

Stand sicherheitsnachweise für Staudämme bei Erdbebenbeanspruchung mit der Finite-Elemente-Methode

Andrej Mey
BAUGRUND DRESDEN, Dresden, Deutschland

Peter-Andreas von Wolffersdorff
BAUGRUND DRESDEN, Dresden, Deutschland

Zusammenfassung

Für Staudämme und Talsperren mit einer Höhe von über 40 m werden in DIN 19700-11 realitätsnahe Untersuchungen mittels dynamischer Berechnungsmodelle für den Nachweis der Erdbebensicherheit gefordert. Zur Durchführung dynamischer Untersuchungen wird auch das so genannte „Zeit-Schritt-Verfahren“ vorgeschlagen. Die Berechnung von Erdbebenbeanspruchungen mit dem „Zeit-Schritt-Verfahren“ kann mittlerweile in einer Vielzahl gängiger FE-Programme vorgenommen werden.

Im Beitrag wird die Bedeutung der Stoffgesetze zur Modellierung von Dammmaterial und Untergrund hinsichtlich ihrer Eignung zur Wiedergabe zyklischen Materialverhaltens bei der Anwendung der FEM untersucht. Anhand eines Beispiels für einen Damm werden FE-Berechnungen mit verschiedenen Stoffmodellen, unter anderem dem HS-Small Modell, vorgestellt.

Im zweiten Teil werden Wege aufgezeigt, wie zukünftig die Standsicherheit im Erdbebenfall mittels der Methode der Finiten Elemente ermittelt werden kann.

1. Einführung

Für den üblichen Hochbau existieren ausführliche Vorschriften zum Umgang mit Erdbeben und deren Auswirkungen auf Bauwerke. Die einschlägige Norm hierfür ist die DIN 4149 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten“ [4]. Übergeordnet kommt die Anwendung des Eurocode 8 hinzu [3].

Die Bemessung von Talsperren als Stauanlagen gegenüber Erdbebenbeanspruchungen erfolgt in Deutschland nach DIN 19700-10 und DIN 19700-11 [1, 2].

Die DIN 19700-10 verlangt die Untersuchung der Auswirkungen von Erdbeben auf Stauanlagen anhand von Nachweisen für zwei Erdbebenfälle:

Erdbebenfall 1: Das „Betriebserdbeben“ dient dem Nachweis der Tragfähigkeit sowie dem Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Stauanlage; die Stauanlage muss ohne Nutzungsbeschränkungen widerstehen.

Erdbebenfall 2: Das „Bemessungserdbeben“; dient dem Nachweis der Tragfähigkeit; die Stauanlage muss ohne globales Versagen widerstehen.

In DIN 19700-11 entspricht das Betriebserdbeben einer seltenen oder zeitlich begrenzten Einwirkung. Das Bemessungserdbeben ist als außergewöhnliche Einwirkung anzusehen. Die globalen Sicherheitsbeiwerte für die Nachweise der Tragfähigkeit sind in Abhängigkeit von Tragwiderstandsbedingungen und Bemessungssituationen festgelegt. Für das Bemessungserdbeben ist ein Gesamtsicherheitsbeiwert $\gamma = 1,1$ einzuhalten.

Die DIN 19700-11 unterscheidet weiterhin in Abhängigkeit vom Gefährdungspotential zwei Talsperrenklassen:

Talsperrenklasse 1: große Talsperren mit Kronenhöhen > 15 m über Gründungssohle und einem Stauraum $> 1.000.000$ m³

Talsperrenklasse 2: mittlere und kleine Talsperren, die nicht in Talsperrenklasse 1 eingeordnet werden können

Es genügt bei Talsperren der Klasse 2 und bei Talsperren der Klasse 1 mit Kronenhöhen bis 40 m, Erdbebennachweise mit quasistatischen Ersatzlasten zu führen. Bei höheren Absperrbauwerken der Talsperrenklasse 1, mit Höhen > 40 m, ist eine Untersuchung auf der Grundlage dynamischer Berechnungsmodelle erforderlich. Weitere detaillierte Hinweise werden in DVWK-Merkblatt 242 (Berechnungsverfahren für Gewichtstaumauern) [6] und in ATV-DVWK-Merkblatt M 502 (Berechnungsverfahren für Staudämme) [5] gegeben.

In DIN 19700-11 sind weitere, hier nicht weiter erläuterte Vorgaben für die Erdbebenfälle 1 und 2 hinsichtlich jährlicher Übertretungswahrscheinlichkeiten der anzusetzenden Betriebs- und Bemessungserdbeben enthalten.

2. Überblick über die gebräuchlichen Berechnungsmethoden zur Berücksichtigung seismischer Einwirkungen

2.1 Berechnungen mit pseudostatischen Ersatzlasten

Für mittlere und kleine Staudämme ist in ATV-DVWK-Merkblatt M 502 der pseudostatische Nachweis als Regelnachweis genannt. Dabei wird die Erdbebenbeanspruchung durch eine statische Ersatzbeanspruchung

unter Ansatz einer effektiven, d.h. abgeminderten, horizontalen Beschleunigung berücksichtigt. Diese abgeminderte Beschleunigung wird mit der Masse eines angenommenen Gleitkörpers multipliziert und die sich so ergebende Ersatzkraft wird im Schwerpunkt des Gleitkörpers angesetzt. Mit der Erdbebenersatzkraft können alle konventionellen Nachweise durchgeführt werden. Vertikale Erdbebenkräfte, sowie mitschwingende Wassermassen werden für mittlere und kleine Staudämme in der Regel nicht berücksichtigt.

Die nicht abgeminderte Grundbeschleunigung ist auf der Grundlage von seismologischen Gutachten festzulegen. In der Regel sind die in DIN 4149 genannten Erdbebenkennwerte für Staudämme nicht anwendbar. Die standortspezifischen Grundbeschleunigungen werden entweder deterministisch oder probabilistisch ermittelt. Die deterministische Vorgehensweise ist die üblichere Variante, da sich die Belegung von bekannten Erdbebenzonen und -herden mit Wahrscheinlichkeiten bezüglich Intensität und Wiederkehrhäufigkeiten in seismisch nicht besonders auffälligen Regionen, wie z.B. Deutschland, etwas schwieriger gestaltet, als die Betrachtung von gemessenen, registrierten und/oder historischen Erdbeben innerhalb eines Standortszenarios.

Zur Ermittlung einer für Bauwerke und Bauwerksschäden repräsentativen Beschleunigung wird in [5] die Abminderung der seismischen Grundbeschleunigung mit einem Faktor von $2/3$ bis 1 empfohlen. Die Abminderung der maximalen für einen bestimmten Standort bestimmten horizontalen Beschleunigung ist notwendig, da der Extremwert eines registrierten Beschleunigungs-Zeitverlaufes eines Erdbebens oft nur sehr kurz auftritt und meist im Bereich höherer Frequenzen liegt, die für viele Bauwerke eher unschädlich sind. Insgesamt erfordert die Vorgabe einer effektiven Beschleunigung umfangreiche Erfahrungen und erfolgt meist auf empirischer Basis.

