

Erdbebeneinwirkung bei Stauseen: nichtlineares Verhalten von Bogenstaumauern und Stausee

Autor(en): **Hohberg, Jörg Martin / Weber, Benedikt / Bachmann, Hugo**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **110 (1992)**

Heft 19

PDF erstellt am: **10.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77896>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Erdbebeneinwirkung bei Stauseen

Nichtlineares Verhalten von Bogenstaumauern und Stausee

Bei Bogenstaumauern unter starken Erdbeben führt vor allem das Öffnen von Blockfugen zu einem komplexen, nichtlinearen Verhalten des dreidimensionalen Gesamtsystems Staumauer-Stausee-Untergrund. Die Druckwellenausbreitung in den Fernbereich des Stausees reduziert die Bewegungsenergie und beeinflusst die dynamische Wechselwirkung zwischen Stausee und Staumauer. Beide Phänomene, das nichtlineare dynamische Fugenverhalten und die Wasser-Struktur-Interaktion, können durch neuartige Rechenmodelle wirklichkeitsnah erfasst werden.

Von insgesamt 25 Schweizer Talsperren mit einer Höhe von über 100 m sind 19 Bogenstaumauern, die in hochalpinem

VON JÖRG-MARTIN HOHBERG,
BENEDIKT WEBER UND
HUGO BACHMANN,
ZÜRICH

Gebiet mit mässiger bis mittlerer Seismizität liegen. Im allgemeinen wird Bogenstaumauern eine beträchtliche Tragreserve zugeschrieben, da ihr räumlicher Lastabtrag eine Kraftumlagerung mit Überbrückung örtlicher Schwachstellen ermöglicht. Dies setzt jedoch den Erhalt der Schalentragswirkung, die Standsicherheit der Felswiderlager und die kinematische Verträglichkeit grösserer Verschiebungen voraus.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes an der ETH Zürich werden ein Modell und ein entsprechendes Recheninstrument zur Erfassung des Gesamtsystems Bogenstaumauer-Stausee-Untergrund entwickelt. Dabei stellt sich vor allem die Frage nach Mitteln, mit denen das komplexe Verhalten dieses dreidimensionalen Gesamtsystems im nichtlinearen Beanspruchungsbereich möglichst wirklichkeitsnah rechnerisch erfasst werden kann. Über die bereits entwickelten Teilmodelle «nichtlineares Fugenverhalten» und «Wasser-Struktur-Interaktion» wird nachfolgend berichtet.

Zur Modellbildung

Bei einer Bogenstaumauer ist die Annahme eines homogenen isotropen Materials nicht gerechtfertigt. Insbesondere die etwa alle 15 bis 20 m angeordneten vertikalen Blockfugen und eventuell auch horizontale Betonierfugen stellen vorgegebene örtliche Schwachstellen dar, in denen sich schon bei mässig-

ger dynamischer Beanspruchung ein nichtlineares Verhalten zeigt. Gegenüber diesen Schwachstellen spielt – anders als bei Gewichtstaumauern – die Zugfestigkeit bzw. Bruchzähigkeit des Betons für die Standfestigkeit keine dominierende Rolle. Diese beruht vor allem auf der Ausbildung kinematischer Mechanismen und dem Beitrag dieser Mechanismen zur Dämpfung. Schalenmodelle mit verschmierter Beton-Nichtlinearität oder mit Fugen als unbegrenzt schersfeste Gelenklinien [1] [2] geben diese Effekte nur unzureichend wieder und sind zudem nicht auf den Felsbereich übertragbar. Deshalb wurde ein Konzept räumlicher Trennflächen zwischen Volumenelementen gewählt (Bild 1), wie es seit 1975 in der einen oder anderen Form bereits vorgeschlagen worden ist.

Für die dynamische Interaktion der Staumauer mit dem Stausee im Zeitbereich werden häufig stark vereinfachte Modelle wie Dämpfer oder Zusatzmassen benutzt. Diese Modelle erfassen die Wirklichkeit nur ungenau [6]. In dieser Hinsicht ist die Randelement-Methode

mit Faltung für den Zeitbereich, wie sie für zweidimensionale Probleme (Gewichtstaumauer mit Stausee) in [9] verwendet wurde, vereinfachten Methoden weit überlegen, da sowohl die Kompressibilität des Wassers als auch die Abstrahlung der Wellenenergie am Modellrand richtig erfasst wird. Diese Methode benötigt jedoch sehr viel Speicherplatz und Rechenzeit, so dass eine Berechnung eines dreidimensionalen Problems (Bogenstaumauer mit Stausee) auch auf einem grossen Computer praktisch kaum mehr durchführbar wäre.

