

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: Entsorgung: neue bodenmechanische und tonmineralogische Problemstellungen
Autor: Bucher, Felix / Müller-Vonmoos, Max
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-75778>

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: 17.04.2026

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

gnitudenkorrelationen (M-Häufigkeitsgesetz, Beschleunigungs-Abminderungsgesetz); sie liefert die maximale Bodenbeschleunigung, womit Normspektralen 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-Perzentile 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

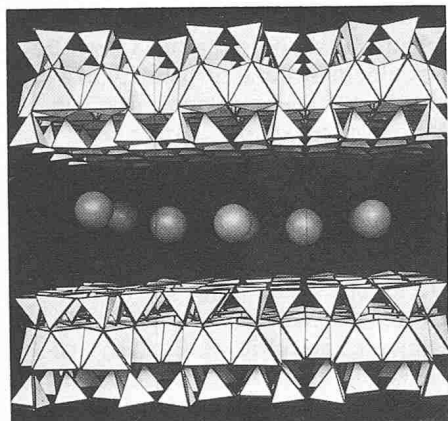


Bild 1. 2 Montmorillonit-Schichten, bestehend aus einer Oktaeder- und zwei Tetraederschichten, und Gegenionen

und schweizerische Verhältnisse als Verfüll- und Versiegelungsmaterial eignen könnte.

In der Folge wurde im März 1981 das Institut für Grundbau und Bodenmechanik mit der Untersuchung von verschiedenen Bentoniten durch die Nagra beauftragt. Die Untersuchungen bezweckten, die insbesondere in Schweden erarbeiteten, konzeptbeeinflussenden Ergebnisse bzw. Parameter durch eigene Methoden bzw. Versuche unter Berücksichtigung der in der Schweiz zu erwartenden Endlagerbedingungen zu verifizieren und noch ausstehende ingenieurtechnische und nuklearspezifische Parameter zu bestimmen.

Die Untersuchungen konzentrierten sich auf den im schwedischen Konzept vorgesehenen Natrium-Bentonit MX-80 aus Wyoming und den geographisch günstiger gelegenen Calcium-Bentonit Montigel aus Bayern.

Die Wahl von Bentonit für eine technische Barriere um die Behälter mit den verglasten, hochradioaktiven Abfällen hängt insbesondere von den folgenden bodenmechanischen Eigenschaften des Bentonits ab: Verdichtbarkeit, Dichtigkeit, Quell-, Deformations- und Schrumpfverhalten, Wärmeleitfähigkeit, Kationenaustauschkapazität, Sorptionsvermögen, Langzeitverhalten. Zur Abklärung dieser Eigenschaften wurden am IGB umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse, welche in verschiedenen Berichten der Nagra [4-11] veröffentlicht wurden, können im Rahmen dieses Artikels keinesfalls in ihrer ganzen Breite dargestellt werden. Als ein Beispiel daraus seien daher bloss die Quelluntersuchungen und deren Ergebnisse kurz vorgestellt.

Bentonite enthalten hauptsächlich Montmorillonit, ein sehr feinkörniges, hochquellfähiges Tonmineral. Jedes Montmorillonit-Teilchen besteht aus etwa 10 bis 20 parallel angeordneten Schichten. Jede Schicht ist etwa 10 Å ($1 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ mm}$) dick und besteht aus einer Oktaeder- und zwei Tetraederschichten (Bild 1). Die Oktaeder bestehen aus Aluminium im Zentrum und Sauerstoff bzw. Hydroxyl-Gruppen an den Ecken. Die Tetraeder sind aus Silizium und Sauerstoff aufgebaut. Durch den teilweisen Ersatz des Aluminiums durch Magnesium erhalten die Schichten eine negative Ladung, die durch Anlagerung austauschbarer Kationen ausgeglichen wird. Der Zusammenhalt der Schichten ist im Montmorillonit so schwach, dass Wasser zwischen die Schichten dringen kann.

