**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
**Band:** 114 (1996)
**Heft:** 18

**Artikel:** Quelldruckentwicklung in Ton- und Sulfatgesteinen
**Autor:** Vögtli, Beat / Jordan, Peter
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-78957

**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:** 12.12.2025

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

Beat Vögtli, Basel, Peter Jordan, Solothurn

# Quelldruckentwicklung in Ton- und Sulfatgesteinen

**Im Rahmen der geologisch-geotechnischen Vorabklärungen für den Bau des Adlertunnels wurde aus den Sondierbohrungen umfangreiches Probenmaterial entnommen und im Labor auf die Quellfähigkeit hin untersucht. Sowohl bei der Probennahme als auch bei der Versuchsdurchführung wurden dabei Normen angewandt, die den in Ausarbeitung befindlichen Empfehlungen für normierte Messmethoden bei quellfähigen Gesteinen entsprechen [1].**

Als Quellen werden im folgenden zeitabhängige, chemisch-physikalische Prozesse verstanden, die unter Wasseraufnahme zu einer Volumenvergrösserung oder aber zum Aufbau eines zusätzlichen Gebirgsdruckes führen [2]. Dabei kann grundsätzlich zwischen Tonquellen und Sulfatquellen unterschieden werden.

Für die Interpretation der Laborergebnisse konnten erstmals Konzepte für den Quellprozess in Sulfatgesteinen beigezogen werden, die von den Autoren innerhalb eines parallel laufenden Forschungsprojektes unter der Leitung von *L. Hauber,* Basel, im Auftrag des Bundesamtes für Strassenbau/Sektion Umwelt und Forschung erarbeitet wurden [2].

(1) zeigt die Quellprozesse, so wie sie sich nach jüngsten Forschungen präsentieren.

## Tonquellen

Das Quellen von Ton ist gänzlich auf dasjenige der mikroskopisch kleinen Tonminerale (Kristalle) zurückzuführen. Nach Madsen/Müller-Vonmoos [3] beruht dieses Quellen der Tonminerale auf der Hydratation der austauschbaren Kationen in den Zwischenschichten der quellfähigen Tonminerale einerseits und der nachgeschalteten osmotischen Quellung andererseits. Diese wiederum ist durch grosse Unterschiede in der Ionenkonzentration an der Oberfläche der Tonminerale und in der umgebenden Lösung bedingt. Die typische Schichtstruktur der Tonminerale wird bei diesen Prozessen aufgeweitet, aber nicht zerstört (1a). Der Quellprozess ist bei der Aufwendung eines genügend grossen Gegendruckes reversibel. Dieser Gegendruck stimmt (zumindest theoretisch) mit dem Quelldruck betragsmässig überein, eine Beobachtung, die für die Versuchsanordnung bei Experimenten an Tonproben wichtig ist. Da das Tonquellen eine Hydratation ist, kommt der Wertigkeit der Zwischenschicht wie der angelagerten Kationen eine zentrale Bedeutung zu.

