

Stand sicherheitsuntersuchungen von Staudämmen unter seismischen Einwirkungen mittels dynamischer FE-Analysen

Dipl.-Ing. Frank Brötzmann, BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft mbH

Dynamische Finite-Elemente-Berechnungen werden heutzutage für Staudämme auch unter Erdbebenbeanspruchungen zunehmend angewendet, da sie das komplexe dynamische Verhalten des Bauwerks, das Bodenverhalten und die sich einstellenden Verformungen gut abbilden. In den deutschen Wasserbaurichtlinien wird für hohe Dämme gefordert, Standsicherheitsnachweise auf der Grundlage dynamischer Berechnungen zu führen. Jedoch gibt es im Grunde keinen Algorithmus für die Definition bzw. Bestimmung der Standsicherheit mittels FEM bei Anwendung des Zeit-Schritt-Verfahrens. Dieser Beitrag stellt eine Herangehensweise für die Untersuchung der Standsicherheit bei Erdbebenbeanspruchung auf der Grundlage dynamischer FE-Analysen an Staudämmen vor. Als Berechnungsbeispiel dient die Geometrie des Steinschüttdammes der Talsperre Lichtenberg unter Berücksichtigung von Strong Motion Daten des Erdbebens Northridge (1994). Das Dammmaterial wird mit dem modernen HSS-Stoffgesetz modelliert, mit dem das Bodenverhalten auch unter zyklischer und dynamischer Belastung gut beschrieben werden kann. Schließlich wird ein Weg aufgezeigt, wie die Standsicherheit des Dammes anhand der Ergebnisse der dynamischen FE-Berechnungen ermittelt werden kann, wobei statische Standsicherheitsuntersuchungen hierfür voran gestellt werden.

1. Auswirkungen von Erdbeben

Erdbeben können in Abhängigkeit der Magnitude des Bebens, der geologischen Gegebenheiten und des technologischen Know Hows zur Errichtung erdbebensicherer Bauwerke teils katastrophale Schäden zur Folge haben. Das Risikopotenzial bei Staudämmen ist wegen der zu erwartenden gewaltigen Zerstörungen besonders hoch. Aus diesem Grund müssen sie gegenüber Erdbeben ausreichend sicher ausgebildet sein. Dazu sind tiefgründige Kenntnisse hinsichtlich des komplexen Verhaltens des Bauwerkes bei Erdbeben und zur Seismik selbst von Nöten. Sie zählen nicht zum alltäglichen Stand der Technik.

In jüngster Vergangenheit sind jedoch die Werkzeuge der Erdbebenanalyse stark weiterentwickelt worden. Mit Hilfe der modernen Computertechnik und den weiterentwickelten FE-Programmen ist es möglich, auch große, komplexe Strukturen als 2D- oder 3D-Modell nachzubilden und unter dynamischer Beanspruchung zu betrachten. Sol-

che FE-Analysen erlauben Aussagen zu möglichen Setzungen, zum Verhalten während des Erdbebens und auch zur Standsicherheit. Außerdem ermöglichen sie die Anpassung und Modifizierung der Konstruktionsart und Bauweise und den teilweisen Verzicht auf großmaßstäbliche Modellversuche. Jedoch steht diese Entwicklung noch relativ am Anfang. Das gilt insbesondere für geeignete Stoffgesetze, die das Verhalten von Boden und Fels unter dynamischer Beanspruchung wiedergeben können, und es gibt weiterhin den Bedarf an wissenschaftlichen Arbeiten.

Andererseits sollte auch dem günstigen Umstand Beachtung geschenkt werden, dass in der Regel ein Erd- oder Steinschüttdamm relativ „gutmütig“ gegenüber Erdbebeneinwirkungen reagiert. Ein Versagen kann in der Regel nahezu ausgeschlossen werden, es sei denn, ein solcher Damm ist auf einer tektonischen Plattengrenze gebaut.