Eine starke Reduktion des Aufwandes kann dadurch erreicht werden, indem die Faltung – anstatt für die Freiheitsgrade – für die einzelnen Modalformen durchgeführt wird [7]. Die hier dargestellte, durch den zweitgenannten Autor entwickelte neue Methode ist noch etwas allgemeiner und effizienter. Der Fernbereich wird durch wenige zusätzliche interne Freiheitsgrade erfasst, so dass keine Faltung mehr nötig ist. Der Nahbereich wird mit finiten Elementen modelliert, was erlaubt, auch nichtlineare Effekte wie Fugenöffnung bei der Mauer und Kavitation miteinzubeziehen (Bild 1).

Örtliche Nichtlinearität der Bogenstaumauer

Das Modellierungskonzept schliesst an Entwicklungen an, wie sie Anfang der siebziger Jahre zweidimensional für die Grosstafelbauweise eingeführt wurden: Unter der Annahme, dass die Bauteile selbst nicht überbeansprucht werden, konzentriert sich das gesamte nichtlineare Verhalten in den Fugen dazwischen. Anders als in Rissverzahnungsmodellen im Betonbau ist keine vor-

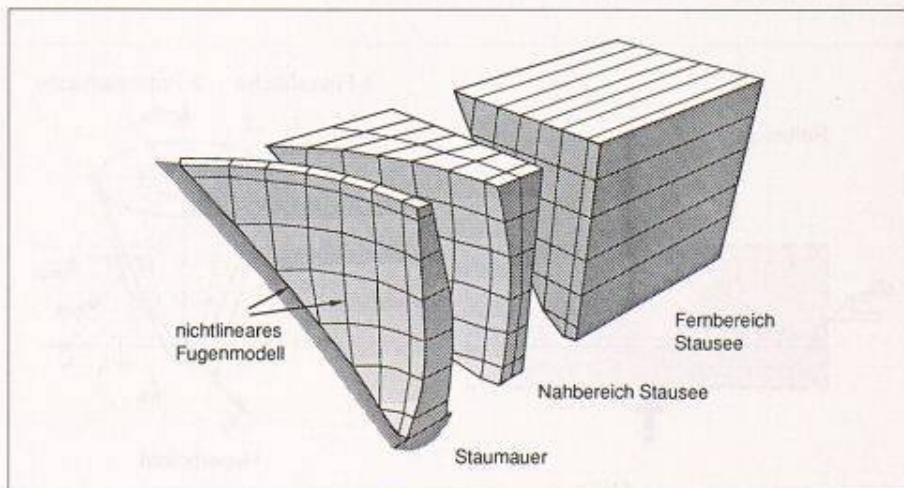


Bild 1. Makro-Modell für Staumauer und Stausee

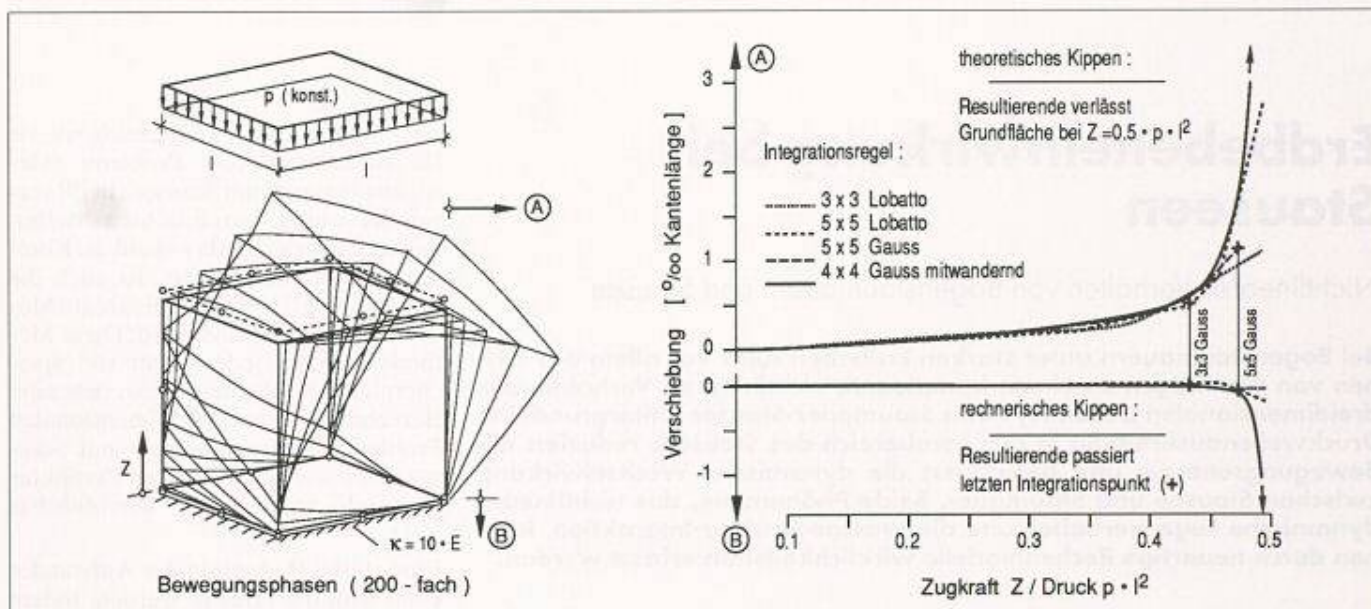


Bild 2. Fugenöffnung unter einem Block durch eine Zugkraft im Ein-Element-Test

gängige Öffnung der Trennflächen nötig, sondern Scherversagen kann wie im Felsbau unter schieben Druckkräften erfolgen. Freilich können Gleiten und Öffnen/Schliessen auch beliebig vermischt auftreten, und dies bringt eine bedeutende Komplikation im Vergleich zu bestehenden Formulierungen, z.B. in Stahlbeton-Verbundmodellen.

Die örtliche Konzentration der Nichtlinearität gestattet eine saubere Formulierung konzentrierter Dehnungen als Relativverschiebungen in speziellen Fugenelementen. Sie können wahlweise als Grenzfall eines dünnen Kontinuums oder als isoparametrisch interpolierte Federkombinationen aufgefasst werden. Beide Herleitungen führen zu numerisch gleichen Bindungsmatrizen, die die Kontaktnebenbedingungen zwischen den Teilkörpern abgeschwächt über Strafparameter erfüllen [3]. Der Impulsaustausch in der Dynamik ist dabei ohne zusätzliche Stossbedingungen gewährleistet. Im Rahmen kleiner Relativverschiebungen – bezogen auf die Elementlänge, d.h. hier auf die Stau-

