

**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:** Quellende Gesteine als Ursache von Problemen im Untertagebau  
**Autor:** Madsen, Fritz / Kahr, Günter  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-75784>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 01.04.2025

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

# Quellende Gesteine als Ursache von Problemen im Untertagebau

Von Fritz Madsen und Günter Kahr, Zürich

Quellende Gesteine sind im Untertagebau eine wohlbekannte und unangenehme Erscheinung. Zahlreiche Tunnel wurden in der grossen Bauperiode der Eisenbahnen Ende des vergangenen und anfangs dieses Jahrhunderts im Schweizer Mittelland und Jura in quellfähigen Gesteinen gebaut. Dabei traten oft schon in der Bauphase Sohlhebungen auf, und später wurden wegen nicht abklingender Quellungen kostspielige Renovationsarbeiten nötig. Zahlreiche Bahntunnel mussten so mit grossem Aufwand in den letzten Jahren saniert werden. Besonders aktuell wurden die Schwierigkeiten mit den quellenden Gesteinen beim Ausbau des Nationalstrassennetzes. In diesem Rahmen wurden von unserem Institut im Verlauf der letzten 15 Jahre viele Laborversuche zu Bestimmung der Quelleigenschaften verschiedener Gesteine durchgeführt. Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die Messmethoden und die Grössenordnung der Quellparameter von Molassemergel gegeben werden.

## Quellfähigkeit und Mineralogie

Ein Gestein wird als quellfähig bezeichnet, wenn sich dessen Volumen bei einer physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser vergrössert.

Bei den quellfähigen Gesteinen der Molasse geschieht die Volumenvergrösserung durch Einlagerung von Wasser, zusätzlich zum natürlichen Wassergehalt, zwischen den einzelnen Tonteilchen und zwischen den Elementarschichten im Kristallgitter des quellfähigen Tonminerals Smektit (Montmorillonit). Die Ursache der Wasseraufnahme liegt in der negativen Flächenladung der Tonminerale. Als Folge, und zur Kompensation dieser Ladung, ist die Ionenkonzentration zwischen den Tonteilchen und auch zwischen den Elementarschichten des Smektites viel grösser als diejenige des Porenwassers im Gestein. Das während des Quellens eingelagerte Wasser dient zur Ver-

minderung des Konzentrationsunterschieds und treibt die Tonteilchen und die Elementarschichten auseinander.

Diese Art von Quellvorgang wird als «osmotische Quellung» bezeichnet. Bei genügender Kenntnis der mineralogischen Daten kann dann auch der Druck, welcher auf die Teilchen und Elementarschichten wirkt, als ein osmotischer Druck berechnet werden [1] und [2]. Der Druck  $p$  ist hauptsächlich eine Funktion des halben Teilchenabstandes  $d$ , etwa wie folgt:

$$p = \frac{K}{d^2}$$

wobei in  $K$  verschiedene Konstanten zusammengefasst sind. Eine kleine Vergrösserung des Abstandes bedeutet also eine grosse Verringerung des Drucks. Für die Grösse des Drucks spielt es keine Rolle, wie viele Tonteilchen und Elementarschichten aufeinander liegen. Allein deren Abstand ist wichtig. In einem Gestein ist deshalb die Menge

Ton für die Grösse des osmotischen Drucks weniger wichtig als der durch den natürlichen Überlagerungsdruck erzeugte Abstand  $d$ . Für die aus einem unbehinderten Quellvorgang sich ergebende Volumenvergrösserung hat hingegen die Menge der Teilchen und Elementarschichten eine grössere Bedeutung als deren ursprünglicher Abstand.

Als quellfähiges Tonmineral kommt in der Molasse nur der Smektit vor. Die Tonfraktion der Mergel enthält zwischen 10% und 40% (Gewichtsprozente) Smektit, was einer spezifischen Oberfläche von bis zu 350 m<sup>2</sup>/g gleichkommt. Der Rest des Tonanteils wird aus den Mineralien Kaolinit, Illit und Chlorit gebildet. Die Hauptkomponenten der Molassemergel sind Karbonat, Quarz und Ton, wobei sich das Mischverhältnis meistens innerhalb weniger Zentimeter bis Dezimeter eines Profils ändert. Für die Beurteilung der Quellfähigkeit eines Schichtpakets ist es deshalb wichtig, eine genügende Anzahl Proben zu untersuchen.

Bei unseren bisherigen Untersuchungen hat es sich gezeigt, dass Mergel mit weniger als 20 bis 25% Tonfraktion eine kleine Quellfähigkeit besitzt. Mergel mit mehr als 50% Tonfraktion kommen selten vor, haben aber eine grosse Quellfähigkeit. Bei der Abschätzung der Quellfähigkeit einer Gesteinsprobe mit Hilfe der mineralogischen Zusammensetzung kann Bild 1 einen ersten, groben Hinweis geben. Dabei sollte der Überlagerungsdruck auch mitberücksichtigt werden.

