Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 103 (1985)

Heft: 19: 50 Jahre Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich

Artikel: Erdbebenforschung in der heutigen Bodendynamik

Autor: Ziegler, Armin / Prater, Edward G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75777

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

- Gilt es, den Hang anhand der probabilistischen Rechnung zu beurteilen, ist von der untersten Lamelle nach oben fortschreitend die Änderung von *pf* zu beurteilen.
- Hat die unterste Lamelle eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass sie von oben gestossen wird, nimmt auch die Grösse der mittleren übertragenen Kraft zu. Die Rutschung kann sich so weit nach oben ausdehnen, bis die Wahrscheinlichkeit gegen Null strebt.
- Entlang einer durch die Geologie vorgegebenen Gleitfläche lassen sich somit Zonen unterschiedlichen Gleitrisikos bestimmen, was zum Beispiel erlaubt, Massnahmen zur Sanierung örtlicher besser festzulegen und die auftretenden Kräfte besser abzuschätzen.
- Im Bereich, wo die Wahrscheinlichkeit der Kraftübertragung sehr gering ist, können Risse im Gelände auftreten, was in diesem konkreten Fall durch die Beobachtungen bestätigt werden konnte.

Dieses Beispiel zeigt, dass wir von einer einzigen Zahl, dem globalen Sicherheitsfaktor, zu Vergleichswerten, welche die ganze untersuchte Fläche charakterisieren, gelangt sind.

Es bedarf aber auch im Falle dieser neuen Methode noch vieler Anstrengungen, um den Inhalt der Aussage in einer beliebigen Anwendung richtig zu werten, und es wäre sicher voreilig zu behaupten, dies sei der einzige Weg, um in Zukunft Stabilitätsprobleme anzugehen.

Schlussfolgerungen

Die Geotechnik erlaubt noch viele Beiträge zur Gestaltung und Erhaltung unseres Lebensraumes, wobei der Ingenieur *in jedem Fall,* sei es bei der Forschung, der Planung oder der Ausführung, Rücksicht auf die Umwelt zu nehmen hat. Dabei möchte ich den Ausdruck Umwelt in seiner umfassenden Bedeutung verstanden wissen. Diese Rücksicht erfordert Kenntnisnahme von Ansprüchen, die nicht allein durch das Projekt bedingt sind, sie erfordert Kenntnisnahme von Entwicklungen innerhalb und ausserhalb des eigenen Tätigkeitsfeldes, und sie verlangt in jedem Fall, das richtige Mass zu finden.

Dem IGB wünsche ich heute an seinem fünfzigsten Geburtstag, dass es weiterhin seinen wichtigen und wertvollen Beitrag auf der Suche nach eben diesem Mass leisten möge.

Adresse des Verfassers: Prof. *R. Sinniger,* Lehrstuhl für Wasserbau an der ETH Lausanne, 1015 Lausanne.

Erdbebenforschung in der heutigen Bodendynamik

Von Armin Ziegler und Edward G. Prater, Zürich

Bodendynamik: Entstehungsgeschichte und Umfeld

Es ist oft schwierig, den Anfang eines Fachgebietes genau festzulegen. So ist es auch bei der Bodendynamik. Zwar wurde vor 50 Jahren ein Anfang mit den ersten Arbeiten über Maschinenfundationen gemacht, die grossen Impulse bei ihrer Entwicklung kamen jedoch in den letzten 30 Jahren mit militärischen Anwendungen (wie die nuklearen Waffeneinwirkungen auf Untergrundschutzräume) und die Erdbebenbeanspruchung von Dämmen und Boden-Bauwerk-Systemen, insbesondere von Kernkraftwerken. Ein verwandtes Gebiet, das in der letzten Zeit Bedeutung erlangte, ist die Off-shore-Technik, bei der die Beanspruchung von Bohrplattformen durch Wellengang oder Erdbeben massgebend werden kann.

Die nachfolgende Liste gibt eine Übersicht der Teilaspekte der Bodendynamik:

- Maschinenfundationen mit aktiver und passiver Isolation
- Erschütterungsmessungen im Feld
- Stossbelastung des Bodens infolge Explosionen usw.
- seismisch induzierte Verflüssigung in Bodenschichten und künstlichen Erdbauten
- seismische Explorationsmethoden wie die Refraktionsseismik
- dynamische Boden-Bauwerks-Wechselwirkung (z.B. bei eingebetteten Massivbauwerken wie Reaktorgebäuden unter Erdbebenlast)
- dynamisch belastete Pfähle (axial und seitlich)
- Schwingungsverhalten von Erddämmen und anderen Erdbauten
- dynamischer Erdruck auf Stützmauern und verankerte Wände
- Wellenausbreitungseffekten bei Rohrleitungen
- dynamische Intensivverdichtung
- Materialuntersuchungen im Labor oder Feld (z.B. «Crosshole»- und «Down/Uphole»-Tests).