2.2 Dynamische Berechnungen

Antwortspektrummethode

Für Gewichtsstaumauern und für hohe Staudämme (Talsperrenklasse 1, Kronenhöhe > 40 m) werden gemäß [5, 6] dynamische Berechnungen nach der Antwortspektrummethode empfohlen. Die Grundlage dieser Methode ist das Antwortspektrum eines Erdbebens. Es charakterisiert den Frequenzgehalt der Beschleunigungsantwort eines gedämpften Einmassenschwingers mit bestimmter Eigenfrequenz unter Erdbebenanregung. Antwortspektren für Betriebs- und Sicherheitserdbeben können der Literatur entnommen oder aus seismologischen Gutachten für den entsprechenden Standort abgeleitet werden. Antwortspektren können auch für Geschwindigkeiten und Verschiebungen aus jedem beliebigen gemessenen oder künstlich generierten Erdbebenverlauf erzeugt werden. Aus Antwortspektren kann man Beschleunigungen, Geschwindigkeiten oder Verschiebungen in Abhängigkeit der Dämpfung und Frequenz ablesen. Bei Anwendung der Antwortspektrummethode sind die Eigenfrequenzen des jeweiligen Bauwerks samt Untergrund zu bestimmen. Somit wird berücksichtigt, dass an dynamisch angeregten Körpern Schäden am ehesten durch Schwingungen in der Eigenfrequenz des jeweiligen Körpers entstehen. Für Staudämme und Staumauern genügen die ersten drei Eigenfrequenzen und Eigenformen.

Die Bestimmung der Eigenfrequenzen ist meistens aufwendig, da sie mithilfe von kontinuumsmechanischen Modellen oder auf Federn gelagerten Ersatzkörpermodellen berechnet werden müssen. Auch können mitschwingende Wassermassen einbezogen werden. Nur für einfache Querschnitte und Lagerungsverhältnisse sind in der Literatur Formeln zur Abschätzung der Eigenfrequenzen angegeben.

Mit den ermittelten Eigenfrequenzen kann man aus einem für den Standort und die Dämpfung skalierten Antwortspektrum die jeweiligen maßgebenden Beschleunigungsantworten ablesen.

Mit den Beschleunigungsantworten lassen sich wiederum Erdbebenersatzkräfte analog den pseudostatischen Verfahren berechnen. Für Staudämme genügt es, die Ersatzkräfte für den nachzuweisenden Gleitkörper zu ermitteln und im Schwerpunkt angreifen zu lassen. Der Gleitkörper muss vorab angenommen werden. Weitere prinzipielle Hinweise zum Umgang mit aus Antwortspektren gewonnenen Beschleunigungen zur Bestimmung von Ersatzkräften liefert DIN 4149.

Zeit-Schritt-Verfahren

Als weitere dynamische Berechnungsmethode für Staudämme wird in [5] das Zeit-Schritt-Verfahren genannt. Dieses aufwendige numerische Verfahren, mit dem die seismischen Einwirkungen im Vergleich zu den oben beschriebenen Ersatzkraftmethoden realitätsnäher berücksichtigt werden können, wird für sehr hohe Dämme in Gebieten mit hohem seismischem Risiko empfohlen. Da jedoch durch die Entwicklung der modernen Computertechnik der Rechenaufwand für das Zeit-Schritt-Verfahren nur noch eine untergeordnete Rolle spielt, hat die Verfügbarkeit dieser Methode in gängigen Computerprogrammen stark zugenommen. Das Zeit-Schritt-Verfahren stellt dadurch eine Alternative zu den Ersatzkraftmethoden dar und wird zunehmend auch für deutsche Standorte interessant.

Beim Zeit-Schritt-Verfahren wird die zu erwartende Beschleunigung in der Dammaufstandsfläche oder im Grundgebirge entsprechend eines vorgegebenen Beschleunigungs-Zeit-Verlaufes in kleine Zeiteinheiten aufgeteilt. Für jede kleine Zeiteinheit wird eine Berechnung durchgeführt, mit der die jeweils aktuelle Beanspruchung des Dammes ermittelt wird. Dabei kann nichtlineares Materialverhalten des Dammkörpers und des Untergrundes beachtet werden. Da die je Zeitintervall berechneten Spannungen und Verformungen jeweils an die Berechnung des darauf folgenden Zeitintervalls als Ausgangszustand übergeben werden, handelt es sich um eine „echte“ dynamische Berechnung. Solche Berechnungen können mittlerweile mit vielen

kommerziellen Finite-Elemente-Programmen ausgeführt werden.

Sowohl Erdbebenwirkung als auch Materialverhalten sind beim Zeit-Schritt-Verfahren im Vergleich zu den pseudostatischen und vereinfachten dynamischen Verfahren realitätsnäher berücksichtigt. Die anzusetzenden Beschleunigungs-Zeit-Verläufe können künstlich generiert oder aus gemessenen Erdbebenverläufen gewonnen werden. Sie sind den Gegebenheiten des Standortes anzupassen.

Dammkörper und Dammuntergrund können mit neuartigen „Small-Strain“-Stoffgesetzen modelliert werden, so dass sich aus dem Materialverhalten heraus Dämpfungseffekte ergeben. Auch Aufgabenstellungen mit komplexen Geometrien können damit untersucht werden.

Nachfolgend wird am Beispiel eines Staudammes die Berechnung mit dem Zeit-Schritt-Verfahren unter seismischer Einwirkung vorgestellt.

3 Dynamische Berechnung eines Staudammes unter Erdbebenwirkung

3.1 Beispielstaudamm

Für die Berechnungen wurde ein 46 m hoher Steinschüttdamm mit wasserseitiger Asphaltbetonaufabdichtung als Absperrbauwerk einer Talsperre verwendet (siehe Abb. 1). In Abb. 2 ist der für die Berechnungen maßgebende Regelquerschnitt dargestellt.



Abbildung 1: Staudamm

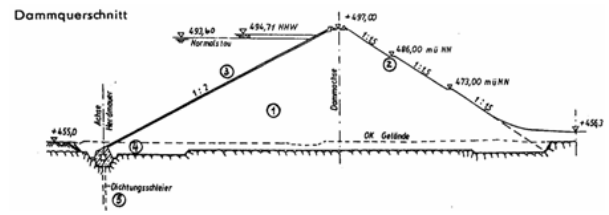


Abbildung 2: Regelquerschnitt

Im Folgenden wird ein Überblick über die wesentlichen technischen Daten des Dammes gegeben:

Technische Daten	Steinschüttdamm mit Asphaltbetonaufabdichtung
Rückhaltevermögen	14.45 Mio. m ³
Kronenhöhe	497 m ü NN
Kronenlänge	300 m
Kronenbreite	6 m
Höhe über Gründung	46 m
Höhe über Gelände	42.8 m
Dammkörpervolumen	600000 m ³
Max. Breite im Gründungsbett	165 m
Talsperrenklasse	1; Höhe > 40 m

3.2 Ziel der Berechnungen

Gegenwärtig gibt es kein anerkanntes Verfahren, um die Standsicherheit direkt mit dynamischen Berechnungsmethoden ermitteln zu können. In dem Beitrag wird gezeigt, wie mit gegenwärtig verfügbarer Software Standsicherheitsuntersuchungen auf der Basis dynamischer Berechnungen durchgeführt werden können.

