Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 88 (1996)

Heft: 7-8

Artikel: Zur Wahl des Materialgesetzes des Lockergesteines für Erdbebenberechnungen

Autor: [s.n.]

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940358

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: 23.08.2025

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

Zur Wahl des Materialgesetzes des Lockergesteines für Erdbebenberechnungen

Mitteilung des Laboratoriums für Wasserbau der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne

Die Wahl des Materialgesetzes des Lockergesteines wird wesentlich vom erwarteten Verhalten des Bodenkörpers bestimmt. Zum Beispiel, wenn der Boden nur kleinen Änderungen der Last ausgesetzt wird, kann ein linear elastisches Materialgesetz vollauf genügen. Falls die Belastung so gross ist, dass eine grössere Zone des Bodens in die Nähe des Versagens gelangt, kann das elastische Verhalten vernachlässigt werden und ein starr plastisches Modell gewählt werden. Die Beanspruchung des Bodens für schnell wirkende Lasten kann oft als Vorgang in einem undräinierten Lockergestein betrachtet werden, ohne auf Langzeitverhalten wie Konsolidation und Kriechen einzugehen. Dies bedeutet, dass ein bestimmter Boden je nach Anwendung ganz verschieden modelliert wird.

Die Kunst des Modellierens des Lockergesteines besteht darin, die wichtigsten Charakteristiken der zu erwartenden Beanspruchung zutreffend beschreiben zu können und gleichzeitig das Materialgesetz so einfach wie möglich zu wählen. Je komplizierter das Materialgesetz gewählt wird und je mehr Eigenschaften es berücksichtigen kann, desto grösser wird der Aufwand zur Bestimmung der Materialparameter (im Labor und im Feld) und desto komplizierter wird die Analyse, um das Verhalten des Bodenkörpers zu bestimmen. Ein vernünftiges Gleichgewicht zwischen dem Testaufwand zur Bestimmung der Bodenparameter und den Kosten der Analyse einerseits und der Genauigkeit der Analyse, d.h. Übereinstimmung mit dem effektiven Bodenverhalten, andererseits muss erreicht werden.

Schon vor über 20 Jahren sind Abschätzungen des seismischen Verhaltens von Talsperren durchgeführt worden, wie zum Beispiel der von Seed berechnete San Fernando Dam (Bild 1). Eine zutreffendere Erfassung der Beanspruchung eines vor mehreren Jahren gebauten Dammes stellt hohe Anforderungen an das Materialgesetz. Das ist vor allem auf folgendes zurückzuführen:

- Da das Erdbeben einen dynamischen Lastfall darstellt, sind die wesentlichen angreifenden Lasten, nämlich die Trägheitskräfte, vor der Berechnung unbekannt. Diese sind gleich den Massen multipliziert mit den Beschleunigungen das Dammkörpers, die sich erst als Resultat der Berechnung ergeben.
- Die Festigkeit das Lockergesteines hängt stark ab von der Belastungsgeschichte und vom Verlauf der Porenwasserspannungen. Die Anfangsbedingungen beim Eintreten des Erdbebens, die durch Konsolidation und Kriechen sowie durch Durchsickerung und Wasserspiegeländerungen seit Bauende bestimmt werden, sind wichtig. Die durch die zyklische Belastung des Schubes hervorgerufenen Volumenänderungen können die Porenwasserspannungen stark erhöhen, was die effektiven Spannungen herabsetzt und somit die Festigkeit reduzieren kann. Neben grossen bleibenden Deformationen kann auch eine Verflüssigung eintreten.
- Im Gegensatz zu einer statischen Beanspruchung kann das Erdbeben als zyklische Last mit wechselnden Vorzeichen zu bleibenden Verformungen führen, die beschränkt bleiben und nicht zum Versagen führen.

Um das Verhalten eines Dammes, das durch bleibende Verschiebungen beschrieben wird, für den Lastfall Erdbeben beurteilen zu können, müssen folgende Bedingungen an das Materialgesetz des Lockergesteines gestellt werden:

- *Nichtlineares Materialgesetz des Korngefüges.* Das Materialgesetz muss mittels Inkremente formuliert werden, und zwar in den effektiven Spannungen. Für ein gegebenes Inkrement der totalen Dehnung muss das Inkrement der effektiven Spannung berechnet werden, wobei der Belastungsgeschichte Rechnung getragen werden muss.
- *Volle Kopplung zwischen dem Korngefüge und dem Wasser in den Poren.* Während und nach dem Erdbeben muss eine relative Bewegung zwischen Korn und Wasser auftreten können, die zu Reibungskräften führt, die nach dem Gesetz von *Darcy* bestimmt werden.