## Sulfatquellen

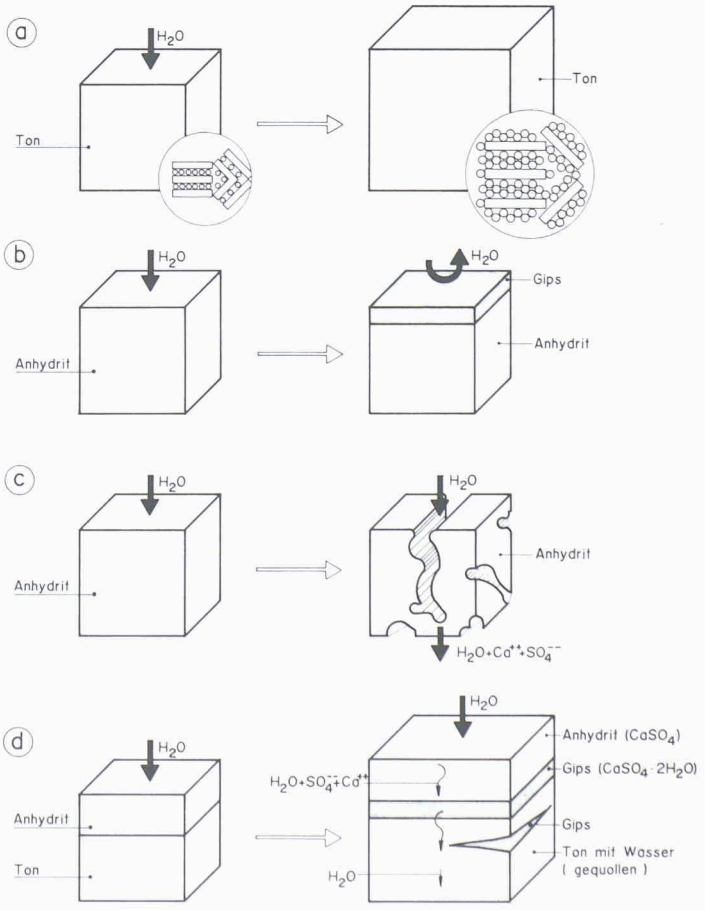
Das Quellen von ursprünglich anhydritführendem Fels hängt mit der Volumenzunahme des Gipses zusammen, der aus eben diesem Anhydrit durch Hydratation entstanden ist. Gips, chemisch $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, beansprucht etwa 60% mehr Volumen als der Anhydrit ($CaSO_4$) alleine oder rund 10% weniger als der Anhydrit und das Wasser, aus denen er hervorgegangen ist. Die Umwandlung von Anhydrit zu Gips findet jedoch nicht analog zum Tonquellen durch Aufweitung der Kristallstruktur, sondern durch Lösung des Anhydrits und Ausfällung des unter entsprechenden Bedingungen schlechter löslichen Gipses statt. Bei 25°C beträgt die Löslichkeit von Gips 2,4 g/l, diejenige von Anhydrit jedoch 2,7 g/l. Das zugeführte Wasser muss also eine kritische Konzentration erreichen, bevor Gips ausfallen kann; im Unterschied zum Ton, wo – so lange der Ton noch quellfähig ist – jegliches zutretende Wasser sofort zum Quellen beiträgt. Es lassen sich dabei zwei Extreme von Anhydrit-Gips-Quellen beschreiben (1b und 1c):

1b:

- Das Wasser dringt bis zu einer geringen Tiefe in den Anhydrit ein, stagniert dort und erreicht die kritische Konzentration. Die Folge ist der typische, meist hauchdünne Gipssaum, der das Gestein durch Verstopfen der Poren vor einer weiteren Hydratation schützt.

1c:

- Das Wasser kann aufgrund einer grösseren Porosität oder einer Klüftung den Anhydrit rasch durchdringen. Dabei wird der Anhydrit zwar gelöst, die kritische Konzentration für die Gipsfällung jedoch nicht erreicht. Durch den Abtransport des gelösten Sulfates kommt es zur Ausbildung eines Anhydritkarstes [4].




1
Schematische Darstellung des Quellvorganges im Ton und im Sulfat-Ton-Mischgestein

In beiden Fällen tritt kein nennenswertes Quellen und somit auch kein Quelldruck auf. Die erste Situation kann auch im Labor nachvollzogen werden, wo reine Anhydrite auch bei langjährigen Versuchen nicht bzw. kaum quellen [5].

Ton-Anhydrit-Mischgesteine zeigen demgegenüber ein ausgeprägtes Quellverhalten. Zwar führen einige Autoren [6,7,8] das Quellpotential ausschliesslich auf das Quellen der Tonminerale zurück, doch lässt sich nachweisen, dass Mischgesteine deutlich stärker quellen als anhydritfreie Tongesteine [9,10]. Das Quellen der Mischgesteine hält zudem deutlich länger an (Jahre bis Jahrzehnte) als dasjenige der reinen Tone (Stunden bis Tage). Der Umwandlungsprozess von Anhydrit zu Gips hat hier also nachweislich einen verstärkenden Effekt auf das Quellen des sulfathaltigen Felsens.