Hierzu werden umfangreiche dynamische Berechnungen an zweidimensionalen Berechnungsmodellen vorgenommen. Diese Modelle beziehen sich auf den Regelquerschnitt des Beispielstaudammes. Insbesondere wurde der Einfluss verschiedener bodenmechanischer Stoffgesetze und deren Auswirkungen auf das Dämpfungsverhalten untersucht.

Daran anschließend werden Wege aufgezeigt, wie Standsicherheitsberechnungen mit der Finite-Elemente-

Methode unter Berücksichtigung seismischer Einwirkungen geführt werden können.

Alle FE-Berechnungen wurden mit dem Programm PLAXIS 2D Ver. 8.5 Dynamics durchgeführt [8].

3.3 Beschleunigungs-Zeit-Verlauf des Bemessungs-erdbebens

Der für den Standort repräsentative Beschleunigungs-Zeit-Verlauf wurde in einem seismologischen Gutachten mit allen Erdbebedaten zur Verfügung gestellt. Die Erstellung eines solchen Beschleunigungs-Zeit-Verlaufes wird hier nicht näher beschrieben.

Im Programm PLAXIS 2D Dynamics können Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Zeit-Verläufe als ASCII- oder .smc-Dateien eingelesen werden. Für das Beispiel wurde ein 10 Sekunden langer repräsentativer, horizontaler Beschleunigungs-Zeit-Verlauf mit maximal auftretender horizontaler Beschleunigung von **0,36 m/s²** eingelesen (siehe Abb. 3). Dieser horizontale Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, der einem Bemessungs-erdbeben nach DIN 19700 entspricht, ist hinsichtlich potentieller Schäden maßgebend. Alle Berechnungen wurden mit diesem horizontalen Beschleunigungs-Zeit-Verlauf durchgeführt.

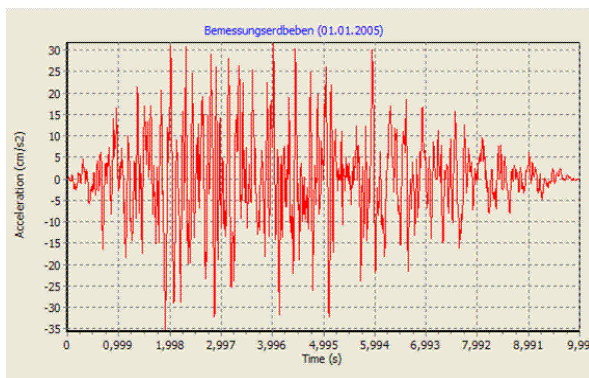


Abbildung 3: Beschleunigungs-Zeit-Verlauf, Bemessungs-erdbeben

Für die in Abschnitt 4.3 erläuterten Standsicherheitsnachweise wird eine effektive horizontale Beschleunigung von **0,24 m/s²** angesetzt. Dieser Wert entspricht 2/3 der maximalen horizontalen Grundbeschleunigung.

Falls besonders genaue seismologische Daten vorliegen, können andere Verfahren zur Bestimmung einer effektiven Beschleunigung angesetzt werden, wie z. B. die Methoden nach BENJAMIN [11] oder KENNEDY [12].

3.4 Modellgeometrie

Höhe und Breite des modellierten Felsuntergrundes im 2D-Berechnungsmodell wurden in Anlehnung an die Empfehlungen des ICOLD Bulletins 52 (1986) [9] gewählt. Der möglichst breite Untergrundausschnitt vermindert den Einfluss von Wellenreflexionen an den Modellrändern. Zusätzlich sind an den vertikalen Modellrändern viskose Randbedingungen (Randabsorber) definiert.

Herdmauer, Dichtungsschleier und Dammaußendichtung wurden im Modell berücksichtigt (siehe Abb. 4). Die Erstellung des FE-Modells erfolgte unter der Maßgabe, auch konventionelle statische Verformungs- und Setzungenberechnungen mit ein und demselben Modell ausführen zu können. Es wurde angenommen, dass die Dammaußendichtung vollkommen dicht ist und somit keine Sickerströmungen und Porenwasserdrücke innerhalb des Dammkörpers auftreten können.

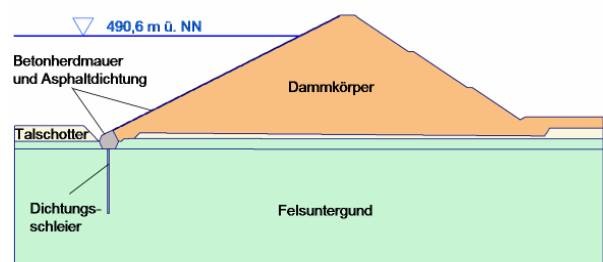


Abbildung 4: Regelquerschnitt, schematischer Ausschnitt

Wie in Abb. 5 dargestellt ist, werden die horizontalen Beschleunigungen für die dynamische Berechnung am unteren Modellrand gemäß des eingelesenen Verlaufes vorgegeben. Linksseitig des Dammes wird eine Wasserlast als Streckenlast aufgebracht.

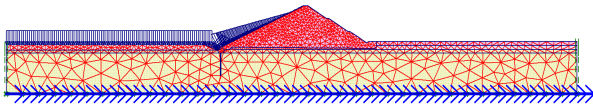


Abbildung 5: Berechnungsmodell

3.5 Stoffmodelle und deren Eingabeparameter

Für den Felsuntergrund wurde linear elastisch Materialverhalten angenommen. Der Talschotter, die Betonbauteile sowie die Asphaltbetondichtung wurden vereinfacht als linear elastisch – ideal plastisches Material (Mohr-Coulomb-Modell) modelliert. Für den Dammkörper wurden folgende Stoffmodelle¹ verwendet: das linear-elastische Modell, das linear-elastische, ideal-plastische Mohr-Coulomb-Modell, das elasto-plastische Hardening-Soil-Modell, das HS-Small-Modell. „HS-Small“ ist die Bezeichnung für das erweiterte Hardening-Soil-Modell mit Berücksichtigung erhöhter Steifigkeiten im Bereich kleiner Dehnungen [14].

Die Eingabeparameter der Stoffmodelle für das Dammkörpermaterial (Steinschüttmaterial) wurden entsprechend einer Parameterrecherche aus Altgutachten, Laborversuchen und wissenschaftlichen Veröffentlichungen abgeleitet.

Felsuntergrund-, Talschotter- und Bauteilparameter wurden auf Grundlage des geotechnischen Gutachtens und Erfahrungen aus vorangegangenen Berechnungen festgelegt.

In den Tabellen 1 bis 3 sind die in den dynamischen Berechnungen verwendeten Materialparameter der verschiedenen Stoffmodelle für den Dammkörper zusammengestellt.