Diese beiden Bedingungen sollten es erlauben, bei einer korrekten Wahl der Materialkonstanten und der Anfangsbedingungen das nichtlineare Verhalten mit bleibenden Verschiebungen des Dammes zu erfassen. Umfangreiche Untersuchungen haben ergeben, dass Vorausrechnungen der Verflüssigung einfacher Bodenkörper zu einer annehmbaren Übereinstimmung mit den Resultaten von Tests in Zentrifugen führen (Projekt VELACS, Verification of Liquifaction Analysis using Centrifuge Studies).

Das Materialgesetz gUTS (grand Unified Theory of Soil), eingebaut in ein entsprechendes Finite-Element-Programm, sollte zutreffende Resultate des Verhaltens unter Erdbeben eines bereits in Betrieb stehenden Dammes ermöglichen. Die Formulierung des Materialgesetzes und die Bestimmung der Materialparameter sowie Resultate der Simulation sind in der Referenz 1 enthalten.

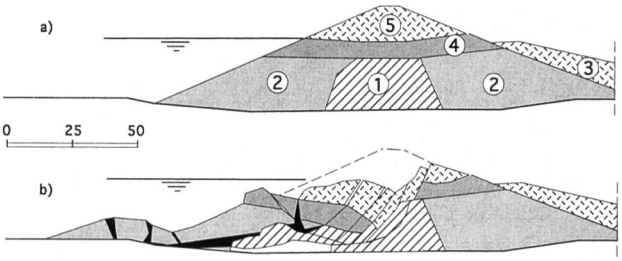

Bild 1. Lower San Fernando Dam.
a) Querschnitt vor Erdbeben
b) Querschnitt nach Erdbeben
① Tonkern, ② Spülschüttung Sand, ③ Verdichtete Schüttung, ④ Spülschüttung Tonschiefer, ⑤ Verdichtete Schüttung.
Schwarze Zone in b): Verflüssigung.

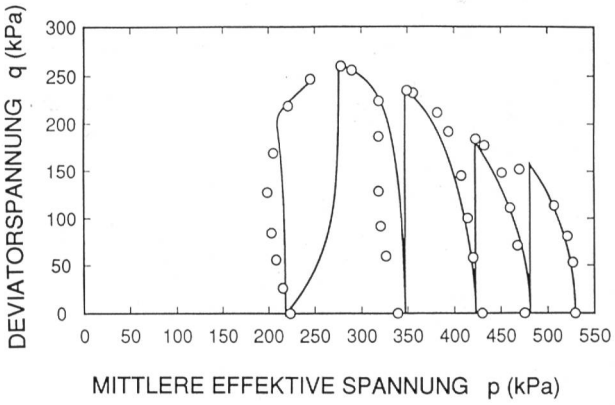

Bild 2. Normal konsolidierter Ton mehrfach beansprucht (Berechnung Linien, Triaxialversuch Punkte).

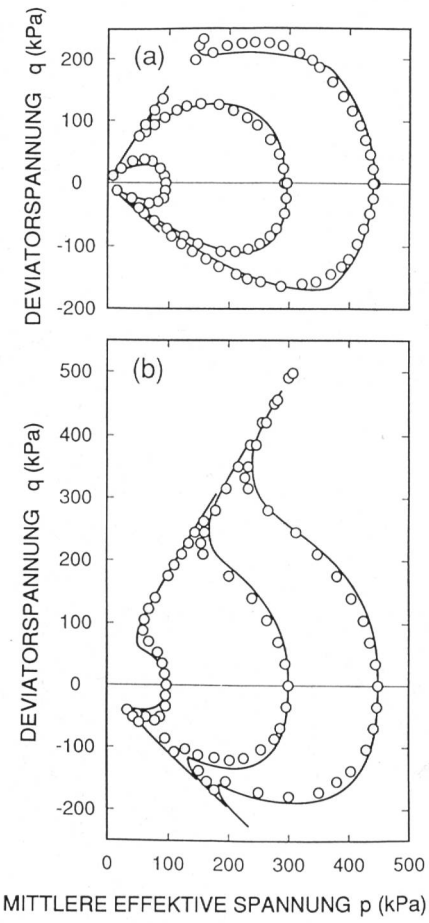

Bild 3, links. Silt mit drei verschiedenen Seitendrücken im Triaxialversuch (Berechnung Linien, Triaxialversuch Punkte)
a) lockere Lagerung, b) dichte Lagerung.

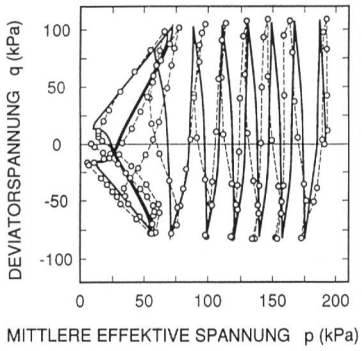

Bild 4, rechts. Lockerer Sand bis zur Verflüssigung zyklisch beansprucht (Berechnung Linien, Triaxialversuch Punkte).

