

Tonminerale und Sulfate als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen. Ursachen und Wirkungen des Quellvorganges

Les minéraux argileux et les sulfates – origine de
pressions développées par des roches.
Origine et effets du processus de gonflement

Clay minerals and Sulfates as source of swelling
of sediments.
Reasons and effects of swelling

**Geologisch-palaeontologisches Institut
der Universität Basel, Abt. Praktische Geologie**

**L. Hauber, Prof. Dr. phil.
P. Jordan, PD, Dr. sc. nat.
F. Madsen, PD, Dr. sc. nat.
R. Nüesch, Dr. sc. nat.
B. Vögtli, Dr. phil.**

Mit Beiträgen von A. Flückiger und L.S.C. Ko

**Forschungsauftrag 55/92 und 52/96 (Nr. 4306.01 und 4306.02) auf An-
trag des Bundesamtes für Strassenbau (ASTRA 1996/039)**

Oktober 2005

**Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation (UVEK)
Bundesamt für Strassen ASTRA**

**Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie
et de la communication (DETEC)
Office fédérale des Routes (OFROU)**

Tonminerale und Sulfate als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen. Ursachen und Wirkungen des Quellvorganges

Les minéraux argileux et les sulfates – origine de
pressions développées par des roches.
Origine et effets du processus de gonflement

Clay minerals and Sulfates as source of swelling
of sediments.
Reasons and effects of swelling

Geologisch-palaeontologisches Institut
der Universität Basel, Abt. Praktische Geologie

**Lukas Hauber, Peter Jordan, Fritz Madsen,
Rolf Nüesch und Beat Vögli**

mit Beiträgen von Anette Flückiger und Leslie S.C. Ko

Forschungsauftrag 55/92 und 52/96 (Nr. 4306.01 und 4306.02)
ASTRA 1996/039

Basel, Oktober 2005

Aktuelle Adressen der Autoren:

Hauber, Lukas, Prof. Dr. phil., Schützenstrasse 17, 3052 Zollikofen

Jordan, Peter, PD, Dr. phil., Rainstrasse 33, 4528 Zuchwil

Madsen, Fritz, PD, Dr. sc. nat., Rütistrasse 5, 8134 Adliswil

Nüesch, Rolf, Dr. sc. nat., Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Technische Chemie, Wasser und Geotechnologie (ITC-WGT), Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe

Vögtli, Beat, Dr. phil., Geotechnisches Institut AG, Hochstrasse 48, 4002 Basel

Inhaltsverzeichnis	Seite
Zusammenfassung	5
Abstract	5
Résumé	6
Vorwort	7
1. Einleitung	9
2. Tonquellung	11
2.1 Allgemeines	11
2.2 Theorie der Tonquellung	12
2.2.1 Aufbau der Tonminerale	12
2.2.2 Eigenschaften der Tonminerale	14
2.2.3 Wassergehalt	15
2.2.4 Osmotische Quellung	16
2.2.5 Beobachtungen zum zeitlichen Quellverlauf	20
2.3 Bestimmungsmethoden	20
2.3.1 Quellversuche	20
2.3.2 Wasser	21
2.3.3 Oberfläche	22
2.4 Fallbeispiele	22
2.4.1 Allgemeines	22
2.4.2 Ermittlung des Quellpotentials während der Projektierungsphase	22
2.4.3 Bestimmung des Quellpotentials während des Baus an bergfrischem Material	23
2.4.4 Einfluss der Entnahmemethode auf das Quellpotential	24
2.4.5 Abplatzungen im Firstbereich	25
2.4.6 Der Einfluss von mineralisiertem Wässern auf das Quellverhalten	27
2.4.7 Vergleich verschiedener Daten zu Quellhebungen im Betriebszustand (In situ- und Labormessungen)	29
2.4.8 Prognosen erwarteter Quelldrucke auf der Basis von Quellhebungsdaten	32
2.4.9 Auswirkung einer Vorbelastung auf das Quellverhalten	34
2.5 Schlussbemerkungen zur Tonquellung	35
3. Quellen von Sulfatgestein	37
3.1 Einleitung	37
3.2 Definition, Auftreten und Ursprung der Sulfatgesteine	37
3.3 Das System Anhydrit-Wasser-Gips	38
3.3.1 Die Anhydrit-Gips-Umwandlung in industriellen Prozessen	38

3.3.2	Volumen-Zu- oder Abnahme, offenes oder geschlossenes System?	39	
3.3.3	Problematik des Wasserzutritts	40	
3.4	Das System Ton-Anhydrit-Wasser-Gips		41
3.4.1	Tonminerale und Gipsbildung	41	
3.4.2	Tonquellen oder Gipswachstum als Ursache für Quellvorgänge	43	
3.5	Vergipsung unter natürlichen Bedingungen		46
3.5.1	Beginn der natürlichen Vergipsung in den Trias-Evaporiten der Nordschweiz.	46	
3.5.2	Sukzessive Stadien der natürlichen Vergipsung	51	
3.5.3	Gipsspiegel, Anhydritspiegel und Vergipsungsfront	51	
3.6	Überlegungen zur Vergipsung im Umfeld von Untertagebauten		52
3.6.1	Wasserzirkulation und Bergwasserspiegel	52	
3.6.2	Eindringen von Tunnelwasser in das umgebende Gestein	53	
3.6.3	Längsdrainage und Vergipsung	55	
3.6.4	Zwei Modelle der Vergipsung	56	
3.7	In-situ-Befunde zur Vergipsung im Belchen Autobahntunnel (N 2 / A 2)		62
3.8	Quelldruck- und Quellmass-Experimente		68
3.8.1	Möglichkeit und Grenzen von Experimenten an tonhaltigen Sulfatgesteinen	68	
3.8.2	Wassergehaltsbestimmung	69	
3.8.3	Resultate der Quellversuche	70	
3.8.4	Diskussion der Resultate	73	
3.8.5	Schlussfolgerungen	73	
4.	Zusammenfassung und Empfehlungen		75
4.1	Unterschiedliche Prozesse		75
4.2	Ähnliche aber nicht identische Prozessabläufe		76
4.3	Wasserzutritt / Entlastung		77
4.4	Experiment und Prognose		77
4.5	Mögliche Massnahmen zur Verhinderung des Quellens		79
4.6	Empfehlungen für die Projektierung von Untertagebauten		80
4.7	Ausblick		81
	Anhang I: Literaturverzeichnis		83
	Anhang 2: Quellennachweis		89

Zusammenfassung

Bei Untertagebauten treten in den Triasgesteinen der NW-Schweiz und Süddeutschlands oft heftige, bautechnisch schwierig zu beherrschende Quellerscheinungen auf. Diese Studie zeigt Ursachen und Gesetzmässigkeiten auf und liefert Hinweise zur Schadensbegrenzung.

In tonhaltigen Gesteinen ist das Quellen auf die Einlagerung von Wasser in das Schichtgitter quellfähiger Tonminerale zurück zu führen („Tonquellen“). Deren Anteil am Gesamtgestein bestimmen das Quellmass- bzw. das Quelldruckpotential, welches bis 2,5 – 3 MPa betragen kann. Der Vorgang ist reversibel.

Enthält das Gestein zusätzlich Anhydrit, wird der Quellvorgang durch das Auskristallisieren von Gips erheblich verstärkt („Gipsquellen“). Es können Drücke bis 7 MPa auftreten. Tonfreie Anhydritgesteine quellen demgegenüber kaum. Quellende Tonminerale sprengen das dichte Anhydritgestein, erhöhen die Wasserwegsamkeit und somit die Sulfatlösung. Ihre retardierende und adsorbierende Wirkung begünstigt zudem die Gipsfällung. Das Gipsquellen ist unter natürlichen Bedingungen wie auch bei felsmechanischen Laborversuchen irreversibel.

Entscheidend für den Fortgang von Ton- und Gipsquellen ist der Umfang des Wasserzutritts. Verschiedene Indizien zeigen, dass nicht nur – wie bisher angenommen – das aus dem Tunnel versickernde, sondern auch das dem Tunnel zufließende Wasser eine Rolle spielt. Zukünftig ist deshalb vermehrt der Drainwirkung von Bauwerk und Sondierungen Beachtung zu schenken.

Anhand von petrographischen und strukturellen Untersuchungen kann das Quellpotential von Ton- und Anhydritgesteinen grob abgeschätzt werden.

Abstract

In subsoil constructions in the Triassic rocks of north-western Switzerland and southern Germany, swelling phenomena are common, often quite severe, and difficult to manage technically. This study demonstrates causes and repeatedly observed effects and offers suggestions for limiting deleterious consequences.

In rocks containing a sizable amount of clay minerals, swelling is due to the incorporation of water in the crystal lattice of specific clay minerals (“swelling clay minerals” as e. g., Smectite or Montmorillonite). The partial amount of these minerals in the total rock determines the degree of swelling or, alternatively, the pressure potential which may amount to up to 2.5-3 MPa. This process is reversible.

If the rock, in addition, contains anhydrite, swelling is considerably augmented because of the crystallization of gypsum (“gypsum swelling”). As a result, pressures of up to 7 MPa may be attained. Rocks consisting of pure anhydrite that is devoid of clay, as a rule, do not exhibit swelling. If, however, clay minerals are present, their swelling may crack the otherwise dense anhydrite with the ensuing accessibility for water capable of dissolving the sulfates. Moreover, due to their ability to retard water percolation because of their adsorptive power they help increase gypsum crystallization. Gypsum swelling is irreversible under natural conditions and in experiments performed in rock mechanics laboratories.

Of decisive importance for continuous clay and gypsum swelling is the amount of water that may have access to the rocks. There are indications that not only water derived from the tunnel, as assumed in the past, but also water percolating towards the tunnel plays a role. Therefore, in the future more attention than hitherto ought to be paid to the draining potential of constructions and drillholes.

Résumé

Lors de constructions souterraines dans les roches triasiques de la Suisse septentrional et de l'Allemagne du sud, on est souvent confronté à des phénomènes de gonflement violents et difficiles à maîtriser. Cette étude met en évidence les causes et les règles des processus et fait des propositions pour réduire les dégâts.

Le gonflement des roches argileuses provient de l'adsorption d'eau par des structures en feuillets des minéraux gonflants (gonflement des argiles). Leur pourcentage dans la roche entière détermine le degré de gonflement pouvant atteindre 2,5 à 3 MPa. Le processus est réversible.

Au cas où la roche contient en plus de l'anhydrite, le gonflement se renforce nettement par la cristallisation de gypse produisant des pressions jusqu'à 7 MPa. Par contre les roches anhydritiques sans argile ne montrent qu'un faible gonflement. Les minéraux argileux gonflants brisent la microstructure de la roche anhydritique dense, accélérant ainsi l'absorption d'eau et donc la sulfatation. Leur effet retardant et adsorbant favorise en plus l'accumulation de gypse dans la solution. Le gonflement du gypse est irréversible tant sous des conditions naturelles que dans les expériences de laboratoire.

L'intensité du gonflement de l'argile et du gypse dépend tout d'abord de la quantité d'eau adsorbée. Différentes observations ont montré que non seulement l'eau s'écoulant du tunnel (comme supposé jusqu'à présent) mais également celle amenée par celui-ci joue un rôle. C'est pourquoi il faut désormais porter davantage d'attention à l'effet drainant des constructions et des sondages. C'est par des analyses pétrographiques et structurales que l'effet gonflant des roches argileuses et anhydritiques peut être évalué.

Vorwort

Der Anstoss zu den vorliegenden Untersuchungen ergab sich aus der nahezu täglichen Beschäftigung mit Untertagebauten im nordschweizerischen Juragebirge. Die praktische Erfahrung zeigte, dass im Gipskeuper der Nordschweiz wie auch im süddeutschen Raum bei Tunnelbauten oft sehr unregelmässig Quellerscheinungen auftreten. Deren Prognose war bislang mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, weil die dabei ablaufenden geologischen Prozesse noch nicht in allen Facetten verstanden wurden. Dass das Thema keinesfalls an Aktualität verloren hat, zeigen insbesondere die anhaltenden Quellhebungen über einen Abschnitt von 350 m im Chienbergtunnel der sich im Bau befindlichen Umfahrung Sissach der T2.

Ausgangspunkt für unsere Überlegungen war der Belchentunnel der Nationalstrasse N 2, die von Basel aus in Richtung Luzern-Gotthard führt. Dieser doppelröhrige Tunnel, welcher zwischen 1963 und 1970 gebaut wurde, zeigte ab 1980 zunehmend Schäden, die auf einen erheblichen Gebirgsdruck¹ zurückzuführen waren und eine Sanierung notwendig machten. Aus diesem Grunde wurden in den Jahren 1986, 1991, 1998 und 2001 umfangreiche Untersuchungen, die auch Sondierbohrungen aus dem Tunnel heraus umfassten, durchgeführt. Dies gab uns den Anlass, dem Bundesamt für Strassen (ASTRA) ein Gesuch für ein Forschungsprogramm mit dem Titel „Tonmineralien und Sulfatgesteine als Ursachen für druckhaftes Verhalten von Gesteinen“ einzureichen. Zunächst war nur vorgesehen, das Probenmaterial aus dem Belchentunnel als Ausgangsmaterial für Laboruntersuchungen zu verwenden; als sich dann aber abzeichnete, dass der Adlertunnel der SBB zwischen Basel und Liestal ebenfalls mit denselben Problemen konfrontiert sein könnte, wurde auch Probenmaterial aus den Sondierbohrungen für dieses Bauvorhaben in die Untersuchungen einbezogen. Hieraus ergab sich aber eine Verlängerung der ursprünglich vorgesehenen Dauer des Forschungsvorhabens. Nachdem der Adlertunnel Ende 2000 in Betrieb genommen werden konnte und die entsprechenden Bauverfahren vorliegen, kann nun diese Arbeit ebenfalls abgeschlossen werden.

Dem Forschungsgesuch lagen folgende Überlegungen zugrunde:

„Sowohl Tonmineralien als auch Sulfate (Anhydrit) können Ursache zu Quellerscheinungen im Gestein sein. Hierüber besteht bereits eine reichhaltige Literatur (siehe z. B. Madsen & Nüesch, 1990). Dennoch bereitet die Vorhersage des Quellpotentials im Rahmen von Untertageprojekten auch heute noch Schwierigkeiten. Dies liegt einerseits im Ineinandergreifen mehrerer, parallel zueinander verlaufender Vorgänge, andererseits in Unterschieden bei der Bestimmung der Quellparameter begründet. Es besteht somit die Notwendigkeit, die ablaufenden Vorgänge unter kontrollierten Bedingungen geologischer und technischer Art festzuhalten und sie dem Langzeitverhalten in der Natur gegenüberzustellen. Der nächste Schritt besteht sodann darin, die Überlagerung verschiedener Vorgänge zu untersuchen und zu interpretieren.“

Unser Gesuch ist mit Datum vom 20. Mai 1992 bewilligt worden (Nr. 55/92, 4306.01). Die Verlängerung wurde unter der Nr. 52/96, 4306.02 am 3. April 1996 genehmigt. Nachfolgend werden nun die gewonnenen Forschungsergebnisse dargestellt.

Basel, Oktober 2005
Lukas Hauber und Mitarbeiter

¹ In dieser Arbeit wird unter dem Begriff „Gebirgsdruck“ die Summe aus der lithostatischen Überlast, den remanenten tektonischen Drücken und dem hier besonders interessierende Druck verstanden, der sich durch quellendes Ton- und Ton-Sulfatgestein aufbaut. Zunahmen des Gebirgsdruck während des Baus und Betriebs eines Untertagebauwerkes sind in der Regel auf den Aufbau oder die Zunahme des Quelldrucks zurückzuführen.

I. Einleitung

Der Tunnelbau hat in der Schweiz seinen Anfang mit dem aufkommenden Bahnbau in der zweiten Hälfte des vorletzten Jahrhunderts genommen. Zunächst handelte es sich zumeist um einspurige Eisenbahntunnels mit beschränktem Querschnitt, doch gesellten sich bald auch doppelspurige Tunnels dazu (Gotthard-Bahntunnel, Bözbergunnel). Erst nach dem zweiten Weltkrieg, mit dem Aufbau eines gesamtschweizerischen Autobahnnetzes, ist ein neuer Abschnitt des Tunnelbaues in der Schweiz eröffnet worden: Heute werden grosse Querschnitte aufgeföhren und dabei auch vollmechanische Tunnelbohrmaschinen (TBM) eingesetzt. Als jüngste Entwicklung darf der Bau von tiefliegenden, sehr langen Bahntunnels angesehen werden (AlpTransit: Gotthard-Basistunnel, Lötschberg-Basistunnel).

Zu den frühen, langen Bahntunnels zählen in der Nordschweiz u. a. (chronologisch geordnet nach Jahr der Inbetriebnahme):

- "Alter" Hauensteintunnel, 2'495 m, Läuelfingen – Trimbach (1858)
- Bözbergunnel, 2'526 m, Effingen – Schinznach-Dorf (1875)
- Weissensteintunnel, 3'700 m, Gänsbrunnen – Oberdorf SO (1907)
- Grenchenbergunnel 8'578 m, Moutier – Grenchen (1915)
- Hauenstein-Basistunnel, 8'134 m, Tecknau – Olten (1916)

Unter den neuen Bahn- und Autobahntunnels sind zu erwähnen:

- N 2 (A 2): Belchentunnel, 3'200 m, Eptingen - Hägendorf (1970)
- N 3 (A 3): Bözbergunnel 3'700 m, Effingen – Schinznach Dorf (1996)
- N 16 (A 16): Tunnel du Mont Russelin, 3'600 m, Glovelier – St.-Ursanne (1998)
- N 16 (A 16): Tunnel du Mont-Terri, 4'100 m, St. Ursanne – Courgenay (1998)
- SBB: Adlertunnel, 5'302 m, Muttenz – Liestal (2000)

Im Bau befindet sich derzeit der Chienbergunnel, Kernstück der Umfahrung Sissach der T 2.

Bei allen diesen Tunnels sind dort, wo sie durch tonmineral- und/oder durch sulfathaltige Gesteine führen, Gebirgsdrücke aufgetreten, welche das normale lithostatische Mass deutlich übersteigen. Diese zusätzlichen Drücke können schon bald nach der Erstellung oder im Extremfall, wie beim Belchen (Grob, 1972; Huder & Amberg, 1970; Schillinger, 1970) oder Chienbergunnel, schon während des Baues auftreten. Dieselben Probleme sind auch aus dem süddeutschen Raum bekannt geworden. Als typische Beispiele seien hier Kappesberg-, Schanz- Weinsberger, Wagenburg- und Freudensteintunnel genannt (Krause 1977; Schächterle 1926). Als besonders kritisch hat sich dabei der sulfatführende Keuper der oberen Trias entpuppt. Aber auch Tunnelbauten in Molassegesteinen, in welchen Sulfate fehlen, haben Schäden erlitten (Einstein et al., 1972; Golta, 1976 & 1988; von Moos, 1949). Als Beispiel hierfür sei der Rickentunnel zwischen Uznach und Wattwil genannt. Ein weiterer bekannter Tunnel, der im Opalinuston starke Sohlhebungen erfahren hatte, ist der Grenchenbergunnel, wo mehr als die Hälfte des ursprünglichen Sohlgewölbes durch massive Granitquader ersetzt wurde.

Da sich in den Sulfaten oft, aber keineswegs immer, ein Quelldruck einstellt, kam der Gedanke auf, dass allein die Tonminerale (z.B. Corrensit) für die Quelldrücke verantwortlich seien (Henke et al., 1975). Dies stand mit der Tatsache in Einklang, dass in sulfatfreien Tongesteinen ebenfalls Quellphänomene bekannt geworden waren. Als Beispiele hierfür mögen der Alte Hauensteintunnel (1853 - 1858) und der Bözbergunnel der SBB dienen: Beim Alten Hauensteintunnel sind schon während des Tunnelbaues in Abschnitten des Opalinustons und der Lettenkohle Sohlhebungen und Verengung der Tunnelmauerung beobachtet worden (Pressel & Kauffmann 1860). Auch der Einfluss des Wassers im

Zusammenhang mit Quellerscheinungen wurde erkannt. Beim Bözbergtunnel der SBB (1871 – 1875) wurden zehn Jahre nach dem Bau in verschiedenen Gesteinen Sohlhebungen festgestellt, so dass erste Reparaturen bereits 1885 und dann wieder 1896 notwendig wurden, weil sich die Röhren für die Tunnelentwässerung innerhalb von elf Jahren um 30 cm gehoben hatten (Beck und Golta, 1972). Solche Verformungen traten in den mergeligen Gesteinen des Tertiärs, des Malms, des Opalinustons (Dogger) und auch des Keupers auf. Einzig im Keuper ist während des Baues Anhydrit durchörtet worden. Festzustellen ist, dass die grössten Quelldrücke oder Hebungen meist in sulfathaltigen Gesteinen auftreten. Hierzu liegen eine ganze Reihe gut dokumentierter Arbeiten vor: Berner (1991); Erichsen & Kurz (1995); Fecker 1981; Fecker & Wullschläger (1991); Fecker (1995); Grob 1975; Henke et al. (1975); Kirschke et al. (1991); Kirschke (1995); Kovári (1998); Kovári et al. (1981), Krause (1976); Pierau & Kiehl (1995); Paul (1993); Paul & Wichter (1995); Steiner (1993); Wiedemann et al. (1957), Hauber et al. (2000); Meyer (2001).

Die geologische und mineralogische Beschreibung des Phänomens der Quellfähigkeit von Gesteinen, die labormässige Erfassung der felsmechanischen Parameter der entsprechenden Gesteine sowie Ansätze zu einer gesetzmässigen Interpretation der dabei auftretenden Kräfte ist schon mehrfach versucht worden, doch herrschen noch immer unterschiedliche Ansichten vor. Siehe z. B. Anagnostou (1992); Beiche (1991); Henke et al. (1975); Kiehl (1991); Kovári et al. (1987); Nüesch & Madsen (1995); Schmid (1995). Anhand der Erfahrungen beim Bau des Belchentunnels der N 2 war bekannt, dass hohe Quelldrücke sehr lokal und unregelmässig verteilt auftreten können.

Die Quellerscheinungen wiesen oft einen sehr unterschiedlichen zeitlichen Verlauf auf. Ferner zeigten sich gewisse Abhängigkeiten der Sulfatquellung vom Tongehalt.

Bei den Resultaten, die aus Laborproben gewonnen wurden (Quellmass und Quelldruck), stellten sich weitere Fragen: Zu diskutieren waren die Versuchsdurchführungen und deren Vergleichbarkeit, wie auch die Versuchsdauer. Es erwies sich nämlich, dass in den meisten Fällen in der Praxis kaum ausreichend Zeit zur Verfügung stand, die Versuche an anhydrithaltigen Gesteinsproben bis zu einem statischen Endzustand durchzuführen.

So setzte sich allmählich die Erkenntnis durch, dass sich zwei Phänomene überlagern können:

- a) die Volumenzunahme (Quellung) durch Wasseraufnahme der Tonminerale und
- b) die Volumenzunahme (Quellung) der Sulfate bei der Umwandlung vom wasserfreien Anhydrit zum wasserhaltigen Gips.

Dabei ist:

Die Quellung eines Gesteins eine zeitabhängige Volumenzunahme, welche auf einer physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser beruht.

Der Quellmechanismus ist eine Kombination der physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser und einer Spannungsverminderung,

wobei erstere normalerweise die Hauptbeteiligte an der Quellung ist. Der Quellprozess tritt aber nur gleichzeitig mit einer Spannungsverminderung auf oder folgt dieser unmittelbar anschliessend (Madsen & Nüesch, 1990).

Die Arbeiten wurden in die Kapitel "Tonquellung" (das hauptsächlich am Tonmineralogischen Labor des Institut für Geotechnik, ETH Zürich behandelt worden ist) und "Sulfatquellung" (das hauptsächlich am Geologisch-paläontologischen Institut der Universität Basel und am Geotechnischen Institut AG, Basel bearbeitet worden ist) aufgeteilt. Die Schlussfolgerungen sind in gemeinsamen Arbeitssitzungen gezogen worden.

2. Tonquellung

2.1 Allgemeines

Die Tonquellung resultiert aus der Anlagerung von Wasser an den Oberflächen der Tonminerale im Gestein.

Die ersten Erfahrungen mit dem quellfähigen Gestein wurden in der Schweiz beim Bau des Oberen Hauensteintunnels (1853-1858) gemacht. In den Tunnelabschnitten mit dem Vorkommen von Opalinuston und Ton der Lettenkohle wurden schon während des Baues eine Sohlhebung und eine Verengung der Tunnelmauerung beobachtet. Rasch erkannten u.a. Pressel & Kauffmann (1860) die verheerende Wirkung von Wasser auf Opalinuston, welches ein Quellen und eine Erweichung des Gesteins auslöste. Aus diesen Beobachtungen im Tunnel wurde die Bedeutung des Wassers für das Quellen erkannt, und es wurde versucht, das Wasser möglichst fern zu halten.

Beim Hauenstein-Basistunnel (1912-1916) bestätigte z.B. Wiesmann (1917), dass neben dem Opalinuston auch weitere mergelige Gesteinsarten, wie z.B. Mergel des Tertiärs und der Passwang-Formation (Hirnichopf-Schichten = „Sowerbyischichten des „Unteren Doggers“), von der Tonquellung betroffen sind, und dass fein verteilter Anhydrit im Ton sehr stark quillt. Obwohl der Prozess der Wasseraufnahme noch nicht verstanden wurde, war klar, dass Wasser auch über Luft möglichst keinen Kontakt mit quellfähigem Gestein haben sollte.

Beim Bözbergtunnel (1871-1875) wurden zehn Jahre nach dem Bau in verschiedenen Tongesteinen Sohlhebungen festgestellt, welche zu einer ersten Sanierung führten. Auch im Zeitraum von 1923-1954 fanden Quellhebungen in den Molassemergeln bis 33.5 cm und in der Anhydritgruppe bis 37.5 cm statt (Beck und Golta, 1972). Damit war offensichtlich, dass die Gesteinsquellung im Untertagebau auch nach der Bauphase ein sehr langwieriger Prozess sein kann, mit Quellhebungen im Dezimeterbereich im Verlauf von Jahrzehnten. Auch beim Grenchenbergtunnel (1911-1915) musste mehr als die Hälfte des ursprünglichen Sohlgewölbes aus Beton im Bereich des Opalinustones durch massive Granitquader ersetzt werden.

Während der Bauphase des Belchentunnels (1963-1970) wurden Sohlhebungen von bis zu 80 cm festgestellt (Huder & Amberg, 1970; Grob, 1972). Das 45 cm mächtige Sohlgewölbe wurde schwer beschädigt und musste über lange Strecken durch ein dickeres (80 cm) ersetzt werden. 1990 wurden weitere Anzeichen von Sohlhebungen festgestellt.

Der Sulfatquellung ist ein eigenes Kapitel gewidmet. Doch auch bei der chemischen Umwandlung von Anhydrit in Gips spielen die Tone eine entscheidende Rolle. Umfangreiche Quellversuche im Labor zeigen, dass ohne Ton praktisch keine Sulfatquellung stattfindet, und, dass bei einem Tongehalt von 10-20 Gew.% die Quellung maximal ist.

Quellende Gesteine und Quellphänomene beschäftigen Ingenieure und Geologen nun seit fast 150 Jahren (s. a. Amstad & Kovári 2001). Entsprechend gross und vielfältig ist die Beschreibung dieser Phänomene in der Literatur, und je nach Gesichtspunkt und Schwergewicht erfolgt die Wahl der Begriffe. In dieser Arbeit werden die Begriffe wie folgt verwendet:

Quellung

Die Quellung eines Gesteins ist eine zeitabhängige Volumenzunahme aufgrund einer physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser.

Quellmechanismus

Der Quellmechanismus ist eine Kombination einer Spannungsverminderung und der physikalisch-chemischen Reaktion mit Wasser. Die vorausgehende oder gleichzeitig stattfindende Spannungsverminderung bewirkt den Quellprozess.

Quellprozess

Der Quellprozess oder Quellvorgang beschreibt den zeitlichen Verlauf des Quellens, welcher je nach Bedingungen (Überlagerung, Wasserzugänglichkeit, Gesteinstyp, Ausbildung, Art und Grad der Deformation etc.) einen unterschiedlichen Verlauf über Jahre hinweg aufweist. Im Laborversuch wird der Quellprozess durch optimale Bedingungen beschleunigt.

Osmotische Quellung

Bei der osmotischen Quellung wirkt der Ionenkonzentrations-Unterschied zwischen den Doppelschichten der Tonteilchen und dem Porenwasser als treibende Kraft. Die Ionenkonzentration im Porenwasser spielt eine untergeordnete Rolle und erreicht auch bei gesättigten Lösungen nicht die Konzentration der an die Tonoberflächen gebundenen Ionen. Durch Osmose gelangt Wasser zwischen die Tonteilchen und bewirkt Volumenvergrößerung (unbehinderte Quellung). Wird Volumenvergrößerung infolge Wasseraufnahme behindert, so entsteht ein Quelldruck. Die osmotische Quellung ist abhängig vom Abstand zwischen den wasserzugänglichen Oberflächen der Tonminerale und der Wertigkeit ihrer gebundenen Kationen.

Quellpotential

Das Quellpotential eines Tongesteines hängt vor allem von der Grösse der für Wasser zugänglichen Oberfläche ab. Das Quellpotential wird entweder experimentell durch Quellversuche bestimmt oder aus der mineralogischen Zusammensetzung des Gesteins und des Bergwassers geschätzt..

Quellmass

Das Quellmass (freie Quellhebung) bezieht sich auf die ursprüngliche Probenhöhe beim Einbau der Probe in die Quellapparatur.

Quelldruck

Der Quelldruck von Tongesteinen entspricht der maximalen Spannung bei verhinderter, axialer Quellhebung (Volumenkonstanz) im Quelldruckapparat.

2.2 Theorie der Tonquellung

Die Tonquellung im oberflächennahen Bereich im Gebirge (<500 m) resultiert aus der Anlagerung von Wasser an Oberflächen der Tonminerale im Gestein. Die Tonquellung ist eng mit den wichtigsten Eigenschaften der Tonminerale verbunden, welche wiederum aus deren Aufbau resultieren. Im Folgenden werden der Aufbau der Tonminerale und die wichtigsten tonmineralogischen Eigenschaften, welche die Basis für das Verständnis der Tonquellung bilden, kurz beschrieben.

2.2.1 Aufbau der Tonminerale

Die Tonminerale sind sehr klein (<0,002mm) und meistens plättchenförmig. Sie können grob in zwei Klassen unterteilt werden:

- quellfähige Tonminerale
- nichtquellfähige Tonminerale

Der Unterschied zwischen diesen beiden Haupttypen liegt in der Grösse der für das Wasser zugänglichen Oberfläche der Minerale. Diese liegt bei den quellfähigen Tonmineralen (z.B. Montmorillonit) in der Größenordnung von 700 bis 800 m²/g Ton. Bei den nichtquellfähigen Mineralen (z.B. Kaolinit oder Illit) beträgt die mit Wasser belegbare Oberfläche 10 bis 100 m²/g Ton. Bei den Mixed-layer Mineralen (z.B. Illit/Montmorillonit und Chlorit/Smektit = Corrensit) liegt die spezifische Oberfläche zwischen der des Illits und des Montmorillonits.