mauerdicke – kann so die Kontinuitätsbeschränkung der Finite-Element-Methode in Richtung auf ein Diskontinuum überwunden werden (Bild 2). Die gewählte Formulierung einer räumlich gekrümmten Trennfläche zwischen Kontinuums-elementen gestattet sowohl die Darstellung von Dehn- und Arbeitsfugen in der Betonkonstruktion als auch von Hauptklüften im Felswiderlager und der Kontaktfläche zwischen Beton und Fels.

Dreidimensionales Trennflächenelement

Die Aufstellung der Bindungsmatrix aus Trennflächen-Elementmatrizen endlicher Steifigkeit verwandelt das Kontakt- und Reibungsproblem in eine Pseudo-Materialnichtlinearität, die grundsätzlich auf zwei Arten behandelt werden kann, entweder mittels sukzessiver Abminderung der Kontaktmoduli (variable Elastizität) oder durch Begrenzung der aufnehmbaren Spannun-

gen über «Fließ»-Kriterien. Der letztere Ansatz basiert auf der 1954 von Drucker aufgestellten Analogie zwischen Reibung und nichtassoziierter Plastizität, wobei im Fall einer ideal glatten Reibfläche Coulombs Reibungskriterium durch den Drucker-Prager-Kegel mit Reibungswinkel Φ und das zugehörige Gleitpotential durch von-Mises' Zylinderfläche verkörpert werden. Unebenheiten auf der Reibfläche führen zu (höhenbegrenzten) Aufgleitvorgängen mit dem Dilatanzwinkel ψ oder werden direkt abgeschert (Bild 3). Diese geometrische Festigkeitskomponente lässt sich über eine scheinbare Kohäsion (als Kegelstumpf) oder ausgerundet als Hyperboloid (mit σ_n -abhängigem Φ_{mob} , ψ_{mob} formulieren, wobei ihr Verlust zur Entfestigung auf die rein Coulombsche Restscherfestigkeit führt. Eine anfängliche Zementierung (z.B. Fuginjektion) begründet daneben eine tatsächliche Kohäsion, die auf Zug wie auf Scherung zerstört werden kann. Auch im Fall eines stetigen Versagens-