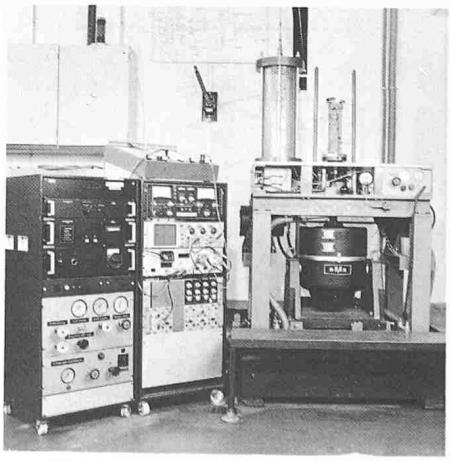
Die mathematischen Grundlagen (Wellentheorie im elastischen Halbraum usw.) wurden um die Jahrhundertwende erarbeitet. In den letzten Jahren haben wir grosse Fortschritte in der numerischen Behandlung von bodendynamischen Problemen erlebt. Heute ist es jedoch klar, dass das schwächste Glied unserer Wissenskette die Erfassung des Materialverhaltens ist. Bei monotoner Belastung bis zum Bruch genügen einfache Materialmodelle elastoplastischer Art. Unter transienter oder zyklischer Belastung jedoch wird die Beschreibung des Bodenverhaltens viel komplizierter. Leider ist bei manchen Problemstellungen der Bodendynamik dieses Verhalten massgebend.

Geotechnisches Erdbebeningenieurwesen

Drei Ereignisse haben vor allem das Interesse an der Erdbebengefährdung von geotechnischen Bauten erweckt, und alle drei haben mit Verflüssigungseffekten zu tun:

- Alaska 1964, $M = 8{,}4$ (grosse Erdrutsche, versagte Brückenfundationen)
- Niigata, 1964, $M = 7{,}5$ (das destruktivste wenn nicht das stärkste Beben in den letzten Jahren in Japan)
- San Fernando, Kalifornien, 1971, $M = 6{,}6$.

Bild 1. Resonant-Column-Anlage des IGB



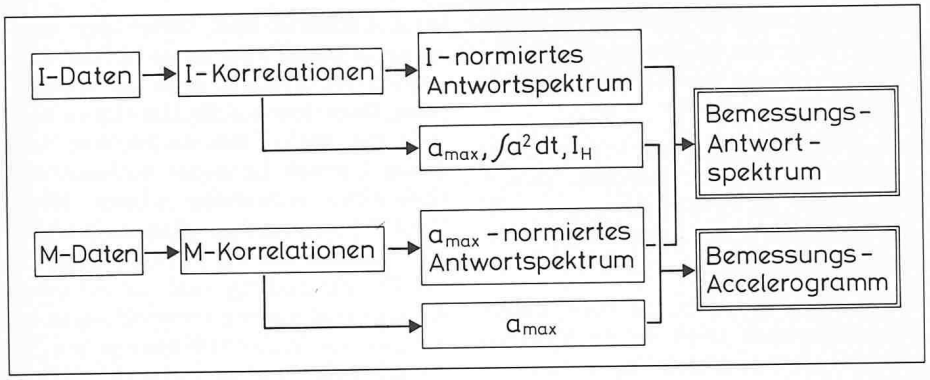


Bild 2. Schematische Darstellung der Berechnung des Bemessungsbebens

Vom Standpunkt des Ingenieurs war zweifellos das dritte Ereignis das wichtigste. Das Beben verursachte beinahe eine grosse Katastrophe, als beim Lower-San-Fernando-Damm ein Rutsch auf der Wasserseite ausgelöst wurde.

Dieser Dammtyp mit teilweisem «Hydraulic-Fill» - obwohl kaum mehr gebaut - ist auch bei sog. «Tailings-Dams» zu treffen. So ein Damm versagte beim Izu-Oshima-Beben 1978 in Japan. Eine Deponie, bestehend aus verseuchtem Abfallmaterial eines Goldbergwerks, die mittels eines seismischen Koeffizienten von 0,2 g bemessen wurde, verflüssigte sich. 80 000 m³ Material flossen 400 m weit einen Hang hinunter zum Tal und verunreinigten einen Fluss.