Tonminerale gehören zur Gruppe der Schichtsilikate. Bausteine sind SiO₄-Tetraeder und Al(O,OH)₆-Oktaeder. Die Si-Tetraeder und Al-Oktaeder sind zu Sechseringen in übereinanderliegenden Tetraederschichten (T-Schichten) und Oktaederschichten (O-Schichten) verknüpft. Die Dreischichtminerale (TOT-Schicht) zeichnen sich durch eine grosse Mineralvielfalt aus, zu denen die quellfähigen Tonminerale, wie Smekтите mit dem bekanntesten Vertreter Montmorillonit, gehören. Jeweils eine TOT-Schicht (Elementarschicht von 1nm; 1nm = 10⁻⁹ m) bildet ein Schichtpaket. Mehrere übereinandergestapelte Schichtpakete bilden zusammen einen Tonkristall (Fig. 1).

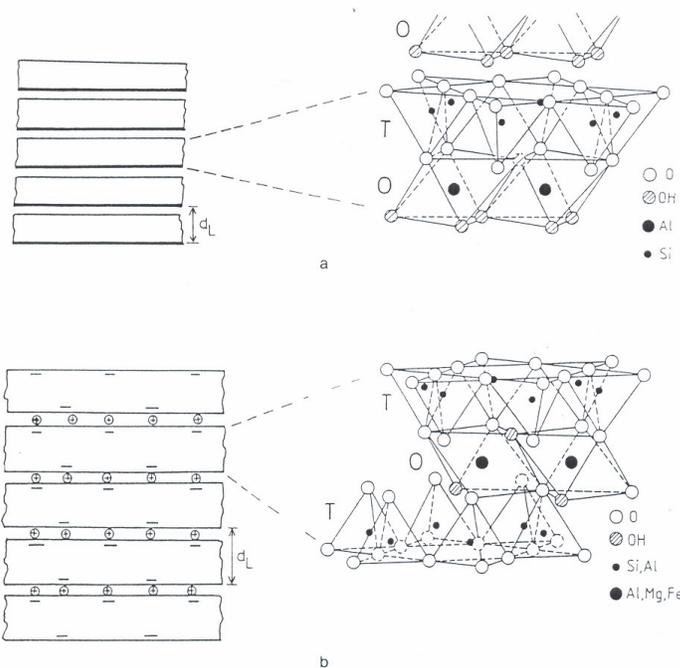


Fig. 1: Räumliche Darstellung der Schichtstruktur der Zweischicht- (TO -Minerale) und Dreischichtminerale (TOT -Minerale). Nach Lagaly (1993).

Zu den nichtquellfähigen Dreischichtmineralen gehören Illite mit Kalium als Zwischenschichtkation. Illit lagert nur Wasser an den äusseren Oberflächen der Tonkristalle an.

Die Zweischichtminerale bestehen aus gestapelten TO-Schichten. Der bekannteste nicht quellbare Vertreter ist der Kaolinit mit einem Basisabstand von 0.7 nm. Der strukturell ähnliche Halloysit ist quellfähig und weist aufgrund der adsorbierten Wasserlage einen Basisabstand von ca. 1 nm auf.

Die meisten Tonminerale haben eine permanente negative Flächenladung. Diese negative Ladung beruht auf dem isomorphen Ersatz von Metallionen im Kristallgitter der Tonminerale. Dabei können z.B. Al^{3+} für Si^{4+} in der Tetraederschicht und Mg^{2+} oder Fe^{2+} für Al^{3+} in der Oktaederschicht ausgetauscht werden. Die daraus resultierende negative elektrische Ladung der Tonflächen wird durch angelagerte Kationen ausgeglichen. Bei den quellfähigen Tonmineralen (z.B. Smektite) sind alle angelagerten Kationen austauschbar.

Neben der permanenten negativen Schichtladung haben Tonminerale an den Kanten variable Ladungen. In sauren und neutralen Elektrolyten sind die Kanten positiv und in basischen negativ geladen. Für die Quellung spielt die Kantenladung eine geringe Rolle.

2.2.2 Eigenschaften der Tonminerale

Die tonmineralogischen Eigenschaften und das Wasser sind Ursache für das Quellverhalten der Tone.

Der meist plättchenförmige Habitus der Tonminerale bewirkt normalerweise eine Anisotropie der Quellparameter und somit auch der Quelldruckverteilung im Gestein. In diagenetisch verfestigten Sedimentgesteinen sind die Tonminerale bevorzugt parallel zur Schichtung eingeregelt. Dabei liegen die Tonplättchen mit ihrer Fläche senkrecht zur Richtung der Hauptspannung, welche in den meisten Fällen die Gesteinsüberlagerung darstellt. In deformierten Tongesteinen können spröde Scherflächen wasserwirksame Wege darstellen. Die Durchlässigkeit in Tongesteinen ist generell parallel zu den Tonplättchen grösser als senkrecht dazu. In den Quellversuchen werden die grössten Quellhebungen und Quelldrücke senkrecht zur Schichtung gemessen.

Grosse spezifische Oberflächen sind typisch für quellfähige Tonminerale. Quellfähige Tonminerale wie Smektite besitzen eine innere, dem Wasser zugängliche Oberfläche. Diese bildet zusammen mit den äusseren Kristalloberflächen die spezifische Oberfläche der quellfähigen Tonminerale. Quellfähige Tonminerale adsorbieren auf den inneren Flächen viel mehr Wasser als auf den äusseren. Für das Quellpotential ist daher die Grösse der inneren spezifischen Oberfläche von besonderem Interesse.

Quellhebung und Quelldruck werden massgeblich durch die Wertigkeit der Kationen in der Austauschgaritur der Tonminerale bestimmt. Tone mit einwertigen Kationen, z.B. Na^+ , quellen viermal mehr als derselbe Ton mit zweiwertigen Calciumionen. Daher ist die Ionenform resp. Ionenbelegung der Tonminerale von entscheidender Bedeutung für das Quellpotential. Andererseits kann das Quellpotential durch die Änderung des Wasserchemismus und den Kationenaustausch beeinflusst werden.

Mit Calciumionen gesättigte Wässer werden einen ursprünglichen Natriumton mit einem hohen Quellpotential in einen Calciumton mit einem geringeren Quellpotential umwandeln. Tonminerale können aufgrund der permanenten negativen Schichtladung im gesamten pH-Bereich Ionen austauschen.

Erfolgt mit der Adsorption eines Ions eine gleichzeitige Desorption, so wird von Ionenaustausch gesprochen. Das Ausmass der Kationenaustauschkapazität bei Tonen ist erstens von der spezifischen Oberfläche und zweitens von der negativen Schichtladung abhängig.

Tonminerale weisen im Gegensatz zu vielen anderen Adsorbenten spezifische Kationen-Austauschereigenschaften auf. Kationen werden bevorzugt adsorbiert aufgrund steigender Wertigkeit der Ionen (Wertigkeitseffekt) und abnehmendem Radius der hydratisierten Ionen von gleicher Wertigkeit (Hydratationseffekt). Das heisst, dass Ionen mit kleinen Hydrathüllen (grossem nacktem Ionenradius) bevorzugt eingetauscht werden. Gemäss der Schulz'schen Regel (in Scheffer & Schachtschabel, 1992) resultiert folgende Ionen-Reihenfolge mit bevorzugter Adsorption:

Für einwertige Ionen: $Li < Na < K < Rb < Cs$
zweiwertige Ionen: $Mg < Ca < Sr < Ba$

Diese Reihenfolge der bevorzugten Kationenadsorption kann durch einen Überschuss an einer bestimmten Ionenart gegenüber einer bevorzugt adsorbierten durchbrochen werden.

2.2.3 Wassergehalt

Der natürliche Wassergehalt des Gesteins spielt eine wesentliche Rolle für das Quellpotential. Der natürliche Wassergehalt wird beim gleichen Gesteinstyp mit zunehmendem Überlagerungsdruck kleiner. Dementsprechend wird das Quellpotential mit dem Überlagerungsdruck grösser. Durch Austrocknung (infolge unsachgemässer Behandlung der Proben) schrumpfen tonhaltige Gesteine, d.h. die Tonteilchen rücken näher zusammen. Deshalb ergeben ausgetrocknete Proben im Labor eine unrealistisch grosse Quellhebung und einen zu hohen Quelldruck.

Der Wassergehalt von tonhaltigem Material hängt wesentlich vom Zustand der Probe ab (bergfrisch, lufttrocken, ofentrocken) und beinhaltet jedesmal eine andere Art von Wasser:

- bergfrische Probe: Porenwasser + adsorbiertes Wasser + Strukturwasser
- lufttrockene Probe: adsorbiertes Wasser + Strukturwasser
- ofentrockene Probe (105°C): Strukturwasser

Bei Wassergehaltsmessungen muss deshalb der Zustand der Probe vor der Trocknung angegeben werden. Aus der Art und Menge der unterschiedlichen Wasseranteile können wichtige Rückschlüsse auf Art und Menge der Tonminerale gezogen werden.

Als Porenwasser bezeichnet man das in den Tonaggregaten und in feinsten Rissen zwischen den Teilchen vorhandene Wasser, das nicht an die Tone adsorbiert ist und durch Lufttrocknung bei Raumtemperatur entfernt wird. Porenwasser gibt Hinweis auf die Porosität und das Gefüge des tonigen Materials.

Als adsorbiertes Wasser bezeichnet man den Wasseranteil, der durch Trocknung bei 105°C über eine Zeitdauer von 24h entfernt wird. Das adsorbierte Wasser gibt Hinweise auf den Tonanteil und auf die Art der Tonminerale. Quellfähige Tonminerale weisen gegenüber nichtquellfähigen einen höheren Wassergehalt auf.

Als Strukturwasser wird das in der Probe verbliebene Wasser nach Trocknung bei 105°C bezeichnet. Es gehört in den Bereich des Kristallwassers der Minerale und wird der festen Probenmasse zugeordnet. Es besteht aus Hydroxylgruppen, die wesentliche Bestandteile des Kristallgitters sind, und kann nur bei höheren Temperaturen entfernt werden.

2.2.4 Osmotische Quellung

Der Quellvorgang, welcher unter oberflächennahen (<500 m) Bedingungen (Tunnelbau) im Gebirge wirkt, wird als osmotische Quellung bezeichnet, weil Unterschiede in der Ionenkonzentration als treibende Kraft wirken. Wenn das tonhaltige Gestein durch den Vortrieb eines Tunnels entlastet wird und Wasser zur Verfügung steht, wird es durch Osmose Wasser aufnehmen und dadurch sein Volumen vergrössern. Das Wasser kann auch aus dem umliegenden Gestein herrühren (Kovári et al., 1981).

Der Konzentrationsausgleich durch Osmose kann nur durch Wasseranlagerung am Tonmineral stattfinden, weil die Kationen an die negativ geladene Tonmineraloberfläche gebunden sind. Dadurch findet eine Volumenvergrößerung statt, welche je nach Gesteinstyp und Überlagerung bis zu 20 Vol % betragen kann. Die Tonquellung ist von der Anzahl gebundener Kationen und der wasserzugänglichen Oberfläche abhängig. Smektite haben grosse Oberflächen (bis 800 m²/g) und eine maximale Kationenaustauschkapazität von 1.5 mmol Na⁺ pro g Ton und gelten daher als stark quellfähige Tonminerale. Tonminerale mit wenig wasserzugänglichen Oberflächen von 10 bis maximal 100 m²/g (z.B. Illit und Chlorit) und dazu noch mit sehr wenig adsorbierten Ionen (z.B. Kaolinit oder Pyrophyllit) werden als nicht quellfähige Tonminerale bezeichnet. Nicht quellfähige Tone haben keinen wasserzugänglichen Zwischenschichttraum und lagern Wasser nur auf den äusseren Oberflächen an. Daher ist ihre Quellung im Vergleich zu den quellfähigen Tonmineralen bescheiden. Bei den häufigen mixed-layer Mineralen liegt die Grösse der von Wasser belegten Oberfläche zwischen jener des Smektites und des Illites.

Die Volumenvergrößerung infolge Wasseraufnahme kann mit Hilfe der Doppelschicht-Theorie (z.B. in Madsen & Müller-Vonmoos, 1985) dargestellt werden. Die negativ geladene Tonoberfläche und der Ionenschwarm in der Nähe dieser Oberfläche wird als diffuse elektrische Doppelschicht bezeichnet (Fig. 2).

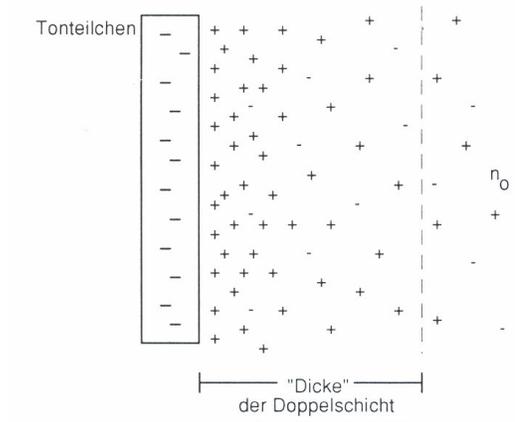


Fig. 2: Diffuse Doppelschicht. Verteilung der Ionen in der Nähe einer negativ geladenen Tonteilchen-Oberfläche (nach Madsen 1996).

Die Ausdehnung (Dicke) der Doppelschicht $1/\kappa$ in einem Elektrolyt kann vereinfacht nach folgender Formel berechnet werden:

$$\frac{1}{\kappa} = \sqrt{\frac{\epsilon\epsilon_0 kT}{2n_0 e^2 v^2}}$$

Für eine Ionenkonzentration $n_0 = 10^{-3}$ Mol/Liter (Na-Ionen), eine Temperatur $T = 293^\circ\text{K}$ ist mit folgenden Werten zu rechnen:

- Dielektrizitätskonstante des Elektrolyts $\epsilon = 80$ (für Wasser)
- Absolute Temperatur $T = 293^\circ\text{K}$
- Ionenkonzentration (Poren) $n_0 = 10^{-3}\text{Mol/liter} \times 10^3\text{Liter/m}^3 \times 6.02 \times 10^{23}\text{ Ionen/Mol}$
- Valenz der Ionen $v = 1$ für Na^+
- Influenzkonstante des Vakuums $\epsilon_0 = 8.859 \times 10^{-12}\text{ C}^2/\text{Nm}^2$
- Boltzmann'sche Konstante $k = 1.381 \times 10^{23}\text{ J/K}^\circ$
- Elementarladung $e = 1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$

Daraus ergibt sich $\frac{1}{\kappa} = 96 \times 10^{-10}\text{ m} = \text{ca. } 10\text{ nm}$

In Tab. I ist die Dicke der Doppelschicht für verschiedene Ionenkonzentrationen für ein- und zweiwertige Kationen angegeben.

Konzentration Mol/Liter	Dicke der Doppelschicht für $v = 1$	Dicke der Doppelschicht für $v = 2$
10^{-5}	100 nm	50 nm
10^{-3}	10 nm	5 nm
10^{-1}	1 nm	0.5 nm

Tab. I: Dicke der Doppelschicht in Abhängigkeit der Ionenkonzentration

Der Einfluss der Temperatur auf die Dicke der Doppelschicht ist klein (Mitchell, 1992). Ferner beeinflussen die Grösse der solvatisierten Kationen - je kleiner, desto geringere Doppelschichtdicke - die Ausdehnung der Doppelschicht.

Sind nun zwei Tonminerale nahe beisammen, so überlagern sich die beiden Doppelschichten mit einer viel höheren Ionenkonzentration als in der Porenlösung und stossen sich ab. Diese elektrostatische Abstoßung steht im Gleichgewicht mit der Überlagerung resp. dem Gebirgsdruck. In den Tongesteinen ist dieses Gleichgewicht und oft eine ehemals grössere Überlagerung konserviert, d. h. die Tonpartikelchen sind näher zusammen als dies dem heutigen Überlagerungsdruck entspricht und in dieser Position durch Karbonate und Eisenoxide zementiert.

Durch eine Entlastung des Gesteins infolge des Tunnelvortriebes entsteht eine Volumenzunahme, welche auch als mechanische Quellung bezeichnet wird (z.B. Einstein, 1993). Aufgrund der Volumenzunahme durch die Spannungsverminderung bilden sich negative Porenwasserdrücke.

Die Volumenvergrößerung infolge Wasseraufnahme (Fig. 3a) kann mit einem Gegendruck verhindert werden (Fig. 3b). Aus der DLVO-Theorie (Madsen, 1976; Madsen & Müller-Vonmoos, 1985 und 1989, Madsen & Nüesch, 1990) geht hervor, dass der Quelldruck hauptsächlich vom halben Abstand d der Elementarschichten resp. Tonteilchen und der Valenz der austauschbaren Kationen (v) abhängig ist.

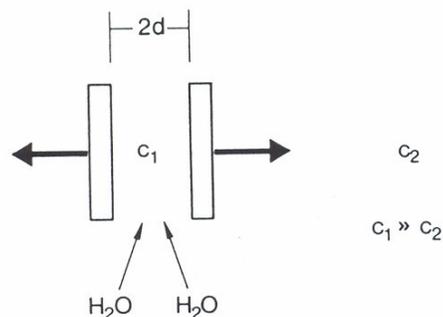


Fig. 3a: Bei der unbehinderten, freien Quellung können sich die Tonteilchen ohne Gegendruck voneinander weg bewegen.

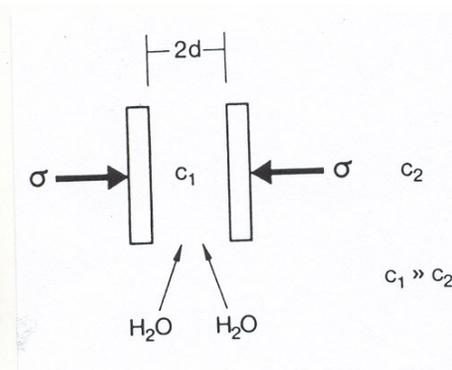


Fig. 3b: Bei der behinderten Quellung werden die Tonteilchen durch einen Gegendruck an Ort gehalten (Madsen & Nüesch, 1991).

Der Quelldruck wird wie folgt aus der Doppelschichttheorie abgeschätzt:

$$\sigma = \frac{\pi^2 \epsilon \epsilon_0 k^2 T^2}{2e^2 v^2 d^2}$$

Nach Madsen (1995) ist für $T = 293^\circ\text{K}$

$$\sigma = \frac{2.27 \times 10^{-12}}{v^2 d^2} \text{ (Nm}^{-2}\text{)}$$

Die halbe Distanz d wird aus dem Quotient des spezifischen Wasservolumens über der spezifischen wasserzugänglichen Oberfläche ermittelt.

Bolt (1956) hat für den halben Abstand d folgenden Korrekturterm x_0 für die verschiedenen Tonminerale eingeführt (aus Madsen 1995).

Illit	$x_0 = 10^{-10}/v$
Kaolinit	$x_0 = 2 \times 10^{-10}/v$
Montmorillonit	$x_0 = 4 \times 10^{-10}/v$

Die Gleichung für die Berechnung des Quelldruckes ist somit

$$\sigma = \frac{2.23 \times 10^{-12}}{v^2 (d + x_0)^2} \quad (\text{Nm}^{-2})$$

Die Valenz der Kationen v geht aus der Bestimmung der austauschbaren Ionen hervor, und der halbe Abstand d aus dem Wassergehalt ermittelt.

Mit Hilfe der Formel kann bei bekanntem Wassergehalt einer Probe, bekannter spezifischer Oberfläche und Valenz der Kationen in der Doppelschicht der Quelldruck der Probe bei Volumenkonstanz berechnet werden. Folgende Berechnung soll dies am Beispiel von Opalinuston erläutern:

Eine Opalinustonprobe aus dem Bözbergtunnel hat einen Sättigungswassergehalt von 6.7%. Die spezifische Oberfläche der Tonfraktion beträgt $135 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ (Madsen & Müller-Vonmoos, 1985). Der Anteil Tonfraktion beträgt 46 Gew.%, was eine spezifische Oberfläche der Probe von $62 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ergibt. Unter der Annahme, dass alles Wasser in der Probe mit den Tonmineralen verbunden ist, lässt sich der halbe Abstand zwischen den Tonteilchenoberflächen berechnen, indem das Wasser auf dieser Oberfläche verteilt wird:

$$d = \frac{0.067 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ g}^{-1}}{62 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}} = 10.8 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Da die Tonminerale im Opalinuston hauptsächlich Illit und mixed-layer Illit/Smektit sind, wird für $v = 1$ (Na-Ionen) $x_0 = 10^{-10}$. Der Quelldruck berechnet sich dann zu:

$$\sigma = \frac{2.23 \times 10^{-12}}{1^2 (10.8 \times 10^{-10} + 1 \times 10^{-10})^2} = 0.016 \times 10^8 \text{ Nm}^{-2}$$

$$\sigma = 1.6 \text{ MPa}$$

Der im Labor gemessene Quelldruck betrug 1.5 MPa. Die Methode liefert also bei bekannter mineralogischer des Materials brauchbare Resultate.

Aus der Formel zur Bestimmung des Quelldruckes geht hervor, dass eine Vergrößerung des Tonteilchenabstandes zu einer wesentlichen Reduktion des Quelldruckes führt. Weiter weist ein Natriumton den vierfachen Quelldruck auf im Vergleich zum selben Ton mit Calcium als austauschbaren Kationen. Die Ionenkonzentration im Porenwasser des Gesteins spielt eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu der viel höheren Kationenkonzentration zwischen den Tonteilchen.

Die Quellung von tonmineralhaltigen Gesteinen in der Schweiz beträgt bis zu 20 Vol% für smektitartige Molassegesteine bei unbehinderter Quellung. Bei vollständig behinderter Quellung baut sich ein Quelldruck von bis 3 MPa (300 t/m^2) auf.

Zusammenfassend sind für die osmotische Quellung von Tonen die negative Mineraloberfläche und die adsorbierten Ionen verantwortlich – vor allem die Kationen der Tonminerale. Diese Kationen müssen nicht nur vorhanden sein, wie z.B. beim Glimmer, sondern auch für Wasser zugänglich sein (bei Glimmer nicht der Fall). Das Ausmass der Quellung wird durch Menge und Art der Kationen, sowie den Abstand zwischen den wasserzugänglichen Tonmineraloberflächen bestimmt.

2.2.5 Beobachtungen zum zeitlichen Quellverlauf

Die Tonquellung unterscheidet sich stark von der Sulfatquellung in ihrem zeitlichen Verlauf. Während die Tonquellung unter optimalen Bedingungen im Labor in Stunden bis Wochen abgeschlossen ist, dauert die Sulfatquellung Jahre, ohne dass bisherige Versuche zu einem Endwert kamen, (Kirschke 1992; Madsen & Nüesch, 1991; Madsen et al., 1995; Nüesch & Ko, 2000).

2.3 Bestimmungsmethoden

Die experimentellen und mineralogischen Untersuchungen haben die Bestimmung des Quellpotentials im Bereich des Untertagebauwerkes zum Ziel. Allerdings werden bei der Auswahl der Proben (Bohrkernstücke) im Feld die als nicht-quellfähig geschätzten Proben ausgeschlossen. Die im Labor ermittelten Quellwerte stellen somit Maximalwerte aus dem aufgeschlossenen Gesteinsprofil dar.

Für eine detaillierte Beschreibung der Methoden wird auf Madsen & Müller-Vonmoos (1985), Madsen & Nüesch (1990) sowie Madsen (1999) verwiesen.

Von grosser Bedeutung für die Aussage der Quellversuche ist die Art der Probenentnahme im Feld. Realistische Versuchsergebnisse werden nur von möglichst ungestörten Proben erhalten, deren Wassergehalt so weit als möglich dem Zustand im Gebirge entspricht. Der Bohrkern Durchmesser sollte nicht zu klein sein und am besten 8-10 cm betragen. Der Bohrkern für Quellversuche wird nach Entnahme aus dem Kernrohr sofort abgetrocknet und luftdicht konserviert.

2.3.1 Quellversuche

Die Quellversuche wurden gemäss den Richtlinien der International Society for Rock Mechanics (Madsen 1999) ausgeführt.

Die scheibenförmigen Proben von ca. 3 cm Dicke werden in einen Stahlring eingebaut, welcher ein radiales Quellen und Zerfallen verhindert.

Der maximale Quelldruck ergibt sich durch das Konstanthalten der Probenhöhe mittels eines stufenweise aufgebrachten Gegendruckes.

Das Quellmass (freie Quellhebung) wird ebenfalls axial in Prozent der Probenhöhe gemessen. Falls erwünscht, kann auch das radiale Quellmass bestimmt werden.

Zwischen Quellmass und Quelldruck besteht eine recht gute empirische Korrelation (Madsen & Müller-Vonmoos, 1988 & 1989), welche die grobe Abschätzung des Quelldruckes aus den einfacheren Quellmassbestimmungen erlaubt.

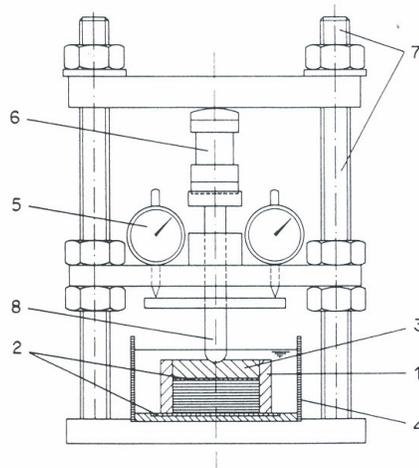


Fig. 4: Apparat zur Messung des Quelldruckes: 1 Stahlring; 2 poröse Metallplatte; 3 Belastungsplatte aus Stahl; 4 Gefäss; 5 Messuhren; 6 Druckdose, 7 steifer Rahmen; 8 Druckstempel (aus Madsen & Nüesch, 1991).

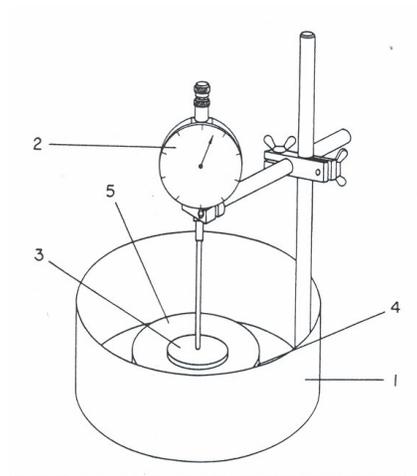


Fig. 5: Apparat zur Messung des axialen und radialen Quellmasses bei unbehinderter Quellung: 1 Gefäss; 2 Messuhr; 3 Keramikplatte; 4 Stahlband; 5 Probe (aus Madsen & Nüesch, 1991).

2.3.2 Wasser

Der natürliche Wassergehalt einer bergfrischen Probe gibt einen Hinweis auf die Menge und Art der darin enthaltenen Tonminerale und der geologischen Vorbelastung. Ein hoher Wassergehalt deutet auf viel Ton bzw. quellfähige Tonminerale oder aber eine grosse Porosität hin. Der Wassergehalt bezieht sich auf die ofentrockene (105 °C, 24 Stunden) Probe.

Wird die Probe im Labor zuerst luftgetrocknet und nachher ofengetrocknet, so ergibt die Differenz im Wassergehalt einen Hinweis auf das an den Tonmineralen adsorbierte Wasser. Aus dem volumetri-

schen Wassergehalt der Probe und deren spezifischen Oberfläche lässt sich der halbe Abstand zwischen den Tonteilchen berechnen.

2.3.3 Oberfläche

Die Bestimmung der spezifischen Oberfläche der Tonminerale erfolgt durch die Ermittlung der äusseren Oberfläche durch Stickstoff-Tiefemperatur-Adsorption nach der BET-Methode und durch Bestimmung der inneren Oberfläche durch Wasseradsorption (Madsen & Müller-Vonmoos, 1985). Bei der Berechnung wird vorausgesetzt, dass eine Schicht von 1g monomolekular verteiltem Wasser eine Oberfläche von 3500 m² bedeckt. Die innere Oberfläche ist ein Mass für den Gehalt an quellfähigen Tonmineralen.

2.4 Fallbeispiele

2.4.1 Allgemeines

Der geologische und geotechnische Datensatz für die Projektierung eines Untertagebauwerkes stammt meist aus Kernbohrungen. Für die Ermittlung des Quellpotentials mittels Quellversuchen ist die Art der Bohrung und die Probenentnahme sowie die Aufbewahrung des Kernmaterials entscheidend. Von grossem Nutzen für spätere Bauvorhaben ist die Entnahme von bergfrischen Proben in älteren Tunnels sowie in neuen Tunnels während des Vortriebes. An diesen Proben können die aus Bohrkernen ermittelten Quelldaten überprüft werden (Madsen, 1979; Steiner et al. 1989).

2.4.2 Ermittlung des Quellpotentials während der Projektierungsphase

Der Beginn der Projektierung des Bözbergtunnels der Nationalstrasse N3 geht auf den Anfang der 70er Jahre zurück. Bis in die beginnenden 80er Jahre wurden mehrere Linienführungen ausgearbeitet und verglichen mit dem Ziel, negative Auswirkungen auf das Thermalwasser der Therme Bad Schinznach zu vermeiden. Gleichzeitig wurde auch versucht, durch eine ideale Streckenführung den Eintrag betonaggressiver Wässer sowie Probleme mit drückenden tonigen Sulfatgesteinen zu minimieren.

Zur Ermittlung des Quellpotentials der einzelnen geologischen Schichten und Tunnelabschnitte wurden Bohrkern aus den verschiedenen Sondierbohrungen entnommen. Beprobte Tongesteine aus dem Lias, dem Opalinuston und der Passwang-Formation („Unterer Dogger“). An diesen Proben wurden Quelldruck- und Quellmassbestimmungen (unbehindertes Quellen) durchgeführt. Die ersten experimentellen Bestimmungen wurden an luftgetrockneten Bohrkernen durchgeführt. Im Opalinuston wurden Quelldrücke bis 2.8 MPa und Quellmasse bis 21% (Fig 6) ermittelt.