Tabelle 1: Materialparameter bei linearer Elastizität

Bezeichnung	LE 90	LE 300
Stoffmodell	Lineare Elastizität	Lineare Elastizität
E^{ref} [kN/m ²]	90000	300000
ν [-]	0,2	0,2

¹ Zur Zeit werden ergänzende Berechnungen mit dem hypoplastischen Modell mit intergranularer Dehnung durchgeführt

Die Berechnungen mit linearer Elastizität und mit Mohr-Coulomb-Modell wurden zu Vergleichszwecken mit statischem E-Modul (LE 90, MC 90) und mit dynamischem E-Modul (LE 300, MC 300) durchgeführt.

Tabelle 2: Materialparameter des Mohr-Coulomb-Modells

Bezeichnung	MC 90	MC 300
Stoffmodell	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
c_{ref} [kN/m ²] (Verzahnungsfestigkeit)	10	10
ϕ [°]	41	41
ψ [°]	6	6
E^{ref} [kN/m ²]	90000	300000
ν [-]	0,22	0,22

In allen Berechnungen wurde für den Dammkörper die Wichte $\gamma = 21,4 \text{ kN/m}^3$ und für den Felsuntergrund die Wichte $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$ angesetzt.

Tabelle 3: Materialparameter des Hardening-Soil-Modells und des HS-Small-Modells

Bezeichnung	HS 90	HSSmall 90
Stoffmodell	Hardening-Soil	HS Small
c_{ref} [kN/m ²] (Verzahnungsfestigkeit)	10	10
ϕ [°]	41	41
ψ [°]	6	6
E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	30000	30000
E_{50}^{ref} [kN/m ²]	30000	30000
E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	90000	90000
m [-]	0,6	0,6
ν_{ur} [-]	0,2	0,2
$\gamma_{0.7}$ [m]	-	0,0001
G_0 [kN/m ²]	-	375000

3.6 Materialdämpfung

Einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnung haben die Dämpfungseigenschaften der verwendeten Materialien. In PLAXIS besteht die Möglichkeit, die Materialdämpfung als Rayleigh-Dämpfung zu modellieren. Die Rayleigh-Dämpfung ist als Annäherung der viskosen

Dämpfung zu betrachten. In Abhängigkeit der aktuellen Steifigkeiten und der Masse kann die Dämpfung über die Eingabefaktoren α und β gesteuert werden. Über α werden der Einfluss der Masse auf die Dämpfung und der Bereich der niedrigen Frequenzen beeinflusst. Über β wird die Dämpfung proportional zur aktuellen Steifigkeit gesteuert.

Im vorliegenden Beispiel wurden die Rayleigh-Dämpfungsparameter aus der 1. und 3. Eigenfrequenz des Dammkörpers und einer abgeschätzten Dämpfung von 5% ermittelt. Die Eigenfrequenzen wurden über eine Näherungsformel für Dämme auf Felsuntergrund aus dem Schweizer Basisdokument zu den Nachweisen der Erdbebensicherheit für Stauanlagen [7] bestimmt. Für den untersuchten Beispieldamm erhält man die Parameter:

$$\alpha = 0,5353$$

$$\beta = 0,0032$$

In den vorgenommenen Vergleichsberechnungen mit unterschiedlichen Stoffmodellen wurde die Rayleigh-Dämpfung mit diesen beiden Parametern berücksichtigt.

Eine weitere, etwas aufwendigere Möglichkeit besteht darin, das jeweilige Berechnungsmodell in mehreren ungedämpften Rechnungsdurchgängen mit harmonischen Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen anzuregen und die Deformationsantworten des Dammkörpers bezüglich der maximalen Verformungen bei bestimmten Frequenzen auszuwerten. Dadurch können „berechnungsmodellspezifische Eigenfrequenzen“ ermittelt werden. Diese können wiederum zur Ermittlung der Rayleigh-Dämpfungsparameter herangezogen werden. Für das untersuchte Beispielobjekt wurden auf diese Weise Eigenfrequenzen ermittelt.

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich ist, stimmen die Eigenfrequenzen aus den FE-Analysen relativ gut mit den ersten 3 Eigenfrequenzen aus der schweizerischen Näherungsformel überein.

Tabelle 4: Ergebnisse der Analyse der Eigenfrequenzen

Auswertung ω	1. Frequenz [rad/s]	2. Frequenz [rad/s]	3. Frequenz [rad/s]
Näherungsformel [7]	6,84	15,72	24,63
LE 90	6,91	18,22	29,53
MC 90	6,91	18,22	33,30
HS 90	-	19,48	-
HS Small 90	-	19,48	29,53

Für die leeren Tabellenfelder konnten keine eindeutigen Verschiebungsmaxima bestimmt werden. Aus Gründen der Rechenzeit wurde jeweils nur 2 Sekunden lang angeregt. Bei niedrigen Frequenzen wird dadurch keine volle Schwingung berechnet. Es wurden Schwingungen mit Frequenzen von 0,1 bis 7 Hz untersucht.

In Abb. 6 sind die berechneten Horizontalverschiebungen des Dammkörpers, ausgelesen an drei Punkten, über die einzelnen Rechenschritte aufgetragen. Über die Rechenschritte erfolgt die Zuordnung zu den Anregungsfrequenzen.

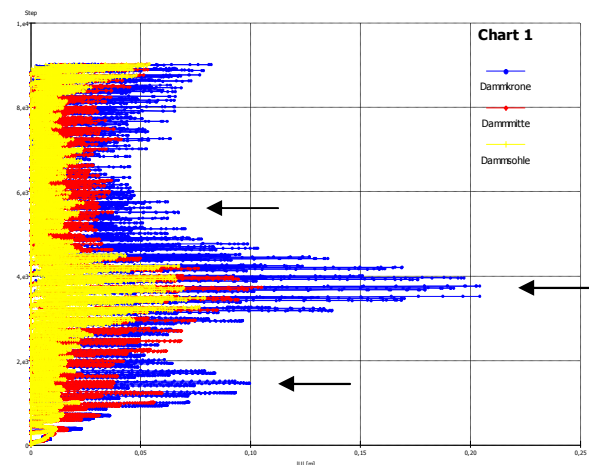


Abbildung 6: Horizontalverschiebung (x) je Rechenschritt (y), bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen, mit LE 90 Dammkörper, ungedämpft

Das HS-Small-Modell erzeugt Materialdämpfung, indem das Stoffmodell hysteretisches Verhalten realistisch nachbildet und folglich dämpft. Obwohl durch das HS Small Modell voraussichtlich insgesamt zu wenig Energie dissipiert wird, kann auf eine Rayleigh-

Dämpfung mit ihren vielen Abschätzungen und Annahmen insbesondere bei Nichtvorliegen von Laboruntersuchungen teilweise oder ganz verzichtet werden.

Abb. 7 zeigt die während der dynamische Berechnung des Steinschüttdammes im Erdbebenverlauf auftretenden Horizontalverschiebungen des Dammkörpers, die mit rayleigh-gedämpftem Hardening-Soil-Dammkörper, mit rayleigh-gedämpften HS-Small-Dammkörper und mit ungedämpftem HS-Small-Dammkörper berechnet worden sind. Die X-Achse zeigt die Verschiebungen in Metern und die Y-Achse die einzelnen Rechenschritte.