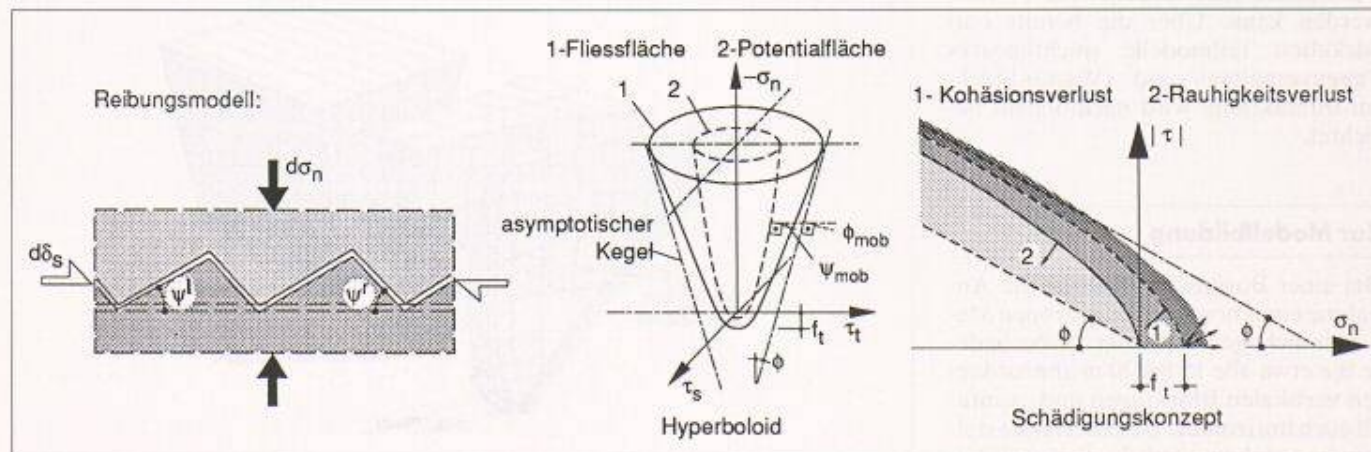


Bild 3. Grundlagen des Reibungsmodells mit variabler Dilatanz

kriteriums sollte sich dieser doppelte Schädigungsmechanismus als Singularität des plastischen Potentials am Hyperbelscheitel bemerkbar machen [4].

Von jüngsten Parallelentwicklungen in der Bruchmechanik unterscheidet sich das vorliegende Modell nicht nur durch seine Dreidimensionalität, sondern auch durch die Behandlung der Öffnung als reversiblen Prozess mit einer eigenen Zugentfestigungsfläche, die zu einer Scheitelsingularität degenerieren kann. Trotz gewisser nichtplastischer Eigenschaften ist sie mit dem Reibungskriterium voll gekoppelt. Nach Zerstörung einer Anfangszementierung bleibt noch eine begrenzte Scherverzahnung definierter Eingriffshöhe erhalten, so dass nicht nur glatte Fugen, sondern auch Schubnocken dargestellt werden können.

Nichtlineare Staumauerschwingungen

Während eines Erdbebens besteht die Gefahr, dass die Trägheitskräfte für Bruchteile von Sekunden die statische Überdrückung von Fugen aufheben und die Zugfestigkeit des Injektionsgutes überschreiten. Bereits früher wurden für Bogenstaumauern mit der in Kalifornien üblichen Scherverzahnung Schalenmodelle vorgestellt, in denen die Membranwirkung auf Zug, nicht aber der Scherverbund ausfallen kann [1], [2]. Das neue Modell bietet erstmals die Möglichkeit, die komplette Auflösung der Schalenschwingung in die unabhängige Bewegung einzelner Kragarme zu studieren.

Zu Demonstrationszwecken wird vorerst angenommen, dass die in Bild 1 gezeigte Staumauer nicht unter Wasserdruck stehe und nur in Tallängsrichtung mit 25% g maximaler Bodenbeschleunigung angeregt werde. Da es sich um ein sehr energiereiches Akzelerogramm handelt, entstehen dabei in der Schale Ringzugspannungen von 9 MPa, denen angenommenemassen eine Fugenzugfestigkeit von nur 1 MPa gegenübersteht. Dargestellt sind in Bild 4 die Radialverschiebung der Krone im Scheitel und die wasserseitige Ringspannung in der Fuge unmittelbar daneben.