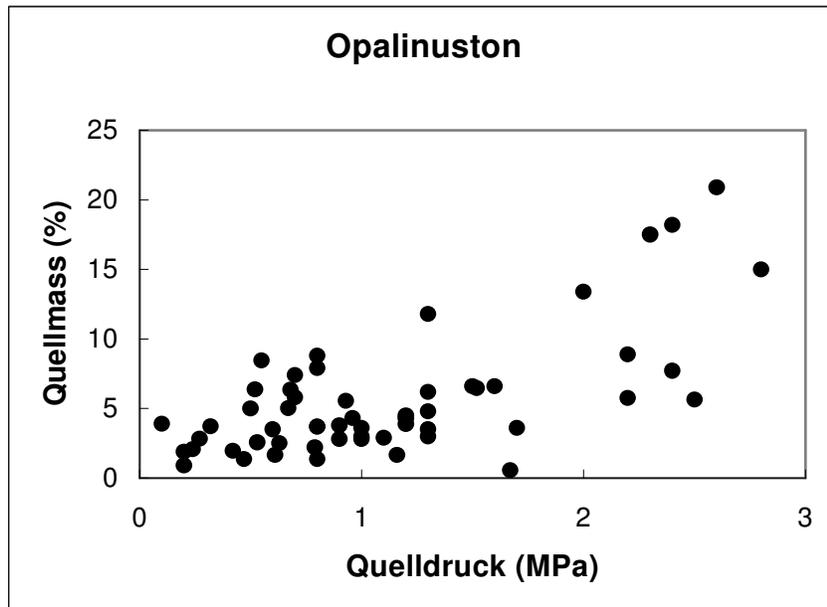


Fig. 6: Experimentell bestimmte Quellung an luftgetrockneten Bohrkernen von Opalinuston ergab Quelldrücke bis 2.8 MPa und Quellmasse bis 21% (nach Madsen & Müller-Vonmoos, 1985).

Madsen (1976) gelang in der Folge die Berechnung des Quelldruckes nach der DLVO-Theorie. Damit konnten Quelldrücke von Tongesteinen aus den mineralogischen Kennwerten berechnet werden. Diese Methode ist heute noch für Untertagebauten interessant, denn sie erlaubt, den Quelldruck auch an gestörten Proben zu bestimmen. Dabei wird der tonspezifische osmotische Druck für ein quellfähiges Gestein wie der Opalinuston in Abhängigkeit des halben Teilchenabstandes ermittelt. Diese Methode erlaubt z.B. die Überprüfung des Quelldruckes während des Tunnelvortriebes mit verhältnismässig einfachen Ermittlungen.

Messungen und Berechnungen ergaben, dass im Opalinuston mit beachtlichen Quelldrücken zu rechnen ist. Die mineralogischen Untersuchungen und die theoretischen Überlegungen zeigten aber auch, dass der Quelldruck stark vom Abstand der Tonteilchen abhängig ist. Wird also eine gewisse Quellhebung zugelassen, so die Schlussfolgerung, so reduziert sich der zu erwartende maximale Quelldruck.

Es stellte sich aber auch die Frage, wie zuverlässig Messungen an Proben aus Bohrkernen sind. Durch den Bohrvorgang werden bei aller Vorsicht der natürliche Wassergehalt des Tongesteins, und somit auch sein Quellverhalten und insbesondere sein Quellpotential verändert.

2.4.3 Bestimmung des Quellpotentials während des Baus an bergfrischem Material

Um eine unerwünschte Veränderung der Proben bei der Probennahme zu vermeiden, und um die Prognosen zu überprüfen, wurden beim Bau des Bözbergtunnels weitere Proben entnommen. Der Tunnelvortrieb wurde mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) durchgeführt. Mit diesem gegenüber dem Sprengvortrieb schonenden und wasserfreien Ausbruch wurde das Quellen während der Bauphase vermieden. Dieser trockene Vortrieb erlaubte auch die Bestimmung des Bergwassergehaltes an

Tongesteinen ohne Beeinträchtigung durch Bohrwasser. Die bergfrischen Proben wurden unmittelbar hinter dem Bohrkopf des TBM vom Förderband genommen und mit Wachs konserviert. Im Labor wurden die Proben für die Bestimmung des Quelldruckes und des Quellmasses trocken zugesägt und sofort in die Quellapparatur eingebaut. Mit den Abschnitten wurde der Bergwassergehalt bestimmt.

Der Bergwassergehalt (Einbau-Wassergehalt in die Quelldruckapparatur) wies folgende maximale, minimale und durchschnittliche Werte auf: A) Tongestein (6.4 %, 1.9 %, 4.4 %), B) Mergel (6.1 %, 0.7 %, 2.93 %). Aus dem Bergwassergehalt resultiert weder eine direkte Korrelation mit dem Quelldruck noch mit dem Quellmaß. D.h. das Probenmaterial ist heterogen und weist unterschiedliche Tongehalte resp. wasserzugängliche Oberflächen auf.

Karbonatbestimmungen ergaben für Proben aus dem Bereich 730 m ab Tunnelvortrieb Karbonatgehalte von 50-90 Gew.%. Die Proben wurden aufgrund der hohen Karbonatgehalte, welche für Mergel typisch sind, klassifiziert. Es resultierten folgende Quelldrücke und Quellmasse (Tab. 2).

	Tongestein	Mergel
Quelldruck (MPa)		
maximal	2.41	1.13
minimal	0.64	0.14
Durchschnitt	1.61	0.64
Quellmass (%)		
maximal	11.6	3.9
minimal	0.9	0.0
Durchschnitt	5.1	1.0

Tab. 2: Quelldruck und Quellmass von Tongestein und Mergel aus dem TBM-Vortrieb des Bözbergtunnels der Nationalstrasse N3.

Die Experimente haben gezeigt, dass sich Quelldrücke auch an Ausbruchmaterial bestimmen lassen. Die Proben für Quelldruckbestimmung wurden trocken (quadratische Grundfläche) zugesägt. Quelldrücke der Mergel (Effingerschichten) sind kleiner als jene von Tongesteinen. Vorteil des TBM-Probenmaterials ist die Möglichkeit, rasch den Bergwassergehalt zu bestimmen. Aus dem Bergwassergehalt allein kann das Quellpotential nicht abgeleitet werden. Dazu braucht es zusätzlich Kenntnis der wasserzugänglichen Tonmineraloberflächen.

Nachteil des Ausbruchmaterials einer TBM sind die im Vergleich zum Bohrkern unregelmäßigen und für konventionelle Quellversuche oft zu kleinen Gesteinsstücke. Die mit Abriebstaub bedeckten Gesteinsstücke erschweren zudem eine Gesteinsbestimmung vor Ort.

2.4.4 Einfluss der Entnahmemethode auf das Quellpotential

Es wurde verschiedentlich vermutet, dass die Art und Weise der Entnahme und Lagerung der Proben die Laborresultate entscheidend beeinflussen. So ergaben vorgängig gequollene Proben meist ausgesprochen tiefe, ausgetrocknete Proben aber als unrealistisch betrachtete hohe Werte.

Anlässlich der Sondierkampagnen für den Bözbergtunnel wurde deshalb das Quellpotential von Tongesteinen an Bohrkernen untersucht, welche mit Wasser resp. mit Zusatz von Antisol gebohrt wurden. Beim Tunnelbau ergab sich dank der trockenen Vortriebsart (TBM mit Vollschnittfräse, s. o.) die Möglichkeit, bergfrische Proben zu erhalten. Damit ergibt sich folgender Vergleich des Quellpotentials von Opalinuston resp. Tongesteinsproben mit früheren Arbeiten in Abhängigkeit der Methode der Probenentnahme:

Die Proben aus dem Vortrieb einer TBM zeigen gegenüber den mit Antisol gebohrten Proben deutlich höhere maximale Quelldrücke und höhere maximale Quellmasse, erreichen jedoch nicht die Werte von den konventionell mit Wasser gebohrten Proben, welche nachträglich auf Grund der Probenaufbewahrung teilweise ausgetrocknet waren und daher ein zu hohes Quellpotential vor-täuschten (Tab.3).

Opalinuston s.l.	Bohrkern mit Wasser gebohrt und luftgetrocknet (IGB Mitt. 108)	Bohrkern mit Antisol gebohrt (NTB 90-17)	Vortrieb trocken (diese Arbeit)
Quelldruck (MPa)			
maximal	2.8	1.7	2.41
minimal	0.7	0.2	0.64
Durchschnitt	1.7	1.0	1.61
Quellmass (%)			
maximal	18.2	8.8	11.6
minimal	4.8	0.9	0.9
Durchschnitt	11.9	3.8	5.1

Tab. 3: Vergleich der Quelldrücke und Quellmasse von Proben aus dem Bözbergtunnel (Nationalstrasse N2), welche mit drei verschiedenen Entnahmetechniken gewonnen wurden.

Die mit Antisol gebohrten Proben können während des Bohrvorgangs doch etwas Wasser aufnehmen und quellen, bevor die Proben einparaffiniert werden (Madsen & Nüesch, 1990). Die Quellwerte sind daher als minimale Werte zu betrachten. Umgekehrt können die trocken herausgefrästen Proben durch Reibungs- und Maschinenwärme etwas austrocknen. Daher werden die Quelldrücke und Quellhebungen von TBM-Proben eher als maximale Werte betrachtet.

2.4.5 Abplatzungen im Firstbereich

Im Bözbergtunnel (N3/600) kam es während des TBM-Vortriebes in der Molasse zu Abplatzungen im Firstbereich. Diese Abplatzungen sollten mit Mörtelinjektionen behoben werden, und dazu waren Kenntnisse über das Quellverhalten dieses Gesteins notwendig.

Da die Zeit drängte, wurden mineralogische Untersuchungen an zwei Proben (rotbraune Mergel) zur Ermittlung des Anteils der quellfähigen Tonminerale als mögliche Ursache und die Bestimmung der freien Quellhebung (Quellmass) gewählt..

Die tonmineralogische Untersuchung beider Proben ergab eine Zusammensetzung der Proben von 17-44 % Karbonat, 10-30 % Quarz, 35-40 % Tonminerale und <5 % Feldspat und Erze (Eisenhydroxid).

Der Anteil von quellfähigen Tonmineralen betrug ca. 10-20 % und bestand zur Hauptsache aus Montmorillonit. Die freie Quellhebung beider Proben betrug nach 200 Stunden 1 bis 1.6 % (Fig. 7a). Das unterschiedliche Quellverhalten der zwei Teilproben A und B von Probe 1108 widerspiegelt die mineralogische Heterogenität des Probenmaterials.

Beide Proben (Tübing 1084 und 1108) zeigten eine rasche unbehinderte Quellung, welche schon nach 1 Stunde 0.8 - 1.4 % Hebung erreichte (Fig. 7b). Dabei bekam Probe 1108 A, welche in der Matrix bis 0.5 cm grosse Karbonat-Klasten aufwies, schon nach 15 Minuten Risse. Diese Risse veränderten sich während des weiteren Verlaufs nicht mehr. Die beiden anderen Proben (Teilprobe 1108 B und 1084) blieben ganz. Die Rissbildung wird mit der heterogenen Verteilung der quellfähigen Matrix um die Karbonatklasten herum erklärt.

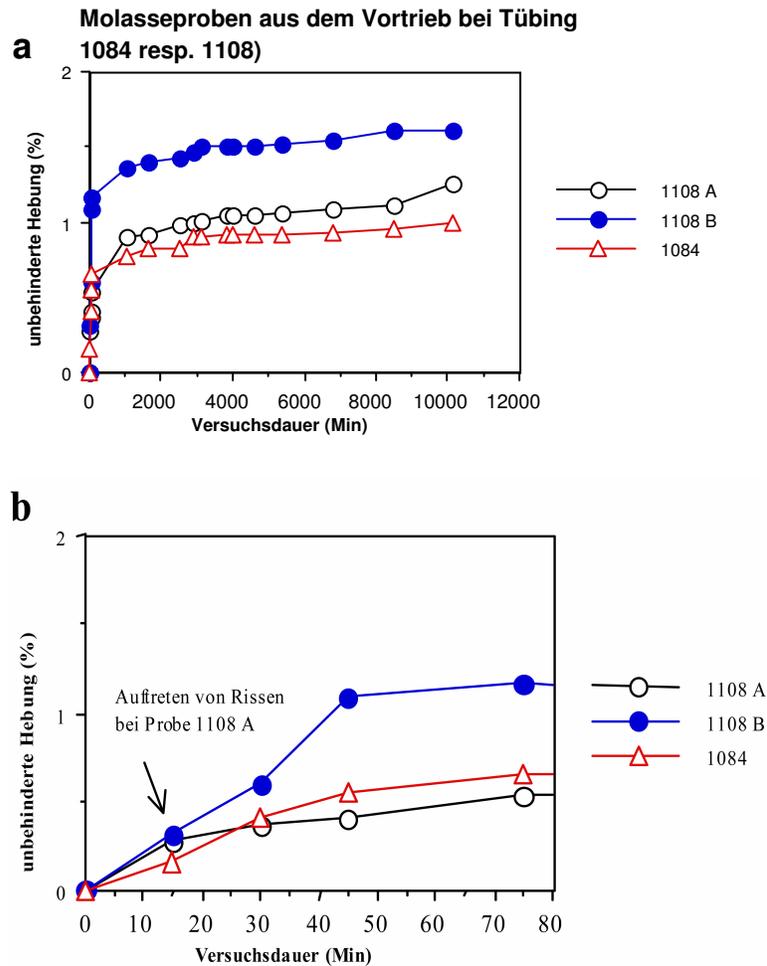


Fig. 7: Axiale Quellhebung (Quellmass) in Abhängigkeit der Zeit.

- a) Die Quellhebung betrug nach 200 Stunden 1 bis 1.6%.
- b) Detail aus a) zeigt rasche Quellhebung innert 80 Minuten.

Das Quellpotential der beiden Mergel ist mit 0.8 bis 1.4 % Quellhebung innert 24 Stunden eher klein im Vergleich zu Opalinuston (2-3 %) und entspricht mit ebenfalls 0.8-1.4 % Hebung innert 24 Stunden den Vergleichsproben der oberen Süsswassermolasse, welche anlässlich der zweiten Sondierkampagne für den Bözbergtunnel 1980 untersucht wurden.

Das vorliegende Probenmaterial quillt jedoch sehr rasch und zeigt 0.4 bis 1.1 % Quellhebung innerhalb der ersten Stunde (Fig. 7b zeigt Ausschnitt von Fig. 7a). Diese rasche Quellhebung sowie das knollige Gefüge mit Karbonatklasten führten vermutlich zur Rissbildung bei der Probe I 108 A.

Das Vergleichsmaterial Opalinuston zeigte nach einer Stunde Quellhebungen von 1-2 % und die obere Süsswassermolasse 0.2-0.5 %. Die Endwerte der Quellhebung der oberen Süsswassermolasse betragen nach 32 Tagen ca. 3 %. Die Probenauswahl ist kaum repräsentativ, weil durch die Probenentnahme während des Vortriebes (Probe Tübing 1084) und von der Brust (Probe Tübing 1108) die grösseren Stücke und damit die härteren, tonarmen bevorzugt wurden. Daher musste mit örtlich höheren Quellhebungen gerechnet werden.

2.4.6 Der Einfluss von mineralisiertem Wässern auf das Quellverhalten

Im Bözbergtunnel treten Quellen mit hochmineralisierten Tiefenwässern in der Schuppenzone des Faltenjuras zu Beginn des Streckenbereichs im Opalinuston und in den Effingerschichten auf. Das Wasser zeichnet sich durch hohe Natriumgehalte aus. Falls die Tone in Calcium-Form vorliegen, können natriumhaltige Tiefenwässer das Quellverhalten und das Scherverhalten durch Ionentausch im Ton ungünstig beeinflussen (höhere Quelldrücke, geringere Scherfestigkeit).

Um dies zu überprüfen wurden Proben aus dem kritischen deformierten Streckenbereich (mit hochmineralisierten Wässern) entnommen, und die austauschbaren (einwertigen und zweiwertigen) Kationen bestimmt. Die untersuchten Proben lagen bereits in einwertiger Ionenform (Na^+ -Form) vor. Es erfolgt daher durch den Kontakt dieser Proben mit Na-haltigen Wässern kaum ein Ionentausch und auch keine Umwandlung. Quellversuche belegen, dass durch hohe Ionenkonzentration die treibende Kraft der Quellung (Osmose) eingeschränkt wird und zu geringeren Quellungen führt.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die deformierten Bereiche im Gebirge mehr Na-Ionen aufweisen als die undeformierten Bereiche. Diese bemerkenswerte Tatsache könnte auf eine teilweise stattgefundene Umwandlung der Tone infolge der Jurafaltung hinweisen. Die Umwandlung der Tone von zweiwertiger in einwertige Ionenform wird mit dem spröden Verhalten von Tongestein (Nüesch, 1991) unter den Bedingungen der Jurafaltung im Bereich der Überschiebungszone erklärt. Dabei wird die Wegsamkeit für aufsteigende mineralisierte Wässer an den Überschiebungsbahnen begünstigt. Durch tektonische Hebung und Erosion seit Beginn der Aufschiebung fand eine zusätzliche Wasseraufnahme der Tone statt, welche den Ionenaustausch erleichtert.

Die Opalinus- und Effingertone liegen in Na-Form vor ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) > ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), weisen aber immer noch Gehalte zwischen 29 und 49 % zweiwertiger Kationen auf. Eine vollständige Belegung der austauschbaren Kationen durch Natrium (100 %-Umwandlung) braucht bei Tonen mit drei adsorbierten Wasserschichten eine sehr hohe Salzkonzentration (NaCl) von mindestens 106 g/l. Bei Tonen mit vier und mehr adsorbierten Wasserschichten genügen 56 g/l NaCl. Die Wasserproben aus dem Bözberg weisen Na-Gehalte von <30 g/l auf bei einer totalen Ionenkonzentration von <50 g/l (mündl. Mitt. M. Wegmüller).

Durch den Kontakt von Opalinus- und Effingertonen mit Na-haltigen Wässern wird daher bei den tektonisierten Proben kaum ein vollständiger Ionentausch stattfinden. Durch die hohe Ionenkonzentration wird die treibende Kraft der Quellung (Osmose) eingeschränkt, und es sind geringere Quellungen zu erwarten. Das bestehende Vorliegen der Tone in Na-Form bedeutet für den Tunnelbau allgemein geringe Scherfestigkeit des tonigen Materials und anhaltende Quellung bei Zufuhr von Wasser geringer Mineralisation, wie z.B. durch Betriebswasser.

Quelldaten von Tongesteinen werden im Labor normalerweise mit destilliertem Wasser ermittelt und sind für die Abschätzung der Auswirkung von hochmineralisierten Wässern auf das Quellverhalten somit nicht relevant. Um den Einfluss der Mineralisation zu ermitteln wurden Quellhebungsversuche mit unterschiedlich konzentrierten Lösungen durchgeführt.

Das Quellmass wird in axialer Richtung in einer allseitig frei quellenden Probe gemessen und in Prozent der ursprünglichen Probenhöhe angegeben. Proben mit hohem Quellmass weisen auch hohe Quelldrücke auf.

Für die Experimente wurde wenn möglich das gleiche Probenmaterial genommen wie jenes, an welchem die Bestimmung der austauschbaren Ionen erfolgte. Die Probe wurde in drei Teilproben von 2-3 cm Höhe geschnitten. Da die Schichtung bei allen Proben steil zur Bohrkernachse (ca. 60-70°) verläuft, sind die Teilproben mineralogisch vergleichbar. Der Einfluss der Salzkonzentration auf das Quellen wurde an den drei Teilproben mit destilliertem Wasser, Leitungswasser und gesättigter Kochsalzlösung untersucht. Die gesättigte Kochsalzlösung stellt mit 360 g NaCl/Liter bei 20°C den Maximalwert einer reinen Lösung dar. Die gesättigte Kochsalzlösung wird als Extremwert eines salzführenden Tiefenwassers betrachtet (im Tunnel <30 g/l).

Die Quellhebung der untersuchten Proben ist erwartungsgemäss abhängig vom genetisch zusammengehörenden Gesteinsverband (Formation) und vom Zustand der Probe beim Einbau. Die grosse Spannweite beim Opalinuston von 2.8 bis 15.1 % Quellhebung bei Verwendung von destilliertem Wasser beruht auf dem Einbau der lufttrockenen Probe vom Vortrieb bei 611 m und der mit Wasser gebohrten und gesägten einparaffinierten Probe der Extensometerbohrung bei 572 m (Tab. 4). Die übrigen Proben aus den Extensometerbohrungen wurden trocken gesägt.

Beim Opalinuston und der Probe aus der Passwang-Formation („Unterer Dogger“) ist die Quellhebung in gesättigter NaCl-Lösung deutlich geringer und beträgt noch ca. 1/3 des Wertes der Quellhebung mit destilliertem Wasser (Tab.4).

Formation	OPA	OPA	UD	Eff	Eff
Vortrieb	572 m	611 m	572 m	790 m	790 m
Tiefe	18.0-8.2 m		15.8-16.0 m	29.8-30.0 m	30.0-30.3 m
destilliertes Wasser	2.8 %	15.1 %	4.2 %	0.2 %	1.3 %
Leitungs-Wasser		19.7 %	1.2 %	0.2 %	0.6 %
gesättigte NaCl-Lösung	0.9 %	6.4 %	1.1 %	-0.04 %	0.6 %

Tab. 4: Quellhebung (Quellmass) von Proben aus Opalinuston (OPA), der Passwang-Formation („Unterer Dogger“, UD) und Effinger-Schichten (Eff) in Abhängigkeit des verwendeten Wassers

Der Umstand, dass toniges Material auch in einer gesättigten NaCl-Lösung quellen kann, wird auf die noch höhere Ionenkonzentration im Zwischenschichtraum resp. in der Doppelschicht zurückgeführt. Eine Probe aus den Effinger-Schichten schrumpfte unter Einwirkung von gesättigter NaCl-Lösung. Die zweite Effinger-Schichten-Probe hingegen quoll mit Leitungswasser und gesättigter NaCl-Lösung in gleichem Ausmass.

Durch das Vorkommen von Na-haltigen Wässern mit hoher Salzkonzentration wird bei Opalinuston und Effingerschichten kein höheres Quellpotential erwartet. Die untersuchten Proben liegen bereits in einwertiger Ionenform (Na^+ -Form) vor. Es erfolgt daher durch den Kontakt dieser Proben mit Na-haltigen Wässern kaum ein Ionentausch und auch keine Umwandlung. Quellversuche belegen, dass durch hohe Ionenkonzentration die treibende Kraft der Quellung (Osmose) eingeschränkt wird und zu geringeren Quellungen führt. Ein Quellen der Proben in gesättigten Kochsalzlösungen kann nur mit einer noch höheren Ionenkonzentration im Zwischenschichtraum der Tonteilchen erklärt werden.

2.4.7 Vergleich verschiedener Daten zu Quellhebungen im Betriebszustand (In situ- und Labormessungen)

Sohlhebungen von bis 4.7 m, Hebungsraten von bis 0.1 m in zehn Tagen und Bewegungen, die schon Jahrzehnte anhalten (Fig. 8), haben einen Einfluss auf den Betriebszustand der Untertagebauwerke (z.B. Einstein, 1979, 1993, 1996). Einige der Bahn- und Strassentunnels in quellendem Gestein mussten im Verlauf der Nutzungsdauer saniert werden. Untersuchungen für die Instandstellung bestehender Tunnels sowie für Neubauten liefern wertvolle neue Erkenntnisse und einen fortlaufend grösseren Erfahrungs- und Datenschatz. So wurden z.B. in Verbindung mit Erneuerungsarbeiten am Belchentunnel intensive Feld- und Laboruntersuchungen durchgeführt (Fig. 9). Von speziellem Interesse waren dabei die tonhaltigen Anhydritgesteine des Gipskeupers (z.B. Madsen et al. 1995; Vögtli & Jordan, 1996, Kapitel 3 dieser Arbeit).

Jedes Untertagebauwerk stellt bezüglich der lokalen Geologie, Tektonik und dem Bauwerk eine einmalige Situation dar. Ein Prozessverständnis verlangt aber grundlegende Kenntnisse, welche auf eine spezielle Situation angewandt werden können. Ungeachtet dessen wurden die Resultate verschiedener Tunnelbauwerke der Nordschweiz zusammengestellt (Fig. 10).

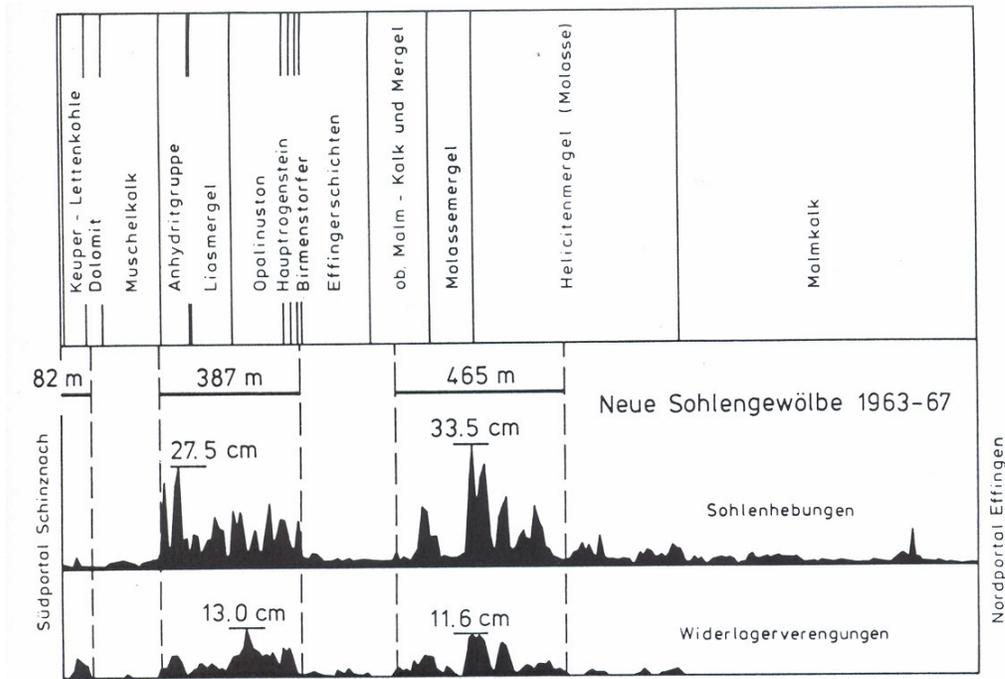


Fig. 8: Sohlhebungen von bis zu 60 cm im Bözbergtunnel und Verengung der Widerlager von 1923-1954 (aus Beck & Golta, 1972).

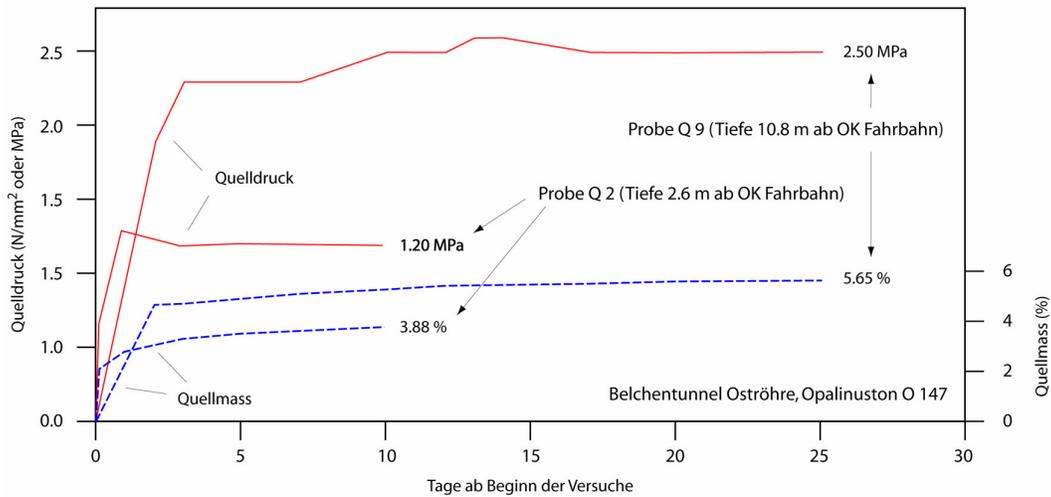


Fig. 9: Quelldruck und Quellmassexperimente an tonhaltigen Proben (Opalinuston) aus dem Belchentunnel. Die Proben wurden einer Bohrung entnommen, welche rund 25 Jahre nach der ersten Durchörterung aus dem Tunnel abgeteuft wurden. Die Probe aus geringerer Tiefe ab OK Fahrbahn zeigt bei einem schnelleren Einsetzen der Quellbewegungen deutlich geringere Maximalwerte (vgl. Fig. 10).

Mit zunehmender Überlagerung nimmt der Quelldruck eines Tongesteines aufgrund der Abnahme des Teilchenabstandes zu. Diese Tendenz lässt sich in der Zusammenstellung der Resultate verschiedener Quelldruck-Experimente an Opalinuston-Proben aus der Nordschweiz trotz starker Streuung

eindeutig belegen (Fig. 10). Die Streuung ist in erster Linie auf Unterschiede in der Mineralogie und der Textur der Proben zurückzuführen. Weitere Ursachen sind Unterschiede in der Probennahme und der experimentellen Konfiguration. Interessant ist, dass sich diese Abhängigkeit auch bei den Proben aus dem Belchentunnel zeigt, welche aus Bohrungen stammen, welche rund 25 Jahre nach dem Bau aus der Tunnelsohle abgeteuft wurden. Hier spielt allerdings weniger die Tiefe unter OK Terrain sondern die Tiefe unter der Fahrbahn eine Rolle (Fig. 10). Die beobachteten Quelldrücke entsprechen Proben aus ca. 20 bis 120 m Tiefe, obwohl die Tiefe unter Terrain tatsächlich rund 500 bis 750 m beträgt. Ursache dieser Differenz ist die durch den Tunnelbau erfolgte teilweise Entlastung.