In Abb. 7 wird deutlich, dass die Verschiebungsantworten des ungedämpften HS-Small-Dammkörpers geringer sind als die Verschiebungsantworten des rayleigh-gedämpften Hardening-Soil-Dammkörpers und dass die Verschiebungsantworten des rayleigh-gedämpften HS-Small-Dammkörpers und ungedämpftem HS-Small-Dammkörpers ähnlich sind.

Diese Vergleichsberechnungen bestätigen somit, dass bei Verwendung des HS-Small-Modells auf eine Rayleigh-Dämpfung verzichtet werden könnte.

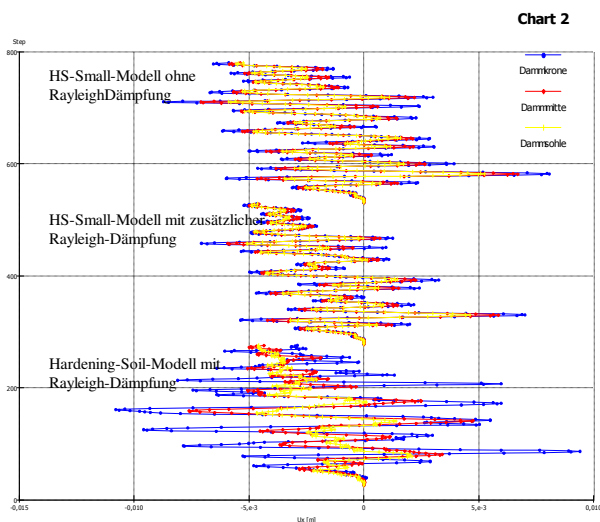


Abbildung 7: Horizontalverschiebung (x) je Rechenschritt (y), Dämpfungsvergleich HS - und HS Small - Dammkörper

3.7 Mitschwingende Wassermasse

Obwohl der Ansatz einer mitschwingenden Wasserersatzmasse in [5] nicht zwingend gefordert wird, ist er

anhand des Berechnungsbeispiels dennoch untersucht worden. Der Ansatz wurde, wie bei Gewichtsstaumauern, nach WESTERGAARD [13] gewählt (siehe Abb. 8).

In Abb. 9 sind die Beschleunigungsantworten mit und ohne Ansatz einer mitschwingenden Wassermasse dargestellt. Der Vergleich der beiden Verläufe zeigt, dass sich die zusätzliche Wassermasse bei dem vorliegenden Berechnungsbeispiel nur geringfügig auswirkt und die Maximalwerte der Beschleunigungs- und Verformungsantworten des Dammkörpers während der dynamischen Berechnung leicht dämpft werden. In weiteren Berechnungen und Vergleichen wurde die Wassermasse deswegen vernachlässigt.

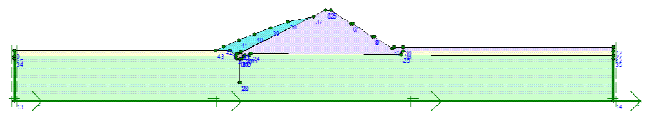


Abbildung 8: Mitschwingende Wassermasse im Modell

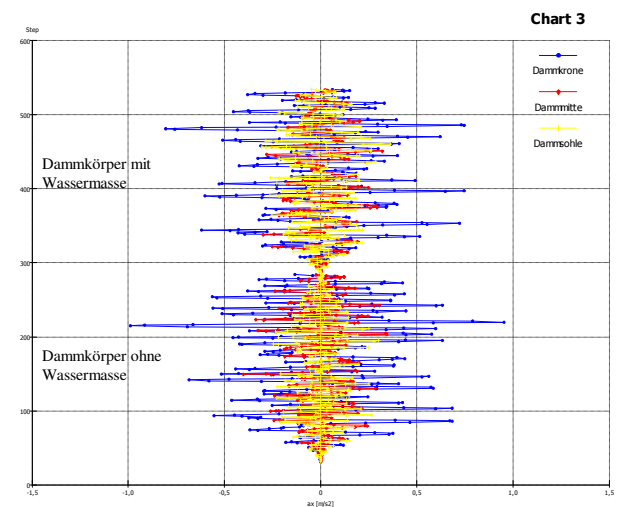


Abbildung 9: Horizontalbeschleunigung (x) je Rechenschritt (y) mit und ohne mitschwingender Wassermasse

4 Ergebnisse der dynamischen Vergleichsberechnungen

4.1 Einfluss der Stoffmodelle

Da viele dynamische Berechnungen auf linear-elastischem Materialverhalten beruhen, wurden zu Vergleichszwecken auch Berechnungen mit linear

elastischem und linear elastisch, ideal plastischem Dammkörper durchgeführt.

Eine erste Auswertung der dynamischen Berechnungen mit unterschiedlichen Stoffmodellen erfolgte, um eine Vorzugsvariante für weitere Untersuchungen festlegen zu können. Ausgewertet wurden die Beschleunigungs- und Verformungsantworten an verschiedenen Punkten

des Dammkörpers. Zur vereinfachten Darstellung der Ergebnisse werden nur die Verformungsantworten der Dammkrone in Abb. 10 dargestellt. An der Dammkrone treten nach ausgiebiger Sichtung aller an den vorab festgelegten Auswertungspunkten ausgelesenen Verformungs- und Beschleunigungsantworten die größten Verformungen und Beschleunigungen auf.

