

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

AlKayyal, Hassan

Numerische und analytische Berechnungen zur Erdbebenbemessung von Böschungen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102383>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

AlKayyal, Hassan (2014): Numerische und analytische Berechnungen zur Erdbebenbemessung von Böschungen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktuelle Themen der Geotechnik. Karlsruhe: Herle, Ivo. S. 213-220.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Numerische und analytische Berechnungen zur Erdbebenbemessung von Böschungen

Hassan AlKayyal

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik

Für dynamische Berechnungen von verschiedenen geotechnischen Bauwerken wird gegenwärtig die Finite-Elemente-Methode sehr häufig angewendet. Das liegt an der Einfachheit und der Zuverlässigkeit des Berechnungsverfahrens und am akzeptablen Genauigkeitsniveau der Ergebnisse. In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst ein Verfahren zur dynamischen Phi-C-Reduktion vorgestellt, das auf eine Lösung des Anfangs- und Randwertproblems für das dynamische Verhalten einer Böschung im Zeitbereich aufbaut und zu einem dynamischen Sicherheitsfaktor führt, der schließlich die Bewertung der Böschungsstandsicherheit unter dynamischer Belastung ermöglicht. Anschließend wird die Standsicherheit verschiedener Böschungen mit unterschiedlichen Böschungswinkeln und bodenmechanischen Eigenschaften mit dem Ziel untersucht, den Einfluss der wichtigsten Einflussfaktoren zu erfassen. Ergänzend werden die Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen mit den Ergebnissen aus einer analytischen Untersuchung der Böschungsstandsicherheit unter quasi-statischer Belastung verglichen.

1 Einleitung

Erdbebeninduzierte Wellen beeinflussen die Sicherheit von geotechnischen Bauwerken und verursachen unterschiedliche Schäden und Bodenverformungen. Die Einwirkung des Erdbebens ist dabei von der Geologie und Topographie des Gebietes, dem Verhalten des Bodens unter dynamischer Belastung und von den Eigenschaften des Erdbebens abhängig. Deshalb müssen nicht nur die Beträge des Sicherheitsfaktors und die Sicherheitsreserve bei den Standsicherheitsuntersuchungen von Böschungen unter seismischen Einwirkungen bestimmt werden, sondern es müssen auch die bleibenden Verformungen in Betracht gezogen werden, da sie eine große Rolle bei der Beurteilung der Standsicherheit von Böschungen spielen.