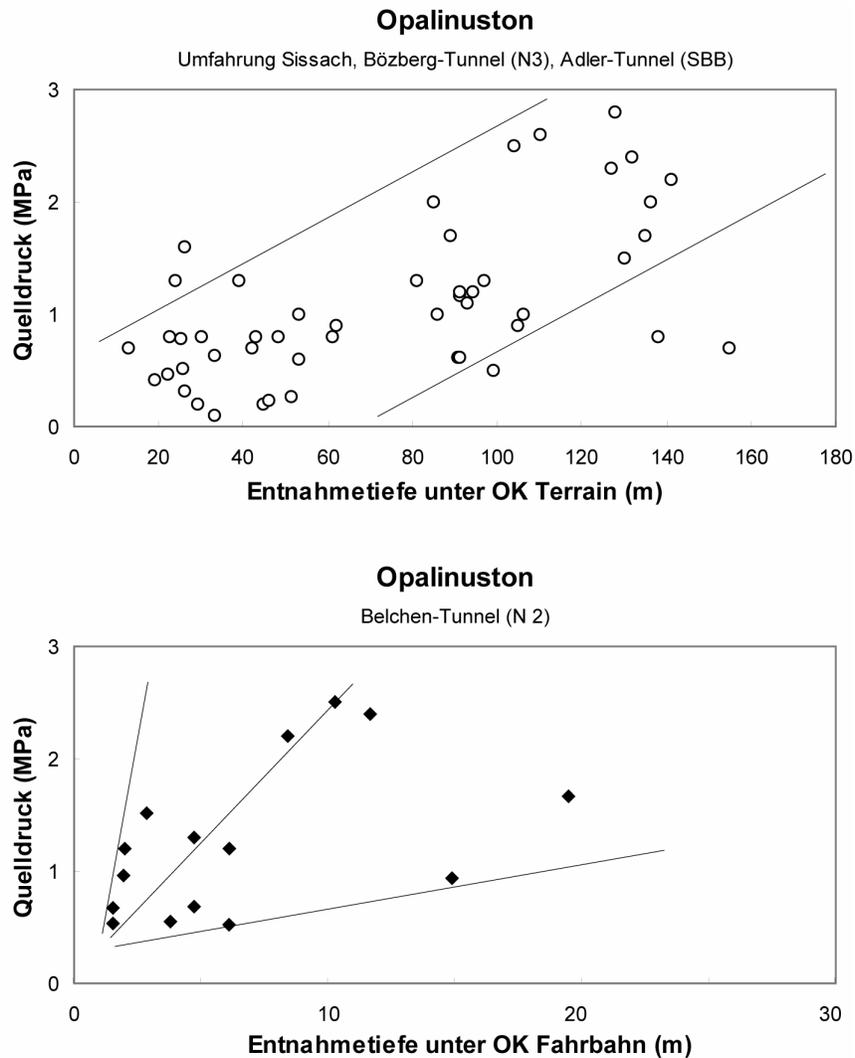


Fig. 10: Im Labor gemessene Quelldrücke von Opalinuston-Proben aus verschiedenen Juratunnels in Abhängigkeit der Tiefe der Probenentnahme. Oben: Proben aus den Sondierbohrungen für die Tunnels Bözberg (N3), Chienberg (Umfahrung Sissach) und Adler (SBB); Tiefenangabe ab OK Terrain. Trotz grosser Streuung ist eine klare Tendenz erkennbar. Unten: Proben aus Bohrungen, welche 1991, d.h. rund 25 Jahre nach dem Auffahren des Belchentunnels (N2), aus der Tunnelröhre abgeteuft wurden, Tiefe ab OK Fahrbahn (Überlagerung ab OK Terrain ca. 500 bis 750 m). Median und Umhüllende weisen auf eine klare, allerdings von vielen weiteren Faktoren (Mineralogie, vorgängige Vergipsung etc.) überdeckte Tendenz hin.

2.4.8 Prognosen erwarteter Quelldrücke auf der Basis von Quellhebungsdaten

Quelldruck-Experimente sind aufwendig und teuer. Hier soll diskutiert werden, ob die maximal zu erwartenden Quelldrücke von Tongesteinen nicht auch mit den einfacheren und kostengünstigeren Quellhebungsexperimenten indirekt bestimmt werden können. Zu diesem Zweck wurden die bisherigen Resultate zur Quellhebung und zum Quelldruck von Opalinuston und Proben aus der Passwang-Formation („Unterer Dogger“) zusammengestellt.

Sowohl beim Opalinuston als auch bei den tonigen Gesteinen der Passwang-Formation („Unterer Dogger“) gibt es einen Zusammenhang zwischen Quellhebungen und Quelldrücken (Fig. 11 und Fig. 12). Insgesamt ergeben sich beim Opalinuston mit höherem Quelldruck auch grössere Quellhebungen, allerdings mit einer recht grossen Streuung (Fig. 11). Die höchsten gemessenen Quelldrücke und Quellhebungen resultieren aus der Serie Bözberg I. Diese Untersuchungen gehen auf den Beginn der Projektierung des Bözbergtunnels der Nationalstrasse N3 zurück (Madsen 1976). Die hohen Werte von über 2.5 MPa Druck und 20 % Hebung wurden an luftgetrockneten Bohrkernen bestimmt und hängen mit der Austrocknung des Opalinustones zusammen. Die Resultate der Proben der Serie Bözberg II, welche unmittelbar an der Ortsbrust während des Tunnelvortriebs gewonnen wurde (Madsen & Nüesch, 1990), zeigen deutlich geringere Drücke und Hebungen. Dies kann auf die geringere Beeinflussung vor der Probenahme (trockener TBM-Vortrieb statt nasse Bohrung) zurückgeführt werden. Die Werte einer späteren Probenahme (Bözberg III) liegen zwischen den Daten der Proben aus den Sondierbohrungen und von der Ortsbrust. Innerhalb der Schere der verschiedenen Bözberg-Werte liegen die Resultate aus den Bohrungen, welche 25 Jahre nach dem Bau aus der Tunnelröhre abgeteuft wurden. Die Proben des Adler- (SBB) und Chienbergtunnels (Umfahrung Sissach) weisen demgegenüber tiefere Werte auf (Tab. 5). Erwartungsgemäss geringe Werte weisen die Proben auf, welche aus rund 910 m Tiefe der Nagra-Bohrung Weiach stammen (Madsen & Nüesch 1990).

Die Proben der Passwang-Formation („Unterer Dogger“) zeigen gesamthaft ein ähnliches Bild. Bis auf die Bözbergproben stammen alle anderen aus dem Grellingertunnel. Die verschiedenen Formationen zeigen unterschiedliche Quellung mit höheren Werten im Vergleich zum Bözbergtunnel (Fig. 12).

Probe	Anzahl	Maximal		Minimal		Durchschnitt	
		Qd (MPa)	Qm (%)	Qd (MPa)	Qm (%)	Qd (MPa)	Qm (%)
Bözberg I	12	2.80	20.9	0.70	6.6	1.79	11.6
Bözberg II	19	1.70	8.8	0.10	2.8	0.90	3.8
Bözberg III	7	2.41	11.6	0.64	1.4	1.61	5.1
Belchen	15	2.50	8.5	0.55	2.6	1.26	5.7
Sissach	7	0.80	3.7	0.20	1.9	0.41	2.5
Adler	6	1.16	1.7	0.47	1.4	0.70	1.5
Weiach	2	1.1	4.6	0.3	4.5	0.70	4.6

Tab. 5: Quellung von Opalinuston mit den Messwerten zu den maximalen, minimalen und durchschnittlichen Quelldrücken (Qd) resp. Quellmasse (Qm) verschiedener Herkunft. Bözberg I – III: verschiedene Probenahmen während Projektierung und Bau des Bözbergtunnels der Nationalstrasse N 3; Belchen: Probenahmen im Belchentunnel der Nationalstrasse N 2 (Betriebsphase); Sissach: Probenahme während Projektierung und Bau des Chienbergtunnels der Umfahrung Sissach; Adler: Probenahme während Projektierung und Bau des Adlertunnels (SBB); Weiach: Proben aus der Nagra-Tiefbohrung Weiach.

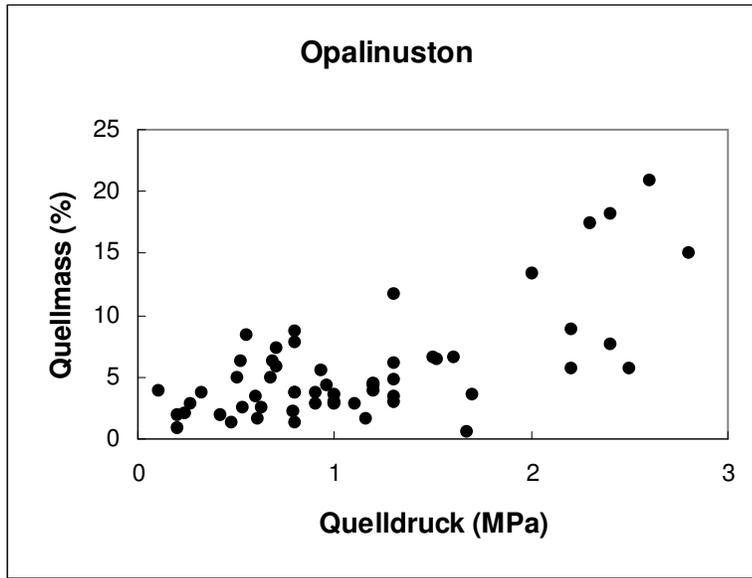


Fig. 11: Quelldruck versus Quellmass von Proben verschiedener Lokalitäten im Jura.

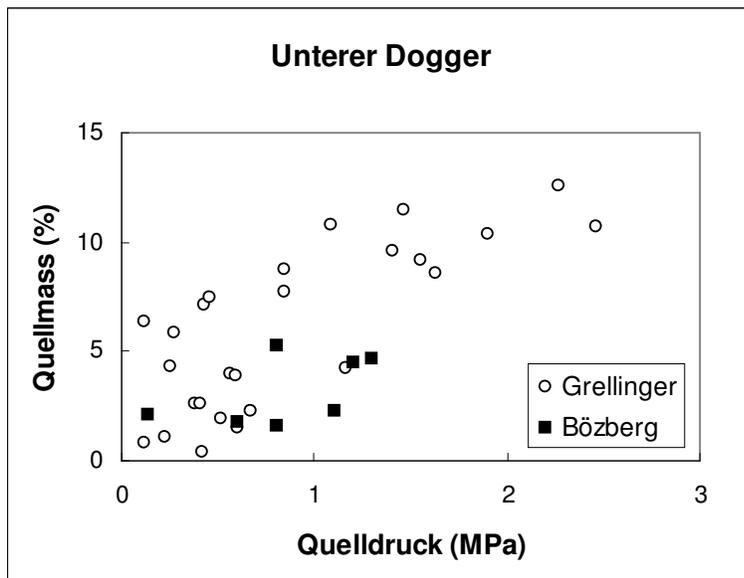


Fig. 12: Quellmass versus Quellhebung verschiedener Formationen aus dem Grellinger Tunnel und aus der Passwang-Formation („Unterer Dogger“) des Bözbergtunnels.

Aus den vorliegenden Daten kann geschlossen werden, dass sich Quellhebungsversuche (Quellmass) aufgrund der relativ grossen Streuung der Werte und der z. T. geringen Korrelation mit gemessenen Quelldrücken nicht als direkter Ersatz für die Messung des Quelldrucks mittels Laborversuchen oder für die Berechnung aus mineralogischen Kennwerten eignen. Dennoch geben diese rasch durchgeführten Quellversuche einen ersten Hinweis auf das Quellpotential.

2.4.9 Auswirkung einer Vorbelastung auf das Quellverhalten

Zentraler Faktor für die Auslösung von Quellvorgängen in Tongesteinen ist neben dem Wasserzutritt die Druckentlastung. Es stellte sich darum die Frage, ob Quellvorgänge möglicherweise durch eine Vorbelastung unterbunden oder doch abgemindert oder verzögert werden können.

Vier Gesteinsproben aus dem Callovionton der Umfahrung Grellingen (Grellingertunnel) und drei aus dem Opalinuston der Umfahrung Sissach (Chienbergtunnel) wurde vor der Wässerung mit verschiedenen Drücken stufenweise über die Zeitdauer von mehreren Wochen vorbelastet (bis max. ca. 2-fache Gebirgsüberlastung). Nach jeder Lastaufbringung stellte sich in der Probe eine Konsolidationsphase ein, während der sich die erhöhte Spannung etwas abbaute (Fig. 13). Beim Beginn der Wässerung reichten die aufgebrauchten Drücke vom 2.7 bis 7.3 Mpa, was einer Gebirgsüberlastung von rund 100 bis 300 m entspricht.

Unmittelbar nach der Wässerung zeigten die meisten Proben einen geringen aber merklichen Druckabfall von 4 bis 6%. Bei einer Probe betrug der Druckabfall gar 15%. Danach entwickelten 5 der Proben einen starken Quelldruck, der, als Differenz zwischen Maximaldruck und dem Druck unmittelbar nach Wässerung betrachtet, in der bekannten Schere von 0,8 bis 2,5 MPa liegt. Absolut wurde die maximal applizierte Vorbelastung bei einer dieser Proben knapp bei den übrigen vier deutlich übertroffen (Fig. 13 und Tab. 6). Nur zwei der sieben Proben entwickelten einen maximalen Quelldruck, der absolut unter dem Wert der applizierten Vorbelastung liegt. Eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Wert der Vorbelastung und dem maximalen Quelldruck konnte nicht festgestellt werden.

Eine Vorbelastung des Gesteins kann das Quellen nicht zuverlässig unterbinden. Die Tonminerale bleiben auch unter hohem Überlagerungsdruck quellfähig.

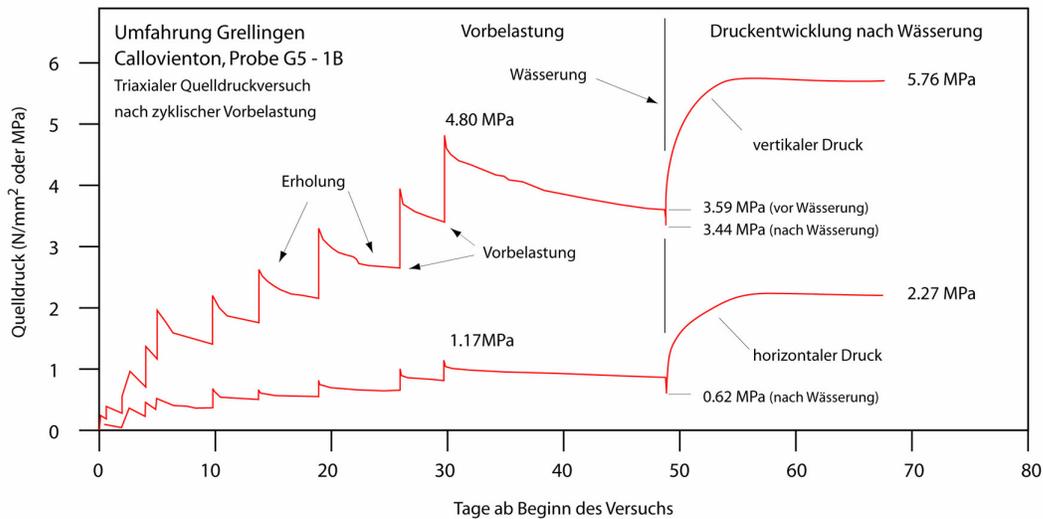


Fig. 13: Verschiedene Proben aus dem Grellingertunnel wurden vor dem Quelldruckversuch stufenweise vorbelastet. Bei dem hier gezeigten Versuch wurde die Probe G5-1B aus dem Callovionton vertikal bis 4.80 MPa vorbelastet. Der Druck betrug vor der Wässerung 3.56 MPa. Nach der Wässerung fiel er kurzfristig auf 3.44 MPa ab um dann wieder anzusteigen. Nach ca. 5 Tagen wurde ein Quelldruck von 5.76 MPa erreicht, der anschließend konstant blieb. Der durch das Quellen induzierte vertikale Druckanstieg betrug also 2.2 MPa. Dies entspricht den Werten, welche bei nicht vorbelasteten Proben beobachtet werden.

Probe	Geologie	Max. Vorbelastung	Belastung bei Wässerung	Minimum nach Wässerung	Maximaler Quelldruck	ΔP
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
RB 20-15A	Opalinuston	4.495	3.852	3.613	4.731	1.118
RB 20- 15B	Opalinuston	6.763	6.399	6.067	6.908	0.841
RB 20-15C	Opalinuston	5.847	5.546	5.204	5.376	0.172
G 5-1B	Callovienton	4.803	3.588	3.436	5.755	2.319
G 5-4A	Callovienton	3.337	2.657	2.264	3.735	1.471
G 5-4C	Callovienton	3.469	2.705	2.553	3.787	1.234
G 5-7	Callovienton	8.295	7.288	6.839	7.164	0.325

Tab. 6: Kennwerte der Quellversuche an vorbelasteten Proben. Zur Erklärung der Begriffe sei auf Fig. 13 verwiesen. Dargestellt ist vertikale Druckentwicklung.

2.5 Schlussbemerkungen zur Tonquellung

Das Problem der Tonquellung ist sowohl theoretisch als auch in der Praxis, z.B. beim Tunnelbau, weitgehend gelöst. Eine Spannungsverminderung resp. Entlastung des Tongesteins ermöglicht eine Volumenzunahme zuerst ohne („mechanisches Quellen“) dann durch Wasseraufnahme. Das Wasser kann dabei sowohl aus dem Bauwerk (Tunnelwasser) wie auch aus dem umliegenden Gebirge stammen. Für den zeitlichen Ablauf der Quellung spielt das Wasserdargebot, die Art der Wasserzufuhr und der Wasserwegsamkeit des Gesteins eine wesentliche Rolle. Quellversuche an Tongesteinen sind unter Laborbedingungen innerhalb von wenigen Tagen oder Wochen beendet. Quellvorgänge im Gebirge in Form von Sohlhebungen und Verengungen der Widerlager können sich über viele Jahrzehnte erstrecken (Beck & Golta, 1972).

Die Anlagerung von Wasser an die Tonteilchen kann mit Hilfe der Doppelschichttheorie erklärt werden. Daraus ergibt sich die Abhängigkeit des Quellpotentials vom Abstand zwischen den mit Wasser belegten Oberflächen der Tonteilchen. Je grösser die Überlagerung im Gebirge, desto kleiner sind diese Abstände. Das Quellpotential wächst also generell mit der Tiefe. Das Quellpotential ist auch von der Menge und Art der austauschbaren Kationen abhängig. Einwertige Kationen verursachen viel grössere Quellpotentiale als zweiwertige.

Veränderungen der Zusammensetzung des Porenwassers wie pH, Ionenkonzentration sowie Änderungen am Ton durch Ionentausch haben einen Einfluss auf die Dicke der Doppelschicht, und damit wird auch die Quellung beeinflusst. Bei Kenntnis aller Ton-Elektrolyt-Parameter können die Quelldrücke berechnet werden.

Die bisher in der Nordschweiz gemessenen und berechneten Quelldrücke an Tongesteinen mit einer Überlagerung von maximal 400 m betragen bis ca. 3 MPa.

Eine zugelassene Quellhebung bewirkt eine Absenkung des Quelldrucks. Diese Tatsache wird z.B. bei der so genannten Knautschzone (Kovári et al. 1987) ausgenützt.

3. Quellen von Sulfatgestein

3.1 Einleitung

Das Quellen von tonhaltigen Sulfatgesteinen äussert sich bei Untertagebauten in jahrzehntelang andauerndem, sich immer wieder neu aufbauendem Druck, welcher zum Versagen des Sohlgewölbes, vereinzelt aber auch der Strossen und des Firstes führen kann und somit wiederholt grössere Sanierungen bedingt. Um dieses Quellen zu verhindern wird heute während den Bauarbeiten, wenn immer möglich, jeglicher Wasserzutritt zum sulfathaltigen Tongestein vermieden. Die Praxis hat indes gezeigt, dass die Quellvorgänge nach einiger Zeit, ungeachtet aller Vorkehrungen, trotzdem und oft mit unerwarteter Heftigkeit einsetzen. Tonhaltige Sulfatgesteine entwickeln dabei oft deutlich grössere Quelldrücke als sulfatfreie Tongesteine (Anagnostou 1992, Berner 1991, Brux 1998, Einstein, 1979, Grob 1972, Kirschke 1992, Madsen et. al. 1995, Rick 1990, Steiner 1993, Wichter 1989, Yilmaz 2001).

Inhalt dieses Kapitel ist es, die Prozesse, welche beim Quellen sulfathaltiger Gesteine eine Rolle spielen, näher zu betrachten, und Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Quellen sulfatfreier Tongesteine aufzuzeigen. Die Ausführungen haben, wie bereits das Kapitel „Tonquellung“, zum Ziel, das Ausmass und die Dauer der Quellprozesse zu erfassen und mögliche Massnahmen zur Verhinderung oder Eindämmung des Quellprozesses aufzuzeigen

Gerade zu den zu erwartenden maximalen Quelldrücke in sulfathaltigen Gesteinen gibt es heute sehr kontroverse Ansichten. So beschreibt z. B. Steiner (1993) Quelldrücke von 1.5-3 MPa in den Schweizer Tunnelabschnitten mit tonhaltigem Anhydritgestein (der gleiche Autor nennt für sulfatfreie Tongesteine Quelldrücke von 0.17-0.8 MPa). Kälin & Schmid (1992) weisen auf die Diskrepanz zwischen in-situ-Messungen, welche 0.5-2.5 MPa ergeben haben und Laborexperimenten an den selben Proben hin, bei welchen Quelldrücke von bis zu 7 oder in einem Fall gar 8,4 MPa gemessen wurden. Wichter (1992) warnt demgegenüber davor, die Laborwerte als Maximalwerte zu betrachten, da – langfristig – in Tunnels noch weit grössere Drücke auftreten können, als je im Labor gemessen werden.

3.2 Definition, Auftreten und Ursprung der Sulfatgesteine

Unter dem Begriff Sulfatgesteine werden hier Gesteine zusammengefasst, welche grössere oder kleinere Mengen an Gips oder Anhydrit enthalten. Bei Gips und Anhydrit handelt es sich in beiden Fällen um Calciumsulfat (CaSO_4). Dabei hat Gips pro Formeleinheit zwei Wassermoleküle in seinem Kristallgitter eingelagert, was in der Formel $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ zum Ausdruck kommt. Demgegenüber enthält Anhydrit (wörtlich „wasserfrei“), wie bereits der Name sagt, kein Kristallwasser. Neben den beiden genannten Calciumsulfaten treten in den Sulfatgesteinen noch weitere Sulfate auf, so z.B. Strontiumsulfat (Cölestin). Mengenmässig ist ihr Anteil allerdings, sowohl im Bezug zum Gesamtgestein wie auch zum Calciumsulfat, so gering, dass sie hier nicht weiter betrachtet werden müssen. Auf Bassanit, ein weiteres Calciumsulfat, ist später noch speziell einzugehen.

Sulfatgesteine entstanden mehrheitlich durch Verdampfung von Meeres- und Grundwasser in wüstenartigem Klima. In unserem Gebiet waren die entsprechenden klimatischen und geographischen Bedingungen vor allem während der Triaszeit (vor 248 bis 206 Millionen Jahren) gegeben. Die wichtigsten Vorkommen von Sulfatgesteinen in der Schweiz sind an Ablagerungen dieser Zeit gebunden: „Anhydritgruppe“ und „Gipskeuper“ im Tafel- und Faltenjura und die „Rauhacke und Gips-Einheit“ („cornieules et gypse“) der Préalpes romandes zwischen Thunersee und Montreux sowie in den Giswiler Klippen. Ebenfalls aus der Trias-Zeit stammen die Sulfatgesteine der „Raiblerformation“ (in Süd-

und Mittelbünden sowie im Südtessin), des „Rötidolomits“ (Pizolgebiet) sowie der Piora-Zone südlich des Gotthards. Selten, aber dennoch von lokaler Bedeutung, sind Sulfatgesteinsvorkommen aus der späten Jura-Zeit und der mittleren Tertiärzeit (z.B. im Gebiet von Delémont).

Man geht heute davon aus, dass aus dem Meeres- und Grundwasser ursprünglich überwiegend Gips und nur untergeordnet primärer Anhydrit ausgefällt wurde (z.B. Sonnenfeld 1984, Shearman 1985, Dronkert, 1987, Dronkert et al. 1990). Erst unter der Überlast späterer Ablagerungen und dem Einfluss der Erdwärme wurde der Gips sukzessive und schliesslich vollständig durch Anhydrit ersetzt. Der hier betrachtete Prozess, die „Vergipsung“ des Anhydrits ist also quasi die Umkehrung der „Anhydritisierung“ des ursprünglichen sedimentären Gipses.

Abhängig davon, ob der Gips durch Einengen oder gar Verdampfen isolierter Meeresbecken oder aber durch die Verdunstung von Grundwasser entstanden ist, ist er mit grösseren oder kleineren Mengen fremder Mineralien vermischt. Übliche Nebengemengteile sind primärer Anhydrit, Tonminerale, Dolomit und Magnesit (MgCO_3) sowie, untergeordnet, Quarz, Steinsalz und Cölestin. Massige Bänke aus fast reinem Gips oder primärem Anhydrit ($> 95\% \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ und CaSO_4) entstehen als Folge eines langsamen und ungestörten Eindampfens isolierter Meeresbecken (z.B. Dronkert, 1987, Dronkert et al. 1990).

3.3 Das System Anhydrit-Wasser-Gips

3.3.1 Die Anhydrit-Gips-Umwandlung in industriellen Prozessen

Gips spielt im Baugewerbe seit jeher eine wichtige Rolle. In seiner Anwendung ist die Gips-Anhydrit-Umwandlung von zentraler Bedeutung (z. B. Hauber & Stucky 1997). Der möglichst anhydritfreie Gips wird in speziellen Öfen gebrannt, also dehydriert. Dabei wird darauf geachtet, dass der Gips nicht zu Anhydrit „tot gebrannt“ wird. Angestrebt wird das so genannte Hemihydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$, mineralogisch: Bassanit). Dieses wandelt sich bei Wasserzugabe unter Wärmeabgabe rasch wieder zu Gips um. Wird der Gips allerdings vollkommen „tot gebrannt“, findet die angestrebte Rückumwandlung zu Gips bei Wasserzugabe nicht mehr innert nützlicher Zeit statt (Knacke und Gans 1974).

Da das Hemihydrat Bassanit in natürlichen Sulfatgesteinen nicht vorkommt, können diese industriellen Prozesse zwar zur Erhellung der Abläufe, nicht zur Gewinnung von Kenndaten verwendet werden. Eine wichtige und auf natürliche Verhältnisse übertragbare Erkenntnis ist jedoch, dass die Anhydrit-Gips-Umwandlung chemisch-physikalisch weder mit dem auf den ersten Blick ähnlichen industriellen Prozess des Kalklöschens noch mit dem hier näher betrachteten Tonquellen verglichen werden kann (z. B. Einfalt 1975).

Beim Kalklöschens verbindet sich das durch Brennen aus Kalkstein gewonnene Oxid (CaO) über komplexe Vorgänge, bei welchen das Wasser nur in Zwischenprodukten auftritt, mit Kohlendioxid (CO_2) zu Calciumkarbonat (CaCO_3). Demgegenüber verbindet sich das Calciumsulfat CaSO_4 (Anhydrit) nur locker mit dem zugeführten Wasser. Die H_2O -Moleküle werden über Wasserstoffbrücken als Kristallwasser in das Kristallgitter eingebaut, ohne dass ihre „Identität“ als Wassermoleküle verloren ginge.

Andererseits wird das Wasser bei der Anhydrit-Gips-Umwandlung auch nicht direkt an das Kristallgitter des Anhydrits angelagert. Es findet keine eigentliche Hydratation sondern eine Umkristallisation statt: Der ursprüngliche Anhydrit wird gelöst und fällt dann als Gips aus. Dieser Prozess hängt nicht nur von thermodynamischen Faktoren, d.h. in erster Linie der Löslichkeit von Anhydrit und Gips, son-

dem auch von der Wasserzirkulation und der Aktivität dieses Wassers, insbesondere der Konzentration der Calcium- und Sulfationen ab.

Ist die Löslichkeit des Gipses geringer als diejenige des Anhydrits, so muss sich bei genügendem Wasserzutritt der Anhydrit lösen, und – wenn eine kritische Konzentration erreicht ist – der Gips ausfallen. Bei atmosphärischen Druck und 25 °C beträgt die Löslichkeit von Gips beispielsweise 2.4 g/l, während diejenige von Anhydrit 2.7 g/l beträgt. Unter Laborbedingungen und atmosphärischem Druck ist der Anhydrit bei Temperaturen bis 42°C (Marshall & Slusher 1966; andere Autoren sprechen gar von 57°C, Hardie 1967) immer löslicher als Gips (Fig. 14). Noch besser löslich ist unter diesen Bedingungen das im Baugewerbe eingesetzte Hemihydrat. Dies erklärt die viel schnellere Reaktion dieses gebrannten, aber eben nicht tot gebrannten Gipses. Trotzdem, und das ist hier ein sehr anschauliches und für das Verständnis der natürlichen Prozesse sehr wichtiges Beispiel, kann aus diesem Hemihydrat kein Stuck oder Verputz hergestellt werden, wenn es mit zu viel Wasser angerührt wird.

Auf natürliche Verhältnisse übertragen heisst das, dass der Anhydrit nicht einfach nur gelöst werden muss, sondern dass das gelöste Sulfat zusätzlich nicht weggeschwemmt, sondern bis zum kritischen, für die Ausfällung von Gips notwendigen Wert aufkonzentriert werden muss.

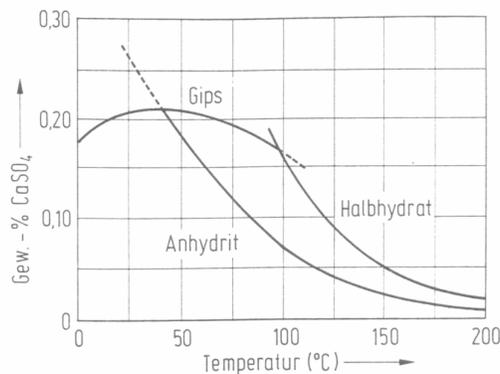


Fig. 14: Stabilität von Gips, Anhydrit und dem Halb- oder Hemihydrat Bassanit (aus Wichter 1989).

3.3.2 Volumen-Zu- oder Abnahme, offenes oder geschlossenes System?

Obwohl der unbestrittenen Beobachtung, dass Anhydritgestein, welches bei tiefen Gruben- oder Untertagebauten angefahren wird, quillt, d.h. in vergleichbar kurzer Zeit oft dramatisch an Volumen zunimmt, nichts entgegen zu halten ist, wird oft ins Feld geführt, dass die Gipsbildung im strengen Sinn mit einer Volumenabnahme verbunden ist. Dies hängt von der Betrachtungsweise ab. Mischt nämlich der Bauarbeiter seinen nicht tot gebrannten Gips sorgfältig mit der genau berechneten Menge Wasser (z.B. 2 dl Wasser zu 1 kg Pulver), so verringert sich das Volumen des ursprünglich angerührten Pulver-Wasser-Gemischs um fast unmerkliche 7 %, wenn sich der Gips bildet. Bei einer chemisch-physikalisch korrekten Betrachtung von Edukten und Produkt ist also tatsächlich eine, wenn auch geringe Volumenabnahme zu beobachten. Entsprechend nähme ein theoretisches Anhydrit-Wasser-Gemisch rund 10 % mehr Platz ein, als der daraus resultierende Gips.

Betrachtet man allerdings das für die Gipsherstellung verwendete Pulver (zu einer porenraumfreien Pille gepresst) als Grundeinheit, so nimmt der daraus gewonnene Gips 39 % mehr Volumen ein, als das Ausgangspulver. Auf Anhydrit übertragen, ergibt sich sogar eine Volumenzunahme von 62 %.

Diese beiden Betrachtungsweisen sind für das Verständnis des Quellens sulfathaltiger Gesteine von entscheidender Bedeutung.