Es blieb lange ein Rätsel, warum die Neigung zum Quellen bei reinen Anhydriten kaum, bei Anhydriten in Gegenwart von Ton (Mischgesteine) jedoch sehr ausgeprägt auftritt. Jüngste Untersuchungen in optischen und Rasterelektronenmikroskopen wie auch mineralogische und thermodynamische Überlegungen haben nun mehr Licht in diesen Prozess gebracht. Der Umstand, dass die Vergipsung durchwegs in oder entlang von tonigen Einschlüssen und Zwischenlagen beginnt und erst später von dort aus in die anhydritischen Gesteinsbereiche vordringt, bezeugt die zentrale Rolle des Tones für die Vergipsung (Gipsneubildungen und somit Gipsquellen findet sich übrigens auch in ursprünglich sulfatfreien Tongesteinen). Es ist offensichtlich die osmotische Wirkung der Tonkristalle, die die zirkulierenden Lösungen bindet, ihnen gezielt Wasser entzieht und so zu einer Übersättigung an Kalzium- und Sulfat-Ionen führt (1d). Einmal entstandene Gipskristalle wachsen (in der Regel sphärenförmig) in das Nachbargestein. Der Quelldruck wird nicht eigentlich durch die Umwandlung des Anhydrits, sondern durch das Auskristallisieren des Gipses verursacht. Korrekterweise müsste man - zumindest im mikroskopischen Bereich - also von einem Kristallisationsdruck und nicht von einem Quelldruck sprechen. Das «Quellen» der Sulfate entspricht vom Prozess her weit mehr dem vom Bauingenieur ebenfalls gefürchteten Aufsprengen von Betonbauwerken durch Tausalze als dem Tonquellen, mit dem es jedoch kausal eng verbunden ist. Insofern ist die Anhydritumwandlung unter Umgebungsbedingungen auch nicht reversibel. Im Hinblick auf ein Tunnelbauwerk sind folgende Erkenntnisse von Interesse:

- Reiner, unzerrütteter Anhydrit ist stabil (1b).
- Stark zerrütteter, tonarmer Anhydrit wird bei starker Wasserzirkulation ausgelaugt. Es ist eher mit gebrächem als mit quellendem Gebirge zu rechnen (Verkarstung) (1c).
- Intakte tonreiche Anhydrite zeigen eine ausgeprägte Neigung zum Quellen (1d).

Die Gipsbildung wird ebenfalls durch stagnierende Wässer und durch periodische Austrocknung gefördert. Wichtig ist die Feststellung, dass im spezifischen Einzelfall meist eine Kombination dieser Szenarien auftritt. So kann eine mässige Wasserzirkulation in tonführendem Anhydritfels einen Teil des überschüssigen Kalziumsulfates wegführen, ohne aber die Gipsbildung ganz zu verhindern. Es entsteht wohl ein dichter Gipsfels, die Quellhebung und die Quelldrücke bleiben aber moderat. In der Literatur werden sogar Anhydrit-Gips-Umwandlungen ohne Volumenzunahme beschrieben [8,11,12].

Die Darstellung in (1d) zeigt im übrigen, dass der Gips nicht unbedingt an der Stelle auskristallisiert, wo Anhydrit vorhanden ist, sondern dort, wo zirkulierende Sulfatwässer die kritische Sättigung erreichen. Dies kann auch in tonreichen Abfolgen fernab der Sulfate der Fall sein. Für eine genaue Abschätzung der zu erwartenden Quellhebungen und -drücke sind also neben Laborexperimenten auch Überlegungen und allenfalls auch Modellierungen zur Feinstratigraphie und zum hydrogeologischen Umfeld des Bauwerkes notwendig.

## Versuchsprogramm

Um die im Nahbereich des Tunnels zu erwartenden Quelldrücke quantitativ erfassen zu können, wurden den für die geologischen Vorabklärungen abgeteuften Sondierbohrungen des Adlertunnels zahlreiche Kernproben für Laborexperimente entnommen. Da der Erhalt der natürlichen Bergfeuchtigkeit im Probenmaterial für die Aussagekraft von Quellversuchen im Labor von entscheidender Bedeutung ist, erfolgte sowohl der Bohrvorgang als auch die Probenbehandlung unter Beachtung der Empfehlungen der ISRM, Comission on Swelling Rock, für normierte Messmethoden an quellfähigem Gestein [2].

Im Rahmen der Laborversuche wurde an allen Gesteinsproben jeweils die maximale Quelldruckentwicklung bei vollständig behinderter Dehnung sowie die unbehinderte Quelldehnung gemessen. Dabei kamen konventionelle Quellödometer zur Anwendung, aber auch solche, die die Messung von axialen und radialen Quelldrücken erlauben.
Die Gesteine gemäss (2) wurden auf ihr Quellpotential hin untersucht.

Um Zusammenhänge zwischen der Gesteinszusammensetzung und dem Quellpotential aufzuzeigen, wurden von jeder Probe auch Gesteinsdünnschliffe hergestellt und, wo notwendig, der Karbonatgehalt und die tonmineralogische Zusammensetzung bestimmt.