2. Stand der Technik

In der geotechnischen Praxis werden Standsicherheitsnachweise von Dämmen für Talsperren unter Erdbebenbeanspruchung in der Regel anhand von konventionellen Gleitkreisverfahren durchgeführt. Dabei werden die Erdbebenbeanspruchungen als quasistatische Ersatzlasten berücksichtigt. Bei Dämmen der Talsperrenklasse I und einer Dammhöhe größer als 40 m werden in der DIN 19700-11 allerdings besondere Untersuchungen auf der Grundlage dynamischer Berechnungsmodelle verlangt. Im Merkblatt M 502 der ATV-DVWK [1] wird auf numerische Verfahren mit der Methode der Finiten Elemente (FEM) verwiesen. Dabei stehen zwei verschiedene Verfahren zur Auswahl: das Zeit-Schritt-Verfahren und die Antwortspektrummethode (ASM).

Da in Deutschland die Gefahr größerer Erdbeben gering ist, wird häufig die vereinfachte ASM verwendet. Diese hat allerdings den Nachteil, dass sehr konservative – aber auf der sicheren Seite liegende – Abschätzungen sich einstellender Verformungsgrößen gewonnen und keine Informationen über das zeitliche Verhalten ermittelt werden.

Mittels des Zeit-Schritt-Verfahrens kann die zeitliche Einwirkung eines Erdbebens und dessen Auswirkungen auf einen Staudamm unter Verwendung moderner Stoffgesetze (Hardening Soil Model with Small Strains – HSS-Modell) untersucht werden. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass realitätsnahe, aufgezeichnete Zeitverläufe (siehe Bild 1) verwendet werden können und dementsprechend eine gute Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse gegeben ist. Zudem werden realitätsnahe Verschiebungen im Damm und an den luft- und wasserseitigen Böschungen ermittelt.

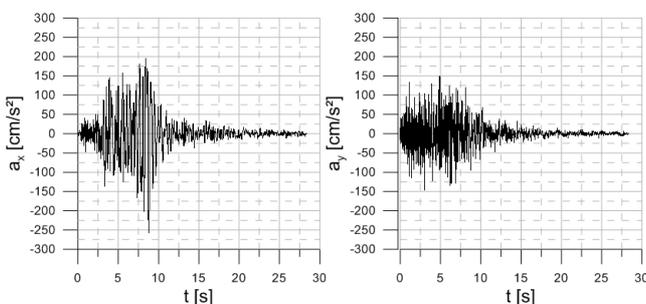


Bild 1. Aufzeichnung der horizontalen und vertikalen Beschleunigung a_x und a_y des Northridge-Erdbebens, 1994

Durch die in den modernen FE-Programmen verfügbaren Ausgabe- und Auswertungswerkzeuge ist es zudem möglich, Versagenskörper zeitlich und räumlich während der Beanspruchung zu lokalisieren und mittels zuvor vorgenommener konventioneller Gleichgewichtsbetrachtungen den Nachweis des Böschungsbruchs in Anlehnung an konventionelle Methoden zu führen.

Es ist außerdem möglich, nach der dynamischen Berechnung des Endzustandes, also des Bauwerkszustandes, der sich nach einem Erdbeben einstellt, Folgeuntersuchungen wie z. B. Durchströmen des Dammes infolge von Rissen in der Dichtung zu führen.

3. Grundlagen einer dynamischen FE-Berechnung

In diesem Beitrag werden dynamische FE-Berechnungen anhand von 2D-Modellen erörtert. Dynamische FE-Berechnungen unter Erdbebenbeanspruchungen können mittels Zeit-Schritt-Integration bei sehr kleinen Zeitschritten dt erfolgen. Dabei werden während des Erdbebenverlaufes Spannungs- und Dehnungszustände berechnet und bei Bedarf visualisiert.