Das Ergebnis belegt die angestrebte Ausschaltung der Zugspannung und darüber hinaus eine deutliche Periodenverlängerung (von 0.5 s auf fast 1 s), die infolge der abnehmenden Spektralordinate zu einer überraschenden Reduktion auch der Druckspannungen führt. Verglichen damit ist der Einfluss der hysteretischen Dämpfung aus Reibung sehr gering, wie ein Vergleich der

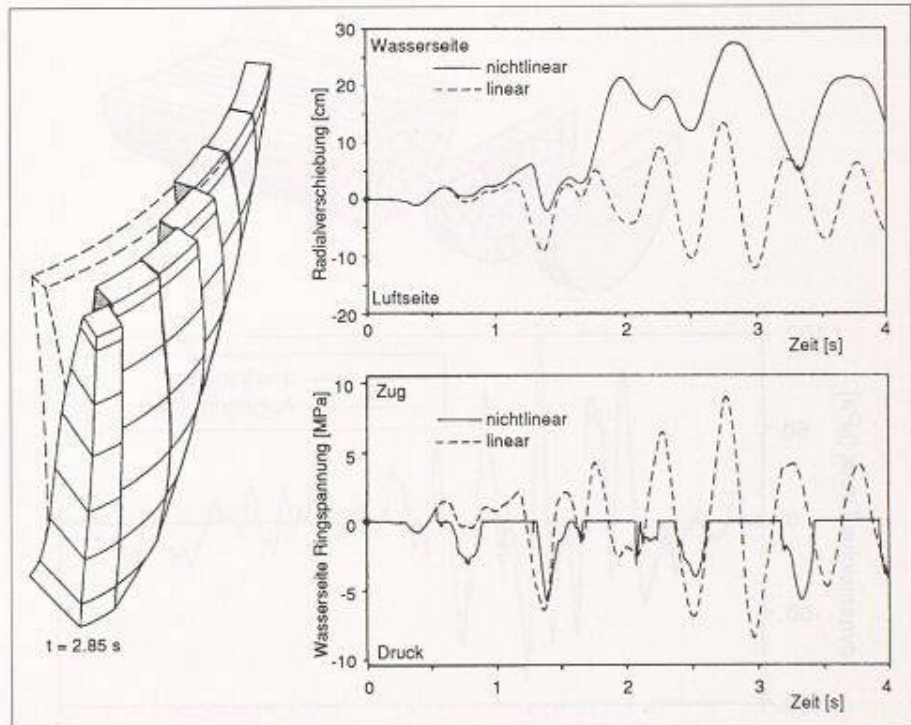


Bild 4. Beispiel nichtlineares Fugenverhalten (leerer Stausee).

Ringkontaktspannungen mit einer früheren Berechnung ohne Fugengleiten (nur Öffnung) zeigt [5]. Hingegen ist das Verschiebungsverhalten der Kragarme sehr unterschiedlich, und das vorgestellte nichtlineare Fugenmodell ist erstmals in der Lage, die Überbeanspruchung von Staumauerblöcken aus Kragarmbiegung zu ermitteln. Ob dieser Versagensmodus auch bei vollem Stausee auftreten kann, werden spätere Berechnungen zeigen müssen; dank des neuartigen Scherfestigkeitskriteriums bei beliebiger Normalkraft sind jedoch auch Versagensformen talabwärts modellierbar.

Schwingungsverhalten des Stausees

Das Verhalten des Wassers wird durch die akustische Wellengleichung beschrieben. Als Variable wurde das Geschwindigkeitspotential gewählt. Gegenüber dem Verschiebungsvektor als Variable hat das skalare Geschwin-

digkeitspotential den Vorteil, dass die Anzahl der Freiheitsgrade kleiner ist; gegenüber dem Druck als Variable liegt der Vorteil darin, dass das gekoppelte System Mauer-Wasser symmetrisch wird. Allerdings muss für diese Kopplung ein spezielles Interface-Element verwendet werden. Die Interaktion zwischen Wasser und Boden wird näherungsweise durch Dämpferelemente erfasst, die einen Teil der Energie absorbieren und so eine teilweise Energieabstrahlung in den Boden simulieren.

Wegen der Druckwellenausbreitung durch das gesamte Reservoir muss an den Nahbereich das Äquivalent eines halbumendlichen Kanals konstanten Querschnittes angefügt werden, um Wellenreflexion an der willkürlichen FE-Netzbegrenzung zu verhindern (Bild 1). Die entsprechende Randbedingung ist die Sommerfeldsche Abstrahlungsbedingung, die nur im Frequenzbereich exakt erfüllbar ist. Bild 5 zeigt grundsätzliche Zusammenhänge am Beispiel eines unendlich ausgedehnten Stausees mit Grundfrequenz ω_1 bei einer stationären horizontalen An-



Bild 5. Dynamischer Druck bei verschiedenen Frequenzverhältnissen.