## Quelldruck und Quellmass

Im allgemeinen wird aber die Quellfähigkeit einer Gesteinsprobe nicht – oder nicht nur – mit Hilfe einer minera-

Bild 1. Mineralogische Zusammensetzung und Quellfähigkeit für Molassemergel

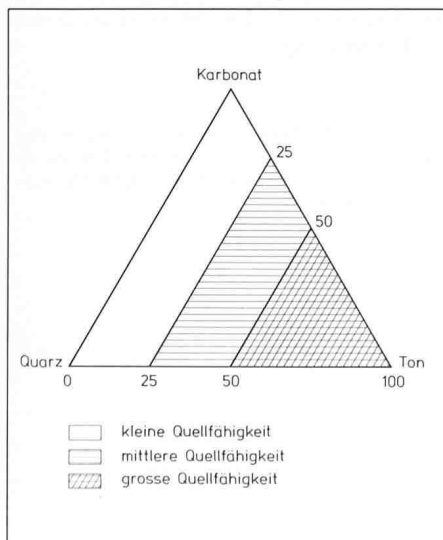


Bild 2. Quelldruck und Quellmass von 175 Mergelproben aus 10 Standorten

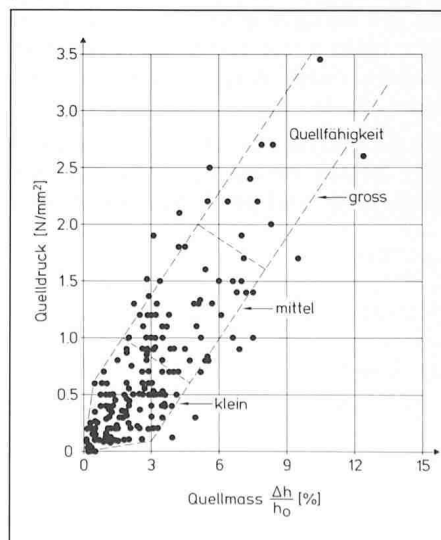
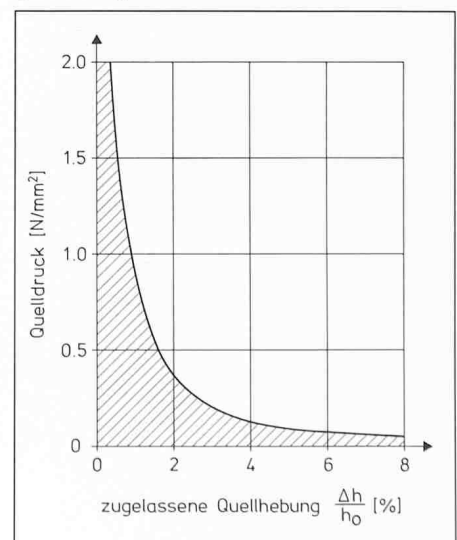


Bild 3. Quelldruck in Funktion einer zugelassenen Quellhebung



logischen Untersuchung beurteilt. Besonders bei Gesteinsproben guter Qualität hat es sich als einfacher und schneller erwiesen, gewisse Quellparameter direkt zu messen. Es handelt sich vor allem um die Parameter Quelldruck und Quellmass; in einzelnen Fällen wird auch der Quelldruck in Funktion einer zugelassenen Quellhebung bestimmt.

Aus versuchstechnischen Gründen können diese Werte nicht am gleichen Probekörper gemessen werden. Für die Beurteilung der Quellfähigkeit einer Gesteinsprobe braucht es deshalb 3 Probekörper. Sollen noch der Anlieferungswassergehalt, das Raumgewicht und das spezifische Gewicht zur Berechnung der Sättigungszahl ermittelt werden, müssen 5 Probekörper zur Verfügung stehen. Bei der Inhomogenität der Molassegesteine muss deshalb eine gewisse Inkohärenz der Ergebnisse in Kauf genommen werden. Die Versuche werden an zylindrischen Probekörpern mit einer Dicke von 3 cm durchgeführt. Die Schichtung sollte dabei möglichst senkrecht zur Zylinderachse sein.

Für die Bestimmung des Quelldrucks wird der Probekörper in eine Art Oedometer so eingebaut, dass eine radiale Ausdehnung nicht möglich ist [2]. Der Quellprozess beginnt mit der Zugabe von Wasser, und der Probekörper dehnt sich in axialer Richtung aus. Mittels steigendem Gegendruck wird die Ausdehnung in kleinen Stufen immer wieder rückgängig gemacht. Als *Quelldruck* wird der maximale Druck verstanden, welcher notwendig ist, um die ursprüngliche Probenhöhe zu erhalten. Der Versuch dauert bei Molassemergel etwa 14 Tage, wobei ungefähr 70% des Endwertes nach 24 Stunden erreicht wird.

Bei der Bestimmung des Quellmasses kann der Probekörper allseitig unbehindert quellen. Normalerweise wird sowohl die radiale als auch die axiale Ausdehnung gemessen. Die grösste axiale Ausdehnung in Prozenten der ursprünglichen Probenhöhe wird als *Quellmass* bezeichnet. Der Versuch dauert etwa 30 Tage, wobei auch hier ungefähr 70% des Endwertes nach 24 Stunden erreicht wird. Die radiale Ausdehnung, welche parallel zur Schichtung gemessen wird, erreicht höchstens 50% der axialen Quellhebung.