Um realistische Berechnungen durchführen zu können und die Ausbreitung sich einstellender Kompressions- und Scherwellen (C_C und C_S) realitätsnah abzubilden, müssen entsprechende Randbedingungen bei der Erstellung des FE-Netzes berücksichtigt werden. Die geeignete Größe der Kantenlänge l_c eines finiten Elementes kann anhand der Kompressionswellengeschwindigkeit C_C und der Zeitschrittgröße dt abgeschätzt werden.

$$l_c = C_C \cdot dt$$

Weiterhin spielen die bodendynamischen Eigenschaften des Untergrundes und der Dammmaterialien eine maßgebliche Rolle. Je nachdem, ob fester Fels oder kompakte Böden anstehen, breiten sich Schwingungen schneller oder langsamer aus. In Abhängigkeit der Materialparameter sollte das Netz automatisch je nach Vorgabe eines Diskretisierungsgrades generiert und an Schichtgrenzen die Kantenlänge der Elemente fließend angepasst werden.

Folgende Modellvorgaben sind zu beachten bzw. festzulegen:

- Abmessungen des Modellausschnittes
- Diskretisierung des FE-Netzes

- Zeitschritt dt
- Rayleigh-Dämpfungsparameter
- Absorptionseigenschaften der vertikalen Modellränder

Die Abmessungen des Berechnungsmodells werden in Abhängigkeit der Größe des Staudammes vorgegeben. Unter Einhaltung der Maßgaben aus Bulletin 72 [2] und des AK Baugrunderdynamik [3] wird ein möglichst breiter Untergrundausschnitt gewählt, um den Einfluss der Wellenreflexion an den Modellrändern zu minimieren, unabhängig davon, ob den vertikalen Modellrändern Absorptionseigenschaften zugeordnet sind.

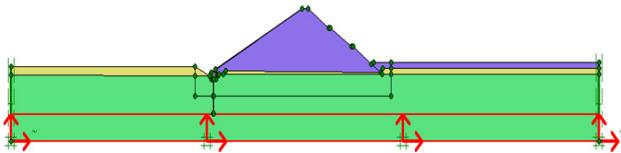


Bild 2. Vorgabe voneinander unabhängiger Horizontal- und Vertikalbeanspruchung (Plaxis 2D)

Am unteren Modellrand (siehe Bild 2) werden vordefinierte Verschiebungen (prescribed displacement), die sich möglichst aus voneinander unabhängigen Horizontal- und Vertikalkomponenten zusammensetzen, vorgegeben. In Abhängigkeit des vorzugebenden Zeitschrittes werden die vordefinierten Verschiebungen mit aus einem eingelesenen Beschleunigungs-Zeit-Verlauf abgeleiteten Wert multipliziert. Damit erhält man für jeden definierten Zeitpunkt des Erdbebenverlaufes die jeweilige Beanspruchung, mit der das System angeregt wird. Im Programm PLAXIS 2D können Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungs-Zeit-Verläufe als ASCII- oder .smc-Dateien eingelesen werden.

Die Dauer einer dynamischen FE-Berechnung hängt sehr stark von der Größe des Zeitschrittes und dem Diskretisierungsgrad des FE-Modelles ab. Es sollte u. U. im Vorfeld untersucht werden, wie groß der Zeitschritt bei gleichzeitiger Wahrung möglichst genauer Ergebnisse gewählt werden kann, um die Berechnungsdauer zu minimieren.

4. Modellierung Damm Lichtenberg

Die dynamischen FE-Untersuchungen wurden an dem maßgebenden Querschnitt des Staudammes Lichtenberg durchgeführt. Der Staudamm Lichtenberg hat folgende technische Daten [4]:

Steinschüttdamm mit Asphaltbetonaußendichtung

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:	600.000 m ³
Max. Breite im Gründungsbett:	165 m
Talsperrenklasse:	1; Höhe > 40 m

Bild 3 zeigt die Querschnittsgeometrie mit den zugehörigen Angaben der Materialien.