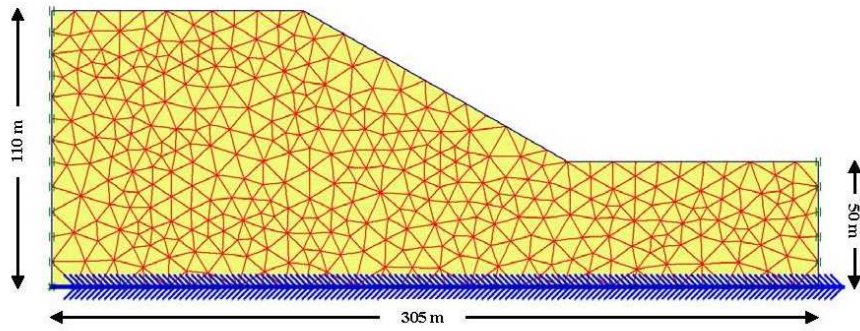


Abbildung 1: Numerisches Modell

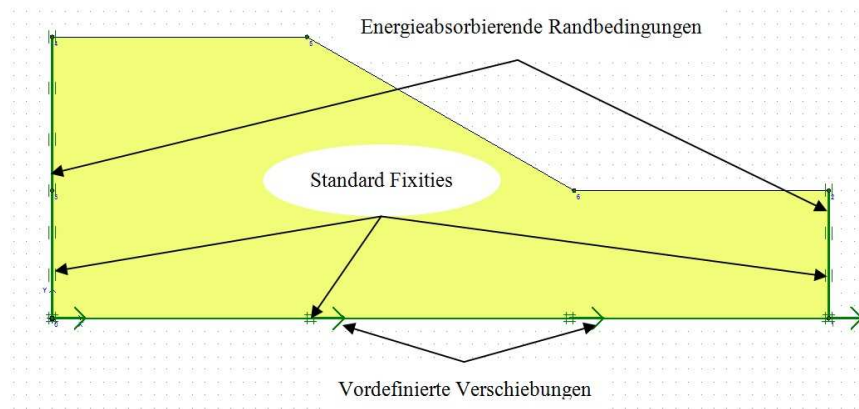


Abbildung 2: Randbedingungen

In der geschichtlichen Entwicklung der Verfahren zum Analysieren der Standsicherheit von Böschungen unter seismischen Einwirkungen wurde das quasi-statische Verfahren oft angewendet, indem die Erdbebeneinwirkung durch eine konstante horizontale und eine konstante vertikale Beschleunigungskomponente repräsentiert wird, die als zwei Trägheitskräfte jeweils im Schwerpunkt der zum Versagen kommenden Masse angesetzt werden. Mit dieser Methode kann die Standsicherheit der Böschung bei der Betrachtung des Gleichgewichtes der statischen und dynamischen Kräfte, die auf den Bruchkörper einwirken, nachgewiesen werden.

Die quasi-statische Methode der Standsicherheitsuntersuchung einer Böschung ist sehr einfach anwendbar, weil sie sehr ähnlich zu einer rein statischen Untersuchung ist. Nachteil des Verfahrens ist jedoch, dass die Abbildung der sehr komplizierten Einwirkung des Erdbebens durch quasi-statische Beschleunigungen nur sehr grob gelingt [Alk12]. Ebenfalls berücksichtigen diese Methoden kein realistisches dynamisches Bodenverhalten, weil der Boden als starres Material angenommen wird. Trotz der Nachteile und der Unzulänglichkeit der genannten quasi-statischen Verfahren wird ihre Benutzung in verschiedenen Vorschriften wie im Eurocode 8 und in der DIN-EN-1998-5:2010-12 unter Beachtung ihrer Anwendungsgrenzen zugelassen.

Tabelle 1: Materialparameter des modellierten rolligen Bodens

γ_{unsat} [kN/m ³]	(γ_{sat}) [kN/m ³]	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	m [1]	c_{ref} [kN/m ²]
20	(20)	30000	30000	90000	0,6	0,1

φ [°]	ψ [°]	$\gamma_{0,7}$ [1]	G_0^{ref} [kN/m ²]	ν_{ur} [1]	p_{ref} [kN/m ²]	R_f [1]
40	6	$1 \cdot 10^{-4}$	100000	0,2	100	0,9

Tabelle 2: Materialparameter des modellierten bindigen Bodens

γ_{unsat} [kN/m ³]	(γ_{sat}) [kN/m ³]	E_{50}^{ref} [kN/m ²]	E_{oed}^{ref} [kN/m ²]	E_{ur}^{ref} [kN/m ²]	m [1]	c_{ref} [kN/m ²]
18	(18)	15000	15000	45000	0,8	15

φ [°]	ψ [°]	$\gamma_{0,7}$ [1]	G_0^{ref} [kN/m ²]	ν_{ur} [1]	p_{ref} [kN/m ²]	R_f [1]
25	0	$8 \cdot 10^{-5}$	60000	0,2	100	0,9