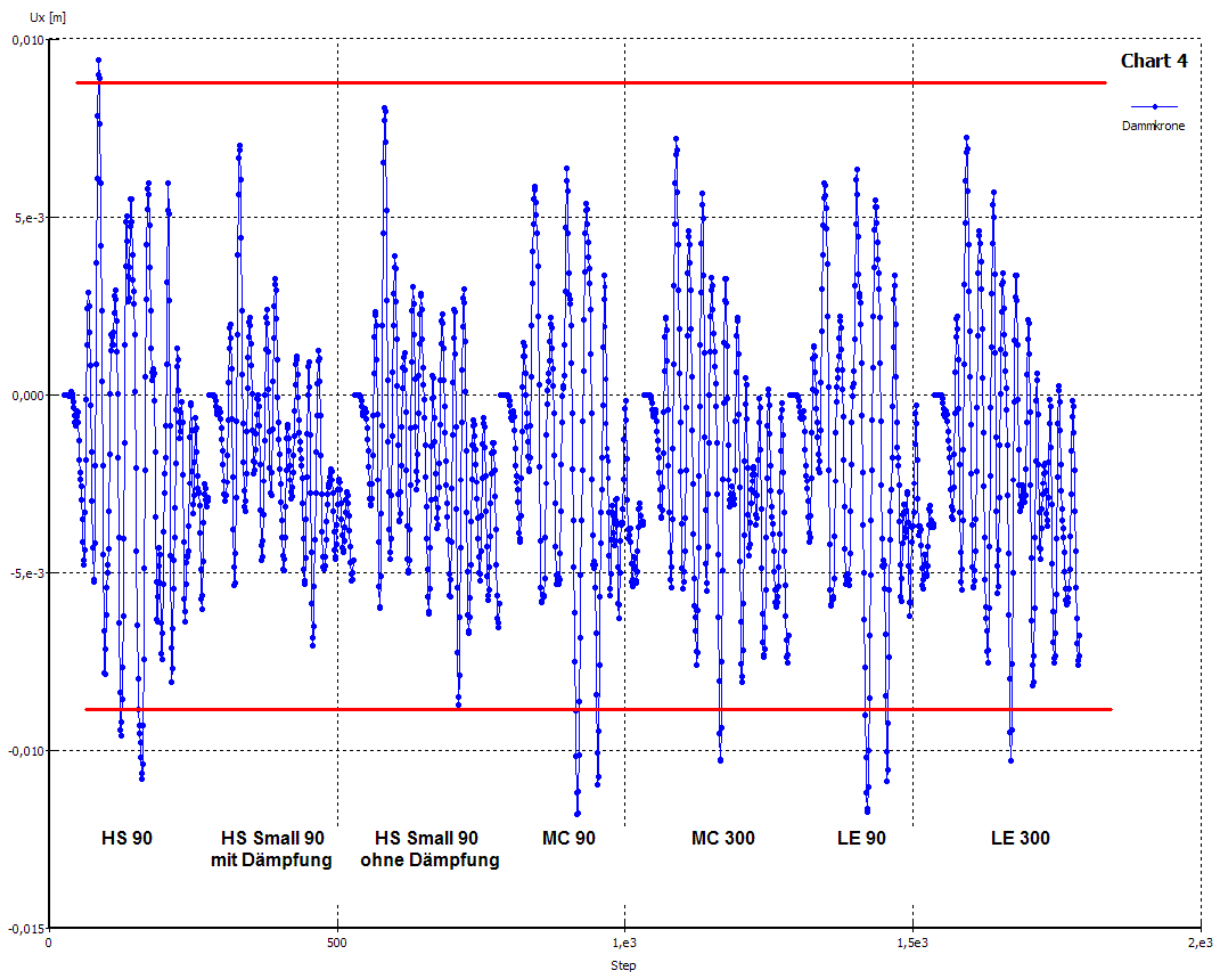


Abbildung 10: Horizontalverschiebung (y) je Rechenschritt (x), Vergleich der horizontalen Kronenauslenkungen bei Erdbebenanregung mit unterschiedlichen Stoffmodellen im Dammkörper

Die größten Verformungen treten in den Berechnungen mit Mohr-Coulomb-Modell und Linearer Elastizität unter Verwendung statischer E-Moduln auf. Auch die Berechnungen mit dem Hardening-Soil-Modell zeigen vergleichsweise große Verschiebungen. Die Anwendung dynamischer Steifigkeiten in den Berechnungen mit Mohr-Coulomb-Modell und linearer Elastizität äußert sich erwartungsgemäß in einer Verringerung der maximal auftretenden Verschiebungen. Die kleinsten

maximalen Horizontalverschiebungen der Dammkrone werden unter Verwendung des HS-Small-Modells berechnet.

Aufgrund der im Abschnitt 3.6 gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Dämpfungswirkung des HS-Small-Modells, die durch in Abb. 10 dargestellten Ergebnisse gestützt werden, wird für die weiteren Detailuntersuchungen des Dammkörpers unter Erdbeben-

belastung das HS-Small Modell ohne Dämpfung verwendet.

Aus dem Vergleich der in Abb. 10 dargestellten Berechnungsergebnisse kann weiterhin geschlossen werden, dass das Hardening-Soil-Modell, die lineare Elastizität und das Mohr-Coulomb-Modell mit statischen Elastizitätsmoduln zu große Verschiebungswerten liefern. Deshalb wurden mit diesen Stoffmodellen keine weiteren Untersuchungen vorgenommen.

4.2 Auswertung der berechneten Verformungen und Spannungen

Da sich eine dynamische Berechnung in viele einzelne Berechnungsschritte unterteilt und jeder einzelne Berechnungsschritt ausgewertet werden kann, empfiehlt sich eine vorangehende Eingrenzung der auszuwertenden Berechnungsschritte. In PLAXIS besteht die Möglichkeit aus einzelnen Berechnungsschritten Animationen zu erzeugen. Die Betrachtung einzelner Ausgabe-Größen als Animation hat den Vorteil, dass man relativ komfortabel die maßgebenden Belastungssituationen einzelnen Rechenschritten zuordnen kann. Zur Eingrenzung der maßgebenden Belastungssituationen wurden für das Berechnungsbeispiel mit HS-Small-Dammkörper ohne Dämpfung auch die sogenannten „plastic points“ animiert. Diese Punkte beschreiben je nach Farbe unterschiedliche Plastifizierungszustände.

Auf diese Weise wurden Berechnungsschritte identifiziert, in denen große Bereiche des Dammkörpers plastifizieren oder lokale Bereiche versagen (siehe Abb. 11). Im untersuchten Berechnungsbeispiel mit HS-Small-Dammkörper ohne Rayleigh-Dämpfung konnten unter Anderem folgende Sachverhalte festgestellt werden:

- Die Außendichtung versagt nicht bei dem angenommenen Bemessungserdbeben (nur punktuellen Plastifizieren der Außendichtung am wasserseitigen Dammfuß durch Erreichen des Mohr-Coulomb-Kriteriums).
- Es bilden sich bei dem angenommenen Bemessungserdbeben keine gleitkörperähnlichen oder großflächige Versagensbereiche aus
- Maximale Schubspannungen treten im luftseitigen Drittelpunkt der Dammsohle, innerhalb der Talschotterschicht, an der luftseitigen Dammoberfläche, im Talschotter unmittelbar an der Herdmauer und in Dammmitte auf (siehe Abb. 12)

Abb. 13 zeigt das verformte FE-Netz bei maximaler Kronenauslenkung.