Erdbebensicherheit von Erd- und Gesteinsschüttdämmen

Nicht alle Dammtypen sind gleich gefährdet. Aber es mag überraschen, dass Dämme aus verdichtetem Ton die stärksten Bodenerschütterungen, z.B. in San Francisco 1906, sehr gut überstanden haben. Locker gelagerte, sandige und siltige Böden sind am empfindlichsten gegenüber Erdbeben, und kleine Dämme aus diesen Materialien, z.B. für Bewässerungszwecke, haben oft versagt.

Die grösste Bedeutung haben heute hohe Gesteinsdämme. Eigentlich sind solche Dämme sehr widerstandsfähig, doch wurden sie bis etwa 1955 beim Bau nicht immer gut verdichtet. Angesichts der grossen Spannungen unten im Damminneren bleiben noch gewisse Fragen offen. Bis heute wurden Dämme dieses Typs nur mittelgrossen Beben ausgesetzt, z.B. der 230 m hohe Oroville-Damm, Kalifornien, der unwesentliche Schäden bei einem Beben mit M = 5,7 zeigte.

In den letzten 10 Jahren wurde das IGB zu der Untersuchung der seismischen Stabilität von verschiedenen Dämmen beigezogen, z.B. beim 133 m hohen Pueblo-Viejo-Damm (Guatemala) [1] und kürzlich beim 90 m hohen Menta-Damm (mit Betonoberflächen-Dichtung) in Kalabrien.

Bei der Untersuchung der seismischen Sicherheit sind folgende Hauptschritte durchzuführen:

a. Evaluation der Geologie und Seismizität
b. Seismische Risikoanalyse
c. Felduntersuchungen (geophysikalische Versuche, Schürfe, Bohrungen usw.)
d. Laborversuche (zyklische Triaxial- und Resonant-Column-Tests)
e. Statische und dynamische Berechnungen.

Die Beurteilung des Dammverhaltens benötigt normalerweise eine dynamische Berechnung und anschliessend rechnerische Stabilitätskontrollen für den Zustand während und nach dem Beben. Bleibende Verformungen können je nach Wasserverhältnisse mittels der Newmark- bzw. der etwas aufwendigeren Seed-Lee-Idriss-Methode abgeschätzt werden. Grosse Anstrengungen sind heute im Gange, bessere nichtlineare Berechnungen mit automatischer Berücksichtigung der erdbebeninduzierten Porenwasserspannung durchzuführen.

Laboruntersuchungen

Das IGB verfügt zur Zeit über zwei besondere Versuchsanlagen zur Bestimmung bodendynamischer Parameter, das Resonant-Column-Gerät (Bild 1) für den Bereich kleiner Dehnungen und das Hydropulsgerät, das zyklische Beanspruchung bis zum Bruch erlaubt. Damit sind gute Voraussetzungen gegeben, um die materialtechnologischen Eingangsgrössen für eine seismische Berechnung zu gewinnen. Die Eingangsgrösse, die jedoch am schwierigsten zu erfassen ist, ist die seismische Belastung. Da am IGB eine Arbeit diesbezüglich kürzlich abgeschlossen wurde, wird hier etwas ausführlicher darüber berichtet (vgl. [2]).

Bemessungserdbeben

Das Ziel der Studie war die Entwicklung eines übersichtlichen und gut fundierten Berechnungsverfahrens, welches auf die in der Schweiz vorhandenen Daten abgestimmt ist.

Das Berechnungsverfahren wurde so konzipiert, dass sowohl Intensitäts- als auch Magnitudendaten berücksichtigt werden können. Es wurde deshalb ein zweiteiliger Berechnungsablauf gewählt, der aus zwei parallelen, voneinander unabhängigen Berechnungen besteht. Die erste Berechnung (Bild 2, oberer Teil) beruht auf dem Intensitäts-Datenkatalog und verwendet für die Gefährdungsberechnung die Intensitätskorrelationen (I_o-Häufigkeitsbeziehungen, I-Abminderungsgesetze); sie ergibt intensitätsnormierte Antwortspektren bzw. die Parameter zur Skalierung von Normspektren und Accelerogrammen. Die zweite Berechnung (Bild 2, unterer Teil) beruht auf dem Magnituden-Datenkatalog und verwendet für die Gefährdungsberechnung die Ma-