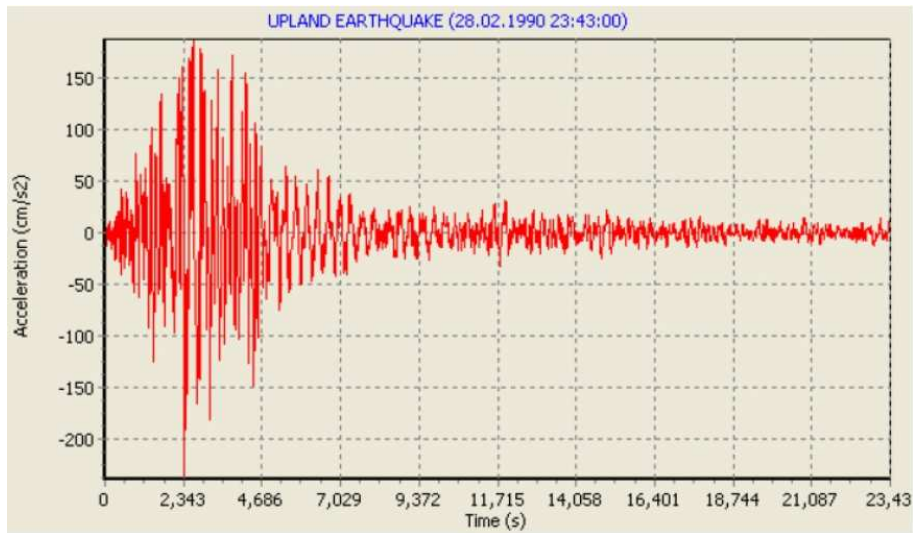


Abbildung 3: Beschleunigungsfunktion

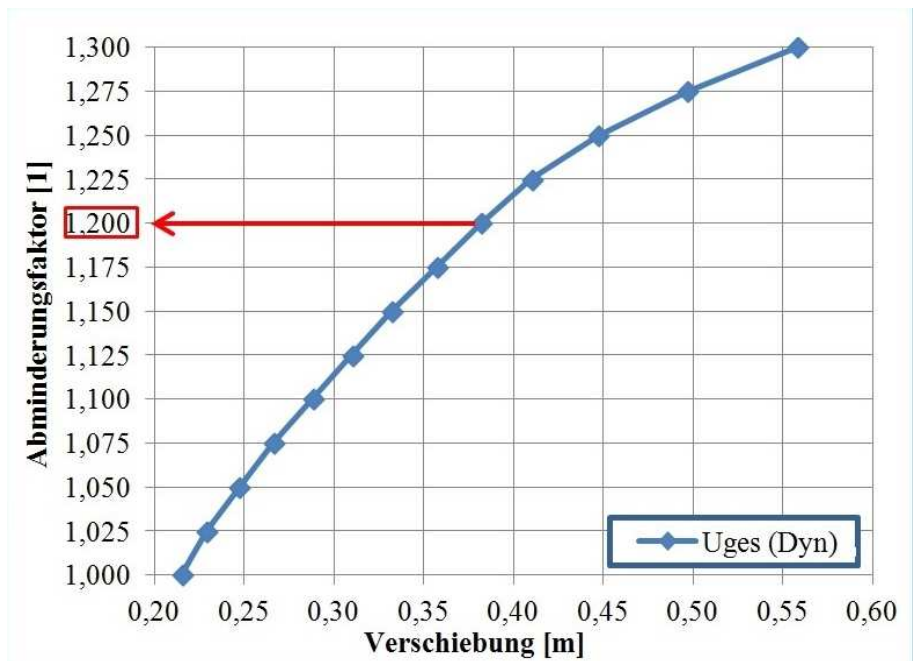


Abbildung 4: Konvergenzkriterium

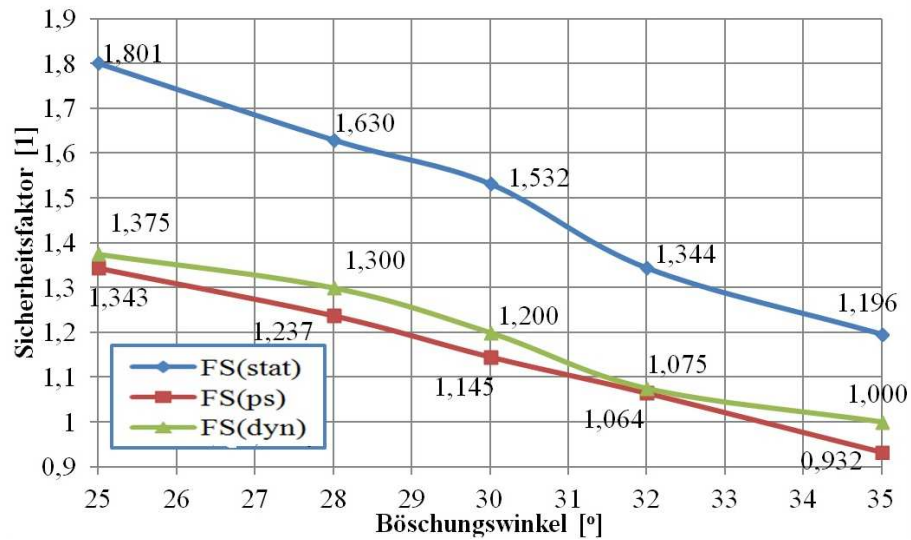


Abbildung 5: Standsicherheitsfaktoren der Böschung aus dem modellierten rolligen Boden

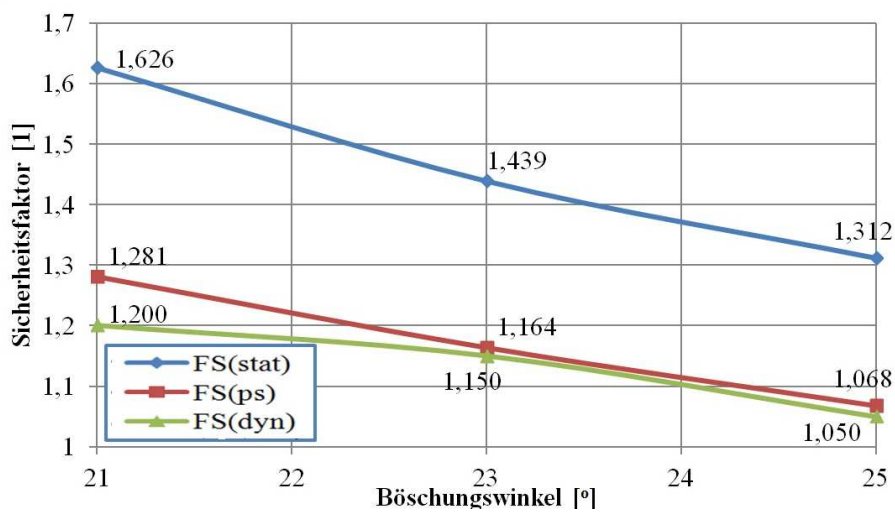


Abbildung 6: Standsicherheitsfaktoren der Böschung aus dem modellierten bindigen Boden

Im Gegensatz zu den konventionellen, analytischen Methoden kann die Standsicherheit von Böschungen durch Anwendung der Finite-Element-Methode ermittelt werden, wobei sowohl das realistische mechanische Verhalten des Baugrundes in Abhängigkeit vom verwendeten Stoffgesetz als auch das zeitabhängige Verhalten der Böschung unter den dynamischen Lasten im Zeitbereich erfasst werden können. Die Anwendung der Finite-Elemente-Methode erfordert gute Kenntnisse der numerischen Modellierung, genaues Verständnis des behandelten Problems und der Materialgesetze, mit denen das dynamische Bodenverhalten erfasst werden soll.

2 Modell der Untersuchung

Für die Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung der Standsicherheit von Böschungen unter dynamischer Belastung wurde ein Modell mit dem Finite-Elemente-Programm PLAXIS2D-V9.0 im ebenen Deformationszustand und mit einer sehr hohen Netzfeinheit erstellt (Abbildung 1). Das mechanische Verhalten der Bodenzonen wurde durch Elemente mit jeweils 15-Knotenpunkten erfasst. Das Modell hatte eine Gesamtbreite von $B = 305 [m]$ und eine Gesamthöhe von $H = 110 [m]$. Die Böschung hatte bei einem Neigungswinkel von $\beta = 30 [^\circ]$ eine Breite von $B = 105 [m]$ und eine Höhe von $H = 60 [m]$, wodurch die vertikalen Ränder einen Abstand von $d = 100 [m]$ und die horizontalen Ränder einen Abstand von $d = 50 [m]$ zur Böschung aufweisen. Das vorgestellte Modell wurde bei der Variation des Böschungswinkels geringfügig modifiziert.

