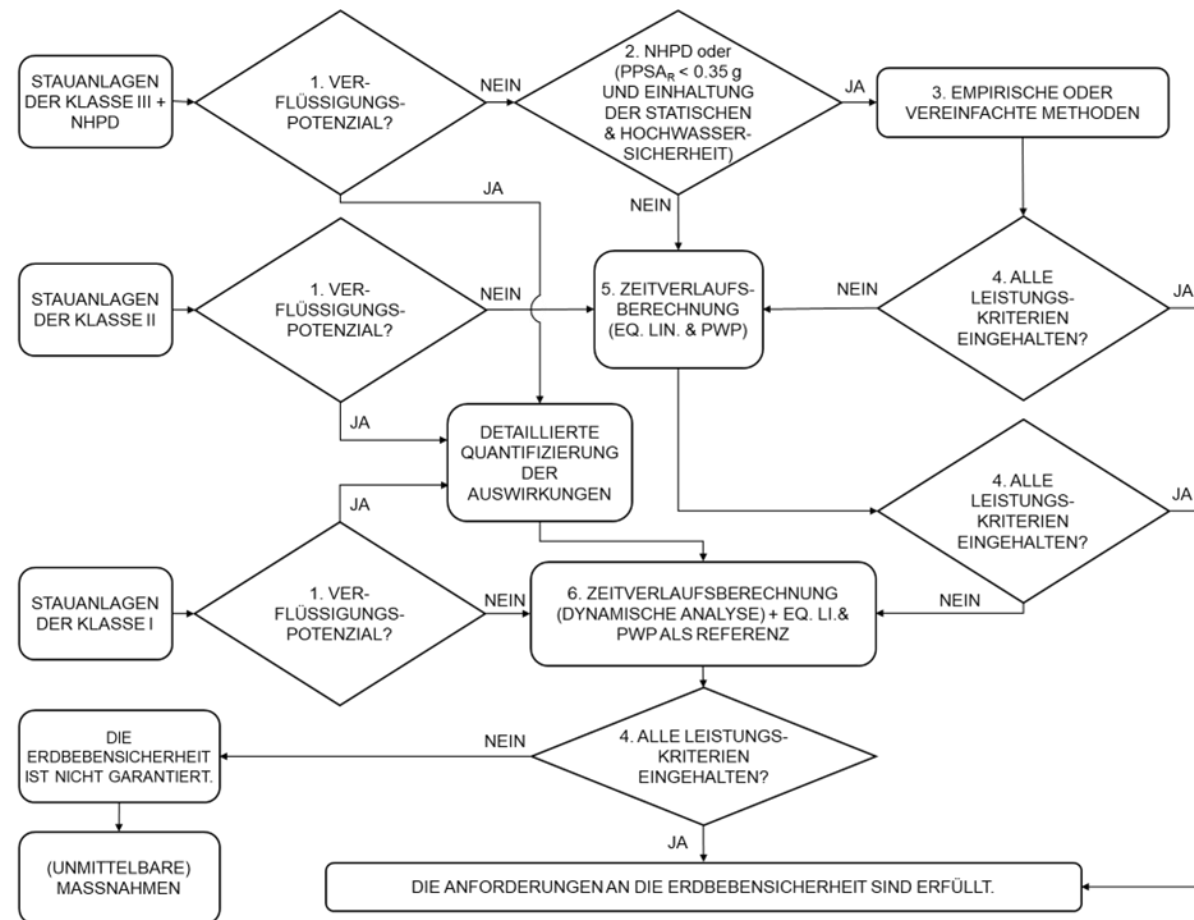
INTERPRETATION DER ERGEBNISSE POTENZIAL FÜR INNERE EROSION

- 6.8.2.7. Bei **Schüttdämmen mit einer wasserseitigen Oberflächendichtung** sind folgende Aspekte zu kontrollieren:
 - i. Die Integrität der Dichtung ist zu beurteilen.
 - ii. Ist davon auszugehen, dass die Dichtung beschädigt werden kann, so sind die daraus entstehenden Gefährdungen für den Schüttdamm (wie innere Erosion und veränderte Stabilitätsverhältnisse infolge einer möglichen Ausbildung einer Sickerfläche im Dammbauwerk) zu beurteilen.
 - iii. Die Restdicke der Filter- und Drainageschichten unter der Oberflächendichtung im deformierten Zustand beträgt mindestens die Hälfte der Dicke im undeformierten Zustand.
 - iv. Zwischen den einzelnen Zonen des Dammes wird die Filterfunktionalität weiterhin eingehalten.