Bild 3. Intensitätsnormierte Antwortspektren der horizontalen Komponenten, gebildet aufgrund der Erdbebenaufzeichnungen in Friaul 1976

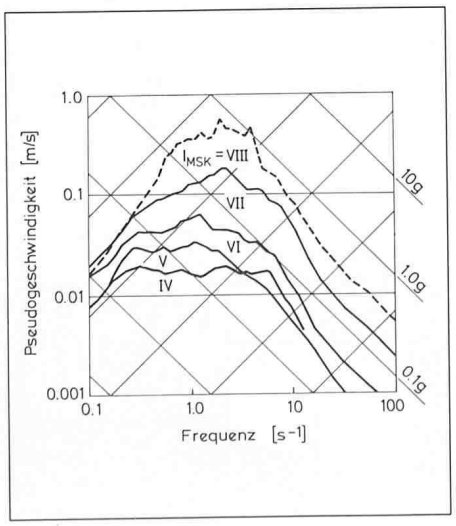
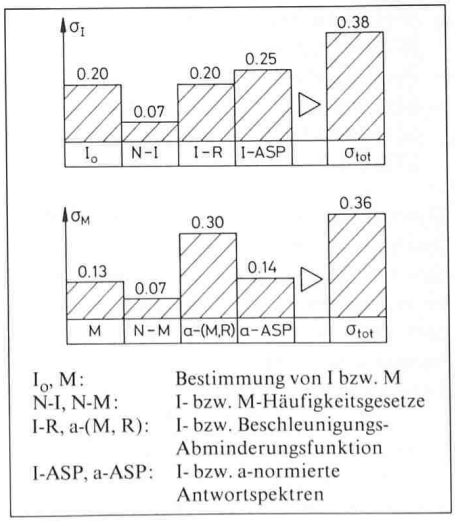


Bild 4. Streubandbreite (logarithmischer Massstab) in den einzelnen Berechnungsschritten sowie Gesamtstreuung im Bemessungsspektrum selbst für die Berechnung mit I-Daten bzw. M-Daten. Die einzelnen Berechnungsschnitte enthalten:



gnitudenkorrelationen (M-Häufigkeitsgesetz, Beschleunigungs-Abminderungsgesetz); sie liefert die maximale Bodenbeschleunigung, womit Normspektren bzw. Accelerogramme skaliert werden können. Das Bemessungsbeben, sei es in Form eines Antwortspektrums oder eines Accelerogrammes, wird schliesslich als Synthese der Ergebnisse aus der Intensitäts- und der Magnitudenberechnung gebildet. Durch die zweiteilige Berechnung ist eine sehr gute Kontrolle des berechneten Bemessungsbebens gewährleistet. Diese Berechnung wurde für vier wichtige Standorte im Wallis angewendet. Dabei hat sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der I- und der M-Berechnung ergeben.

Ein wesentlicher Bestandteil innerhalb der I-Berechnung bilden die intensitätsnormierten Antwortspektren. Diese Spektren sind nicht, wie allgemein üblich, bezüglich maximaler Beschleunigung normiert, sondern es werden Antwortspektren von Stationen mit gleicher Intensität zusammengefasst, woraus durch Mittelwertbildung ein sog. intensitätsnormiertes Antwortspektrum berechnet wird. In Bild 3 sind die in dieser Studie aufgrund der Erdbebenaufzeichnungen von Friaul (1976) bestimmten I-Antwortspektren dargestellt. Die intensitätsnormierten Antwortspektren für die vertikale Bodenbewegung liegen etwa 50% tiefer als für die horizontale Bodenbewegung.

Idealerweise werden für die Berechnung eines Bemessungsbebens nur Daten verwendet, die aus der interessierenden Region selbst stammen. Dies ist für die Schweiz (und zahlreiche andere Regionen) jedoch nicht möglich, da bis jetzt keine Beschleunigungs-Aufzeichnungen von stärkeren Erdbeben vorliegen. Bei beiden Berechnungen, d.h. bei der Berechnung aufgrund von I-Daten und bei der Berechnung aufgrund von M-Daten, müssen in der einen oder anderen Form Erdbebenaufzeichnungen aus anderen Regionen verwendet werden. In der I-Berechnung sind es die intensitätsnormierten Antwortspektren, bei der M-Berechnung die Beschleunigungs-Abminderungsfunktionen und die Antwortspektren, die aus «fremden» Regionen übernommen werden müssen. Selbstverständlich werden die Daten so ausgewählt, dass sie den in der Schweiz möglichen Erdbeben entsprechen, doch bleibt immer eine gewisse Unsicherheit bezüglich der Übertragbarkeit dieser Daten bestehen.