In den Berechnungsphasen mit statischer Belastung wurden die Randbedingungen durch Unterbinden der horizontalen Komponente der Verschiebungen in den Punkten der vertikalen Modellränder und Unterbinden aller Komponenten der Verschiebung an dem unteren horizontalen Modellrand eingestellt. An dem oberen, horizontalen Modellrand wurde der Halbraum durch eine verschwindende Spannung modelliert. In den Berechnungsphasen mit dynamischer Belastung wurden die Randbedingungen durch eine energieabsorbierende Formulierung in den Punkten der vertikalen Modellränder und Vorgabe der horizontalen Komponente der Verschiebung an dem unteren horizontalen Modellrand eingestellt (Abbildung 2).

3 Die dynamische Phi-C-Reduktionsanalyse

Zur Untersuchung der Standsicherheit einer Böschung bei dynamischer Belastung kann eine spezielle Form der Phi-C-Reduktionsanalyse entwickelt werden, dessen mechanisches Konzept zur statischen Phi-C-Reduktionsanalyse ähnlich ist. Ausgangspunkt der Untersuchung bildet ein statischer Gleichgewichtszustand, der vor dem Eintragen der dynamischen Belastung berechnet wird.

Für die überschlägige Ermittlung des Versagensabstandes bei dynamischer Anregung sind eine Reihe von systematischen, dynamischen Berechnungen im Zeitbereich erforderlich, bei denen der Reibungswinkel und die Kohäsion als Parameter der Scherfestigkeit nach der FELLENIUS-Regel schrittweise herabgemindert werden. Weiterhin ist die Formulierung eines mechanischen Kriteriums für das Erreichen eines Grenzzustandes erforderlich.

Zur Untersuchung der dynamischen Standsicherheit der in der vorliegenden Untersuchung modellierten Böschungen wurden systematische Berechnungen durch Nutzung des Hardening-Soil-Model (HSS) Materialmodells durchgeführt. Die verwendeten synthetischen Materialkennwerte für ein typisches rolliges Material und für ein typisches bindiges Material wurden in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt. Die modellierten Böschungen wurden mit einer horizontalen Erdbebenbeschleunigung nach der Aufzeichnung des UPLAND-Erdbebens vom 28.2.1990 durch Eintragung einer Beschleunigungsrandbedingung am unteren Modellrand belastet (Abbildung 3).

Zum Ableiten eines Grenzwertes für die Tragfähigkeit der modellierten Böschungen unter dynamischer Belastung wurden mechanische Größen herangezogen, die als Ergebnis der Berechnungen verfügbar sind. Durch Auswertung der Abhängigkeit zwischen dem Betrag der Verschiebungen am Böschungskopf und dem Abminderungsfaktor der Scherfestigkeit (globaler Standsicherheitsbeiwert) kann beobachtet werden, dass mit zunehmender Abminderung der Scherfestigkeit ab einem Grenzwert des Sicherheitsbeiwertes eine überproportionale Vergrößerung des Betrages der Verschiebungen einsetzt. Als massgebende Größe des dynamischen globalen Sicherheitsbeiwertes "FS(dyn)" wurde in der vorliegenden Untersuchung der Grenzwert der linearen Proportionalität angesehen (siehe Abbildung 4). Als Vergleich wurden die statischen globalen Sicherheitsbeiwerte "FS(stat)" der Böschungen berechnet. Weiterhin wurde der globale quasi-statische Standsicherheitsfaktor der Böschungen "FS(ps)" durch Ansetzen einer aus der Erdbebenanregung (Abbildung 3) abgeleiteten horizontalen quasi-statischen Beschleunigung und Nutzung des Verfahrens von BISHOP zur Ermittlung der Standsicherheit von Böschungen mit kreisförmigen Gleitflächen ermittelt. Die Berechnungsergebnisse sind für die modellierten Böschungen aus rolligem Material in der Abbildung 5 und für die modellierten Böschungen aus bindigem Material in der Abbildung 6 dargestellt. Ein verbessertes Konzept zur Berechnung der Standsicherheit unter dynamischer Belastung könnte durch Nutzung mathematisch objektiver Konvergenzkriterien erfolgen [KH09], insofern diese im Berechnungsvorgang als Ergebnis verfügbar sind.