## Resultate und Folgerungen

Die Resultate der im Rahmen der geologisch-geotechnischen Vorabklärungen durchgeführten Quellversuche sind in (3)

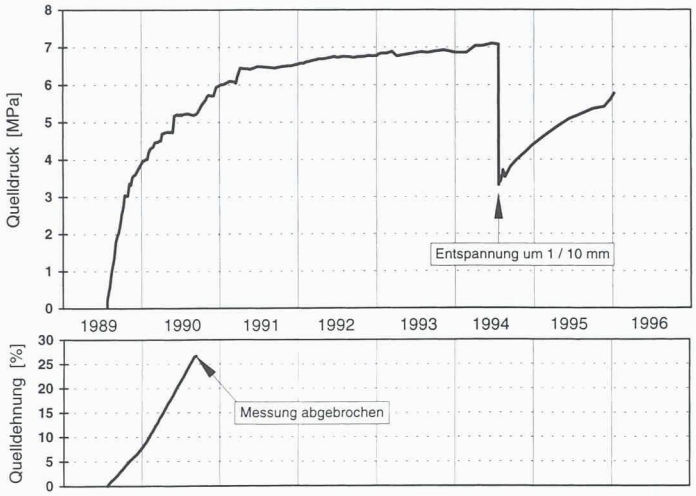
| Gestein | Anzahl Proben | |
|---|---|---|
| Gipskeuper | 8 | Sulfatquellen |
| Obere Bunte Mergel | 6 | Tonquellen |
| Rhät | 1 | Tonquellen |
| Obtususton | 5 | Tonquellen |
| Opalinuston | 6 | Tonquellen |

2
Untersuchte Gesteinsproben

| Geologische Formationen | Raumgewicht [kN/m³] | Wassergehalt [%] | max. Quelldruck [MPa] | | max. Quelldehnung [%] | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Mittelwert | Gabel | Mittelwert | Gabel |
| Sulfatische Gesteine: | | | | | | |
| Gipskeuper* | 24.6 | 4.83 | 3.16 | 0.31-7.10 | 30.08 | 17.6 - 45 |
| Tongestein: | | | | | | |
| Obere Bunte Mergel | 25.65 | 4.28 | 0.20 | 0.10-0.36 | 0.66 | 0.62- 1.01 |
| Rhät | 23.20 | 4.31 | 1.23 | - | 4.90 | - |
| Obtususton | 24.70 | 4.65 | 0.72 | 0.20-1.15 | 5.60 | 2.60-13.80 |
| Opalinuston | 24.90 | 6.49 | 0.69 | 0.47-1.16 | 1.52 | 1.37- 1.67 |

*unvergipste Zone

3
Resultate der Quellversuche




4
Probe W28, Gipskeuper: Quelldruckentwicklung

dargestellt (Mittelwerte, Streubereiche). Die Ergebnisse der Quellversuche an Tongesteinen sind noch nicht abschliessend interpretierbar. Insbesondere die stark unterschiedlichen Verhältnisse Quelldruck - Quelldehnung in den verschiedenen Schichten bedürfen noch zusätzlicher Erklärungen. Grundsätzlich ist zu erkennen, dass das Quellpotential des Gipskeupers erwartungsgemäss wesentlich grösser ist als dasjenige der tonigen Gesteine. Der an der Gipskeuperprobe W 28 bestimmte Wert von über 7 MPa liegt um einen Faktor 5 höher als der grösste Messwert für den Opalinuston.

Ebenfalls von grosser Bedeutung ist der bereits erwähnte Unterschied im zeitlichen Ablauf des Quellvorganges. Die untersuchten Tonproben erreichten die Maximalwerte innert weniger Tage und besassen anschliessend kein Quellpotential mehr, d.h. der Quellvorgang war abgeschlossen. Demgegenüber dauerte der Aufbau des maximalen Quelldruckes im Gipskeuper über drei Jahre (4). Anschliessend blieb der erreichte Wert konstant. Nach einer Versuchsdauer von rund sechs Jahren konnte mit einer einfachen Abänderung der Versuchsanordnung nachgewiesen werden, dass zur Entwicklung des maximalen Quelldrucks in Sulfatgesteinen nur geringe Mengen Anhydrit zu Gips umgewandelt werden müssen. Für den Nachweis wurde die Einspannung der Probe um 1/10 mm (!) gelockert, wodurch sich der gegenüber dem Gerät aufgebaute Quelldruck um über die Hälfte reduzierte. Schon nach kurzer Zeit jedoch begann er sich erneut aufzubauen. Die Extrapolation des Kurvenverlaufes zeigt, dass die Probe in absehbarer Zeit erneut einen hohen Quelldruck erreichen wird.