Nicht nur die oben erwähnten Daten, sondern alle in der Berechnung des Bemessungsbebens verwendeten Korrelationen weisen eine bestimmte Streuung auf. Für die Beurteilung des Berechnungsverfahrens und für die weitere Verwendung des Bemessungsbebens ist die Kenntnis der Streubandbreite in den einzelnen Korrelationen und der Gesamtstreubandbreite beim Bemessungsbeben selbst von grösster Bedeutung. In Bild 4 ist der Beitrag der einzelnen Korrelationen an die Streuung im Bemessungsspektrum dargestellt. Die Werte gelten für eine Wiederkehrperiode von T = 100 Jahren. Interessanterweise ergibt sich trotz grösserer Unterschiede in der Streuung der einzelnen Korrelationen bei beiden Berechnungsverfahren praktisch die gleiche Streuung im Bemessungsbeben. Die einfache Standardabweichung im logarithmischen Massstab beträgt 0,38 bzw. 0,36, was einem Streufaktor von 2,4 bzw. 2,3 entspricht. Dies bedeutet, dass ein als Mittelwertspektrum berechnetes Bemessungsbeben mit einem Faktor von 2,4 bzw. 2,3 zu multiplizieren ist, um den Wert für die 84-Percentile zu bestimmen.

Diese Streubandbreite ist wesentlich grösser, als man bei Lastannahmen für Bauwerke gewohnt ist. Es stellt sich dabei sogleich die Frage, ob diese Streubandbreite durch Verfeinerung der Messsysteme oder durch eine umfangreichere Datenbasis reduziert werden kann. Eine diesbezügliche Untersuchung hat gezeigt, dass eine gewisse Verbesserung, insbesondere bei den Beschleunigungs-Abminderungsfunktionen, möglich ist. Dies setzt allerdings das Vorhandensein von Starkbeben-Aufzeichnungen in der Schweiz voraus. Der grössere Teil der Streuung ist aber durch den Zufälligkeitscharakter des Erdbebens bedingt.

Literatur

[1] *Bossoney C., Prater E.G. et al.:* Earthquake Resistance of a Rockfill Dam. Int. Conf. Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eng. & Soil Dynamics, St. Louis, I, p. 441 (1981)

[2] *Ziegler, A.:* Bemessungsbeben für Stauanlagen im schweizerischen Alpenraum, IGB-Mitteilung (in Vorbereitung)

Adresse der Verfasser: *Armin Ziegler,* dipl. Ing. ETH; Dr. *Edward G. Prater,* Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

Entsorgung: Neue bodenmechanische und tonmineralogische Problemstellungen

Von Felix Bucher und Max Müller-Vonmoos, Zürich

Umweltschutz und Entsorgung stellen der Bodenmechanik und Tonmineralogie in bedeutendem Umfang neue Aufgaben. Beispiele dazu, etwa im Zusammenhang mit der Lösung von Deponieproblemen, der Verwendung von Abfallprodukten als Baustoffe usw., finden sich z.B. in den Beiträgen zur letzten internationalen Konferenz für Grundbau und Bodenmechanik, welche 1981 in Stockholm stattfand [1, 2]. Die entsprechenden Beiträge machen vor allem auch deutlich, dass die herkömmlichen rechnerischen und experimentellen Methoden der Bodenmechanik zum Teil nicht genügen und auf die neuen Problemstellungen auszurichten sind.

Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich (IGB) wurde schon verschiedentlich bei der Bearbeitung von Entsorgungsproblemen beigezogen. Ein besonders bedeutungs- und anspruchsvoller Auftrag stellt sich dem IGB im Zusammenhang mit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle.

Das schwedische Konzept zur Endlagerung hochradioaktiver Abfälle sieht die Verwendung von Bentonit bzw. Bentonit-Quarzmischungen als Verfüll- und Versiegelungsmaterial vor. Eine im Auftrag der Nationalen Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra) durchgeführte Projektstudie für die Endlagerung hochaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen sowie Literaturstudien haben gezeigt, dass sich Bentonit auch für das von der Nagra vorgesehene Endlagerkonzept