Die beobachtete Volumenzunahme bei der Umwandlung von anhydrithaltigem zu gipshaltigem Gestein spricht also eindeutig dafür, dass das dazu notwendige Wasser von aussen zugeführt wurde. Alle bisherigen Untersuchungen an sulfathaltigen Gesteinen haben zudem sehr geringe Porositäten bis maximal 1,5 % ergeben (Peters et al. 1986, 1989a, b; Matter et al. 1988a, b). Unter der – durchaus plausiblen – Annahme, dass diese Poren vollständig mit Wasser gefüllt sind, können so maximal 2 % des Anhydrits zu Gips umgewandelt werden. Die resultierende Volumenreduktion beträgt maximal 3 ‰. Allerdings ist zu beachten, dass auch die Tonminerale das frei verfügbare Porenwasser anzulagern trachten. Beide Prozesse sind mit Volumenänderungen verbunden. Ob dies genügt, durch Poren- und Haarrissbildung die Durchlässigkeit zu erhöhen, bleibt zu diskutieren.

3.3.3 Problematik des Wasserzutritts

Wie weiter unten dargelegt wird, findet die Anhydrit-Gips-Umwandlung in Ton/Anhydrit-Mischgesteinen deutlich rascher und intensiver statt als in tonfreien Anhydrit-Gesteinen. Es könnte daher vermutet werden, dass die Tonminerale das für die Vergipsung notwendige Wasser liefern. Dem ist allerdings entgegenzusetzen, dass die Tonminerale im unvergipsten Bereich durchwegs in einer sehr tief hydratisierten Form vorliegen, d. h. sie weisen eine, sehr selten zwei angelagerte Wasserschichten auf. Diese ersten beiden Wasserschichten werden von den Tonmineralen unter den im Bereich der Untertagebauten üblichen Druck- und Temperaturverhältnisse kaum mehr abgegeben. Zudem kann festgestellt werden, dass die Tonminerale in vergipsten Gesteinen meist drei oder mehr Wasserschichten angelagert haben, also selber Wasser aufgenommen (und somit nicht abgegeben) haben (Jordan & Nüesch 1989).

Es kann also davon ausgegangen werden, dass das Wasser, welches für die vollständige Vergipsung des Anhydrits notwendig ist, von aussen zugeführt werden muss. Das ist allerdings nicht so trivial, wie es auf den ersten Blick erscheint. Es müssen nämlich zwei Voraussetzungen gegeben sein:

1. das Wasser muss bis an die Oberfläche (oder in Spaltrisse) der Anhydrit-Kristalle gelangen können. Es braucht also eine Wegsamkeit, welche in nützlicher Zeit genügende Mengen herbeischaffen kann.
2. Andererseits darf die Wegsamkeit nicht so gross sein, dass das gelöste Sulfat abtransportiert wird, bevor es die für die Gipsausfällung notwendige Konzentration erreicht hat.

Wie bereits erwähnt, weisen anhydrithaltige Gesteine meist nur eine äusserst geringe offene Porosität von einigen Promillen auf. Dies spiegelt sich in der sehr geringen Durchlässigkeit wieder, welche bisher an solchen Proben gemessen wurde. Diese reicht von praktischer Undurchlässigkeit (10^{-11} m/s) bei reinem, intaktem Anhydritfels aus tieferen Bohrungen bis zu immer noch sehr geringen 2×10^{-7} m/s bei entlastetem Ton-Dolomit-Anhydrit-Mischgestein aus dem oberflächennahen Bereich (Peters et al. 1986, 1989a, b; Matter et al. 1988a, b).

Eine Alternative zu diesem langsamen Transport durch das Gestein ist der Wassertransport entlang mikro- bis makroskopischer Risse und Klüfte. Bei dieser Hypothese ist allerdings zu berücksichtigen, dass Klüfte doch nur eine vergleichsweise geringe Oberfläche haben, das Wasser also wiederum von diesen Klüften durch das Gestein zu den Anhydritkristallen vordringen muss. Andererseits können Klüfte das Wasser genau so rasch abtransportieren wie sie es herbeigeführt haben. Es stellt sich also die Frage, ob kritische Konzentrationen, die zur Gipsausfällung notwendig sind, in solchen Klüftensystemen überhaupt erreicht werden. Eine reine Lösung des Anhydrits entlang von Klüften, die schlussendlich durch Auswaschung zu einem Anhydritkarst (ähnlich verkarstem Kalkgestein) führt, ist durchaus bekannt (z. B. Priesnitz 1969).

3.4 Das System Ton-Anhydrit-Wasser-Gips

Es wurde bereits auf die seit längerem bekannte Tatsache hingewiesen, dass tonführende Anhydritgesteine deutlich rascher und intensiver vergipst werden als tonfreie. Dies wird durch die mikroskopische Beobachtung, dass sich die Gipsbildung praktisch durchwegs an Toneinschlüssen nukleiert, unterstützt. In diesem Abschnitt soll deshalb die Rolle des Tones beim Vergipsungsprozess von der qualitativen wie quantitativen Seite näher beleuchtet werden.

3.4.1 Tonminerale und Gipsbildung

So unbestritten die Feststellung ist, dass ohne die Präsenz von Tonmineralen die Vergipsung nicht oder aber nur sehr verzögert einsetzt, so kontrovers werden die Prozesse, welche hinter dieser Feststellung stecken, diskutiert (z. B. Anagnostou 1992, Madsen & Nüesch 1990, Steiner 1993, Wichter 1989). Grundsätzlich können vier Gruppen von Postulaten unterschieden werden:

- Das Tonquellensystem, das der Vergipsung des Anhydrits vorangeht, ermöglicht durch das Brechen und Zerklüften des Gesteins die für die Vergipsung notwendige Wasserwegsamkeit.
- Die Tonhorizonte oder Tonminerale wirken als Wasserlieferanten im Vergipsungsprozess. So wird vorgeschlagen, dass die Tonhorizonte, welche rund 10'000 Mal durchlässiger als kompaktes, reines Anhydritgestein sind, als „Mikroaquifere“ funktionieren, oder aber, dass die Tonminerale ihr angelegertes Wasser abgeben.
- Die quellenden Tonminerale wirken als Wasserfänger und ermöglichen lokal die Aufkonzentrierung der zirkulierenden Lösungen bis zur kritischen, für die Gipsausfällung notwendigen Konzentration. Dabei wird zwischen einem aktiven, selektiven Wasserentzug (Osmose) und der Bildung von Mikroporen unterschieden.
- Die Tonminerale wirken als Katalysatoren im chemischen Sinn.

3.4.1.1 Zerklüftung durch quellende Tonminerale

Im Engelbergtunnel (Deutschland) wurden Abschalungen bevorzugt in Tongesteinen beobachtet (Spaun, 1979). Das Tongestein verhielt sich ausgesprochen spröde und reagierte mit Rissen und Spaltenbildung in den überbeanspruchten Zonen der Sohle und des Firstes. Durch die Überbeanspruchung infolge Horizontalspannungen wurde das Tongestein stark zerbrochen. Die sich dabei gebildeten Risse und offenen Spalten ermöglichen ein tiefes Eindringen von Wasser, welches zu Quellvorgängen und Sohlhebungen führt.

Die Zerklüftung insbesondere des Sohlbereichs ermöglicht nicht nur ein vertikales Eindringen von im Tunnel frei fließendem Wasser sondern auch ein seitliches, horizontales Eindringen durch eine tunnelparallele Längsdrainage (z. B. Wichter 1989).

Es ist zudem eine Wechselwirkung zwischen Tonquellen und Gipsbildung denkbar: Die Tonminerale ziehen osmotisch Wasser an und führen durch Quellen zu einer ersten Auflockerung, welche Wasserzutritt, Anhydritlösung und Gipsbildung ermöglicht. Letztere führt zu einer weiteren Aufweitung des Gesteins und garantiert so den fortwährenden Wassernachschub in den frontalen Bereich, der immer weiter vom Tunnelbauwerk weg in das Gebirge vordringt.

Es sei allerdings festgehalten, dass das Postulat der zunehmenden Zerklüftung und Wasserwegsamkeit durch Tonquellung einem zentralen Postulat der Deponietechnik widerspricht, welches von der Selbstheilung der Ton- und Sulfatgesteine bei Zerklüftung ausgeht. Darunter wird namentlich die Abdichtung von Wegsamkeiten durch Quellen der Tonminerale und Ausfällen der Gipskristalle verstanden (z. B. Hofmann et. al. 1997). So geht namentlich auch Wichter (1989) von einer sukzessiven Selbstversiegelung des Sulfatfelsen durch Gipswachstum und quellende Tonminerale aus.

3.4.1.2 Tonhorizonte als Mikroaquifere

Die geringe Durchlässigkeit der Tone ($\sim 10^{-7}$ m/s) ist immer noch rund 10'000 Mal grösser, als diejenige von intaktem, massigem Anhydrit ($\sim 10^{-11}$ m/s). Tonhorizonte wirken, so das Postulat, als Aquifere, welche das Wasser zum Anhydrit transportieren. Das kann bei grösseren, zusammenhängenden Schichten nicht ausgeschlossen werden. Das Phänomen lässt sich bei natürlich wie künstlich vergipsten Proben aber auch an isolierten Tonlinsen beobachten. In Tunnelnähe wird das Aufreissen des Gesteins in Folge des Tonquellens rasch den Effekt der Tonaquifere übertreffen. Für tonhaltigen, noch unvergipsten Sulfatfels nahe der Erdoberfläche wurden ebenfalls Durchlässigkeiten in der Grössenordnung von 10^{-7} m/s gemessen (Jordan 1994).

3.4.1.3 Tonminerale als Wasserlieferanten

In grösseren Tiefen enthalten Tone in der Regel eine bis zwei angelagerte Wasserschichten. Dieses Wasser könnte theoretisch als Lösungsmittel für Anhydrit und als Kristallwasser für Gips dienen. Da Tone bei Entlastung aber vielmehr zusätzliche Wasserschichten anlagern, als solche abgeben, muss diese These als äusserst hypothetisch bezeichnet werden (s. o.). Zudem würden die Tone auch bei der Sättigungskonzentration von gelöstem Anhydrit (2.7 g/l) aufgrund der höheren Ionenkonzentration in den Doppelschichten das Wasser nicht abgeben. Demgegenüber postulieren Einfalt et. al. (1979), dass eine einmal in Gang gesetzte Gipskristallisation den kompressiblen Tonschichten das Wasser durch Zusammendrücken auspressen kann. Diese Hypothese geht allerdings davon aus, dass Gips schon vorhanden und der Ton bereits stark gequollen ist.

3.4.1.4 Selektiver Wasserentzug durch Tonquellung

Quellende Tonminerale entziehen benachbarten Wasserfilmen Wasser. Aufgrund der diffusen Doppelschicht lagern Tonminerale Wassermoleküle osmotisch an. Dies führt zu einer selektiven Anreicherung der gelösten Minerale, insbesondere der Calcium- und Sulfationen im verbleibenden Restwasser, und begünstigt so die Gipsbildung (Vögtli & Jordan 1996).

3.4.1.5 Retardierende Wirkung der Tonminerale und Tonhorizonte

Beim Quellen von Tongestein nimmt (bei abnehmender Durchlässigkeit) der gesamte Porenraum zu. Außerdem verändert sich die Porengrößenverteilung. Der Anteil an groben Poren nimmt ab, der an Mittelporen und vor allem an Feinporen stark zu (z.B. Scheffer & Schachtschabel, 1992). Dadurch vergrößert sich der kapillare Aufstieg, d. h. weniger Wasser wird weiter transportiert, denn gleichzeitig nimmt der Durchfluss mit dem Radius in vierter Potenz ab. Dieser kapillare Wassertransport könnte auch erklären, weshalb die Vergipsungsfront in den tonigen Lagen weiter fortgeschritten ist als in den massigen Anhydritlagen. Das Verlangsamen der Fließgeschwindigkeiten durch die Bildung von kleinen Poren begünstigt die Stagnation von zirkulierendem Wasser und damit die Konzentrationszunahme der Sulfatkonzentration in den Bereich der Gipsfällung.

Madsen und Nüesch (1990) weisen darauf hin, dass sie Gipsneubildungen auch fernab von ursprünglichen Anhydritvorkommen feststellen konnten, was nur durch einen Transport des Sulfats in Lösung und eine spätere Auskristallisierung in tonreichen Gesteinen erklärt werden kann. Dies stützt die Hypothese, dass die Tonhorizonte und im speziellen die Tonminerale das für die Gipsfällung günstige „Mikroklima“ schaffen können.

3.4.1.6 Tonminerale als Katalysatoren

Jasmund & Lagaly (1993) weisen den Tonminerale katalytische Eigenschaften zu. Sie postulieren, dass es sich dabei um Katalysatoren im chemischen Sinn handeln muss, welche die Umwandlung von Anhydrit in Gips ermöglichen oder zumindest beschleunigen. Schlüssige Belege für dieses Postulat konnten allerdings bis heute nicht erbracht werden.

3.4.1.7 Diskussion

Aufgrund unserer Beobachtungen sowohl an natürlich vergipsten Proben wie auch im Umfeld von Untertagebauwerken darf wohl davon ausgegangen werden, dass eine Kombination dieser Faktoren zum beschriebenen Phänomen, d.h. zum Beginn der Vergipsung im Bereich der Tonhorizonte führt. Neben der Rissbildung durch quellende Tonminerale dürften deren adsorbierende und retardierende Eigenschaft allerdings die wichtigsten Rollen spielen.

3.4.2 Tonquellen oder Gipswachstum als Ursache für Quellvorgänge

Der Umstand, dass massive, tonfreie Anhydritgesteine in Zeiträumen, welche für Untertagebauten relevant sind, kaum quellen, hat verschiedene Autoren zur Annahme verleitet, dass die Umwandlung des ursprünglichen Anhydrits zu Gips kaum zum Phänomen „Quellen“ beiträgt (z. B. Anagnostou 1992). Bestärkt wurden diese Autoren von der Beobachtung, dass in quellenden Sulfatgesteinen immer auch Tonminerale vorhanden sind. Vielfach handelt es sich dabei um Corrensit, welcher bekanntermaßen ein grosses Quellpotential hat (s. Kapitel Tonquellung dieses Berichts).

Es muss somit zwischen zwei sich ergänzenden Prozessen unterschieden werden:

- passive Rolle des Gipses: Gipskristalle wachsen in den freien, vom Tonquellen geschaffenen Kluft- und Porenraum.

- aktive Rolle des Gipses: Der Kristallisationsdruck des Gipses trägt (neben dem Quellen des Tonen) zum Quellen des tonhaltigen Sulfatgesteins bei. Wichter (1989) und Madsen & Nüesch (1990) betrachten das Wachstum der Gipssäume (Satinspars, s. u.), wie sie im Umfeld von Tunneln und in gequollenen Laborproben beobachtet werden können, als Ursache für die Quelldehnung und den Quelldruck.

Es ist zu beachten, dass die Volumenzunahme bzw. das Aufbauen eines Druckes beim Ersatz des Anhydrits durch Gips auf die Ausfällung und das Wachstum der Gipskristalle bzw. den Kristallisationsdruck des Gipses zurückzuführen ist. Dieser Prozess kann mit der „Salzsprengung“, d.h. dem Auskristallisieren von Strassensalz in Poren und Rissen und der daraus folgenden Abschälung oder Zerstörung von Betonbauwerken verglichen werden (Eckhardt et al. 1997).

Für das „passive“ Gipswachstum, d. h. das Ausfüllen von Poren und Hohlräumen durch Gips genügt ein örtliches Erreichen der kritischen, zur Auskristallisation notwendigen Konzentration, allenfalls unterstützt durch Keimbildung oder (räumlich und zeitlich begrenzten) Druckabfall.

Demgegenüber müssen für eine aktive Rolle, d.h. ein Gipswachstum gegen äussere Gegenkräfte, mindestens zwei Gegebenheiten erfüllt sein:

1. Die Sättigung der Lösung muss durchwegs über dem für die Gipsausfällung minimal notwendigen Wert liegen, also eine sogenannte „Übersättigung“ erreicht werden. Es darf sich also weder ein Gleichgewicht zwischen Fällung und Lösung einstellen noch gar zur Gipslösung durch untersättigte Lösungen kommen. Ein genügender Nachschub an gelösten Calcium- und Sulfationen muss also immer gewährleistet sein.
2. Durch die Gipsfällung (oder das Tonquellen) darf der hydrostatische Druck zudem nicht über einen kritischen Wert steigen, bei welchem Anhydrit weniger löslich ist als Gips. Das Gleichgewicht darf also durch Quelldruck nicht zugunsten des Anhydrits verschoben werden.

Genau diese beiden Voraussetzungen waren in den Quelldruck-Experimenten von Madsen und Nüesch (1991) erfüllt, welche bis zu 6-jährige Langzeit-Quelldruckexperimente an natürlichen und künstlichen tonhaltigen Sulfatgesteinen durchführten. Untersucht wurden einerseits natürliche tonhaltige Anhydritgesteine mit 0 - 25 Gew.% Tonmineralen. Eine zweite Probenserie umfasst künstliche Proben, verdichtete Pulver-Mischungen aus Ca-Bentonit Montigel (enthält 66 % Montmorillonit als quellfähiges Tonmineral) und synthetischem Anhydrit. Verglichen wurden diese tonhaltigen Sulfatgesteine mit sulfatfreien Mergel- und Tongesteinen mit 15 – 60 Gew% Tonmineralen.

Die Resultate (Fig. 15) zeigten, dass bezogen auf den Tongehalt (in Gew%) die tonigen Sulfatgesteine deutlich höhere Quelldrücke entwickelten als die sulfatfreien Proben. Den grössten maximalen Quelldruck, nämlich 7.9 MPa, entwickelte eine künstliche Probe mit 15 Gew.% Ca-Bentonit Montigel. Bei 40 Gew% wurden immerhin noch 4 MPa gemessen. Damit liegen beide Werte deutlich über den für sulfatfreie Proben gemessenen Werten von maximal 0,5 bzw. 1,5 MPa. Bei den übrigen synthetischen Proben mit 5, 50 und 70 Gew.% Ca-Bentonit Montigel entwickelten sich demgegenüber Quelldrücke die im Bereich der maximalen Quelldrücke für sulfatfreie Proben mit entsprechenden Tongehalten liegen.

Die natürlichen Proben zeigten eine sehr grosse Streuung der Quelldrücke zwischen 0 und 5 MPa für Proben mit Tongehalten unter 10 Gew% und 2 und 5,5 MPa für Proben mit 10 – 25 Gew% Tonmineralen (Fig. 15). Die grosse Streuung lässt sich mit unterschiedlichen Gehalten an Drittmineralen

sowie unterschiedlicher Struktur und Textur der Proben erklären. Tendenziell zeichnet es sich aber auch hier ab, dass die maximalen Quelldrücke mit zunehmendem Tongehalt zuerst ansteigen und dann ab 10 bis 15 Gew% wieder fallen. Zudem sind die maximalen Quelldrücke im Bereich zwischen 5 und 25 Gew% doppelt bis 10 Mal so gross, wie diejenigen der sulfatfreien Vergleichsproben. Eine einzelne Probe mit 55 Gew% Tonminerale zeigt einen maximalen Quelldruck, der mit der den entsprechenden sulfatfreien Proben durchaus vergleichbar ist.

Die Resultate lassen sich also wie folgt zusammenfassen: Bei einem Tonmineralanteil von unter 5% sowie über 50 Gew% können keine Unterschiede zwischen sulfathaltigen und sulfatfreien sowie künstlichen oder natürlichen Proben festgestellt werden. Demgegenüber muss im dazwischen liegenden Bereich mit deutlich erhöhten Werten gerechnet werden. Diese können durchaus das Zehnfache der Werte von entsprechenden sulfatfreien Proben erreichen.

Dies lässt sich nun kaum mit dem Konzept einer rein passiven Rolle des Gipses erklären. Es muss also davon ausgegangen werden, dass bei den oben beschriebenen günstigen Voraussetzungen durchaus mit einem namhaften aktiven Anteil der Gipskristallisation am Gesamtquellprozess zu rechnen ist.

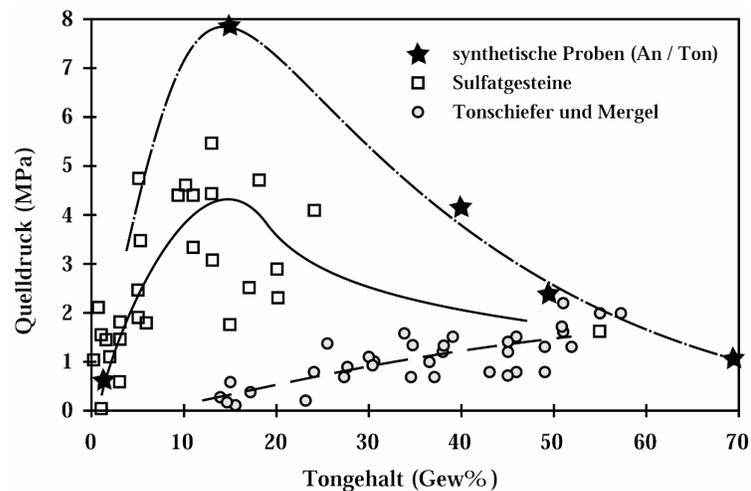


Fig. 15: Quellen sulfathaltiger und sulfatfreier Tongesteine in Abhängigkeit des Tongehalts (aus Madsen und Nüesch 1991, verändert). Bei den Tonschiefern und Mergeln bestehen die restlichen Gesteinsgemengteile vorwiegend aus Calcit und Quarz, bei den Sulfatgesteinen aus Dolomit, Magnesit und Anhydrit. Einzig bei den synthetischen Proben gilt Tonminerale und Anhydrit = 100 %.

Wie weit das auch für natürliche und künstlich induzierte Prozesse im Umfeld von Untertagebauten gilt, kann bis heute nur qualitativ beurteilt werden. Sicher kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil, wenn beide oben angeführten Bedingungen und gesteinspetrographischen Voraussetzungen erfüllt sind, ähnlich hoch sein kann.

3.5 Vergipsung unter natürlichen Bedingungen

Um die Umwandlung von Anhydrit zu Gips besser zu verstehen und vor allem die Kennwerte besser quantifizieren zu können, lohnt es sich, neben der Arbeit im Labor auch ein Blick auf die natürlichen Vergipsungsprozesse zu werfen. Unzweifelhaft hängt die Vergipsung von sehr vielen Faktoren ab, nicht zu letzt auch von der mineralogischen Zusammensetzung und Textur des Gesteins und den regionalen tektonisch-geophysikalischen Verhältnissen (Spannungsfeld, geothermischer Gradient etc.). Ein Studium der natürlichen Vergipsung hat sich deshalb, wenn möglich, auf eine Formation in einer bestimmten Region zu konzentrieren. Da die zu untersuchenden Prozesse in unzugänglichen Tiefen beginnen, ist man auf künstliche Aufschlüsse durch Tiefbohrungen und Tunnel angewiesen. In der Schweiz erfüllt eigentlich nur die zentrale Nordschweiz alle diese Bedingungen. Hier wurden zahlreiche Saline-, Energie- und Forschungsbohrungen auf die Sulfatgesteine der mittleren und späten Triaszeit abgeteuft. Zusätzliche Beobachtungsmöglichkeiten bieten Bahn- und Strassentunnel sowie die heute meist aufgelassenen Gipsgruben und -bergwerke (Jordan 1994). Von Vorteil ist zudem die relativ unspektakuläre Topographie, die, zumindest bei Bohrungen, Bohrtiefe mit Überlast und Temperatur einfach korrelieren lässt, da keine Störungen durch tiefe Eintalungen auftreten.

3.5.1 Beginn der natürlichen Vergipsung in den Trias-Evaporiten der Nordschweiz.

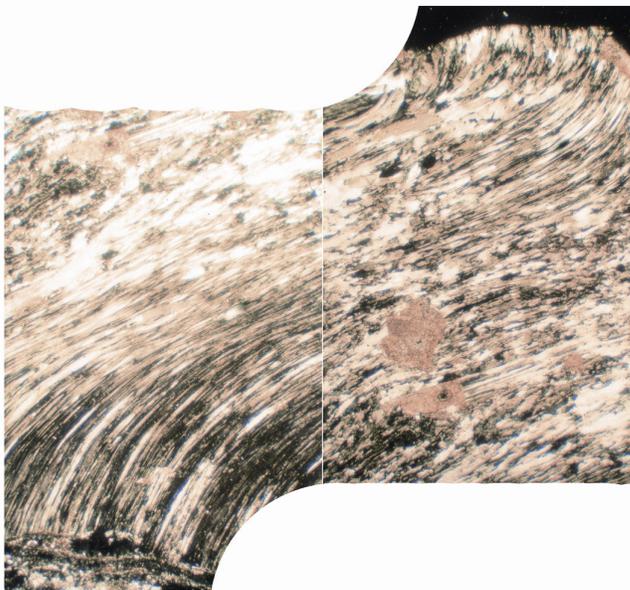
In Tiefen unterhalb 450 m tritt in der Region der zentralen Nordschweiz kein Gips, sondern ausschliesslich Anhydrit auf. In einem Bereich zwischen 350 und 450 m Tiefe, kann Gips einzig als Kluftfüllungen nachgewiesen werden. Diese werden aufgrund ihres seidigen Glanzes oft auch als „Satinspars“ bezeichnet. Die entsprechenden Druckverhältnisse liegen zwischen rund 8 und 11 MPa bei einer Temperatur von etwa 23 bis 28°C. Nach allen publizierten (auf Laboruntersuchungen an pulverförmigen Substanzen entwickelten) thermodynamischen Modellen der Gips/Anhydrit-Umwandlung (Sahores, 1962, Marshal & Slusher 1966, Hardie 1967, Knacke und Gans 1974) sollte unter diesen Umständen, ausser bei der Präsenz hochsaliner Wässer, eigentlich bereits Gips die stabile Form des Calciumsulfats sein. Es stellt sich somit die Frage, ob der Quell- oder Kristallisationsdruck des Gipses zur Kluftbildung geführt hat.

Die Satinspars (Fig. 16) ähneln in Struktur und Textur den alpinen Kalzitklüften, deren Entstehen auf ein Kristallwachstums nach dem Prinzip des wiederholten Aufreissens und Verheilens („crack-and seal“) zurückgeführt wird (z.B. Ramsay & Huber 1983). Bei diesen Klüften besteht die einhellige Meinung, dass das Kalzitwachstum jeweils dem (erneuten) Aufreissen der Kluft zeitlich folgt, also kaum für die Öffnung der Kluft oder gar die Volumenzunahme des Gesteins verantwortlich gemacht werden kann. Zieht man die Parallele zwischen „Satinspar“ und Kalzitkluft weiter, muss man also auch den Gipsklüften eher die „passive“ Rolle des Füllers als die „aktive“ des „Steinbrechers“ zuordnen (Berner 1991). Die Öffnung der Klüfte muss somit durch Drittkräfte verursacht sein, z.B. als Folge des Tonquellens oder einer Änderung des regionalen Spannungsfeldes bedingt durch tektonische Vorgänge oder die erosionsbedingte Minderung der Überlast. Wichter (1989) beschreibt aus dem Wagenburgtunnel die vollständige und kompakte Verkittung von ursprünglichem Lockermaterial aus Sulfatgestein. Dieses Lockermaterial entstand einige Jahre vorher beim Schürfen eines Sondierschlitzes im Bereich der Tunnelsohle und wurde dann, locker geschüttet wieder, zur Verfüllung des Schurfs verwendet. Die Gipsnadeln und Gipsrasen, die zur Verfüllung der Hohlräume und zum Zusammenbacken des Lockermaterials geführt haben, entsprechen, so Wichter, den Satinspars.

Demgegenüber sehen Wichter (1989) oder Madsen und Nüesch (1990) gerade im Wachstum dieser Satinspars die Verursacher von Quellhebung und Quelldruck. Sie argumentieren, dass die beobachteten Quellphänomene in den Experimenten bzw. im Umfeld von Tunnelbauten auf keine anderen be-

obachtbaren Strukturen zurückgeführt werden können, als eben diese „satinspars“. Diese These von einer „aktiven Rolle“ der Satinspars wird durch die Beobachtung gestützt, dass sie in der Nordschweiz erstmals in einer Tiefe von max. 450 m auftreten (Jordan 1994). Der in der Literatur für Gips genannte Kristallisationsdrucke von 8 bis max. 10 MPa (Flückiger 1994) würde genügen eine rund 350 bis 450 m hohe Gesteinssäule anzuheben.

Erste Hinweise auf eine beginnende Vergipsung des Wirtgesteins finden sich – in einer Salinebohrung der Region Basel und im Hauenstein-Basistunnel – in rund 330 bis 350 m Tiefe (Tab. 7). In einer Tiefe von rund 300 m ist, wie sich bei verschiedenen Salinebohrungen und der NAGRA-Bohrung Böttstein belegen lässt, die Vergipsung schon recht fortgeschritten. Es lässt sich zudem feststellen, dass die Vergipsung von den Schichtfugen, vor allem aber von benachbarten, wasserdurchlässigen Formationen, insbesondere dem zwischen den beiden Sulfatformationen gelegenen, oftmals verkarsteten Hauptmuschelkalk in das Gestein vordringt. Innerhalb der massiveren anhydrithaltigen Bänke geht die Vergipsung meist von feinen Haarrissen aus. Praktisch ohne Ausnahme beginnt die Vergipsung aber immer am Kontakt zwischen (den meist feinen) Ton- und Sulfatlagen (Fig. 17). Die Vergipsung dringt dann von den einzelnen Nukleationspunkten sphärenförmig in den Anhydrit ein. Gleichzeitig kristallisiert aber auch in den Tonlagen Gips aus. Isolierte Gipskeime innerhalb reiner oder nur mit Dolomit / Magnesit vermengter Anhydritlagen lassen sich nur sehr selten feststellen. Und auch bei diesen Beobachtungen in den Dünnschliff-Proben lässt sich meist eine ursprüngliche direkte Nachbarschaft von Tonlagen in der dritten Dimension nicht ausschliessen. Die in den Ton- wie Sulfatlagen auftretenden Dolomit- und Magnesit-Kristalle scheinen dagegen bei der Vergipsung keine Bedeutung zu haben.



a)

Fig. 16: Gipsfibern („Satinspars“, Dünnschliffaufnahmen): a) tektonische Kluffüllung bildet Änderung der Dehnungsrichtung während der Klufföffnung ab (Belchentunnel, Breite ca. 1 cm)

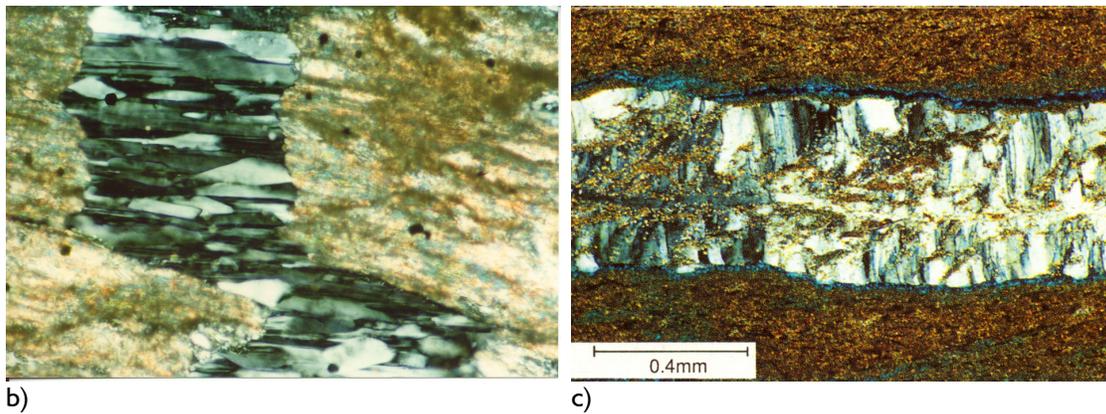


Fig. 16: Gipsfibern („Satinpars“, Dünnschliffaufnahmen, Forts.): b) Klufffüllung (grau) zwischen zwei Tonklasten aus einem nach dem Tunnelbau vergipsten Gestein (Belchentunnel, Breite ca. 1 cm), c) Klufffüllung aus einer experimentell vergipsten Probe (aus Madsen und Nüesch 1990).