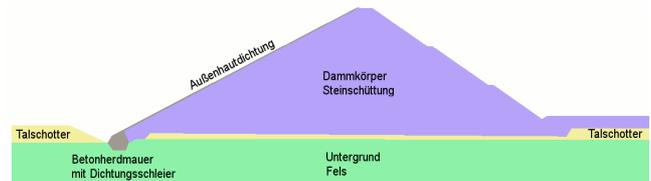


Bild 3. Geometrie des Damms Lichtenberg

Das Netz wurde unter Beachtung der im Kapitel 2 beschriebenen Forderungen generiert. Ein Ausschnitt des FE-Modelles ist in Bild 4 dargestellt.

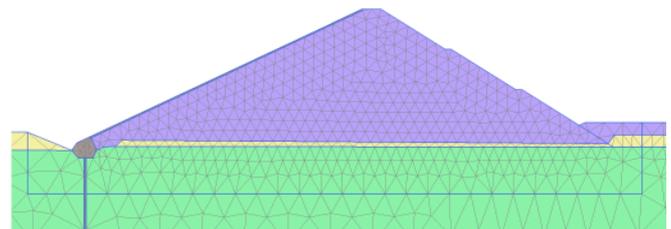


Bild 4. Ausschnitt des FE-Netzes des Damms Lichtenberg

Für die Berechnungen wurden Stationsaufzeichnungen des Erdbebens Norridge aus dem Jahre 1994 verwendet (Prado Dam, Sepulveda Canyon, Huntington Beach).

5. Kennwerte für die Berechnung

Die Bauteile „Betonherdmauer“, „Dichtungsschleier“ und die Oberflächendichtung sowie der Felsuntergrund wurden mit linear elastischem Materialverhalten (LE) modelliert. Der Talschotter wurde vereinfacht linear elastisch, ideal plastisch mit dem Mohr-Coulomb-Modell (MC) angenommen. Für den Dammkörper wurde das elastoplastische Stoffmodell HSS verwendet.

Das HSS basiert auf dem Hardening Soil-Stoffmodell (HS). Jedoch erhält es zusätzlich 2 weitere Stoffparameter, die es erlauben, die größere Steifigkeit von Böden bei sehr kleinen Dehnungen zu berücksichtigen.

Das HS basiert auf der Theorie der Elastoplastizität und gehört zur Gruppe der Stoffgesetze mit doppelter Verfestigung (Double Hardening). Das heißt, es gibt nicht nur Anteile aus elastischer und plastischer Dehnung, sondern die plastischen Dehnungen werden in Abhängigkeit der Belastungsrichtung in einen isotropen und einen deviatorischen Anteil unterteilt (siehe Bild 5).

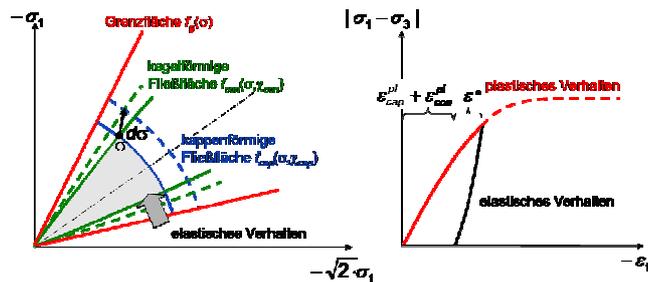


Bild 5. Isotrope und deviatorische Verfestigung (Hardening Soil)

Plastische Verformungen werden hierbei bereits unterhalb der Mohr-Coulomb'schen Grenzbedingung zugelassen.

Der Scher-Dehnungs-Verlauf eines dynamisch beanspruchten Bodenelementes z. B. während eines Resonant-Column-Versuches wird im HSS berücksichtigt. Mit zunehmender Scherdehnung nimmt die Größe des Schubmoduls stark ab. Dies verdeutlicht Bild 6.