Eine kurze Beschreibung von gUTS folgt. Das Materialgesetz kann sowohl für bindiges und nichtbindiges Lockergestein verwendet werden, und zwar bei gleichen Materialparametern für lockere und dichte Lagerungen. Neben der Möglichkeit, Mischungen wie Lehm zu modellieren, ergeben sich auch Vorteile im numerischen Algorithmus, da nur eine Formulierung benötigt wird. Dieses einheitliche Gesetz ist möglich, da auf makroskopischer Ebene das Verhalten von bindigen und nichtbindigen Lockergesteinen das gleiche ist. Zum Beispiel ist bei beiden die effektive Spannung (totale Spannung minus Porenwasserspannung) ausschlaggebend. Auf mikromechanischer Ebene bestehen grosse Unterschiede, die aber die Formulierung des Gesetzes nicht beeinflussen, wohl aber die Werte der Materialparameter. Während des Versagens des Materials sind zwar die Verzerrungen auf Schub nicht mehr begrenzt, aber es tritt keine Änderung des Volumens und des effektiven Spannungszustands ein. Diese Theorie des kritischen Zustandes, ursprünglich für bindiges Material (Ton) entwickelt, gilt somit konzeptionell auch für nichtbindiges Material (Sand). gUTS beruht auf einer weiterentwickelten Plastizitätstheorie, die auch innerhalb der verallgemeinerten Fliessfläche bleibende Dehnungen zulässt. Schliesslich soll auch darauf hingewiesen werden, dass die gängigen Materialgesetze des Bodens, wie *Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, von Mises, Tresca* als Spezialfälle in gUTS enthalten sind.

Bei der Anwendung des Gesetzes in einem Finite-Element-Programm muss die Formulierung inkrementell linear sein. Falls das Inkrement, d.h. in einer dynamischen Analyse der Zeitschritt, genügend klein gewählt wird, sind keine Iterationen nötig.

In einem Materialgesetz auf makroskopischer Basis ist die Anzahl der Materialparameter erfahrungsgemäss sehr gross, was unerwünscht ist. In der allgemeinsten Form erlaubt gUTS die Bestimmung von 32 Materialkonstanten. Wesentlich ist aber, dass zur Beschreibung eines bestimmten Phänomens nur eine kleine Anzahl benötigt wird, was die auszuführenden Experimente stark vereinfacht. Zur Bestimmung aller Materialparameter, mit der Ausnahme von einem, genügen konventionelle Triaxialversuche, die im Detail in der Referenz 1 beschrieben werden. Für 24 Materialparameter können, getrennt nach Ton und Sand, feste Werte a priori gewählt werden (siehe Tabelle 1), ohne dass auf Eigenschaften von gUTS verzichtet werden muss. Für diese Version (gUTS-lite) müssen somit nur acht Materialparameter ermittelt werden.

Um die Leistungsfähigkeit von gUTS zu belegen, sind eine grosse Anzahl von Experimenten nachgerechnet worden (Figuren 5 bis 19 der Referenz 1). 10 verschiedene Lockergesteine (2 Tone, 1 Silt, 7 Sande) sind, ausgehend von verschiedenen Anfangsbedingungen dräniert und undräniert, mit dem gleichen Satz von Materialparametern berechnet worden. Monoton anwachsende Belastungen und zyklische Beanspruchungen bis zur Verflüssigung sind in diesen 49 Berechnungen erfasst worden. Die Genauigkeit der Berechnung muss als hervorragend bezeichnet werden. Als Beispiele der guten Übereinstimmung der berechneten Triaxialversuche mit den Versuchen sind drei undränierte zyklisch beanspruchte Bodenproben, ein Ton (Bild 2), ein Silt (Bild 3) und ein Sand (Bild 4), aufgeführt. Die Deviatorspannung $\sigma'_1 - \sigma'_2$ ist als Funktion der mittleren effektiven Spannung $1/3\ (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$ dargestellt. Die Resultate mit dem Materialgesetz gUTS sind als Linien dargestellt und diejenigen des Versuches als Punkte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass mit gUTS ein leistungsfähiges und erprobtes einheitliches Materialgesetz für Lockergesteine zur Verfügung steht, was zur Berechnung der Erdbebenbeanspruchung eines Dammes herangezogen werden kann.

Verdankung
Das Forschungsprojekt Dynamische Analyse von Staudämmen ist von der Sektion Talsperren des Bundesamtes für Wasserwirtschaft gefördert worden. Ein Beitrag des Forschungsfonds des Schweizerischen Nationalkomitees für grosse Talsperren diente insbesondere zur Nachrechnung von Laborexperimenten an verschiedenen Lockergesteinen. Beiden Instanzen wird für die Unterstützung bestens gedankt.

Referenzen
[1] Unified 3D Critical State Bounding-Surface Plasticity Model for Soils Incorporating Continuous Plastic Loading Under Cyclic Paths. Part I: Constitutive Relations, Part II: Calibration and Simulations, by *Roger S. Crouch* and *John P. Wolf*, «International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics», Vol. 18, 735–758, 759–784 (1994).