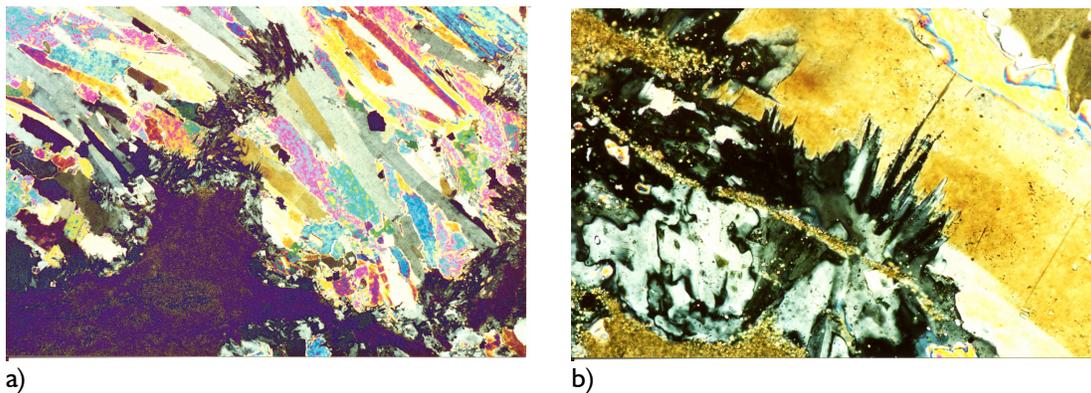


Fig. 17: Gips (grau) „frisst“ sich, ausgehend von feinkörnigen, bräunlichen Tonhorizonten in die grossflächigen Anhydritkristalle hinein. Lösung und Fällung finden entlang eines dünnen Saumes zwischen den beiden Aggregaten statt. Dünnschliffaufnahmen, Belchen, Breite a) ca. 1 cm, b) ca. 0,35 cm.

Grossmassstäblich, d.h. im Meter- bis Dekameterbereich lässt sich eine lineare Abhängigkeit der Eindringtiefe der Vergipsung in die anhydrithaltigen Gesteine von Tiefe der Probenahmestelle unter Oberkante Terrain feststellen (Tab. 7, Fig. 18). Die Vergipsung dringt dabei, wie bereits angedeutet, sowohl von oben (absinkend) wie auch von unten (aufsteigend) in die Sulfatgesteine vor (Jordan et. al. 1990, Jordan 1994). Dabei ist die Eindringtiefe von oben deutlich grösser als diejenige von unten. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Beobachtungen von Reimann (1984) im Gebiet der Werra-Anhydrite bei Fulda (Deutschland). Allerdings geht Reimann in den Tiefen bis 100 m, wo ihm deutlich mehr Material vorlag als in der Nordschweiz verfügbar ist, von einer logarithmischen Abhängigkeit von Eindringen und Tiefe aus. Aus der Nordschweiz beschreiben Kälin & Schmid (1992) ein oberflächennahes Sulfatgesteinsvorkommen, bei welchem die natürliche Vergipsung von oben rund 60 bis 80 m vorgedrungen ist.

Bohrung, Tunnel	Gipskeuper		Anhydritgruppe ¹⁾		Tiefstes Auftreten von Gips	
	Top (m)	Basis (m)	Top (m)	Basis (m)	Tiefe (m)	Formation
T: tektonisiert						
T Wisen			39	63	63	basale tekt. Brekzie
Kaisten	-	-	-	-	94	Wellendolomit
Leuggern			100	160	165	Orbicularis-Mergel
T Belchen- Tunnel	30-180				180 ²⁾	Gipskeuper
T Saline Schweizerhalle S 99			219	462 ³⁾	247/250 ⁴⁾	Anhydritgruppe
Böttstein	42	117	204	261	257	Orbicularis-Mergel
Saline Schweizerhalle S 95			287	352	296/307 ⁴⁾	Anhydritgruppe
Saline Schweizerhalle S 98			333	399	342/352 ⁴⁾	Anhydritgruppe
T Hauenstein- Tunnel	>350	>350	>350	>350	ca. 350 ²⁾	Gipskeuper
Saline Schweizerhalle S 106			440	572	-/448 ⁵⁾	Anhydritgruppe
Riniken	529	612	698	750	-	kein Gips
Weiach	740	814	888	944	-	kein Gips
T Schafisheim	1139	1224	1304	1441	-	kein Gips

1) ohne Anhydrit-Dolomit

2) nur teilweise vergipst

3) Basis Untere Sulfatschichten bei 330 m

4) Vergipsung des Anhydritfels / tiefstes Auftreten von Gips-Fibern

5) in Anhydritgruppe nur Gipsfibern / keine Angaben zum Keuper publiziert

Tab. 7: tiefstes Auftreten von Gipsfibern und vergipstem Sulfatfels in verschiedenen Bohrungen und Tunneln der Nordschweiz (aus Jordan 1994). Bei Gipsvorkommen unterhalb der Anhydritgruppe handelt es sich in der Regel um Kluffüllungen.

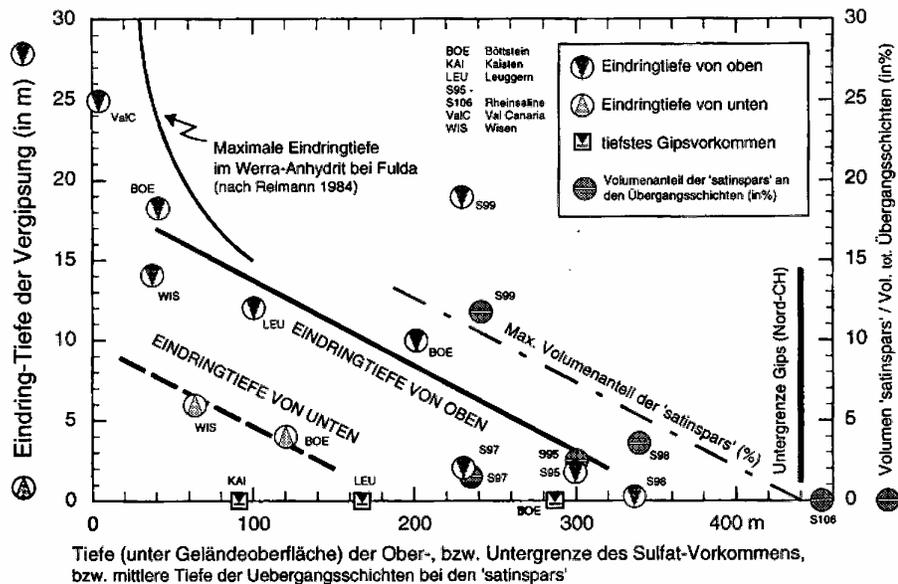


Fig. 18: Maximale Eindringtiefe der Vergipsung in den Evaporiten der Nordschweiz (aus Jordan 1994): Die obere und untere Eindringtiefe ist in Abhängigkeit des Flurabstandes der Trennfläche Aquifer / Sulfatlager dargestellt (linke Skala). Die Daten von Reimann (1984) zum Werra-Anhydrit dienen als Vergleich. Im Weiteren sind die summierten Mächtigkeiten der Gipsfibern („satinspars“) in der Übergangszone der Anhydritgruppe (sensu Widmer 1991) am Hochrhein in Anhängigkeit der mittleren Tiefe der betreffenden Schichten eingetragen (rechte Skala).

Für die vorliegende Studie sind folgende Beobachtungen von Bedeutung:

- Unterhalb einer gewissen Tiefe, das heisst oberhalb von bestimmten Druck- und Temperaturbedingung ist Anhydrit auch bei Auftreten von Entlastungsklüften und bei Wasserzutritt stabil. Gelöstes Sulfat kristallisiert wieder als Anhydrit aus (anhydritische Satinspars, Berner 1991, Jordan 1994). Auch wenn man davon ausgeht, dass das zirkulierende Wasser durch einen hohen Anteil an gelösten Salzen eine verringerte Aktivität hat, liegt die Stabilitätsgrenze des Anhydrits (zumindest in der zentralen Nordschweiz) bei tieferen Druck- und / Temperaturwerten als dies von den klassischen, auf Laborversuchen basierenden Literaturwerten her erwartet wurde.
- In geringeren Tiefen, also unterhalb der kritischen Druck- und Temperaturwerte ist Anhydrit instabil. Die natürliche Vergipsung schreitet allerdings nur langsam voran. Unabhängig von der regionalen tektonischen Situation und Erosionsgeschichte lässt sich eine Abhängigkeit des Grades der Vergipsung („Eindringtiefe“) von der Tiefe ermitteln, was den Schluss nahe legt, dass die natürliche Vergipsung instabiler Anhydritvorkommen nicht nur ein Frage der Zeit sondern auch der tiefenabhängigen Rahmenbedingungen (Druck, Temperatur, Wasseraktivität und -zirkulation) ist.
- Mikroskopisch beginnt die Vergipsung praktisch ausschliesslich am Kontakt zwischen Ton und Anhydrit. Die Grösse der Kontaktfläche zwischen Gips und Anhydrit ist entsprechend entscheidend für die Dynamik der Vergipsung. Massive, tonfreie Anhydritlagen, die höchstens an ihren Schichtflächen von Tonsteinen begleitet werden, sind nicht anfällig für die Vergipsung und können noch wenige Meter unter der Oberfläche in ihrer ursprünglichen Form auftreten. Dagegen sind intensive

Vermengungen von Ton und Anhydrit sehr anfällig auf eine rasche und intensive Vergipsung. Solche Vermengungen können sowohl ursprünglich sedimentären wie auch sekundär tektonischen Ursprungs sein.

3.5.2 Sukzessive Stadien der natürlichen Vergipsung

Bei der Vergipsung anhydrithaltiger Gesteine unter natürlichen Bedingungen können drei Phasen unterschieden werden:

- Die eigentliche Vergipsung, d.h. das sukzessive Lösen und Ersetzen des ursprünglichen Anhydrites durch Gips. Von den ersten Keimen an Ton / Anhydrit-Kontakten wächst der Gips sphärenförmig ins anhydritführende Gestein. Es entsteht ein so genannter „porhyroblastischer sekundärer Gips“ (sekundär weil aus Anhydrit entstanden, ähnliche Gefüge können auch im ursprünglichen, sedimentären Gips gefunden werden und werden dann „primär“ genannt; Dunham 1948, Holliday 1970). Mit der Zeit durchwachsen sich diese Sphären und es entsteht ein „alabastriner sekundärer Gips“ (Ogniben 1957). Die Bildung von porhyroblastischem sekundärem Gips – ausgehend von Ton / Anhydrit-Kontakten und entlang von Anhydritkristallgrenzen sich ausbreitend – konnte übrigens auch in Quelldruckexperimenten im Labor reproduziert werden. In einigen Langzeit-Quellmassversuchen konnte sogar der Übergang zu alabastrinem sekundärem Gips beobachtet werden (Madsen & Nüesch 1990).
- Sobald der Anhydrit verschwunden ist, beginnt eine Rekristallisation. Das diffus-chaotische alabastrine Gefüge wird durch grössere, eigenförmige Gipskristalle verdrängt. Es entsteht ein idoblastischer bis granoblastischer Gips.
- In einer letzten Phase wird der Gips gelöst und ausgewaschen. So finden sich üblicherweise an der Oberfläche kaum je natürliche Gipsaufschlüsse. Aber auch bei untiefen künstlichen Aufschlüssen wie z. B. Weganschnitten ist zu beobachten, dass bereits ein grosser Teil des ursprünglichen Sulfates weggelöst ist. Zurück bleibt ein dolomitischer Mergel.

3.5.3 Gipsspiegel, Anhydritspiegel und Vergipsungsfront

Im Untertagebau wird die Grenze zwischen der ersten und zweiten Phase als Anhydritspiegel, diejenige zwischen der zweiten und dritten als Gipsspiegel bezeichnet (z.B. Wichter 1989, Berner 1991). Der Begriff „Spiegel“ ist hier etwas unglücklich gewählt, da es sich nicht um eine diskrete Fläche, sondern vielmehr um eine bis zu mehreren Zentimeter breiten, diffusen Übergangszone handelt. Die bereits eingeführten Begriffe sollen hier der Klarheit halber aber beibehalten werden. Der dritte wichtige Horizont, das erste Auftreten von Gips, wird hier als „Vergipsungsfront“ bezeichnet. Die drei Horizonte trennen (von oben) die sulfatfreie Zone von der Gipszone, der Gips- und Anhydritzone und der Anhydritzone. Diese Sukzession findet sich nicht nur oberhalb sondern auch unterhalb der Talsohle und hat bei grösseren, mehr oder weniger eben lagernden Sulfatgesteinsformationen meist ein spiegelbildlich angelegtes Äquivalent an der Unterkante des Vorkommens (Jordan et al. 1990, Jordan 1994). Entsprechende Abfolgen findet man, das sei hier vorweggenommen, wenn auch in kleinerem Massstab, auch in Bohrungen, die von Tunnels in die seit dem Bau entstandene vergipsten Bereiche vorgetrieben wurden.

3.6 Überlegungen zur Vergipsung im Umfeld von Untertagebauten

Untertagebauten stellen immer eine Störung der lokalen hydraulischen und felsmechanischen Spannungszustände dar. Diese Veränderungen lösen sowohl bei Tonen wie bei den Sulfatgesteinen die gefürchteten Quellvorgänge aus.

Was den felsmechanischen Aspekt angeht, interessieren in diesem Zusammenhang die lokale Reduktion des Gebirgsdrucks, der ja, zusammen mit der Temperatur, die Stabilitätsgrenze zwischen Gips und Anhydrit bestimmt, und, vor allem, die Zerklüftung und Auflockerung des Gesteins im Umfeld des Tunnels. Diese Zerrüttung schafft die für die Vergipsung entscheidenden Wasserwegsamkeiten (Wichter, 1989). Der Grad der Zerklüftung und Auflockerung des Gesteins ist bekanntlich abhängig von der Art, Struktur und Textur des Gesteins, der präexistente Zerklüftung, den ursprünglichen Druck- und Spannungsverhältnissen sowie der Vortriebsart (Sprengen, Schrämme). Von speziellem Interesse ist hier die Art der Wasserzirkulation im Umfeld von Untertagebauten, ein Aspekt, der in der Diskussion des Vergipsungsprozesses bislang viel zu wenig Beachtung gefunden hat.

3.6.1 Wasserzirkulation und Bergwasserspiegel

Ein Tunnel und andere Untertagebauwerke sind, was die Druckverhältnisse angeht, ein Stück Oberfläche mitten im Gebirge. Während sich die felsmechanischen Verhältnisse nach dem Eingriff, wenn man von quellendem Gebirge absieht, bei geeignetem Tunnelquerschnitt, allenfalls unterstützt durch Ausbauten und Ankerungen wieder in einem, dem früheren nicht unähnlichen Gleichgewicht stabilisieren, führt ein Tunnel häufig zu einer nachhaltigen Veränderung der hydraulischen Verhältnisse. Dies gilt besonders in den Bereichen, wo der Tunnel unter den ursprünglichen Bergwasserspiegel zu liegen kommt. Er wirkt dort als Drainage. Je nach den hydraulischen Parametern und dem Wasserdargebot wird der Bergwasserspiegel nur geringfügig oder aber bis auf das Tunnelniveau abgesenkt (Fig. 19).

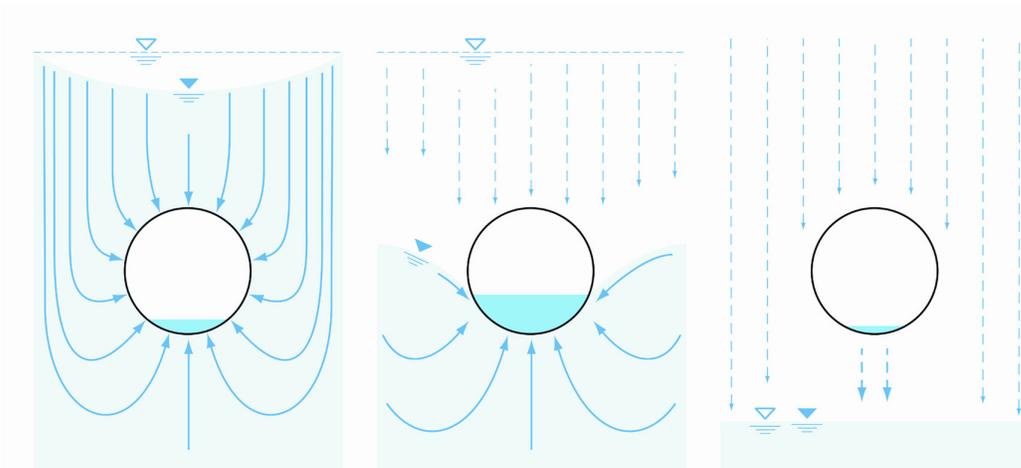


Fig. 19: Wasserzirkulation im Umfeld von Untertagebauten in Abhängigkeit des Bergwasserspiegels und der Drainagekapazität des Tunnels. Links und Mitte: ursprünglicher Grundwasserspiegel (leeres Symbol) über der Tunnelachse, geringe bzw. grosse Durchlässigkeit. Rechts: ursprünglicher Grundwasserspiegel unterhalb der Tunnelachse. Ausgezogene und gestichelte Pfeile: phreatische und vadosse Wasserzirkulation.

Mit Blick auf mögliche Quellphänomene, muss zwischen verschiedenen Situationen unterschieden werden. Entscheidend ist, in welchen Bereich das Tunnelbauwerk betreffend Vergipsungsfront, Anhydritspiegel und Gipsspiegel zu liegen kommt. Dann stellt sich die Frage, ob auch Formationen oder Störungsbereiche durchfahren werden, die sich durch eine besonders hohe Durchlässigkeit und Wasserführung auszeichnen. Von zentraler Bedeutung ist zudem die ursprüngliche Lage des Bergwasserspiegels und seinen möglichen Veränderungen während des Baus und Betriebes des Tunnels.

Bei einem Tunnel können folgende Situationen unterschieden werden, soweit er ausschliesslich im Bereich einer Sulfatformation verläuft (Fig. 20):

1. der Tunnel verläuft oberhalb des Gips- und des Bergwasserspiegels: Der Vortrieb durch das gebräuchliche Material stellt gewisse Anforderung an die Vortriebsweise. Erfolgt der Vortrieb unter dem Gipsspiegel (aber oberhalb von Anhydrit- und Bergwasserspiegel), so ist mit dem Anschneiden von natürlichen Hohlräumen zu rechnen, die zu Komplikationen im Vortrieb oder Erdfall führen können.
2. Der Tunnel verläuft unterhalb des Bergwasser- aber oberhalb des Anhydritspiegels: Beim Vortrieb ist mit massiven Wassereintritten und allenfalls akuter Subrosion zu rechnen. Je nach Verkarstungsgrad und Wasseranfall wird der Wasserspiegel sich allenfalls bis auf Tunnelniveau absenken. Der Tunnel wirkt auch nach Abschluss der Bauphase als Drainage. Es ist somit auch während der Betriebsphase weiterhin mit Subrosion zu rechnen. Erdfallphänomene sind somit nicht nur beim Vortrieb sondern auch später und ausserhalb des unmittelbar über der Tunnelachse liegenden Geländes zu erwarten. Die Drainwirkung wird sich grundsätzlich auch bei einem gut abgedichteten Tunnel einstellen. Als Wassersammler wirken Hohlräume zwischen Tunnelbauwerk und Fels oder aber der aufgelockerte Bereich im Umfeld des Tunnels.
3. Der Tunnel verläuft unterhalb des Bergwasser- und Anhydritspiegels. Das Anschneiden von ergiebigen Karstwasseradern ist zwar nicht gänzlich ausgeschlossen (Anhydritkarst), doch ist während des Vortriebs meist mit keinen grösseren Komplikationen zu rechnen, da intakte Sulfatgesteine normalerweise standfest sind und eine sehr geringe Durchlässigkeit haben. Die Quellvorgänge setzen meist erst verzögert ein. Verläuft die Tunnelachse unterhalb der Vergipsungsfront, ist mit einer zusätzlichen Verzögerung der Quellvorgänge zu rechnen, da natürliche Gipskeime und Wasserwegsamkeiten, die zwischen Anhydritspiegel und Vergipsungsfront bereits vorhanden sind, fehlen.

3.6.2 Eindringen von Tunnelwasser in das umgebende Gestein

Da Tunnelbauwerke in der Regel eine gewisse Neigung aufweisen, kann Bergwasser aus Bereichen, wo es reichlich vorhanden ist und schnell zirkulieren kann, so z.B. aus angefahrenen Klüften oder verkarsteten Karbonatgesteinen, entlang der Tunnelachse in wasserarme, gering durchlässige Abschnitte gelangen. Eindringendes „Stollenwasser“ wird mehrheitlich für die Vergipsung im Sohlbereich verantwortlich gemacht (z.B. Anagnostou 1992, Steiner 1993).

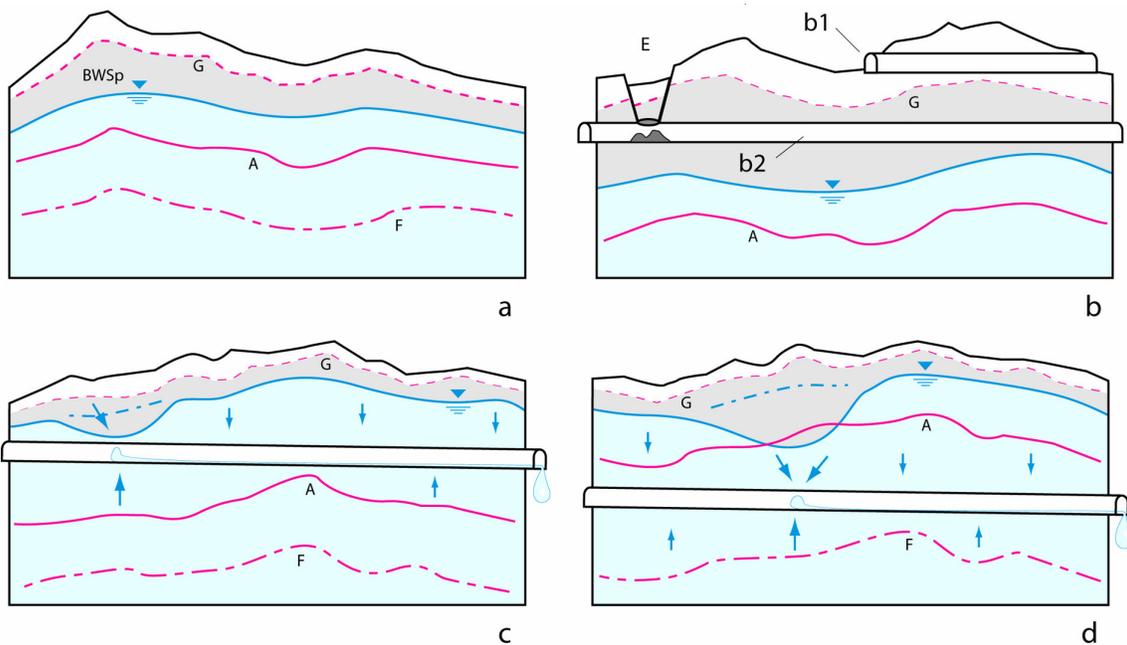


Fig. 20 a: Definition der drei Niveaus der Vergipsung (von oben): G: Gipsspiegel (Grenze zwischen vollständiger Sulfatauslaugung und erstem Auftreten von Gips, oft residuellem Gips), A: Anhydritpegel (erstes Auftreten von Anhydrit; oberhalb tritt Sulfat ausschliesslich als Gips auf), F: Vergipsungsfront (tiefstes Auftreten von Gips). BWSp: Bergwasserspiegel.

b bis d: Vier mögliche Positionen des Tunnels (oder Tunnelabschnitts) relativ zu den vier wichtigsten „Spiegeln“: b: Tunnelachse oberhalb des Bergwasserspiegels und ober- (b1) bzw. unterhalb des Gipsspiegels (b2); E: Erdfall (Doline) in verkarstem Gipsgestein.

c: Tunnelachse zwischen Gips- und Anhydritpegel und unterhalb des Bergwasserspiegels; dargestellt ist zudem eine Absenkung des Bergwasserspiegels durch Wassereintrich in den Tunnel.

d: Tunnelachse unterhalb des Bergwasser- und Anhydritpegels, aber oberhalb der Vergipsungsfront; dargestellt ist wiederum die Auswirkung eines Wassereintrichs auf den Bergwasserspiegel.

Weitere Erläuterungen im Text.

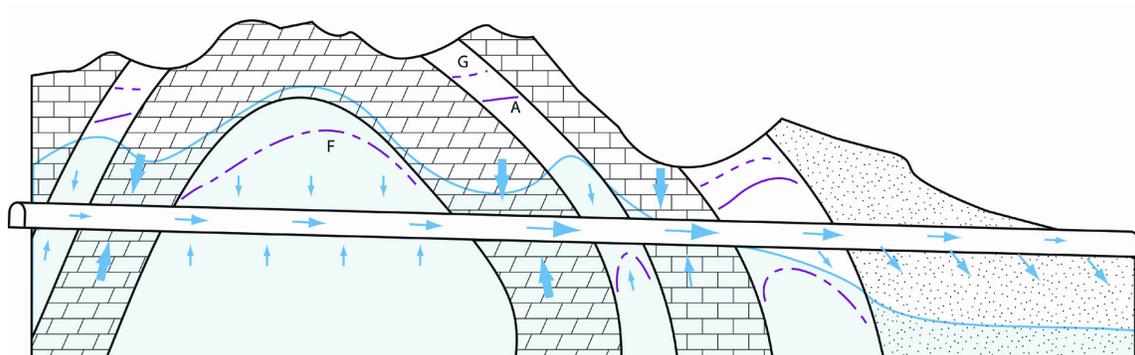


Fig. 21: Mögliche Wasserzirkulation (Pfeile) im Umfeld und entlang der Achse eines ansteigenden Tunnels. Backstein- und Punktmuster: gut durchlässige Gesteine (z. B. Kalk- und Sandstein); ungerastert: gering durchlässige Gesteine (z.B. Sulfatgestein); blau: Bergwasserspiegel und gesättigter Bereich; G: Gipsspiegel, A: Anhydritpegel, F: Vergipsungsfront.

Es stellt sich deshalb die Frage, unter welchen Umständen solches Tunnelwasser auch tatsächlich in das Gestein eindringen kann (Fig. 21):

1. Liegt das piezometrische Niveau im betrachteten Abschnitt tiefer als die Tunnelsohle, ist ein Eindringen des Tunnelwassers in das umliegende Gestein jederzeit möglich. Das Ausmass und die Geschwindigkeit werden von der Porosität und der Durchlässigkeit des zu infiltrierenden Gesteins sowie vom Druckniveau des Tunnelwassers kontrolliert. Eine Zerrüttung des Gesteins durch den Vortrieb erleichtert bei dichten und wenig porösen Materialien das Eindringen im tunnelnahen Bereich.
2. Liegt der Bergwasserspiegel über der Tunnelsohle und dem Freiwasserspiegel des im Tunnel abfliessenden „Stollenwassers“ ist ein Eindringen prinzipiell nicht möglich.
3. Ist das durchfahrene Gestein allerdings sehr undurchlässig, und enthält es praktisch kein Wasser, so kann Stollenwasser in den Kluftraum oder die Auflockerungszone vordringen, welche durch den Vortrieb verursacht wurde.

3.6.3 Längsdrainage und Vergipsung

Da Tunnels dreidimensionale Bauwerke sind, sind neben den beiden Extremen „senkrecht von der Tunnelachse wegfließen“ und „senkrecht zur Tunnelachse zufließen“ auch anderen Fließrichtungen möglich. Aufgrund der wechselnden Schichtneigung und anderer Anisotropien der Durchlässigkeit werden solche „schiefen“ Zu- oder Wegflüsse sogar die Regel sein. Grundsätzlich ändert sich hier aber am Prinzip des Zu- oder Wegfließens nichts.

Eine besondere, in Betrachtungen zur Vergipsung häufig angeführte Konfiguration verdient allerdings besonderer Beachtung: die Längsdrainage. Die Längsdrainage ist ein bekanntes und oft auch gefürchtetes Phänomen bei erdverlegten Rohrleitungen. Das Wasser zirkuliert hier parallel zur Leitung im umgebenden künstlichen Kies- oder Sandbett. Im Unterschied zu einer Drainageleitung sind diese dichten Transportleitungen für Gas, Wasser, Strom etc. indes nicht Teil des hydraulischen Systems. So kommt dem umgebenden Schotterbett eigentlich die Funktion des permeablen Drainagerohrs zu, welches je nach hydraulischer Situation als Vorfluter oder infiltrierendes Medium („Infiltrant“) wirken kann. Auf das Tunnelbauwerk übertragen heisst das, dass das umgebende aufgelockerte, nicht durch Zement oder andere Füll- und Dichtstoffe imprägnierte Gestein durchaus als Längsdrainage wirken kann, wenn das Tunnelrohr selber als dicht und somit nicht zum hydraulischen System gehörend betrachtet wird. Ist der Tunnelraum allerdings nicht wasserdicht gegen den Fels abgeschottet, so übernimmt er, aufgrund seiner erheblich grösseren Durchlässigkeit die eigentliche Drainfunktion (wie in Fig. 21 dargestellt). Der Strömungsverlauf ist dann im aufgelockerten umgebenden Gestein immer praktisch senkrecht zur Tunnelachse.

Bei der Längsdrainage können nun wieder die beiden Grenzfälle unterschieden werden:

- Das Wasser fliesst längs des Tunnels und versickert von dort ins umgebende Gestein.
- Das Wasser fliesst aus dem Fels der aufgelockerten Zone zu und wird von dieser abgeführt.

Die Längsdrainage fügt sich also nahtlos ins Konzept des Stollenwassers ein, wenn auch die Durchlässigkeit und somit die Fließgeschwindigkeit in der aufgelockerten Zone selbstverständlich deutlich geringer sind als im Tunnelraum selber.