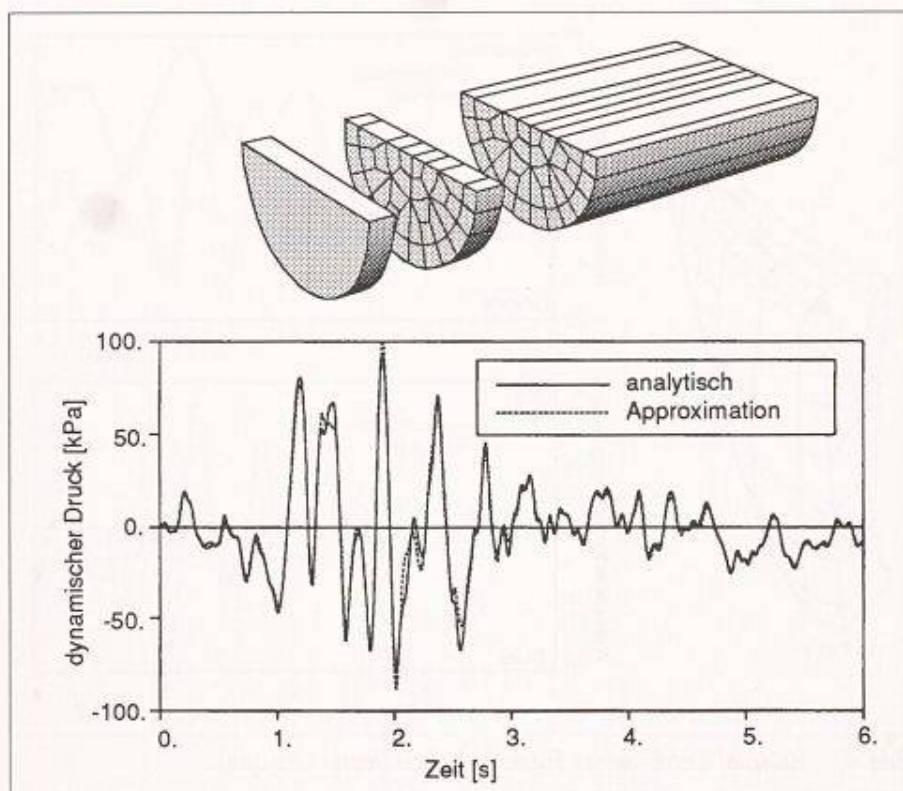


Bild 6. Vergleich zwischen analytischer Lösung und neuer Methode

regung der Frequenz Ω am linken Rand. Für $\Omega < \omega_1$ schwingt nur der randnahe Bereich mit – dies entspräche einer Zusatzmasse nach Westergaard –, während sich für $\Omega > \omega_1$ Druckwellen bilden, die nach rechts wandern und damit Energie wegtransportieren. Die weitverbreiteten sogenannten «lokalen» energiedurchlässigen Ränder, z.B. nach Lysmer/Kuhlemeyer, vermögen Teilreflexionen nicht vollständig zu unterdrücken [8]. Die korrekte Lösung in den Zeitbereich zu übertragen – zu einem sogenannten konsistenten Rand – würde jedoch erneut auf das Faltungsintegral mit Abspeicherung je einer grossen Matrix für jeden Zeitschritt führen. Daher wurde auf der Basis der System-Theorie eine neue Methode entwickelt.

Neue Methode zur Erfassung des Stauseefernbereichs

Zunächst wird der Einfluss des halbunendlichen Kanals (Fernbereich) im Frequenzbereich formuliert. Der Kanalschnitt wird in finite Elemente diskretisiert, während in Längsrichtung eine analytische Lösung die Abstrahlungsbedingung richtig erfasst. Die Hauptidee der neuen Methode ist nun, dass das Verhalten des halbunendlichen Kanals näherungsweise durch ein System von Bewegungsgleichungen, ähnlich den Bewegungsgleichungen des Nahbereichs, erfasst werden kann. Die entsprechenden Matrizen können dann

direkt mit den FE-Matrizen des Nahbereichs kombiniert werden. Das so erweiterte System kann mit Standardverfahren der Zeitintegration gelöst werden. Die Hauptschwierigkeit bei diesem Vorgehen besteht in der Approximation der Lösung im Frequenzbereich durch ein System von Bewegungsgleichungen. Abgesehen davon, dass die Approximation möglichst gut sein soll, muss das System stabil sein und sollte wie die Bewegungsgleichungen des Nahbereichs von zweiter Ordnung und symmetrisch sein. Die entwickelte neue Methode basiert auf der Theorie linearer zeitinvarianter Systeme und erfüllt alle genannten Anforderungen. Sie ist in Bezug auf Speicherplatzbedarf und Rechenaufwand den Methoden, die auf der Faltung basieren, weit überlegen. Einzelheiten der neuen Formulierung und ein dreidimensionales Beispiel sind dem Aufsatz [8] zu entnehmen.