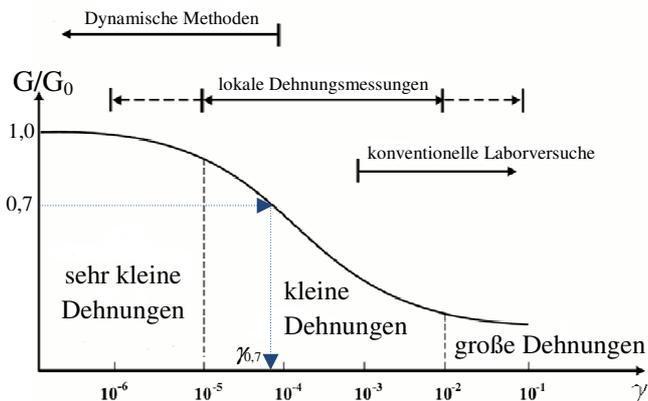


Bild 6. Prinzipieller Schubmodul-Scherdehnungs-Verlauf eines Bodens mit Zuordnung der Messmethoden

Der im HSS implementierte Schubmodulverlauf erfordert die beiden von Benz [5] eingeführten

Parameter: den Schubmodul G_0 und die Scherdehnungsamplitude $\gamma_{0,7}$ (siehe Bild 6). Die Berücksichtigung der erhöhten Steifigkeit im Bereich kleiner Dehnungen ermöglicht nicht nur eine deutlich realistischere Beschreibung von Laborversuchsergebnissen (RC-Tests, zyklische Triaxialtests), sondern es lässt sich auch zyklisches bzw. dynamisches Verhalten von Böden mit einer materialabhängigen Dämpfung beschreiben.

Folgende HSS-Materialparameter sind für die Steinschüttung verwendet worden.

HSS		Dammkörper
Type		drained
γ_{unsat}	[kN/m ³]	21
γ_{sat}	[kN/m ³]	22
E_{50}^{ref}	[kN/m ²]	50000
E_{oed}^{ref}	[kN/m ²]	50000
E_{ur}^{ref}	[kN/m ²]	150000
power	[-]	0,4
c_{ref}	[kN/m ²]	10
φ	[°]	40
ψ	[°]	10
$\gamma_{0,7}$	[-]	0,00005
G_0^{ref}	[kN/m ²]	215000
ν_{ur}	[-]	0,25
p_{ref}	[kN/m ²]	100
R_f	[-]	0,9
R_{inter}	[-]	1
Rayleigh α	[-]	0,24
Rayleigh β	[-]	0,00207

6. Standsicherheitsbetrachtungen mittels FE-Berechnungen und „Dynamischer Phi-c-Reduktion“

In diesem Beitrag orientiert sich der Nachweis der Standsicherheit am Erreichen der Grenzbedingung nach Mohr-Coulomb, so dass keine weiteren Spannungszuwächse mehr möglich sind und keine Materialsteifigkeit mehr vorhanden ist.

Bei Plaxis 2D werden diese Zustände durch sogenannte Plastifizierungspunkte (MC-Points) für jeden aufgezeichneten Zeitschritt dargestellt. Lässt sich ein durchgehender Versagenskörper anhand der Plastifizierungspunkte feststellen, kann ein Böschungsbruch und somit der Verlust der Standsicherheit abgeleitet werden. Ein durchgehender Versagensmechanismus, der zwar ein Erreichen des statischen Grenzgleichgewichtes

bedeutet, führt nicht zwangsläufig zu einem „dynamischen Kollaps“ und einen Abbruch der Berechnung. Deswegen können solche Versagensmechanismen nur visuell anhand von Plastifizierungspunkten in Verbindung mit Dehnungsverläufen festgestellt werden.

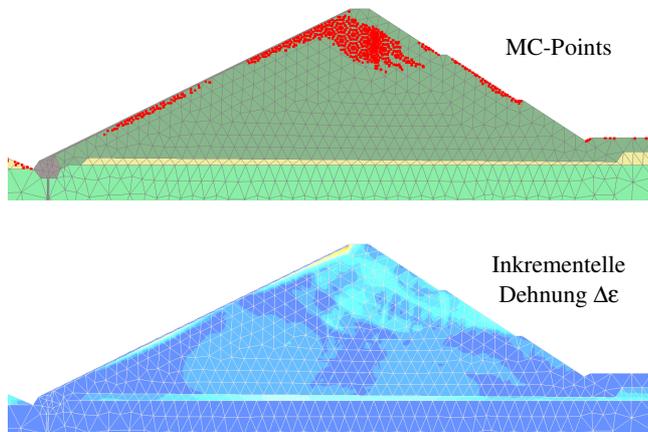


Bild 7. Darstellung der MC-Points (oben) und der inkrementellen Dehnungen (unten)