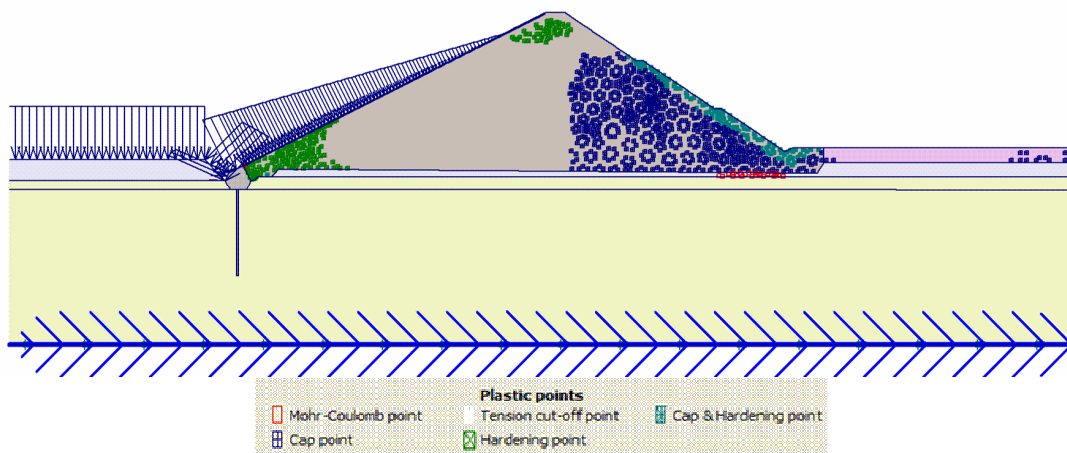


Abbildung 11: "plastic points" eines ausgewählten Zeitschrittes

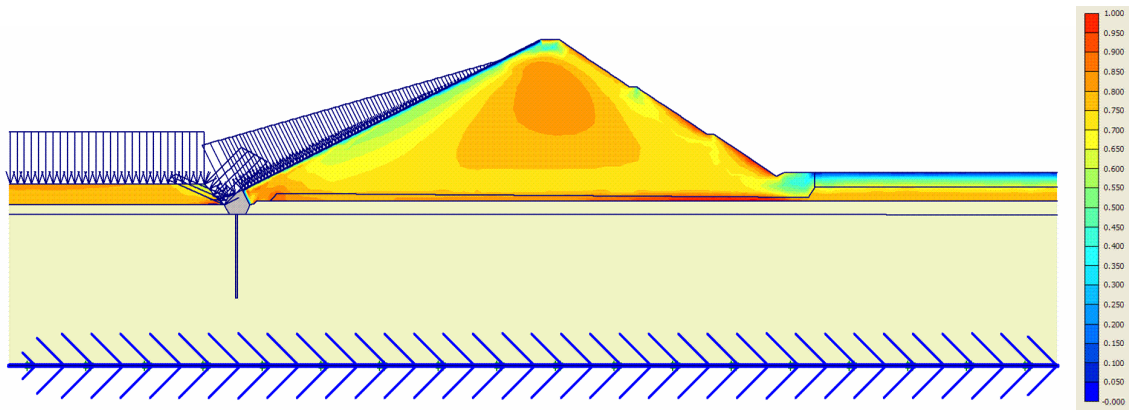


Abbildung 12: Relative Schubspannungen während eines ausgewählten Zeitschrittes

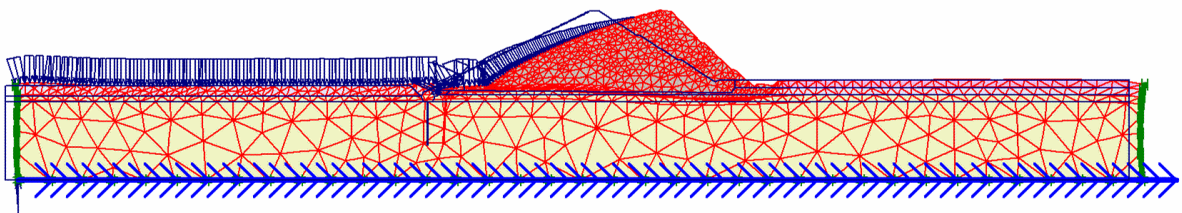


Abbildung 13: Verformtes FE-Netz, überhöht dargestellt

Folgende Verschiebungen wurden für einzelne Punkte des Dammkörpers berechnet:

Maximale Verschiebungen während des Bemessungs-
erdbebens:

Dammkrone	0,87 cm
Dammfuß, luftseitig	0,54 cm
Dammmitte	0,71 cm
Böschungsmite, luftseitig	0,65 cm
Dammsohle	0,59 cm

Bleibende Verformungen:

Dammkrone	0,40 cm
Dammfuß, luftseitig	0,41 cm
Dammmitte	0,40 cm
Böschungsmite, luftseitig	0,38 cm
Dammsohle	0,42 cm

5 Standsicherheitsbetrachtungen

Die Ermittlung der Standsicherheit von Dämmen erfolgt in der Regel mit konventionellen Gleitkreispro-

grammen, wobei eine Beschleunigung als pseudostatische, treibende Ersatzkraft angesetzt wird. Folgende Standsicherheiten wurden auf diese Weise ermittelt:

Standsicherheit der Dammböschung ohne Erdbebenbelastung:	1,71
Standsicherheit mit angesetzter effektiver Horizontalbeschleunigung von $0,24 \text{ m/s}^2$ gemäß Abschnitt 3.3:	1,61

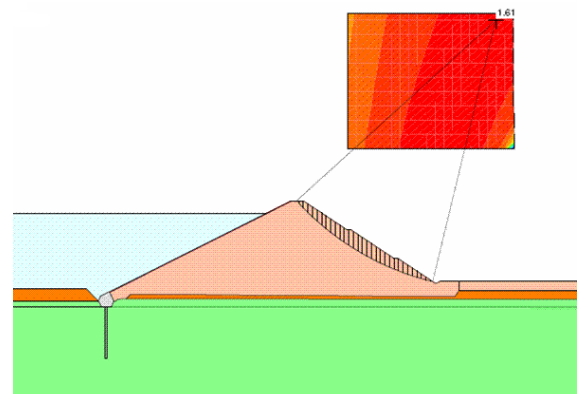


Abbildung 14: Maßgebender Gleitkreis bei angesetzter Horizontalbeschleunigung von $0,24 \text{ m/s}^2$, Sicherheitsfaktor 1,61, Berechnung mit GGU Stability

Bei Anwendung der FEM kann die Standsicherheit durch die so genannte Phi-C-Reduktion ermittelt werden, wobei hierzu in der Regel das linear-elastische, ideal-plastische Mohr-Coulomb-Modell verwendet wird. Im Ergebnis der Phi-C-Reduktion erhält man den maßgebenden Versagensmechanismus, der nicht an die kinematischen Einschränkungen der konventionellen Programme zur Untersuchung der Standsicherheiten von Böschungen gebunden ist.

Phi-C-Reduktion

Analog zu den konventionellen Gleitkreisprogrammen kann für die Phi-C-Reduktion mit PLAXIS eine im gesamten Modell eine pseudostatische Belastung infolge einer gleichmäßig wirkenden Horizontal- und/oder Vertikalbeschleunigung angesetzt werden. Die Beschleunigungskräfte wirken dabei jedoch nicht nur im Gleitkörper.

Mit einer solchen Phi-C-Reduktion wurden folgende Standsicherheiten berechnet:

Standsicherheit ohne Erdbebenwirkung: 1,71

Standsicherheit mit angesetzter effektiver

Horizontalbeschleunigung von $0,24 \text{ m/s}^2$

gemäß Abschnitt 3.3: 1,61

Die Abb. 14 zeigt den Versagensmechanismus bei Berücksichtigung der effektiven Horizontalbeschleunigung. Es sei darauf hingewiesen, dass die nach Phi-C-Reduktion ermittelten Standsicherheiten mit den Standsicherheiten der konventionellen Berechnungen übereinstimmen.

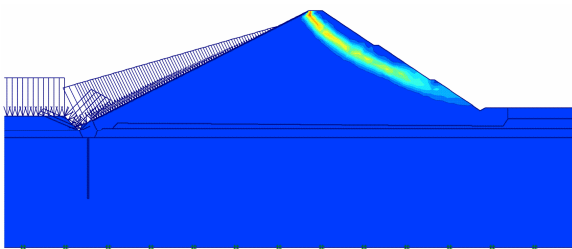


Abbildung 15: Scherfuge aus einer Phi-C-Reduktion bei Berücksichtigung der effektiven Horizontalbeschleunigung, Sicherheitsfaktor 1,61

Für das Berechnungsbeispiel wurden die pseudostatischen Ersatzkräfte auch aus den Ergebnissen der durchgeführten dynamischen Berechnungen ermittelt und damit eine Phi-C-Reduktion durchgeführt. Diese vereinfachte Vorgehensweise wird im Folgenden kurz beschrieben.