Anhand der neu formulierten, allgemein gültigen Gesetzmässigkeiten für die Quellprozesse in Ton- und Sulfatgesteinen lassen sich die im Labor gemessenen Quelldruck- und Quelldehnungswerte realitätsbezogen interpretieren. Dadurch wird es auch möglich, das Phänomen Quelldruck neben den andern Gesteinsparametern als Berechnungsgrösse für die Tunneldimensionierung zu berücksichtigen. So sind Quelldrücke, die bei vollständiger Masshaltung der Probe im geschlossenen wässrigen System gemessen wurden, als Maximalwerte zu betrachten, weil überschüssiges Sulfat nicht abtransportiert werden kann. Maximale Quelldrücke, wie sie im Labor gemessen werden, können auch unter natürlichen Bedingungen lokal durchaus auftreten und müssen somit bei der Dimensionierung der Tunnelauskleidung entsprechend berücksichtigt werden. Zudem zeigen die Laborversuche klar, dass bereits die Umwandlung geringer Mengen Anhydrit in Gips genügt, um unter idealen Bedingungen einen gesteinsspezifischen maximalen Quelldruck aufzubauen. In Sulfatgesteinen kann das Quellpotential somit über lange Zeit (Jahrzehnte und länger) aktiv bleiben. Grossräumig, d.h. bezogen auf die vom Tunnel durchfahrene Gesteinsstrecke, werden die entstehenden Quelldrücke aufgrund der natürlichen Variation des hydrogeologischen Regimes im Gestein sicher unterhalb der im Experiment bestimmten Maximalwerte liegen.

Adresse der Verfasser:
*Beat Vögtli*, Dr. phil. II, Geologe, Geotechnisches Institut AG, Hochstrasse 48, 4002 Basel, und *Peter Jordan*, PD Dr. sc. nat., Kantonsgeologe, Amt für Wasserwirtschaft Kt. Solothurn, Werkhofstrasse 65, 4500 Solothurn

## Literatur

[1]
ISRM, Commission on Swelling Rock (1993): Suggested Methods for Laboratory Testing of Rocks containing Clay and Anhydrite (Entwurf)

[2]
*Madsen, F.T., Hauber, L., Jordan, P., Vögtli, B.* (1995): New Investigations on Swelling Rocks in the Bölchen Tunnel, Switzerland: 8th International Congress on Rock Mechanics, Spt. 25 - 30 1995

[3]
*Madsen, F.T., Müller-Vonmoos, M.* (1988): Das Quellverhalten der Tone, IGB-Tagung über Tonmineralogie und Bodenmechanik

[4]
*Priesnitz, K.* (1969): Das Karstrelief des südlichen Harzvorlandes im Lichte neuer Arbeiten zum System $CaSO_4$ - NaC1-$H_2O$. Abh. 5. int. Kongr. Speläol. Stuttgart

[5]
*Madsen, F.T. Nüesch, R.* (1990): Langzeitquellverhalten von Tongesteinen und tonigen Sulfatgesteinen: Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, ETHZ

[6]
*Anagnostou, G.* (1992): Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quellfähigem Gebirge. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich, Bd. 201

[7]
*Anrich, H.* (1958): Zur Frage der Vergipsung in den Sulfatgesteinen des Mittleren Muschelkalkes und des Gipskeupers in SW Deutschland. - Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, Bd. 106, Seiten 293 - 338

[8]
*Krausse, H.* (1977): Zur Geologie und Statik des Tunnelbaus in Baden-Württemberg unter besonderer Berücksichtigung der Keupertunnel. Jh. geol. Landesamt, Baden-Württemberg 19, 35 - 57

[9]
*Nagel, D.* (1986): Sohlhebungen in den Keupertunnel von Baden-Württemberg. In: Tunnelbau (Hrsg. L. Wichter). - Kontakt & Studium, Bd. 184, Bauwesen. Expertverlag, Sindelfingen

[10]
*Steiner, W.* (1993): Swelling Rock in Tunnels: Rock Characterization, Effect of Horizontal Stresses and Construction Procedures: Int. J. Rock, Mech. Min. Sci. + geomech. Abstr., Vol. 30, No. 4, pp 361 - 380

[11]
*Holiday, D.W.* (1970): The Petrology of secondary gypsum rocks; a review; J. Sediment. Petrol., V.40, p. 734 - 744

[12]
*Jordan, P.* (1994): Evaporite als Abscherhorizonte: Eine gefügekundlich-strukturgeologische Untersuchung am Beispiel der Nordwestschweizer Trias. Beitr. geol. Karte der Schweiz (N.F.) 164