In Bild 2 sind die Quellparameter von 175 Mergelproben eingetragen. Die Proben stammen aus Kernbohrungen

an 10 Standorten der mittelländischen und der subalpinen Molasse zwischen Bern und Bregenz, hauptsächlich aus der Oberen Süsswassermolasse. Die Entnahmetiefen variierten zwischen 15 und 300 m.

Die relativ grosse Streubreite der Ergebnisse ist nicht nur durch die Versuchsdurchführung und die unterschiedliche Qualität der Proben bedingt, sondern auch durch den von einem Standort zum anderen stark wechselnden Gehalt des quellfähigen Tonminerals Smektit und durch die sehr unterschiedlichen Entnahmetiefen der Proben. Die Darstellung erhebt auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll in erster Linie einen Überblick über die Grössenordnung der Quellparameter vermitteln. Da das Quellmass viel einfacher zu bestimmen ist als der Quelldruck, liegt der Wert der Darstellung ebenfalls darin, dass für ein gemessenes Quellmass ein minimaler und ein maximaler Quelldruck herausgelesen werden kann. Die Wahl zwischen unterem und oberem Wert wäre dann vom Überlagerungsdruck abhängig.

In Bild 2 sind drei Bereiche verschiedener Quellfähigkeit ausgeschieden. Die Bereiche kleine, mittlere und grosse Quellfähigkeit entsprechen der Einteilung in Bild 1 und sollen den Zusammenhang zwischen mineralogischer Zusammensetzung, Überlagerungsdruck und Quellparameter der Molassemergel darlegen.

### Lastabhängige Quellung

Wie erwähnt, sind Schäden durch quellfähige Gesteine auch in neueren Untertagebauten vorgekommen. Betroffen sind vor allem Bauwerke mit flacher Sohle oder mit einem schwach bemessenen Sohlgewölbe von grossem Radius. Eine Schwierigkeit bei der Bemessung der Stützmassnahmen besteht oft darin, dass sich aus den Laborversuchen Quelldrücke ergeben, die unsinnig hoch erscheinen.

Aus der Definition des Quelldrucks geht hervor, dass dieser einen Maximalwert darstellt, welcher nur in seltenen Fällen für die Bemessung verwendet werden soll [3]. Die theoretischen Überlegungen haben gezeigt, dass der Quelldruck stark vom Abstand zwischen den Tonteilchen und zwischen den Elementarschichten im Kristall des quellfähigen Tonminerals abhängig ist. Eine zu-

gelassene Quellhebung wird also den Quelldruck stark herabsetzen.

Diese Tatsache kann bei der Bemessung ausgenutzt werden, wobei als Entscheidungshilfe der *lastabhängige Quellversuch* dient. Der Versuch wird im Oedometer durchgeführt. Nach einem Lastzyklus wird auf der höchsten Laststufe der Probe Wasser zugegeben und die sich im Verlaufe der Zeit einstellende Quellhebung gemessen. Wenn der Quellvorgang abgeschlossen ist, wird auf die nächste Laststufe entlastet, wodurch die Probe erneut zu quellen beginnt. Der Versuch wird in dieser Art bis auf die völlige Entlastung durchgeführt und dauert im allgemeinen etwa 4 Monate. Der Versuch kann auf verschiedene Weise ausgewertet werden und liefert, nebst dem maximalen Quelldruck [3] und dem Quelldruckäquivalentwert [4], die in Bild 3 enthaltene Funktion des Quelldrucks in Abhängigkeit der zugelassenen Quellhebung. Aus der Darstellung geht hervor, dass schon eine zugelassene Quellhebung von ein bis zwei Prozent eine deutliche Herabsetzung des Quelldrucks verursacht.

Alle bisher bestimmten Quelldruck-/Quellhebungskurven liegen im schraffierten Bereich von Bild 3. Bei einem bekannten maximalen Quelldruck und Quellmass ist deshalb die überschlagsmässige Bestimmung der Entlastungsfunktion durch Verschieben der Kurve, welche das schraffierte Feld begrenzt, möglich.

### Literatur

- [1] Madsen, F.T.: Quelldruckmessung an Tongesteinen und Berechnung des Quelldrucks nach der DLVO-Theorie. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich, Nr. 108. (1976)
- [2] Madsen, F.T.: Determination of the Swelling Pressure of Claystone and Marlstones using Mineralogical Data. 4th Int. Congr. Rock Mech., Montreux (1979), S. 237-244
- [3] Kovari, K., Madsen, F.T., Amstad, Ch.: Tunnelling with yielding support in swelling rocks. Proc. Int. Symp. Weak Rock, Tokyo (1981), S. 1019-1026
- [4] Huder, J., Amberg, G.: Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. «Schweiz. Bauzeitung» 43 (1970), S. 975-980

Adresse der Verfasser: Dr. Fritz Madsen; Dr. Günter Kahr, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.