3.6.4 Zwei Modelle der Vergipsung

a) Szenarium I: Vergipsung durch Stollenwasser

Das erste Szenarium (Fig. 22) entspricht dem klassischen Konzept des versickernden Stollen- oder „Längsdrainagewassers“. Das Wasser dringt vorwiegend im Sohlbereich und – durch kapillares Aufsteigen – auch im unteren Strossenbereich in das tonhaltige Anhydritgestein ein und führt zu dessen Vergipsung und den entsprechenden Quellhebungen und –drücken. Voraussetzung ist, dass Tunnelwasser im Sohlbereich vorhanden ist. Liegt der Bergwasserspiegel unter der Tunnelsohle, ist ein Eindringen des Tunnelwassers hydraulisch grundsätzlich immer möglich. Im ungestörten Fels ist die eindringende Wassermenge aufgrund des geringen Wasserdruckes und der sehr schlechten Durchlässigkeit der Ton- und Sulfatgesteine eher mässig. Sie nimmt aber mit zunehmender Zerrüttung des Umfelds deutlich zu.

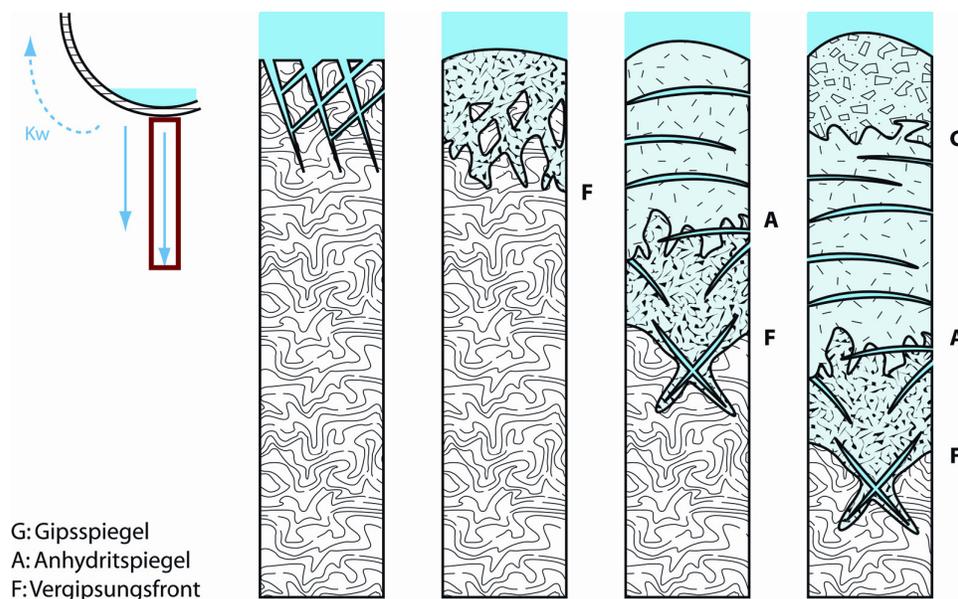


Fig. 22: Vergipsungsszenarium I: Tunnelwasser dringt im Sohlbereich und untergeordnet (durch Kapillarwirkung K_w) auch im unteren Strossenbereich in das aufgelockerte Sulfatgestein ein (Schema links und erstes schematisches Bohrprofil aus dem Sohlbereich). Durch Tonquellen und Gipsausfällung wird der Fels in immer grösserer Tiefe aufgelockert und ermöglicht so, dem Wasser weiter einzudringen, was wiederum zur Vergipsung bislang unveränderter Bereiche führt. Das zweite bis vierte Bohrprofil zeigen die sukzessiven Schritte der Vergipsung mit den drei Spiegeln: Vergipsungsfront, Anhydrit- und Gipsspiegel. Oberhalb der Gipsfront befindet sich die hochdurchlässige ausgelagte, d.h. sulfatfreie Zone. Weiss: „trockener Fels“; hellblau: nasser Fels; blau: Wasser in Klüften und in der Tunnelsohle.

Das eindringende meist hoch aktive (d.h. niedrig saline) Stollenwasser löst den Anhydrit und reichert sich zunehmend mit Calcium- und Sulfationen an (Fig. 23). In den tieferen Bereichen der Zerrüttungszone (aber auch in den weiter oben beschriebenen Feinporen) wird die kritische Konzentration erreicht, und Gips fällt aus. Gleichzeitig nehmen die Tonminerale Wasser auf und quellen. Der von quellenden Tonmineralen und auskristallisierendem Gips beanspruchte Raum führt nicht nur zu einer Quellhebung in Richtung des Tunnels und – sofern diese Hebung verhindert wird – zum Aufbau eines Quelldruckes, sondern auch zu einer fortschreitenden Auflockerung des Gebirges vom Tunnel weg. Das wiederum ermöglicht den Wasserzutritt zu weiteren, bislang nicht erreichten tunnelfernen Bereichen und so zu einer kontinuierlich fortschreitenden Vergipsung.

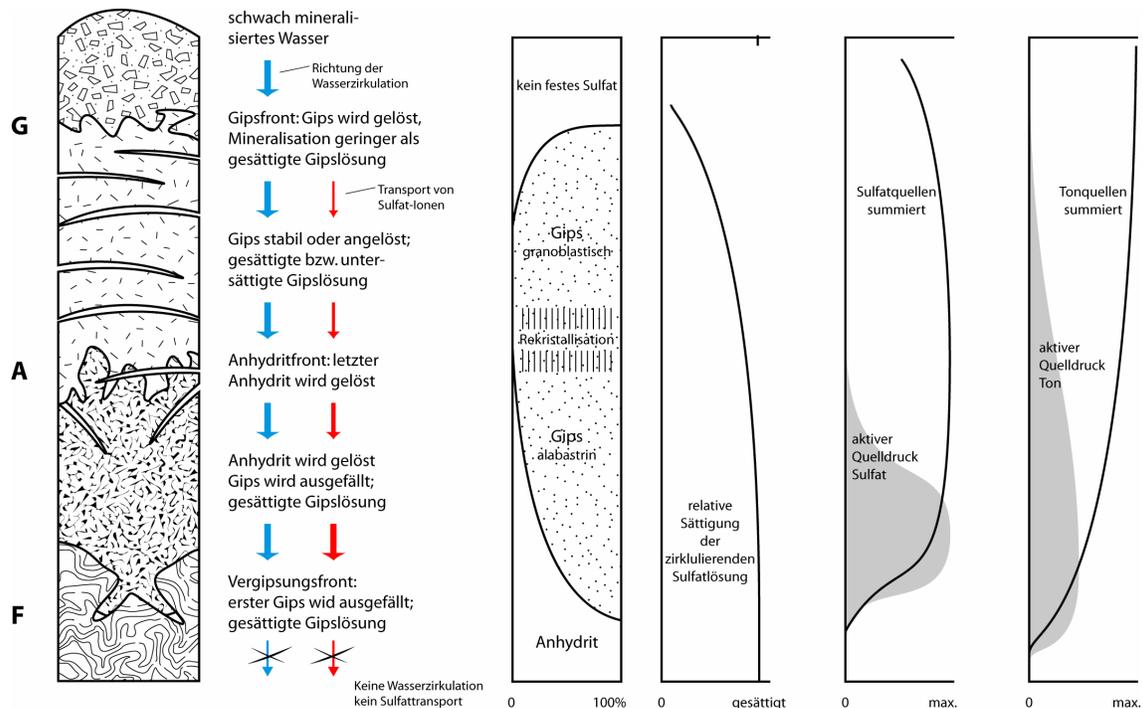


Fig. 23: Mineralogie, Veränderung der Sulfatkonzentration und Lokalisierung des Hauptquellbereichs beim Szenarium I.

Unbestritten ist die erste Stufe dieses Szenariums. So berichtet z. B. Wichter (1989) von Schutt aus Sulfatgestein, das zum Wiederauffüllen eines Schurfes im Bereich der Tunnelsohle des Wagenburgtunnels verwendet wurde. Bei einem erneuten Schurf wenige Jahre später, war das Material nicht nur vollständig vergipst, sondern zu einer kompakten und, zumindest makroskopisch, porenfreien Masse verbacken. Wichter (1989) stimmt darum mit Kirschke (1992) überein, der postuliert, dass die Vergipsung durch eindringendes Wasser nach einiger Zeit zum Erliegen kommt, da der aufgelockerte und erst recht der noch intakte Sulfatfels durch Tonquellen und Gipswachstum versiegelt und so vor einer weiteren Vergipsung bewahrt wird.

Vergipsungen im Strossen- oder Firstbereich müssen in diesem Szenarium mit kapillarem Wasseraufstieg aus dem Sohlbereich oder als eine Folge der Luftfeuchtigkeit im Tunnel erklärt werden (Wichter 1989).

b) Szenarium 2: Vergipsung durch zuströmendes Wasser

Das zweite Szenarium postuliert, dass die Vergipsung von Wasser verursacht wird, welches dem Tunnel zufließt. Der Tunnel wirkt, wie oben beschrieben, als Drain. Das ihm zustrebende Bergwasser durchdringt dabei, wenn auch in kleinsten Mengen und sehr langsam, das an und für sich sehr wenig durchlässige intakte tonige Anhydritgestein. Ein hoher hydraulischer Gradient zwischen Gestein und Tunnel, sowie die Zerrüttung in Folge des Vortriebs fördern den Zufluss im tunnelnahen Bereich. Zudem ist anzunehmen, dass das Wasser Klüften und Schichtungstrennflächen folgt (Fig. 24).

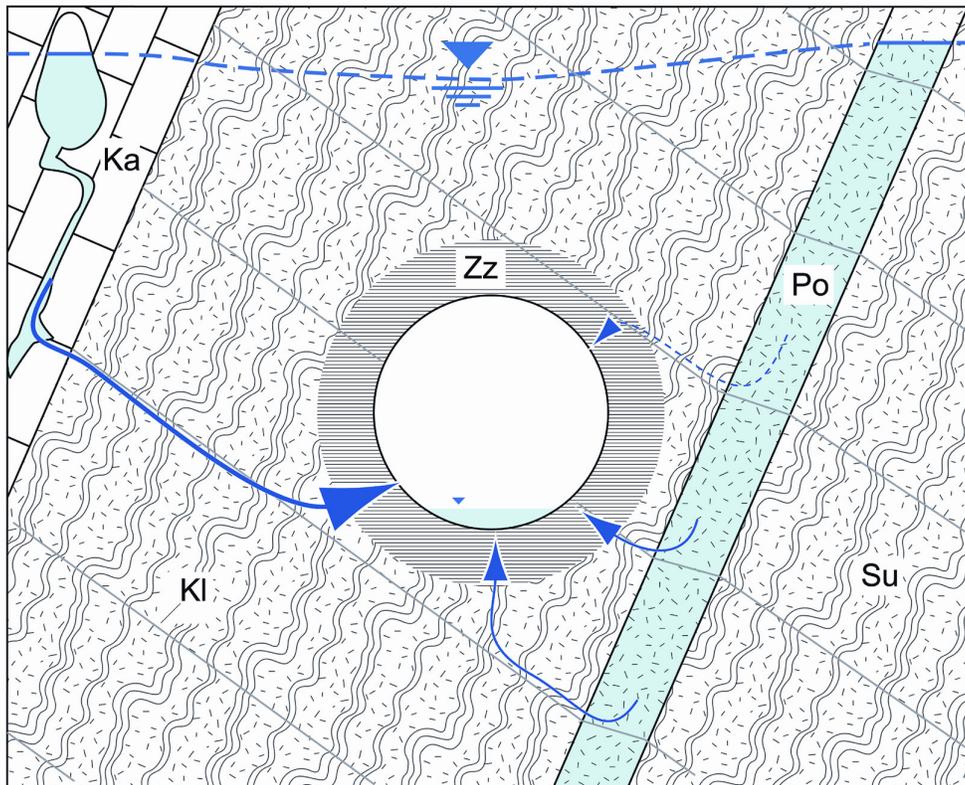


Fig. 24: Mögliche Wasserwegsamkeiten im Umfeld eines Tunnels im Sulfatgestein (schematisch): Ka: Karstgrundwasserleiter (Kalkstein, Dolomit); Kl: Klüftung; Po: Porengrundwasserleiter (Sandstein, ausgelaugte Sulfatzone etc.); Su: Sulfatgestein; Zz: Durch den Vortrieb zerrüttete und daher wasserwegsame Zone. Die Dicke der Pfeile weist auf die relativen Wassermengen hin.

Aus der gesättigten Sulfatlösung fällt, in Folge des Druckabfalls und im Bereich von Tonhorizonten, Gips aus. Prinzipiell kann die erste Gipsausfällung der Anhydritlösung zeitlich vorangehen. Ein weiterer Druckabfall und die zunehmende Wasserzirkulation führen später zur Lösung des Anhydrits. Solange Anhydrit vorhanden ist, wird die Konzentration der zirkulierenden Lösungen die für die Gipsfällung kritische Konzentration kaum unterschreiten. Ist der Anhydrit allerdings vollständig gelöst, kann die Konzentration unter den kritischen Wert fallen. Die zirkulierenden Wässer greifen so den Gips an, der sukzessive gelöst wird (Fig. 25).

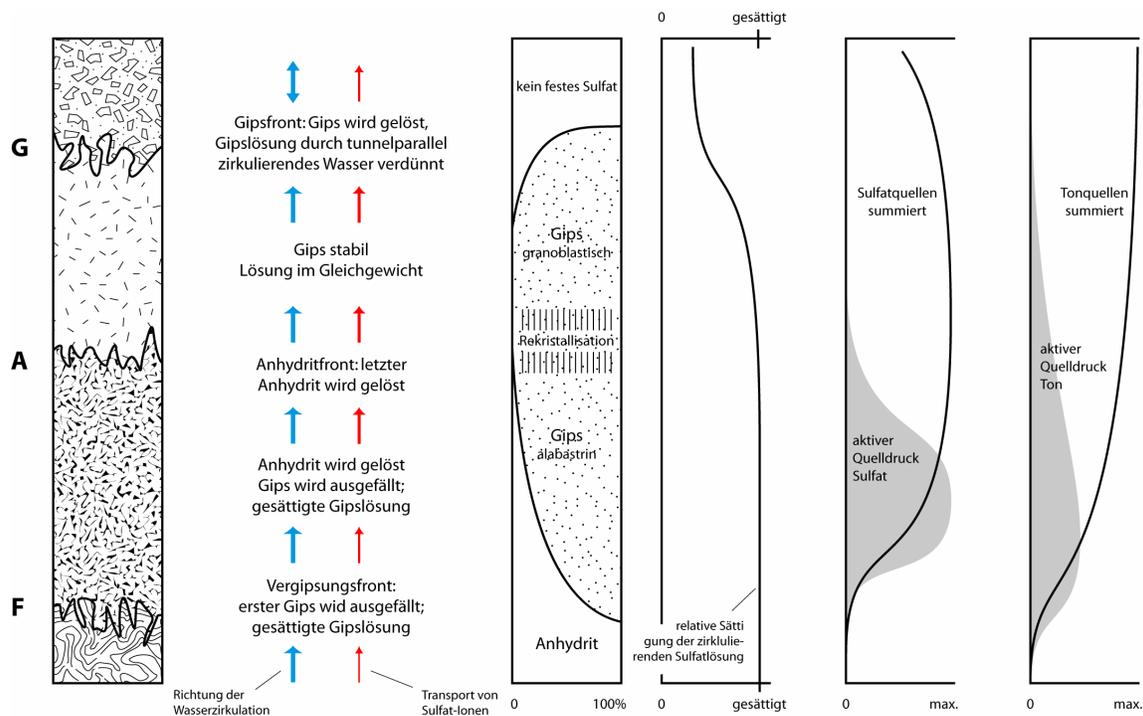


Fig. 25: Mineralogie, Veränderung der Sulfatkonzentration und Lokalisierung des Hauptquellbereichs beim Szenarium 2.

Es bildet sich so, vom Fels zum Tunnel gesehen, die bereits aus der natürlichen Vergipsung von Sulfatgesteinen bekannte Abfolge aus: Vergipsungsfront / Zone mit Gips und Anhydrit / Anhydritspiegel / Zone mit Gips / Gipsspiegel / ausgelaugte, gipsfreie Zone. Alle diese Zonen, Spiegel und Fronten wandern mit der Zeit sukzessive vom Tunnelbauwerk weg in den umgebenden Fels hinein. Dabei ist die Ausbreitung im Bereich der Tunnelsohle, wo der hydraulische Gradient am grössten ist, auch deutlich schneller als z.B. im Firstbereich.

Mögliche Kombination von Szenarium 1 und 2:

Zirkuliert im Tunnel tatsächlich freies Wasser und kann dies in den Bereich von durch den Bohrvortrieb aufgerütteten Sulfatgesteinen gelangen, so ist eine Vergipsung nach Szenarium 1 in einer ersten Phase immer kompetitiver (Fig. 26). Ist allerdings die aufgerüttete Zone einmal mit Wasser gesättigt, wird sie sukzessive Teil des hydraulischen Tunnelumfeldes. Natürlich schafft quellender Ton und auskristallisierender Gips neuen Kluft- und Porenraum. Doch ist dieser natürliche Prozess im Unterschied zur Aufrüttelung durch den mechanischen Vortrieb so langsam, dass ein hydraulischer Ausgleich mit der Umgebung praktisch immer gewährleistet ist. Es kann oder muss gar postuliert werden, dass in Fällen, wo der Tunnel unter dem Bergwasserspiegel verläuft, die Vergipsung sukzessive von Szenarium 1 zu Szenarium 2 übergeht.

Das beobachtete sukzessive Wegwandern des aktiven Quellgürtels vom Tunnel weg (Fig. 27) lässt sich mit einem weg- besser aber noch mit einem zufließenden Wasserregime erklären. Die hoch durchlässige ausgelaugte Zone, die mit der Zeit im Sohlbereich entsteht, dient je nach dem als Quelle oder Senke der zirkulierenden Wässer.

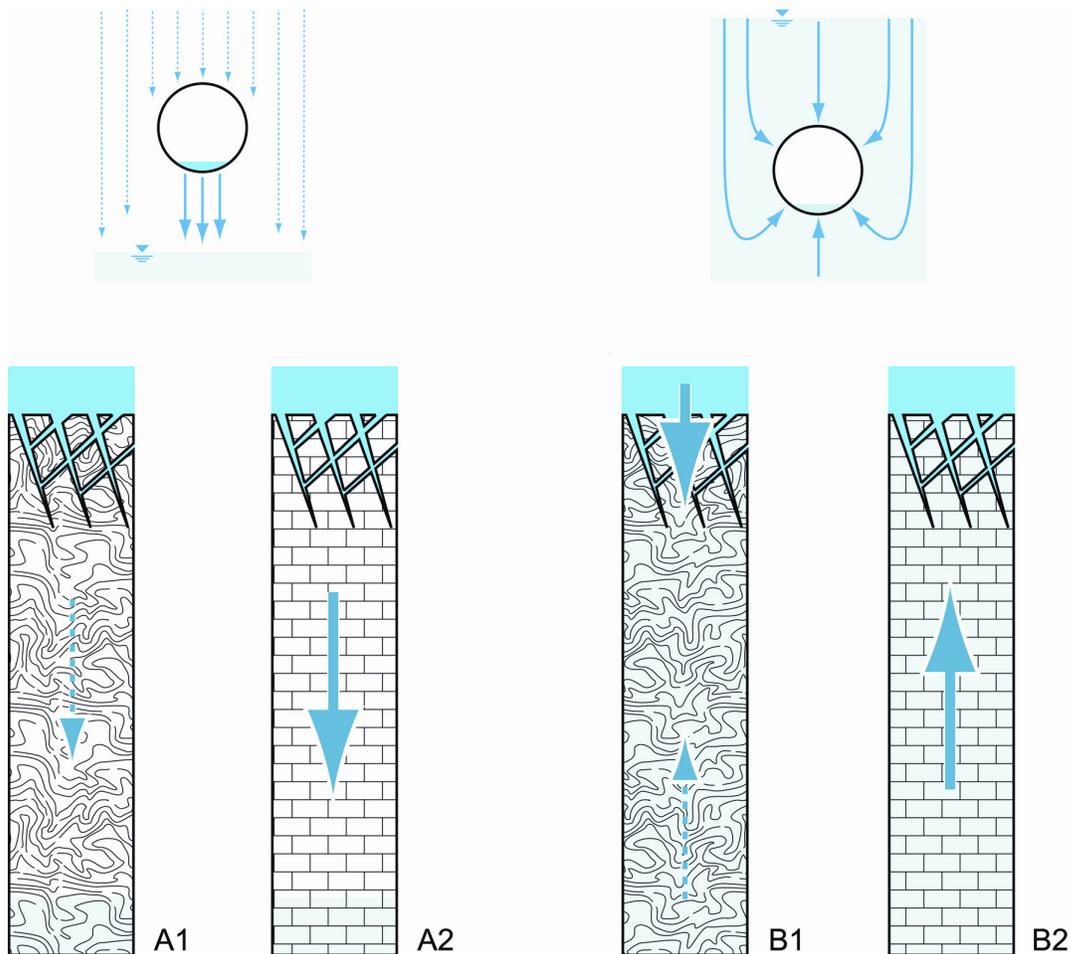


Fig. 26: Schematischer Vergleich der beiden Situationen Tunnel über (A) oder unterhalb des Bergwasserspiegels (B) bei schlecht durchlässigem Sulfatfelsen (1) und gut durchlässigem verkarstetem Kalkfelsen (2). Bei der ersten Situation (A) versickert ungeachtet der Gesteinsart Tunnelwasser in die Tunnelsohle. Es kann in beiden Fällen davon ausgegangen werden, dass der aufgelockerte Bereich wassergesättigt ist. Beim Sulfatgestein muss unterhalb der aufgelockerten Zone von einem sehr geringen Wasserabfluss ausgegangen werden. Demgegenüber kann der beim Kalkstein sehr gross sein, wenn beim Vortrieb alte Höhlensysteme angefahren wurden. Liegt der Bergwasserspiegel über der Tunnelachse, so ist bei geklüftetem oder gar verkarstetem Kalkstein immer mit einem Wasserzufluss zu rechnen (B2). Bei Sulfatgestein hingegen muss bei genügendem Anfall von Tunnelwasser oder bei einer erhöhten Luftfeuchtigkeit davon ausgegangen werden, dass die aufgelockerte Zone tunnelseitig mit Wasser versorgt wird. Mit der Zeit wird sich allerdings dieses Tunnelwassersystem an das Bergwassersystem anschliessen und der Zufluss, wenn auch gering, wird zum Tunnel gerichtet sein.

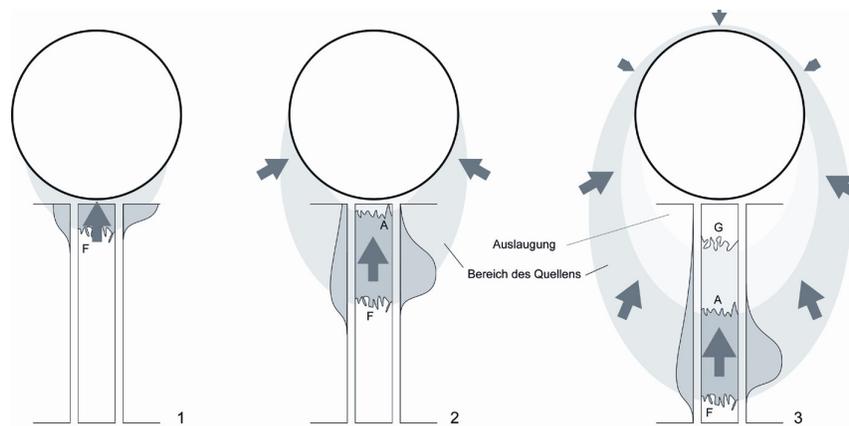
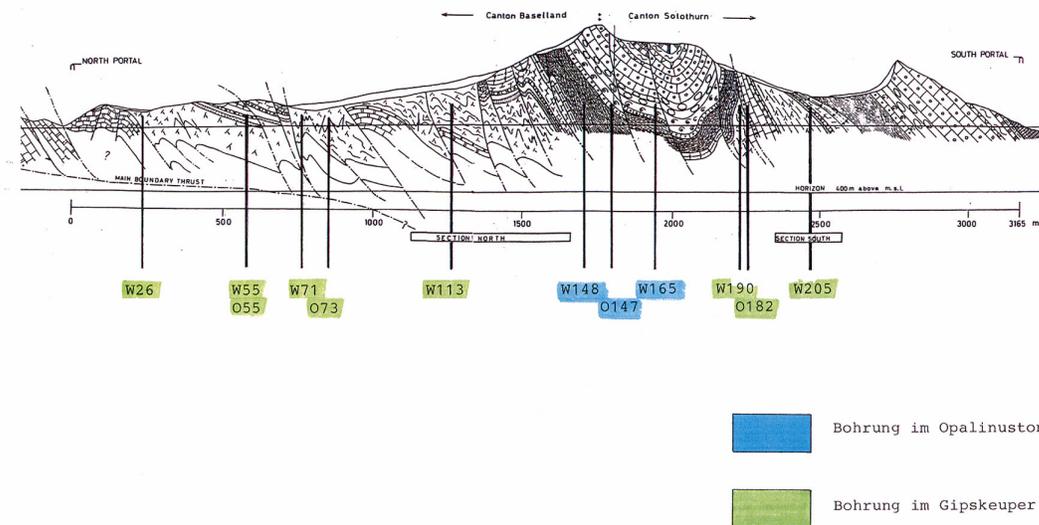


Fig. 27: Fortschreitende Vergipsung im Umfeld eines Tunnelbauwerks (schematisch): Unterhalb des Tunnelquerschnitts sind jeweils ein schematisches Bohrprofil mit den wichtigen „Spiegeln“ (F: Vergipsungsfront, A: Anhydritspiegel, G: Gipsspiegel) sowie je ein Diagramm mit dem aktuellen Betrag des Tonquellens (links) und der Druckentwicklung durch Gipsausfällung (rechts) dargestellt. Der Gürtel des aktuellen Quellens (dunkel) bewegt sich immer weiter vom Tunnel weg. Die Kräfte (Pfeile) werden in späteren Phasen (2, 3) zunehmend über den vergipsten oder gar ausgelagten Bereich (weiss) auf das Tunnelbauwerk übertragen. Im Belchentunnel waren 1991, d.h. knapp 30 Jahre nach dem Bau (s. Kapitel 3.7), mehrheitlich das Stadium I und nur vereinzelt das Stadium 2 (z. B. W 190) oder 3 (z. B. Bohrung W 55) erreicht.



Geologisches Profil Belchentunnel
mit Lage der Sondierbohrungen 1991

Fig. 28: Querprofil durch den Belchentunnel mit Lokalisierung der betrachteten Sondierbohrungen von 1991.

3.7 In-situ-Befunde zur Vergipsung im Belchen Autobahntunnel (N 2 / A 2)

Mit dem Vortrieb des 1970 eröffneten, 3,3 km langen Belchentunnels wurde 1963 begonnen. Dabei wurden auf insgesamt 1,4 km Sulfatgesteine des Keupers („Gipskeuper“) durchfahren. Rund 20 bis 30 Jahre nach dem erstmaligen Durchörterern wurden zwischen 1986 und 1996 an verschiedenen Stellen Bohrungen aus dem Tunnel abgeteuft. Fast alle der 12 Bohrungen der Kampagne von 1991 (Fig. 28) wurden für diese Studie näher untersucht. Die Bohrkern wurden in regelmässigen Abständen beprobt und analysiert. Die zur Zeit des Tunnelbaus gipsfreien Sulfatgesteine zeigten unterschiedliche Grade der Vergipsung.

Die **Bohrung W26** wurde im Nordabschnitt des Tunnels abgeteuft, wo die Überdeckung relativ gering ist (ca. 60 m) und das Sulfatgestein an der Oberfläche ausstreicht. Die Bohrung durchfährt den basalen Gipskeuper in unmittelbarer Nähe zum Trigonodusdolomit (oberster Hauptmuschelkalk). Die Abfolge ist recht tonreich. Das Schichteneinfallen beträgt ca. 70°. Die Vergipsungsfront liegt ca. 2,8 m unter UK Bauwerk, was einer Eindringgeschwindigkeit von rund 11 cm/Jahr entspricht, eine zeitlich lineare Ausbreitung vorausgesetzt. Der Anhydritspiegel kann ca. 1,5 m unter OK Bauwerk lokalisiert werden.

Die Gleitmikromettermessungen zwischen Januar 1992 und März 1995 ergaben zwischen UK Bauwerk und dem Anhydritspiegel (Lage z. Zt. der Bohrung) keine signifikante Bewegung. Im Bereich zwischen Anhydritspiegel und Vergipsungsfront (ebenfalls z. Zt. der Bohrung!) konnten demgegenüber Bewegungen von bis zu 1,5 mm/m festgestellt werden, die gegen unten rasch ausklangen. Davon ausgenommen ist einzig ein isolierter, stark tektonisierter Bereich in ca. 10 m Tiefe ab UK Bauwerk, der zwischen Januar 1992 und April 1994 eine Stauchung von ebenfalls 1,5 mm/m erfuhr.

Die **Bohrungen W 55 und O 55** im nördlichen Tunnelabschnitt gelegen, durchqueren den Grenzbe- reich zwischen dem wasserführenden Schilfsandstein (oben, bis ca. 5 m unter UK Tunnelbauwerk) und dem oberstem Gipskeuper. Die Schichtneigung beträgt rund 20°. Der Bereich, der rund 75 m unter der Oberfläche liegt, war bereits beim Tunnelbau grösstenteils vergipst. 1991 fanden sich in einer Probe 9 m unter UK Bauwerk noch einige Anhydritrelikte, die übrigen Proben wiesen nur Gips auf oder waren gar sulfatfrei. Es erstaunt daher nicht, dass die Gleitmikrometer zwischen Januar 1992 und März 1995 keinen nennenswerten Bewegungen nachweisen konnten.

Die **Bohrung W 71**, im zentralen Tunnelbereich gelegen, durchquert eine mehr oder weniger hori- zontal gelagerte Sulfatserie des Keupers. Die Überdeckung beträgt hier rund 60 m. Der Gipskeuper wird an der Oberfläche von einer mächtigen Lockergesteinsablagerung überdeckt. Die Sulfate sind tonführend bis tonreich. Dolomit tritt feinkörnig, vorwiegend aber als grosse, spät-diagenetische, idio- morphie Einsprenglinge auf. Es handelt sich durchwegs um typische sedimentär-diagenetische Gefüge. Die tektonische Beanspruchung ist schwach bis mässig. Die Vergipsung ist auch im obersten Teil der Bohrung unvollständig. Die Vergipsungsfront findet sich in 1,4 m Tiefe. Ein zeitlich lineares Eindringen vorausgesetzt, hat sich die Vergipsungsfront hier also mit rund 6 cm/Jahr ins Gestein hineinbewegt.