Die Quellung des Bentonits, wie ihr der Bauingenieur normalerweise begegnet,

Literatur

- [1] Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (X. ICSMFE). Stockholm, 1981
- [2] Bucher, F.: X. ICSMFE, Bodenmechanische und fundationstechnische Themen. Mitt. der Schweiz. Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Heft Nr. 105, 1981
- [3] Müller-Vonmoos, M.: Die Bedeutung der Tonminerale für das bodenmechanische Verhalten der Lockergesteine. Mitt. der Schweiz. Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Heft Nr. 109, 1983
- [4] Müller-Vonmoos, M. und Kahr, G.: Bereitstellung der Bentonite für die Laboruntersuchungen. Nagra, Technischer Bericht 82-04, 1982
- [5] Bucher, F., Jeger, P., Kahr, G., Lehner, J.: Herstellung und Homogenität hochverdichteter Bentonitproben. Nagra, Technischer Bericht 82-05, 1982
- [6] Kahr, G. und Müller-Vonmoos, M.: Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX-80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode. Nagra, Technischer Bericht 82-06, 1982
- [7] Müller-Vonmoos, M. und Kahr, G.: Mineralogische Untersuchungen von Wyoming-Bentonit MX-80 und Montigel. Nagra, Technischer Bericht 83-12, 1983
- [8] Bucher, F. und Spiegel, U.: Quelldruck von hochverdichteten Bentoniten. Nagra, Technischer Bericht 84-18, 1984
- [9] Kahr, G., Hasenpatt, R., Müller-Vonmoos, M.: Ionendiffusion im hochverdichteten Bentonit. Nagra, Technischer Bericht 85-23, 1985
- [10] Bucher, F., Jedelhauser, P., Jeger, P.: Schrumpfversuche an Bentonitproben. Nagra, Technischer Bericht 85-24, 1985
- [11] Müller-Vonmoos, M. und Kahr, G.: Langzeitstabilität von Bentonit unter Endlagerbedingungen. Nagra, Technischer Bericht 85-25, 1985

ist die osmotische Quellung [3]. Sie beruht auf der unterschiedlichen Ionenkonzentration im Zwischenschichtraum und im Porenwasser. Gewöhnlich ist die Kationenkonzentration im Zwischenschichtraum und an der Teilchenoberfläche wesentlich grösser als im umgebenden Porenwasser. Da die Kationen den Zwischenschichtraum aus elektrostatischen Gründen nicht verlassen können, diffundiert Wasser zum Konzentrationsausgleich in den Zwischenschichtraum und drückt die Schichten bzw. die Teilchenoberflächen benachbarter Teilchen auseinander. Dabei wandern die Kationen von der Mittelebene zu den Schichtoberflächen und bilden mit ihnen elektrische Doppelschichten. In den Doppelschichten nimmt die Konzentration der Kationen mit zunehmender Entfernung von der Schichtoberfläche ab. Es entsteht also ein mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche abnehmendes, negatives Potential. Überschneiden sich die Potentiale benachbarter Schichten oder Teilchenoberflächen, stossen sie sich ab. Diese Doppelschichtabstossung entspricht dem osmotischen Quelldruck.

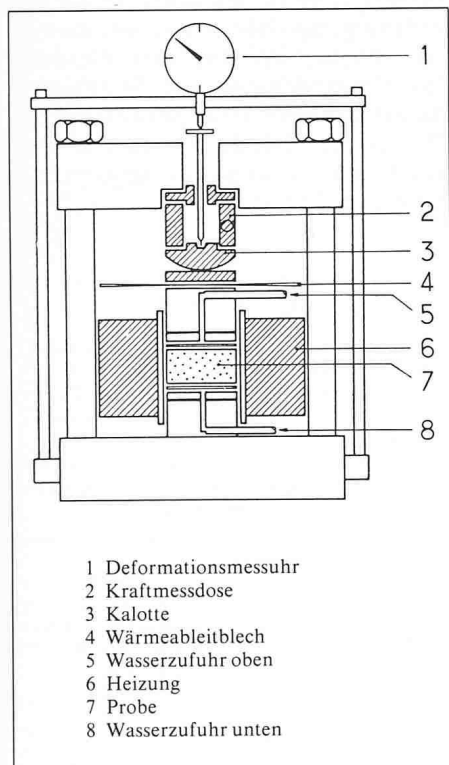
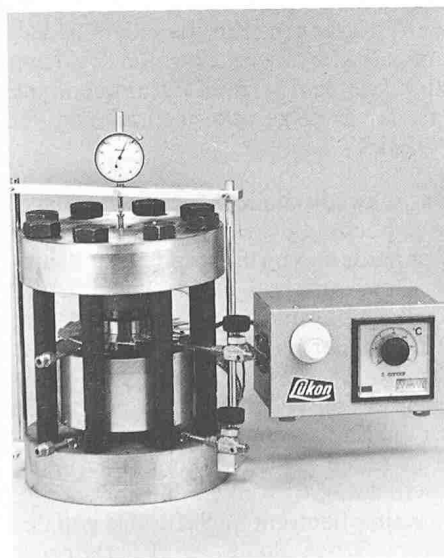