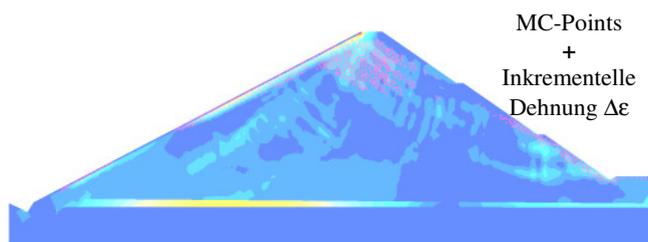


Bild 8. Überlagerte Darstellung der MC-Points und der inkrementellen Dehnungen

Bild 7 zeigt einen weitgehend durchgehenden Versagensmechanismus anhand von MC-Points und inkrementellen Dehnungen für einen ausgewählten Zeitschritt dt . Durch ein Übereinanderlegen der MC-Points und der inkrementellen Dehnungen, können noch bessere Böschungsbruchgeometrien abgeleitet werden.

Die Standsicherheit im Sinne des globalen Sicherheitskonzeptes kann anhand einer iterativen Vorgehensweise ermittelt werden, die ich im Zuge meiner Diplombearbeitung entwickelt habe [6]. Folgende Iterationsschritte sind dabei durchzuführen:

Im 1. Schritt werden die Zeitpunkte bzw. Zeitschritte lokalisiert, bei denen es bei der dynamischen FE-Berechnung zu großen Plastifizierungen innerhalb des Dammkörpers gekommen ist. Hilfreich hierbei ist die Erstellung von Videos, in

denen die Plastifizierungen im Dammkörper während der Erdbebenbeanspruchung erfasst werden. In einem 2. Schritt definiert man einen Abminderungsfaktor für die Scherparameter $\tan \varphi$ und c des HSS in Abhängigkeit der sich eingestellten MC-Points (je kleiner die Anzahl der MC-Points desto größer kann der Abminderungsfaktor gewählt werden). Zusätzlich sollte der Standsicherheitsfaktor anhand einer statischen FE-Berechnung mittels Phi-c-Reduktion bestimmt werden. Dieser Standsicherheitsfaktor ist gleichzeitig der Startwert für die erste Abminderung der Scherparameter.

Im 3. Schritt erfolgt die erneute dynamische Berechnung mit den abgeminderten Scherparametern. Deren Ergebnisse werden wieder hinsichtlich sich einstellender MC-Points untersucht. Es ist nun visuell festzustellen, ob sich anhand der MC-Points ein durchgehender Gleitmechanismus einstellt oder nicht.