INTERPRETATION DER ERGEBNISSE

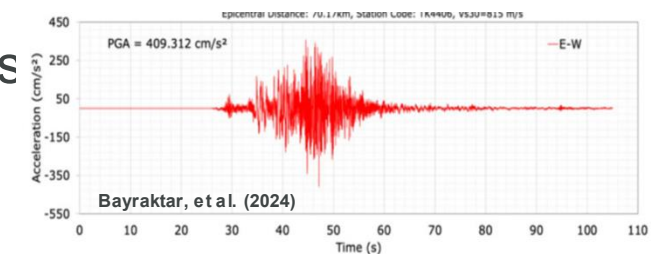
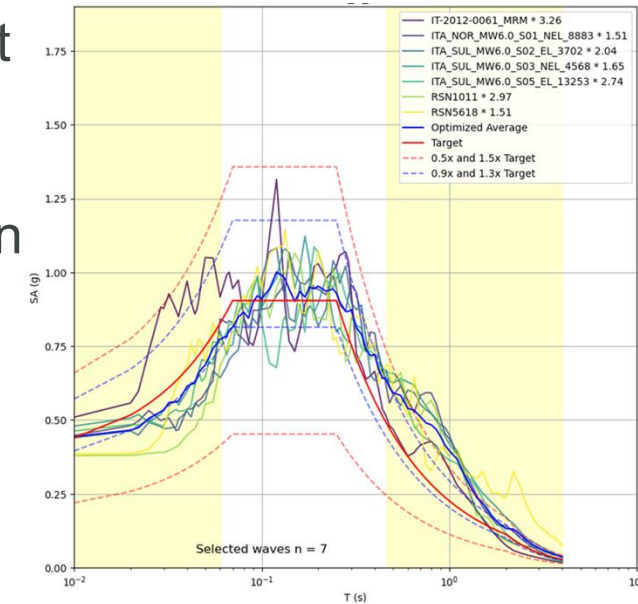
FLUSSDIAGRAMM FÜR DEN NACHWEIS





BESONDERE GRUNDSÄTZE ZU DEN BESCHLEUNIGUNGSZEITVERLÄUFEN

- Das BFE liefert einen Satz von 7 Beschleunigungszeitverläufen mit drei Komponenten
- Die signifikante Dauer und die Arias-Intensität der einzelnen Zeitverläufe und der gesamte Satz erfüllen die in § 4.3.5 genannten Anforderungen.
- Das geometrische Mittel der beiden horizontalen Komponenten ist mit dem normativen Spektrum kompatibel.
- Bei 2D-Simulationen ist die ungünstigste horizontale Komponente zu verwenden (die Kompatibilität dieser Komponenten sollte kontrolliert werden - gegebenenfalls sind die Zeitverläufe neu zu skalieren)
- Bei sehr langen Erdbebenaufzeichnungen kann man die Zeitverläufe "abschneiden", aber es sollte begründet werden, dass der abgeschnittene Abschnitt keinen Einfluss auf die endgültigen Ergebnisse hat.





TECHNISCHES HILFSDOKUMENT

ZIELE

- Ziel 1: Analytische und empirische Methoden zur Beurteilung der Erdbebensicherheit von Schüttdämmen
- Ziel 2: Äquivalent-lineare Methoden kombiniert mit der Gleitblockanalyse
- Ziel 3: Nichtlineare dynamische numerische Modellierungsmethoden
- Ziel 4: Stoffgesetze, Parameterbestimmung und Kalibrierung
- Ziel 5: Schrittweise Beispiele nach dem Stand der Technik und auf der Grundlage der Richtlinie Teil C3 des BFE



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Swiss Federal Office of Energy SFOE





DANKE FÜR DIE AUFMERKSAMKEIT



Amin Askarinejad
Fachspezialist Aufsicht Talsperren

UVEK BFE TS

amin.askarinejad@bfe.admin.ch

energieplus.com