Bild 2. Schnitt der Quelldruckapparatur

Bild 3. Aufnahme der am IGB entwickelten Quelldruckapparatur. Rechts im Bild der Temperaturregler



Demgegenüber spielt sich bei sehr kleinem Wassergehalt die Quellung innerkristallin ab, und man spricht daher von der innerkristallinen Quellung auf kurze Entfernung, welche auf die Anlagerung von vier Wasserschichten (Schichtdicke etwa 2,5 Å), d. h. eine Aufweitung auf 10 Å, beschränkt ist. Massgebend ist dabei die Adsorptionsenergie der Oberfläche, vor allem die Hydratationsenergie der Kationen. Im ofentrockenen Montmorillonit liegen die Schichten dicht aufeinander, und die Kationen sitzen in den hexagonalen Vertiefungen der Tetraederschicht. Die Schichten werden durch die verhältnismässig schwache Van-der-Waals-Anziehung zusammengehalten, die noch durch die Abstossung der in die Schichten eingelassenen Kationen geschwächt wird. Zur Bildung der ersten Wasserschicht ordnen sich vier Wassermoleküle planar um die Kationen an. Die Vierer-Koordination geht dann zur Bildung der Zweifachschicht in eine Sechser-Koordination über, d. h. jedes Kation ist dann oktaedrisch von sechs Wassermolekülen umgeben. Die Kationen heben sich aus den hexagonalen Vertiefungen und ordnen sich auf der Mittelebene zwischen den Schichten an. Die Schichten werden nun neben der Van-der-Waals-Anziehung durch die auf der Mittelebene zwischen den Schichten liegenden Kationen zusammengehalten. Die hohen Quelldrücke der ersten und zweiten Wasserschicht entsprechen weitgehend der Differenz der Hydratationsenergie der Kationen und der Anziehung der Schichten. Mit der Bildung der zweiten Wasserschicht ist die Hydratation abgeschlossen. Nach Auffüllung der Zwischenräume wird je eine Wasserschicht durch Wasserstoffbrücken an die Sauerstoffebene der Tetraederschichten angelagert. Mit der Bildung der dritten und vierten Wasserschicht wird die Osmose zur treibenden Kraft.

Die vom Verfüll- und Versiegelungsmaterial gewünschten hohen Quelldrücke ergeben sich im Bereich der innerkristallinen Quellung des Bentonits, d. h. bei kleinen Wassergehalten und hohen Dichten. Zur Messung der Quelldrücke, die den etwa üblichen Quelldruck eines Molassemergels um den Faktor 100 übertreffen, mussten am IGB neue

Versuchsapparaturen (Bilder 2 und 3) entwickelt und gebaut werden, die den folgenden Anforderungen zu genügen hatten:

- Nur sehr geringe vertikale Deformationen (Größenordnung wenige Zehntelmillimeter). Durch einen Stützzylinder weitgehend verhinderte radiale Deformationen.
- Wasserzugabe oben und unten an der Probe mit Drücken bis 10 N/mm².
- Probentemperaturen bis 150 °C realisierbar.
- Kräfte bis 150 kN messbar.

Insgesamt sind heute am IGB zwölf dieser Geräte für Quelldruckmessungen, vier für Diffusionsmessungen und bei Sulzer in Winterthur fünf für Korrosionsstudien im Einsatz.