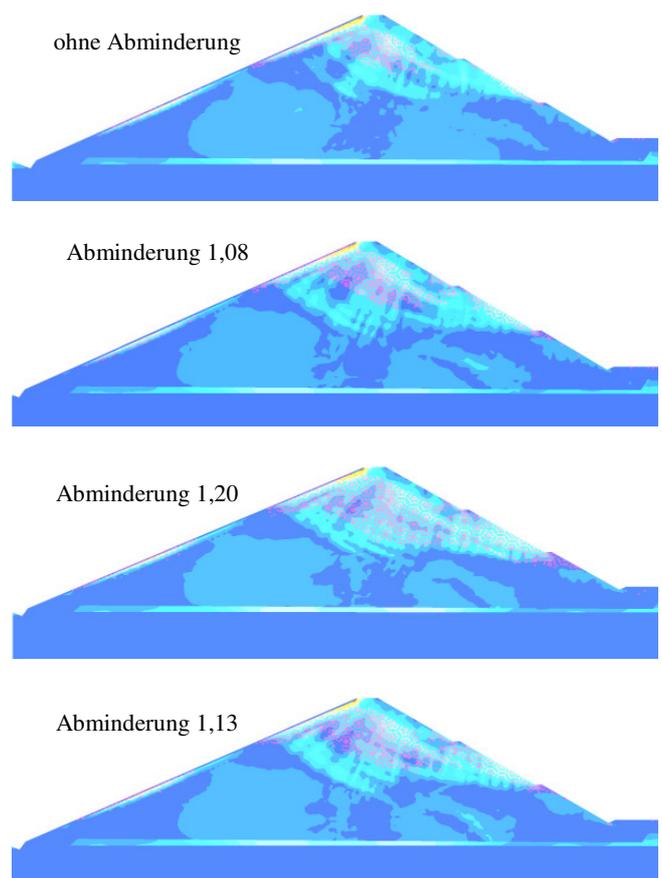


Bild 9. Iteratives Finden des maßgebenden Versagenszustandes

Im Falle, dass sich kein durchgehender Gleitkörper eingestellt hat, muss der Abminderungsfaktor variiert werden und die iterative Vorgehensweise (2. und 3. Schritt) ist fortzusetzen. Im Fall, dass

sich ein weitgehend durchgehender Gleitkörper eingestellt hat, ist die Iteration beendet und der ermittelte Abminderungsfaktor entspricht der vorhandenen globalen Sicherheit. Die Ergebnisse dieser iterativen Vorgehensweise, die auch als „dynamische Phi-c-Reduktion“ bezeichnet werden kann, sind in Bild 9 dargestellt.

Das beschriebene Iterationsverfahren lässt eine Aussage für den Standsicherheitsfaktor (zumindest qualitativ) zu. Zudem erhält man durch die Darstellung der inkrementellen Dehnungen und der MC-Points die Geometrie des Gleitkörpers. Diese kann dazu genutzt werden, die Standsicherheit mit konventionellen Berechnungsverfahren, z. B. Gleitkreise nach den Lamellenverfahren, nachzuweisen.

7. Fazit

Die Bestimmung der Standsicherheit von Staudämmen unter Erdbebenbeanspruchung auf der Grundlage von FE-Berechnungen mit Zeitschritt-Verfahren ist komplex und erfordert Erfahrungen auf dem Gebiet der dynamischen Eigenschaften von Böden und den Ausbreitungseigenschaften von Bodenschwingungen bei Verwendung verschiedener Stoffgesetze.

Die Ableitung eines Standsicherheitsfaktors gemäß der beschriebenen „dynamischen Phi-c-Reduktion“ ist aufwendig und erfordert große Rechenkapazitäten, liefert aber qualitativ den Sicherheitsfaktor und zudem den sich einstellenden Versagensgleitkörper. Darauf aufbauend können konventionelle Verfahren zur Bestimmung der Standsicherheit bei dynamischer Beanspruchung angewendet und mit den Ergebnissen der „dynamischen Phi-c-Reduktion“ verglichen werden.

Quellennachweis

1. ATV-DVWK. „ATV-DVWK-M 502.“ *Berechnungsverfahren für Gewichtsstaumauern - Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Untergrund*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., 2002.
2. ICOLD-Bulletin 72. *Selecting Seismic Parameters for Large Dams (Revision 2009)*. Paris
3. DGGT. *Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugrunderdynamik"*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, 2002.

4. Mey, A., und P.-A. von Wolffersdorff. *Sicherheitsnachweise für Staudämme bei Erdbebenbeanspruchung mit der Finite-Elemente-Methode*. Kolloquium: *Bauen in Boden und Fels*. Ostfildern, 2008, S. 133-146.

5. Benz, T. „Dissertation“. *Small-Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences*. Universität Stuttgart, 2007.

6. Brötzmann, F. „Diplomarbeit“. *Dynamische Finite-Elemente-Analysen von Dämmen unter Erdbebenbeanspruchung*. Technische Universität Dresden, 2010.