Die während der dynamischen Berechnung auftretenden Beschleunigungsantworten des Dammkörpers wurden an 6 verschiedenen Punkten innerhalb eines vorher durch Phi-C-Reduktion ohne Erdbebenwirkung bestimmten Gleitkörpers ausgelesen. Die Beschleunigungsantworten wurden gemittelt, auf einen Effektivwert reduziert ($2/3$ der gemittelten maximalen Beschleunigungsantworten der ausgewählten Gleitkörperpunkte) und als wirkende Beschleunigungen in einer erneuten Phi-C-Reduktion angesetzt. Mit dieser Methode wurde für die Staudammböschung eine horizontale effektive Beschleunigung von $0,35 \text{ m/s}^2$ ermittelt. Diese effektive Beschleunigung ist um 45 % größer als der in Abschnitt 3.3 angegebene Wert. Mit dieser Ersatzbeschleunigung wurde mittels Phi-C-Reduktion eine Standsicherheit von 1,58 berechnet. Der Versagensmechanismus ist dem in Abb. 14 dargestellten Versagensmechanismus ähnlich.

Dynamische Berechnung mit vorweggenommener reduzierter Scherfestigkeit des Dammkörpers

Es wurden auch Standsicherheitsbetrachtungen direkt in den dynamischen Berechnungsläufen durchgeführt, indem die Scherfestigkeit des Dammkörpers vorab reduziert wurde. Der größtmögliche Abminderungsfaktor von 1,7 wurde mittels Phi-C-Reduktion für den Dammkörper ohne Erdbebenbeanspruchung ermittelt. Die dynamischen Berechnungen wurden mit unterschiedlichen Scherparametern, die um die Faktoren im Bereich von 1,1 bis 1,7 abgemindert worden sind, durchgeführt.

Innerhalb der dynamischen Berechnungen traten keine dem statischen Fall analogen Versagenszustände ein. Es kann lediglich anhand von durchgängigen Bereichen

von Versagenspunkten („plastic points“) darauf geschlossen werden, dass sich ein Gleitmechanismus ausbildet. Lokal begrenzte flächenhafte Versagenszonen können zusätzliche Informationen über lokales Versagen liefern.

Bei einem Abminderungsfaktor von 1,5 wurde eine deutliche Zunahme von Versagenspunkten festgestellt. Auch komplett durch Versagenszonen abgetrennte Dammkörperteile konnten dann beobachtet werden. In Abb. 15 sind potentiellen Scherfugen an verschiedenen Zeitpunkten der dynamischen Berechnung dargestellt.

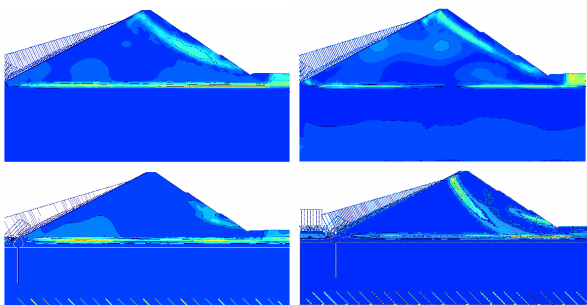


Abbildung 16: Potentielle Scherfugen bei einem Abminderungsfaktor der Scherfestigkeit von 1,5 für 4 ausgewählte Zeitschritte der dynamischen Berechnung

Die vorgelegten Berechnungen haben gezeigt, dass mindestens eine Sicherheitsreserve von 50 % vorhanden ist. Diese Sicherheitsreserve entspricht einer Standsicherheit von 1,5 und liegt in der Größenordnung der Standsicherheitsberechnungen mit statischen Ersatzlasten.

6 Schlussbemerkungen

In dem Beitrag konnten die wesentlichen Vorteile der dynamischen Berechnungen im Zeit-Schritt-Verfahren mittels FEM gezeigt werden. Diese Vorteile sind unter anderem: Die Möglichkeit der Detailbetrachtung von Konstruktionen und Bauteilen über einen kompletten Erdbebenverlauf hinweg, eine realitätsnähere Berechnung von Spannungen und Verformungen unter Beachtung nichtlinearen Materialverhaltens, Identifizierung lokaler Phänomene.

Mit dem HS-Small-Modell ist nunmehr ein Stoffmodell verfügbar, mit welchem ohne zusätzliche Dämpfung das dynamische Verhalten von Lockergestein beschrieben werden kann.

Mit der Finite-Elemente-Methode kann mittels Phi-C-Reduktion die Standsicherheit bei und infolge seismischer Einwirkungen realitätsnäher als mit konventionellen Gleitkreisverfahren erfasst werden.

Verbesserte Standsicherheitsuntersuchungen erfordern die Übergabe von Spannungs-, Verformungs- und Beschleunigungsfeldern aus den dynamischen Berechnungsläufen in einen statischen Berechnungslauf mit einer Phi-C-Reduktion. Solche Berechnungen bleiben zukünftigen Untersuchungen vorbehalten, da einerseits eine solche Übergabe entweder sehr aufwendig bzw. nicht möglich ist und andererseits weitere theoretische Arbeiten notwendig sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 19700-10:2004-07: Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen, Beuth Verlag, Berlin
- [2] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 19700-11:2004-07: Stauanlagen – Teil 11: Talsperren, Beuth Verlag, Berlin
- [3] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN EN 1998:2006, Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben, Beuth Verlag, Berlin
- [4] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 4149:2005-04: Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, Beuth Verlag, Berlin
- [5] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (ATV-DVWK): Merkblatt ATV-DVWK-M 502: Berechnungsverfahren für Staudämme – Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund, GFA – Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik, Hennef, 2002

- [6] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK): Merkblatt 242: Berechnungsverfahren für Gewichts-staumauern – Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 1996
- [7] Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG): Bericht des BWG: Sicherheit der Stauanlagen - Basisdokument zu dem Nachweis der Erdbebensicherheit, Biel, Schweiz, 2003
- [8] PLAXIS b.v.: PLAXIS Version 8, Dynamics Manual, Balkema, 2006
- [9] ICOLD: Bulletin 52, Earthquake Analysis Procedures for Dams – State of the Art, 1986
- [10] Kramer, S.: Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall, 1996
- [11] Benjamin, J.R., and Associates: A Criterion for Determining Exceedances of the Operating Basis Earthquake, EPRI Report NP-5930, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1988
- [12] Kennedy, R.P.: Ground Motion Parameters Useful in Structural Design, Conference on Evaluation of Regional Seismic Hazards and Risk, Santa Fe, 1980
- [13] Westergaard, H.: Waterpressure on Dams during Earthquakes, Transactions of ASCE, Paper Nr. 1835, 1931
- [14] Benz, T.: Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences, Mitteilung 55, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart, 2007