In den bisherigen Untersuchungen wurden für die beiden erwähnten Bentonite, insbesondere der Einfluss der Einbautrockendichte, der zugelassenen Volumendeformation, der Temperatur und des Wassers auf den Quelldruck untersucht. Der Verlauf dreier typischer Versuche ist in Bild 4 gezeigt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Trockendichte ρ_{red} im aufgequollenen Zustand der Probe von ausschlaggebender Bedeutung für den Quelldruck ist. ρ_{red} , die sogenannte reduzierte Trockendichte, kann aus der Einbautrockendichte des Bentonits und der zugelassenen Volumendeformation bei der Quellung ermittelt werden. In Bild 5 sind die Quelldrücke in Abhängigkeit von der reduzierten Trockendichte dargestellt. Wie ersichtlich, erreichen die Quelldrücke sehr hohe Werte bis 40 N/mm², d. h. 400 kg/cm². Die Untersuchungen bezüglich Wasserdruck, Ionenkonzentration im angebotenen Wasser und Temperatur ergaben nur geringe Einflussfaktoren auf den Quelldruck, die hier nicht im einzelnen dargestellt werden können. Um das Langzeitverhalten des Bentonits schliesslich beurteilen zu können, wurden Metabentonit von Kinnekulle (Schweden) und Illit aus dem Massif central (Frankreich) als natürliche Umwandlungsprodukte von Bentonit bezüglich Quellung geprüft (Bild 6). Die Ergebnisse zeigen, dass diese Umwandlungsprodukte beachtliche Quelldrücke entwickeln, wobei

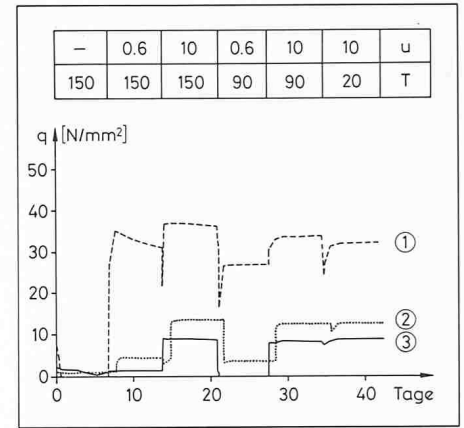


Bild 4. Verlauf typischer Quellversuche mit variablem Wasserdruck (u) und variabler Temperatur (T)

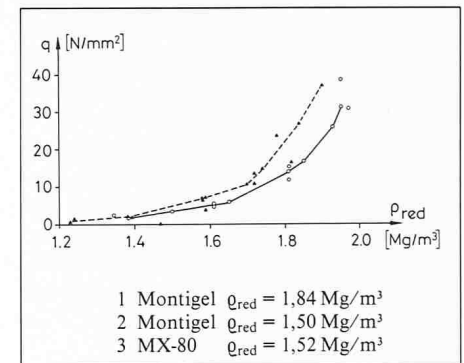
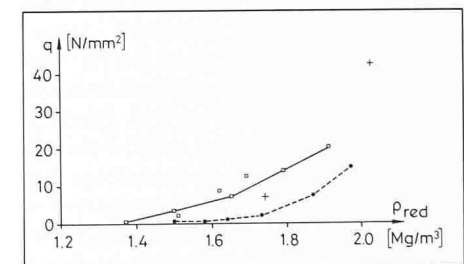


Bild 5. Quelldruck q in Abhängigkeit der reduzierten Trockendichte ρ_{red} für Montigel (---) und MX-80 (—) bei einem Wasserdruck von 0,6 N/mm²

Bild 6. Quelldruck q in Abhängigkeit der reduzierten Trockendichte für Metabentonit (---) und Illit (—). Bei + handelt es sich um beschallte Metabentonitproben.



eine Behandlung des Metabentonits mit Ultraschall noch eine Erhöhung der Werte bewirkte.

Adresse der Autoren: Dr. Felix Bucher; Prof. Dr. Max Müller-Vonmoos, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.