Bild 6 zeigt den Vergleich zwischen der analytischen Lösung und der Zeitbereichslösung mit der neuen Methode im Fall eines Halbkreisbogens mit 100 m Tiefe. Dargestellt ist der Druckverlauf in 60 m Tiefe.

Zusammenfassung und Verdankung

Bei Bogenstauwerken unter starken Erdbeben tritt nichtlineares Verhalten vorwiegend in den vertikalen Blockfugen auf. Durch das Schwingen der Mauer können horizontale Bogen-

Literatur

- [1] Dowling M.J., Hall J.F.: Nonlinear seismic analysis of arch dams. J. Eng. Mech. ASCE, Vol. 115, No. 4, 1989, S. 768-789.
- [2] Fenves G.L., Mojtahedi S., Reimer R.B.: ADAP-88, a computer program for nonlinear earthquake analysis of concrete arch dams. Report UCB/EERC-89/12, Univ. of California, Berkeley, CA, USA, 1989.
- [3] Hohberg J.-M.: Nichtlineare Berechnungen mit Trennflächenelementen. Tagung 'Finite Elemente in der Bau- praxis', Karlsruhe, 1991. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin, Tagungsband, 1992.
- [4] Hohberg J.-M.: A joint element for the nonlinear dynamic analysis of arch dams. Dissertation Nr. 9651, ETH Zürich, 1992. (erscheint als IBK-Bericht 186 bei Birkhäuser 1992).
- [5] Weber B., Hohberg J.-M., Bachmann H.: Earthquake analysis of arch dams including joint nonlinearity and fluid-structure interaction. ERCAD, Berlin, 1989. DGB-Publikation Nr. 4 (Hrsg. Savidis, 1991), S. 349-358. Ebenso: Dam Engineering, Vol. 1, No. 4, 1990, S. 267-278.
- [6] Kausel E.: Local transmitting boundaries. J. Eng. Mech. ASCE, Vol. 114, No. 8, 1988, S. 1011-1027.
- [7] Tsai C.S., Lee G.C.: Time-Domain Analysis of Dam-Reservoir System, II: Substructure Method. J. Eng. Mech. ASCE, Vol. 117, No. 9, 1991, S. 2007-2026.
- [8] Weber B.: Fluid-Structure Interaction for Arch Dams. EURO DYN '90, Ruhr-Universität Bochum, Juni 1990, S. 851-858.
- [9] Feltrin G., Wepf D., Bachmann H.: Dynamische Wasser-Struktur-Interaktion und Rissbildung bei Gewichtstauwerken. Bauingenieur (eingereicht).

druckkräfte vollständig abgebaut und die Fugen geöffnet werden. Infolge einer meist vorhandenen Verzahnung können aber trotzdem noch Reibungskräfte übertragen werden. Ein neu entwickeltes dreidimensionales Trennflächenelement erlaubt ein wirklichkeitsnahes Erfassen der Kräfte und Verschiebungen in den Fugen. Die Berechnung nichtlinearer Stauwanderschwingungen zeigt, dass mit diesem Fugenelement die komplette Auflösung der Schalenschwingung in die unabhängige Bewegung einzelner vertikaler Kragarme studiert werden kann.

An einem einfachen analytischen Beispiel werden die Effekte der Kompressibilität und Wellenabstrahlung anschaulich dargestellt. Für die dynamische Interaktion des Stausees mit einer nichtlinearen Stauwand muss das Ge-

samtmodell im Zeitbereich formuliert werden. Methoden, die auf dem klassischen Faltungsintegral beruhen, führen jedoch für ein dreidimensionales Problem zu einer Rechenzeit und einem Speicherplatzbedarf, die auch von grossen Computern kaum bewältigt werden können. Deshalb wurde eine neue Methode entwickelt, bei welcher der Fernbereich durch wenige zusätzliche inter-

ne Freiheitsgrade erfasst wird, so dass keine Faltung mehr nötig ist. Der Nahbereich wird mit finiten Elementen modelliert, was erlaubt, nichtlineare Effekte miteinzubeziehen. Als Beispiel wird für einen Halbkreisbogen die Lösung nach der neuen Methode mit der analytischen Lösung verglichen. Es zeigt sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung.

Die Verfasser danken dem Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern, und der ETH Zürich für die Unterstützung dieses Forschungsprojektes.

Adresse der Verfasser: H. Bachmann, Dr. sc. techn., Professor für Baustatik + Konstruktion, J.-M. Hohberg, Dipl. Ing. und B. Weber, dipl. Bauing. ETH, Institut für Baustatik + Konstruktion, ETH-Hönggerberg, Gebäude HIL, 8093 Zürich.