4 Zusammenfassung

Für dynamische Berechnungen von verschiedenen geotechnischen Bauwerken wird gegenwärtig die Finite-Elemente-Methode sehr häufig angewendet. Das liegt an der Einfachheit und der Zuverlässigkeit des Berechnungsverfahrens und am akzeptablen Genauigkeitsniveau der Ergebnisse. In dem vorliegenden Beitrag wird zunächst ein

Verfahren zur dynamischen Phi-C-Reduktion vorgestellt, dass auf eine Lösung des Anfangs- und Randwertproblems für das dynamische Verhalten einer Böschung im Zeitbereich aufbaut und zu einem dynamischen Sicherheitsfaktor führt, der schließlich die Bewertung der Böschungsstandsicherheit unter dynamischer Belastung ermöglicht. Anschließend wird die Standsicherheit verschiedener Böschungen mit unterschiedlichen Böschungswinkeln und bodenmechanischen Eigenschaften mit dem Ziel untersucht, den Einfluss der wichtigsten Einflussfaktoren zu erfassen. Ergänzend werden die Ergebnisse der Finite-Elemente-Berechnungen mit den Ergebnissen aus einer analytischen Untersuchung der Böschungsstandsicherheit unter quasi-statischer Belastung verglichen.

Literatur

- [Alk12] ALKAYYAL, H.: *Analytische und numerische Berechnungen zur Erdbebenbemessung von Böschungen und Stützmauern*; Masterarbeit, Institut für Geotechnik, Leibniz Universität Hannover, S.148, Hannover, 2012.
- [Brö12] BRÖTZMANN, F.: Standsicherheitsuntersuchungen von Staudämmen unter seismischen Einwirkungen mittels dynamischer FE-Analysen; *Beiträge der Spezialsitzung der Baugrundtagung in Mainz, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), S.23–28, Essen, 2012.*
- [EC801] DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG (EDS.): *Eurocode 8, Teil 1: DIN-EN-1998-1:2004+AC:2009*; Berlin, 2010.
- [EC805] DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG (EDS.): *Eurocode 8, Teil 5: DIN-EN-1998-5:2004+AC:2009*; Berlin, 2010.
- [Kra96] KRAMER, S.L.: *Geotechnical Earthquake Engineering*; Prentice Hall Press, S.653, London, 1996.
- [MVW08] MEY, A.; VON WOLFFERSDORFF, P.-A.: Die Bedeutung der Stoffmodelle für dynamische Berechnungen zur Standsicherheit von Staudämmen mit der Finite-Elemente-Methode; *Geotechnik Kolloquium "Bodenmechanik, Grundbau und bergbauliche Geotechnik" anlässlich des 75. Geburtstages von Prof. Förster, TU Bergakademie Freiberg, Veröffentlichungen des Institutes für Geotechnik, S.111–133, Freiberg, 2008.*
- [Tow08] TOWHATA, I.: *Geotechnical Earthquake Engineering*; Springer-Verlag, S.684, Heidelberg, 2008.
- [KH09] KUPKA, M.; HERLE, I.: Standsicherheitsberechnung von Böschungen mit der ϕ , c-Reduktion; in *Herle, I.: Aktuelle Themen in Bodenmechanik und Grundbau, Ohde-Kolloquium 2009, TU Dresden, Institut für Geotechnik, Mitteilungen Nr.16, ISSN-1434-3053, S.101-117, Dresden, 2009.*
- [Wol10] VON WOLFFERSDORFF, P.-A.: Ausgewählte Probleme zu statischen und dynamischen Standsicherheitsberechnungen von Staudämmen; *Beiträge zum 25. Christian Veder Kolloquium, Technische Universität Graz, S.163–182, Graz, 2010.*