ASIC-Artikelreihe: Neuartige Aufgaben

Verminderung von Schadenfällen

Aus der Praxis des beratenden Ingenieurs

Fehler und Schadenfälle sind nie absolut ausschliessbar. Nur der ständige Kampf gegen Fehler kann die Schadenfälle vermindern. In diesem Beitrag folgen sieben Regeln zur Verminderung von Schadenfällen.

Ziel unserer Planungs-, Projektierungs- und Bauleitungsarbeit ist selbstverständlich die zweckmässige und mög-

VON WERNER HEIERLI,
ZÜRICH

lichst fehlerfreie Lösung der gestellten Aufgaben. Dabei kennen wir alle das «Naturgesetz», dass es absolute Sicherheit vor Fehlern und Schadenfällen nicht gibt und nie geben wird.

Fehler sind vergleichbar mit Krankheitserregern, welche unseren Organismus befallen. Ähnlich wie die ständige Abwehr unseres Immunsystems gegen Krankheiten kann uns nur der ständige Kampf gegen Fehler wirksam schützen.

Der vorliegende Beitrag soll zeigen, wie dieser Kampf systematischer geführt werden kann.

Da die Hartnäckigkeit – das Durchhalten – in diesem Kampf entscheidet, braucht es unter anderem auch einige einfache, konkrete Regeln, die man sich einprägen, laufend selbst verfeinern und täglich anwenden kann. Es wird daher im folgenden versucht, 7 Regeln für die Verminderung von Schadenfällen aufzustellen, zu begründen und nachfolgend zu diskutieren. Die nachfolgenden 7 Abschnitte sind je einer dieser Regeln zugeordnet.

Kritische Einstellung bewahren

☐ Ist die Aufgabenstellung sinnvoll? Die grössten «Schäden» entstehen wohl dann, wenn eine Aufgabe angegangen wird, deren Lösung bei genauer Betrachtung gar nicht das Ziel des Auftraggebers sein kann. Bei grossen Aufgaben mag es selten sein, bei Teilaufgaben kommt es häufiger vor, dass die Aufgabe im Grunde genommen nicht richtig, zu weit oder zu eng formuliert ist. Der beratende Ingenieur muss genau wissen, was der Auftraggeber erreichen will, und sich auch dann der kritischen Würdigung der Aufgabenstellung unterziehen, wenn daraus der Verlust eines Auftrags resultieren kann, weil dieser vielleicht nicht oder anders zur Ausführung kommt.

☐ Können wir diese Aufgabe bewältigen? Fehler entstehen oft dort, wo eine Firma oder ein Konsortium durch eine Aufgabe überfordert ist. Es gehört zur Pflicht des beratenden Ingenieurs, die Frage nach der Kompetenz der eigenen Firma wie auch anderer beteiligter Firmen nüchtern zu stellen, und zwar für die Gesamtaufgabe ebenso wie für die Detailprobleme. Die Frage kann zum Teil durch den Beizug von Spezialisten gelöst werden.

☐ Gibt es grundsätzlich andere, unkonventionelle Lösungen? Erfahrung hat viele Vorteile, aber sie darf nicht dazu verleiten, nur noch bisherige Lösungen fortzuschreiben. Auch wenn echt unkonventionelle Lösungen im Bauwesen selten sind, so lohnt es sich trotzdem immer, das Problemfeld nach solchen Möglichkeiten abzusuchen. Dazu ein frappantes Beispiel des verstorbenen Astronomen und Morphologen Fritz Zwicky: Nach vorherrschender Meinung gab es Räume am Himmel, in denen neue Sterne zu entdecken waren, und andere, wo man sicher keine finden würde. Zwicky entschied sich für die unkonventionelle Lösung, forschte in den als sternenleer «bekannten» Räumen und fand dort gleich eine Anzahl neuer Sterne.

Der «alte Praktiker» hat häufig recht, aber nicht immer. Am besten bewährt sich eine kritische Einstellung zu allem.

Verantwortung bewusst machen

☐ Verantwortlichkeiten schriftlich festlegen: Dadurch wird nicht nur die Rechtslage geklärt, sondern – viel bedeutsamer – vermieden, dass Lücken in den Verantwortungsbereichen vorkommen. Bekanntlich ereignet sich dort der Fehler, wo jeder meinte, der andere kümmere sich um das Problem. Verantwortung muss bewusst gemacht und bewusst gehalten werden.

- ☐ Kritische Einstellung bewahren
- ☐ Verantwortung bewusst machen
- ☐ Einfach, robust und flexibel entwerfen
- ☐ Schadenträchtige Situationen erkennen
- ☐ Kontrollen organisieren
- ☐ Defensive Haltung einnehmen
- ☐ Persönliche Weiterbildung betreiben