Die Gleitmikromettermessungen zwischen Januar 1992 und März 1995 ergaben eine ausgeprägte Dehnung von ca. 1,2 mm/m im Bereich zwischen Unterkante Bauwerk und Vergipsungsfront. Interes- sant ist, dass die Querdehnung im obersten, d.h. beim Ansetzen der Bohrung bereits am stärksten vergipsten Bereich mit fast zwei jähriger Verzögerung, dann aber um so heftiger einsetzte. Bis zu einer Tiefe von rund 7 m ab UK Bauwerk, also im ursprünglich noch gipsfreien Bereich konnten eine sich gleichmässig beschleunigte Dehnung oder Stauchung von schliesslich 1 mm/m festgestellt werden. In tieferen Bereichen waren auch nach drei Jahren praktisch keine Bewegungen feststellbar.

Die **Bohrung W 113** wurde im zentralen Tunnelabschnitt, wo die Überdeckung etwa 130 m beträgt, abgeteuft. Es liegt hier eine Ton-Anhydrit-Wechselagerung vor, die von einzelnen mächtigeren, rund 1 m dicken Tonlagen unterbrochen wird. Die Schichtlagerung beträgt etwa 60° bis 70°. Die Vergippsungsfront liegt 50 cm unter UK Tunnelbauwerk. Wenn die Vergippsung tatsächlich unmittelbar nach dem Durchhörtern angefangen hat, entspräche dies einem Fortschreiten von knapp 2 cm/Jahr. Da es sich hier um die einzige Bohrung aus einem tiefen Bereich handelt, die nicht gleichzeitig aus einer Störungszone stammt, kann durchaus postuliert werden, dass hier, wo der Druck hoch und die Wasserzirkulation träger ist, die Vergippsung verzögert einsetzt oder nur sehr langsam fortschreitet.

Die Gleitmikrometermessungen zwischen Januar 1992 und März 1995 zeigen ein entsprechend uneinheitliches Bild. Geringe Bewegungen von max. 0.5 mm/m über diese Zeit wurden im bereits leicht vergippten Bereich und unmittelbar darunter bis etwa 1,5 m unter UK Bauwerk festgestellt. Namhafte Bewegungen bis 1,5 mm/m konnten aber im ansonsten ruhigen Bohrloch im Bereich einer mächtigen Mergelbank auf ca. 4 m unter UK Bauwerk und in deren Liegendem festgestellt werden.

Die **Bohrung W 190** ist im Südabschnitt des Tunnels gelegen. Die Überdeckung beträgt hier gut 125 m. Die Bohrung folgt einer praktisch senkrechten Sulfat-Scherzone (Jordan 1994). Das ursprüngliche sedimentäre Gefüge ist durch die sehr intensiven tektonischen Bewegungen vollständig verwischt. Es liegt ein stark geschiefertes Gestein vor. Sulfate und Fremdminerale, insbesondere Ton und Dolomit/Magnesit, sind durchwegs in meist mm-, selten auch cm-dicke Lagen konzentriert. Die Anhydritlagen sind dadurch meist sehr rein. Neben den feinkörnigen Anhydritlagen treten auch grobkörnigere, gleichfalls sehr reine Anhydrit-Fibern in Zerrklüften auf. Dolomit tritt einerseits feinkörnig, andererseits aber auch als grosse, diagenetische, idiomorphe Skelettkristalle auf, d.h. als Kristalle mit Sulfatkernen (Fig. 29). Im anhydritischen Bereich der Bohrung sind die Skelettkristalle intakt, im vergippten Teil sind sie jedoch gesprengt. Sie geben somit ein Indiz für die bei der Vergippsung entstehende Volumenzunahme.

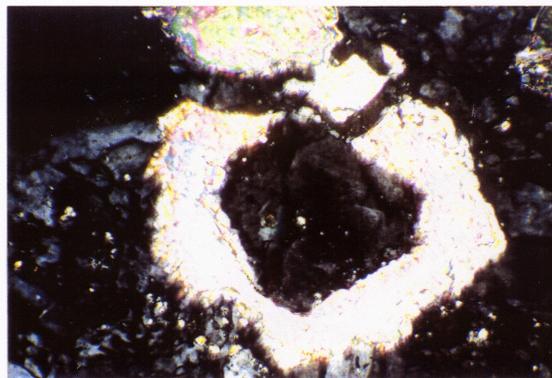


Fig. 29: Durch Gipsquellen gesprengter Dolomitkristall aus der Bohrung Belchen W 190, 3.5 m unter OK Fahrbahn (horizontale Bildkante 0,8 mm)

Die senkrechte Lagerung der Schichten führt dazu, dass die 25 m lange Bohrung praktisch über die gesamte Länge derselben Lage folgt (Fig. 30). Das erlaubt in idealer Weise den Vergippsungsprozess zu studieren, da davon ausgegangen werden kann, dass alle beobachteten Phänomene einzig durch das Fortschreiten der Hydratisierung und nicht durch Änderungen in Textur, Mineralogie oder tektonischer Beanspruchung bedingt sind. Die Bohrung W 190 ist in ihren obersten Metern praktisch vollständig vergippt. Die Vergippsung dringt hier deutlich tiefer ein als in die eben gelagerten oder mässig geneigten Schichten, was auf die bedeutend grössere Wasserwegsamkeit zurückgeführt werden kann

(Anisotropie der Durchlässigkeit). Es lassen sich von unten nach oben folgende Bereiche unterscheiden (Fig. 30):

- 0 bis 0.5 m (jeweils Bohrtiefen ab UK Bauwerk): blockiger Gips (Zone III).
- ca. 0.5 bis 1.8 m: Vergipsung vollständig, flammiger Gips wird durch blockigen Gips überwachsen (Zone II).
- Anhydritspiegel bei 1.8 m
- ca. 1.8 bis 6.2 : Vorwiegend flammiger Gips mit Anhydrit-Relikten (poykilitisch, Zone I).
- Vergipsungsfront bei 6.2 m: Gipssäume entlang Kontakt Ton/Anhydrit wie auch entlang von Korngrenzen in reinem Anhydrit. Die Vergipsungsfront ist stark verfingerter. Entlang von Rissen dringt sie in bedeutend grössere Tiefen.
- Unterhalb 6.2 m (= ca. 9 m unterhalb OK Fahrbahn): keine Spuren der Vergipsung (Zone 0).

Die beobachtete Abfolge von drei Vergipsungszonen entspricht den Verhältnissen bei natürlichen Vergipsungsvorgängen (Ogniben 1957, Holliday 1970). Im vorliegenden Fall kann die Vergipsung aber eindeutig auf den Bau des Tunnels zurückgeführt werden: Zum einen ist die Mächtigkeit der beschriebenen Zonen deutlich geringer als bei natürlichen Vergipsungsvorgängen, wo sie i.d.R. 30 m und mehr betragen. Zum anderen belegen Beobachtungen während des Tunnelvortriebes (Prasad 1979), dass der Gipskeuper hier vor ca. 25 Jahren als weitgehend intaktes, nicht hydratisiertes Gestein vorlag. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die natürliche und die durch den Tunnelbau initiierte Vergipsung deutliche Parallelen aufweisen.

Bei einer Eindringtiefe von rund 6.2 m, kann die Geschwindigkeit des Vordringens der Vergipsungsfront, ein unmittelbares Einsetzen nach Durchörterung und eine gleichmässige Verschiebung vorausgesetzt, mit 25 cm / Jahr angegeben werden. Die Gleitmikrometermessungen zwischen Januar 1992 und März 1995 zeigen oberhalb der Vergipsungsfront nur sehr geringfügige Bewegungen. In den zwei Metern unterhalb der Vergipsungsfront, im Bereich eines grauschwarzen tonigen Mergels mit Anhydritlinsen, wurden Dehnungen und Stauchungen von rund 1 mm/m festgestellt.

Die **Bohrung O182**, etwas südlicher in der benachbarten Oströhre gelegen, traf ebenfalls eine steile bis senkrechte Schichtung an. Allerdings scheint es sich hier aber nicht um eine Scherzone sondern um eine sedimentäre Lagerung zu handeln, welche von drei diskreten spröden Störungszonen unterbrochen wird. Entsprechender geringer ist die Eindringtiefe der Vergipsungsfront. Die ca. 2 m entsprechen unter den genannten Voraussetzungen etwa 9 cm/ Jahr. Bemerkenswert ist aber, dass der Anhydritspiegel bereits 0,3 m in den Fels vorgedrungen ist. Die Gleitmikrometermessungen zwischen Januar 1992 und März 1995 zeigen ein sehr heterogenes Bild. Während die oberen 3 m ab UK Bauwerk noch das bereits vertraute Muster aufweisen mit sehr geringen Bewegungen im ursprünglich (d.h. vor Bohrbeginn) bereits vergipsten Bereich, und starken Bewegungen bis 1 mm/m just unterhalb der Vergipsungsfront, fällt hier noch eine stärkere Stauchung bis 1 mm/m im Bereich einer Störung auf rund 5,5 m Tiefe ab UK Bauwerk auf.

Von der **Bohrung W 205** aus dem südlichen Tunnelabschnitt liegen leider, ausser Gleitmikrometermessungen nur sehr wenige Angaben vor. Sie quert den mit etwa 40° südfallenden Gipskeuper des überschobenen Südschenkels. Die Überdeckung beträgt hier rund 100 m. Das typische Verformungsmuster liesse sich mit einer Vergipsungsfront bei rund 6 m und einem eventuellen Anhydritspiegel einige dm unterhalb der UK Bauwerk erklären.

Bohrung Belchen	Geologie	Schichteneinfallen	Überdeckung vor Baubeginn	Vergipsungsfront		Anhydritspiegel Eindringtiefe in m
				Eindringtiefe in m	Eindringgeschwindigkeit in m / Jahr	
W 26	Gipskeuper nahe zu Trigo'dolomit	ca. 70°	ca. 60 m	ca. 2.8 m	0.11 m	ca. 1,5 m
W 55	Grenze Schilfsandstein / Gipskeuper	ca. 20°	ca. 75 m	(bereits vor Baubeginn vergipst, Vergipsungsfront nicht erbohrt)		ca. 9 m
W 71	Gipskeuper	+/- horizontal	ca. 60 m	ca. 1.4 m	0.06 m	-
W 113	Gipskeuper	60 – 70°	ca. 130 m	ca. 0.5 m	0.02 m	-
O 182	Gipskeuper	ca. 90°	ca. 125 m	ca. 2.0 m	0.09 m	ca. 0.3 m
W 190	Gipskeuper oder An'gruppe	ca. 90°	ca. 125 m	ca. 6.2 m	0.25 m	ca. 1.8 m
W 205	Gipskeuper	ca. 40°	ca. 100 m	Keine Analysen		

Tab. 8: Zusammenstellung der Befunde zum Fortschritt der Vergipsung innerhalb rund 25 Jahren zwischen dem Bau des Tunnels und der Probenahme im Jahre 1992.

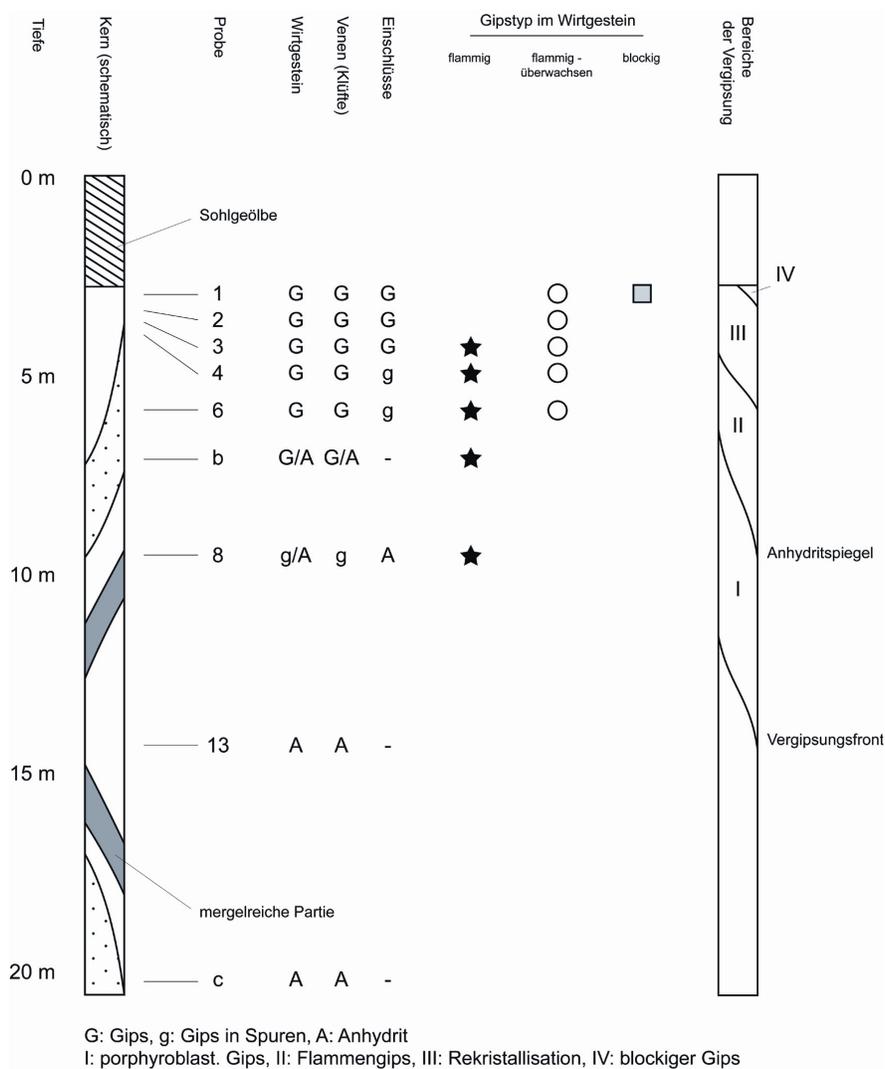


Fig. 30: Schematisches Profil der Bohrung Belchen W 190 mit dem Auftreten von Gips und Anhydrit sowie den verschiedenen Vergipsungsbereichen (I – IV).

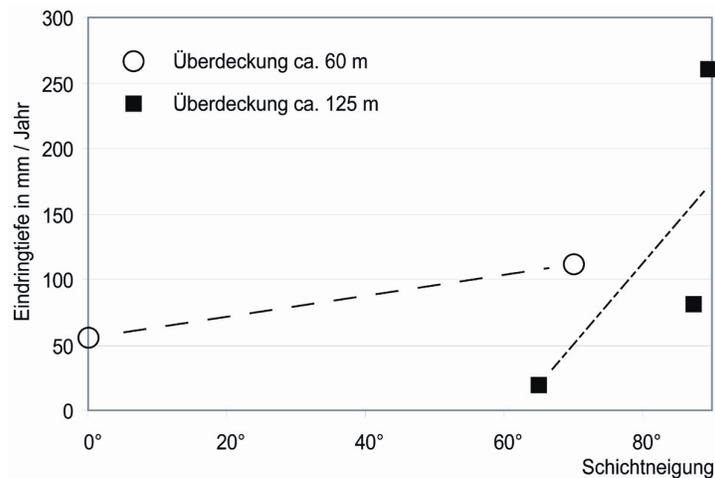


Fig. 31: Ein Vergleich der Daten zur Eindringtiefe zeigt eine tendenzielle Abhängigkeit vom Schichtfallen und der ursprünglichen Überlast.

Die Feldbefunde zeigen eine gewisse Abhängigkeit der Eindringtiefe der Vergipsung von der Schichtneigung und der ursprünglichen Überlast (Tab. 8, Fig. 31). Es lässt sich ableiten, dass ein steileres Schichteinfallen und eine geringere Überdeckung das Quellen begünstigen. Leider liegen nur fünf gesicherte Datenpaare vor, so dass der Befund nicht als statistisch abgesichert gelten kann. Eine entsprechende Abhängigkeit von Schichtneigung und Quellmass wird aber auch von Nüesch et. al. (1995) beschrieben.

Der äusserst geringe Fortschritt der Vergipsung (0,5 m in 25 Jahren) in der Bohrung Belchen W 113 deutet darauf hin, dass sich die Zerrüttung, trotz konventionellem Sprengvortrieb, in Massen hält. Andere, präexistente Faktoren, wie Schichtneigung, Überlast, Lithologie, Deformation, stratigraphische und tektonische Position, insbesondere die Nähe zu besser durchlässigen Schichten scheinen einen weit grösseren Einfluss zu haben.

Bemerkenswert sind aber auch das weite Fortschreiten der Vergipsung und die anhaltenden Hebungsbewegungen in der Bohrung Belchen W 190. Eine Versiegelung und Abdichtung, welche mit der Zeit zu einem Abklingen der Vergipsung führen soll (Wichter, 1989; Kirschke, 1992), hat hier nicht stattgefunden. Obwohl sich die aktive Quelldruckzone (zwischen Anhydritspiegel und Vergipsungsfront) bereits vom Tunnel entfernt hat, treten am Bauwerk immer noch Schäden auf. Die Kräfte werden also über die nicht mehr aktiven, aber noch nicht ausgelaugten Zwischenschichten übertragen. Noch interessanter ist in diesem Zusammenhang die Situation bei den Bohrungen Belchen W 55 und O 55, die ebenfalls in einem Abschnitt mit Schäden an der Tunnelröhre abgeteufelt wurden. In dieser bereits vor Baubeginn teilweise vergipsten Zone liegt der Anhydritspiegel rund 9 m unter der Tunnelsohle. Der Gipsspiegel kann aufgrund der Probenahme nicht genau lokalisiert werden. Er liegt aber auch deutlich unter der Tunnelsohle, da verschiedene Proben bereits vollständig ausgelaugt waren. Die Schäden am Tunnel können also nur unter der Annahme erklärt werden, dass der Druck der mehr als 9 m entfernten aktiven Quellzone über das vollständig vergipste und z.T. auch ausgelaugte Gebirge übertragen wurde.

Ob der Vergipsungsprozess im Belchentunnel nun von aus dem Tunnel eindringendem oder dem Tunnel zufließendem Wasser ausgelöst wurde, lässt sich aufgrund der vorliegenden Befunde nicht

abschliessend beurteilen. Interessant sind in diesem Zusammenhang indes Beobachtungen aus zwei anderen Tunneln:

Beim Engelberg-Basistunnel verhielt sich der Sulfatfels dank weitsichtigen Vorsichtsmassnahmen über mehrere Jahre praktisch ruhig. Als aber dann in 60 m Entfernung von der Tunnelröhre eine Sondierbohrung abgeteuft wurde, begannen innerhalb weniger Tage heftige Quellbewegungen im Bereich der Tunnelsohle (Wichter 1989). Da es kaum wahrscheinlich ist, dass sich Quellvorgänge im Bereich der Bohrung über 60 m Entfernung in wenigen Tagen auf das Bauwerk auswirken können, muss davon ausgegangen werden, dass die Bohrung einen hydraulischen Kurschluss verursachte, der dem Bergwasser erlaubte, in grösseren Mengen dem Tunnel zuzuströmen. Hier hat also eindeutig zuströmendes Wasser das Quellen unmittelbar an der Tunnelsohle ausgelöst und alle bisherigen Bemühungen, kein Wasser an das aufgefahrene Gestein gelangen zu lassen, zunichte gemacht.

Im Hauenstein-Basistunnel wurde rund 75 Jahre nach dem Bau (1912 /13) eine 20 m lange Horizontalbohrung in eine seit Anbeginn als äusserst druckhaft bekannte Zone aus Sulfatgestein vorgetrieben (Steiner 1993, Nüesch et al. 1995). Eine in der Tunnelwand durchgeführte in situ-Quelldruckbestimmungen mit Druckdosen ergab einen durchschnittlichen Quelldruck von 1.7 Mpa (Steiner et al., 1989). Aufgrund der wohlbekanntem stratigraphischen Verhältnisse, konnte man davon ausgehen, dass über die 20 m keine grossen lithologischen Veränderungen zu erwarten waren. Die beobachteten mineralogischen Änderungen können somit einzig auf den Vergipsungsprozess zurückgeführt werden.

Unmittelbar in Tunnelnähe wurde Sulfatgestein mit 60 -70 % Anhydrit und nur Spuren von Gips (< 5 %) angetroffen. In etwa 4 m Entfernung vom Tunnel stieg der Gipsgehalt erstaunlicherweise auf 10 bis 20 % zu, während der Anhydritgehalt auf 30 % sank. Von 13 m ab Tunnelwand bis zum Bohrende wurde dann wieder ein praktisch unvergipstes Anhydritgestein durchbohrt. Erstaunlich ist hier nicht das Fortschreiten der Vergipsungsfront, die mit rund 175 mm / Jahr durchaus im Bereich der Belchen-Daten liegt, sondern viel mehr das Fehlen des Anhydritspiegels. Anstelle eines Übergangs zum vollständig vergipsten Fels, nimmt der Anhydrit in Richtung Tunnel wieder zu. Es scheint so, als wäre die Vergipsung von einem „Nukleationspunkt“ zwischen der heutigen Vergipsungsfront und der Tunnelwand in beide Richtungen symmetrisch fortgeschritten. Dieser Nukleationspunkt könnte nun eine Kluftfläche sein, auf welcher sich Wasser von einem entfernten Aquifer zur Tunnelsohle bewegt. Es ist natürlich auch denkbar, wenn auch eher unwahrscheinlich, dass Wasser aus dem Bereich der Tunnelsohle kapillar in diese Kluftzone aufgestiegen ist (Fig. 32).

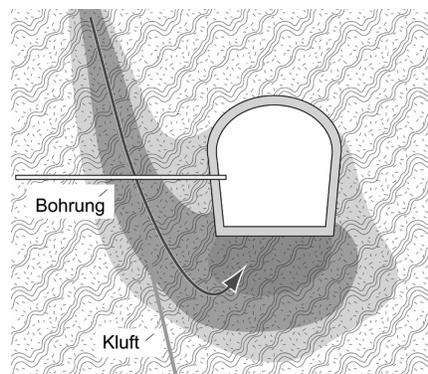


Fig. 32: Mögliche Interpretation der Ergebnisse der Horizontalbohrung im Hauenstein-Basistunnel (schematisch). Dunklere Farbtöne stehen für weiter fortgeschrittenere Vergipsung.

3.8 Quelldruck- und Quellmass-Experimente

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden 30 Laborexperimente an tonführenden Anhydritgesteinen aus dem Gipskeuper durchgeführt:

- Adlertunnel (SBB Bahn 2000): 8 Probenahmen aus Sondierbohrungen.
- Belchentunnel (Nationalstrasse N2): 19 Probenahmen Bohrungen, welche rund 25 Jahre nach Abschluss der Bauarbeiten abgeteuft wurden.
- Umfahrung Sissach (Chienbergtunnel, J2): 3 Probenahme aus Sondierbohrungen

3.8.1 Möglichkeit und Grenzen von Experimenten an tonhaltigen Sulfatgesteinen

Die Abbildung der natürlichen Prozesse im Labor, welche bei der Vergipsung eine Rolle spielen, ist alles andere als trivial. Die Probleme reichen von der Probenauswahl über die Probendimensionierung bis hin zur Mineralisation und Zirkulation der zur Benetzung verwendeten Wässer und zur Dauer der Experimente (Kirschke 1992).

Für die Experimente werden meist – bewusst oder intuitiv – Proben ausgewählt, bei welchen feststellbare Quellvorgänge in nützlicher Zeit, d.h. innerhalb der geplanten Dauer der Experimente erwartet werden können. Aufgrund der bislang gewonnenen Kenntnisse sind dies tonhaltige Anhydritgesteine mit einem Tongehalt von einigen bis maximal 30 Prozent. Nicht berücksichtigt werden dagegen meist massive reine Anhydrite, stark vergipste oder gar ausgelaugte Sulfatgesteine sowie Gesteine mit hohen Dolomit- und Magnesitgehalten. Allein aufgrund dieser Probeauswahl stellen die gewonnenen Labordaten also Maximalwerte dar, welche nicht das Gebirge als Gesamtes, sondern einzig seine quellfähigsten Teilbereiche repräsentieren.

Das von Madsen (1999) vorgeschlagene Labor-Testverfahren ist ebenfalls darauf ausgelegt, in möglichst kurzer Zeit die maximalen Quellparameter zu bestimmen. Die Probe wird vollkommen mit einer gesättigten Sulfatlösung benetzt. Der Wasserspiegel liegt dabei über der Oberkante der Probe (Fig. 4 und 5). Bei den Proben handelt es sich meist um etwa 3 cm dicke Bohrkernscheiben (Madsen & Nüesch 1990). Der Durchmesser dieser Proben kann zwischen 7,5 und maximal 12,5 cm variieren. Nach Madsen (1999) müssen die Proben im bergfeuchten Zustand eingebaut werden. Experimente an getrockneten Proben ergeben zu hohe, nicht repräsentative Werte. Die entsprechenden Resultate dürfen deshalb für Vergleiche und Prognosen nicht beigezogen werden. Es ist besonders darauf zu achten, dass ein Austrocknen durch unsachgemässe Lagerung ausgeschlossen werden kann.

Im Vergleich zu den natürlichen Bedingungen lässt sich diese Versuchsanordnung wie folgt beschreiben:

- Geometrie der Tonhorizonte: Die Wahrscheinlichkeit, dass die Ton- oder Mergellinsen, welche ja für den Vergipsungsprozess von entscheidender Bedeutung sind, angeschnitten und direkt mit Wasser benetzt werden, ist bei den Probezylindern sehr gross. Im Massstab des Felsens, wie er für Untertagebauten relevant ist, muss davon ausgegangen werden, dass viele dieser Ton- und Mergellinsen von den Hauptwasserquellen (Klüfte, Tunnelsohle) durch umliegendes Sulfatgestein ursprünglich isoliert sind. Die Rolle der Tonhorizonte als kapillare Aquifere und quellende „Steinbrecher“ wird also in solchen Experimenten eher überschätzt.

- Wasserzutritt und -zirkulation: Bei der im Experiment gewählten Konfiguration kann das Wasser in fast idealer Weise in die Probe eintreten. Das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen ist sehr gross, der „wasserfernste Punkt“ keine 1,5 cm von der Oberfläche entfernt. Solche Verhältnisse sind in der Natur selten. Zudem stagniert das Wasser in der Probe, was den Abtransport von Calcium- und Sulfationen verunmöglicht. All diese Faktoren begünstigen das Gipswachstum und das Quellen der Tonminerale.
- Wasserchemismus: In der Natur hat der Chemismus der zirkulierenden und in Porenräumen stagnierenden Wässer einen entscheidenden Einfluss auf den Fortgang der Vergipsung. In den normierten Experimenten (Madsen 1999) wird eine gesättigte Sulfatlösung (2,4 g CaSO₄ / l) verwendet, welche das Gipswachstum fördert und die Lösung des Anhydrits verzögert. Es wird also hier eine ganz spezielle, in der Natur aber durchaus mögliche Situation untersucht.
- Geometrie der Probe und der Experimentalapparatur: In den Empfehlungen für Untersuchungen zum Quellverhalten von Tongesteinen (ISRM-Richtlinien 7 und 8, 1989 bzw. 1994) wird das periodische „Zurückstellen“ der Experimentalkonfiguration empfohlen. Das heisst, die in die Ausdehnung der Probe abgeleiteten Drücke werden jeweils kompensiert, quasi in das Experiment zurückgeführt (s. Abschnitt Tonquellen). Dieses Prozedere ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn die Ausdehnung des Probenmaterials reversibel ist. Das ist bei den Tonmineralen, nicht aber beim gelösten Anhydrit oder beim neu entstandenen Gips der Fall. Ein „Zurückstellen“ würde hier also nicht den gewünschten Zweck erfüllen, sondern die Resultate in einer unkontrollierten Weise beeinflussen. Deshalb wird bei den Experimenten an tonhaltigen Sulfatgesteinen auf ein „Zurückstellen“ verzichtet, eine Ausdehnung der Probe also in Kauf genommen (Madsen 1999).

In den Experimenten wird also in verschiedener Hinsicht ein „worst case“-Szenarium untersucht, das in dieser kumulierten Form bei Untertagebauten durchaus vereinzelt lokal auftreten kann, aber für den Fels meist nicht repräsentativ ist. Die Resultate müssen somit, bevor sie auf ein konkretes Tunnelbauwerk angewandt werden können, unter Einbezug lithologischer und struktureller Daten und statistischer Modelle umgerechnet werden (Madsen & Nüesch 1990).

Anders sieht es beim Übertrag der Experimente auf das Langzeitquellverhalten von Sulfatgesteinen im Tunnelbereich aus. Hier ergeben die Labordaten tendenziell zu kleine Werte ab, da die maximalen Werte nie erreicht werden. Insbesondere die Endlichkeit der Probe, die erwähnten Kompromisse bei der Experimentalkonfiguration und die fehlende Wasserzirkulation begünstigen ein Abklingen der Quellprozesse mit der Zeit.

3.8.2 Wassergehaltsbestimmung

An drei Proben aus dem Adlertunnel und allen Proben aus den Sondierbohrungen für den Chienbertunnel (Umfahrung Sissach) wurde der Wassergehalt bestimmt. Dabei wurde zwischen dem adsorbierte „Tonwasser“ und dem „Gipswasser“ unterschieden. Da das an die Tonminerale angelagerte Wasser („Tonwasser“) erst bei 105° vollständig entweicht, überlappen sich die Entwässerung der Tone und die bei ca. 60° beginnende Umwandlung von Gips zu Anhydrit, welche zur Freisetzung des ursprünglich im Gips enthaltenen Kristallwassers („Gipswasser“) führt.

Um das adsorbiertem Tonwasser festzustellen, werden Proben an der Luft und anschliessend über P₂O₅ getrocknet. Bei Lufttrocknung bleiben immer noch ein bis zwei Wasserschichten an den Tonen adsorbiert. Dieses adsorbierte Wasser wird durch P₂O₅ nach 2 Tagen entzogen, und zwar ohne Beeinträchtigung des Gipses, wie Versuche gezeigt haben. Damit ergibt sich eine einfache quantitative

Möglichkeit zur Bestimmung des Gipsgehaltes. Der adsorbierte Wassergehalt gibt andererseits einen ersten Hinweis auf den Tonanteil.

Der Wassergehalt der luftgetrockneten Tonminerale ergibt sich aus folgender Formel:

$$w = 100\% * \frac{(M_l - M_t)}{M_t}$$

w : Wassergehalt
M_l: Masse der lufttrockenen Probe
M_t: Masse der Probe nach Trocknung über P₂O₅

Zur Bestimmung des im Gips gebundenen Kristallwassers wurden tonwasserfreie Proben 24 Stunden bei 200°C erhitzt. Aus dem freiwerdenden Gipswasser wird nach folgender Formel der Gipsgehalt berechnet:

$$\text{Gips(\%)} = \frac{1 \text{ mol Gips}}{2 \text{ mol Wasser}} * \text{Gipswasser\%}_{200^\circ\text{C}} = 4.78 * \text{Gipswasser\%}_{200^\circ\text{C}}$$

3.8.3 Resultate der Quellversuche

Figur 33 zeigt zwei ausgewählte Quellversuche. In Tab. 9 sind die Resultate der wichtigsten Experimente zusammengestellt. Sie umfassen sowohl ungehinderte Quelldehnungs-Versuche (diese enthalten keine Angabe zum Maximalen Quelldruck) wie auch die Versuche zur Ermittlung des maximalen Quelldruckes.

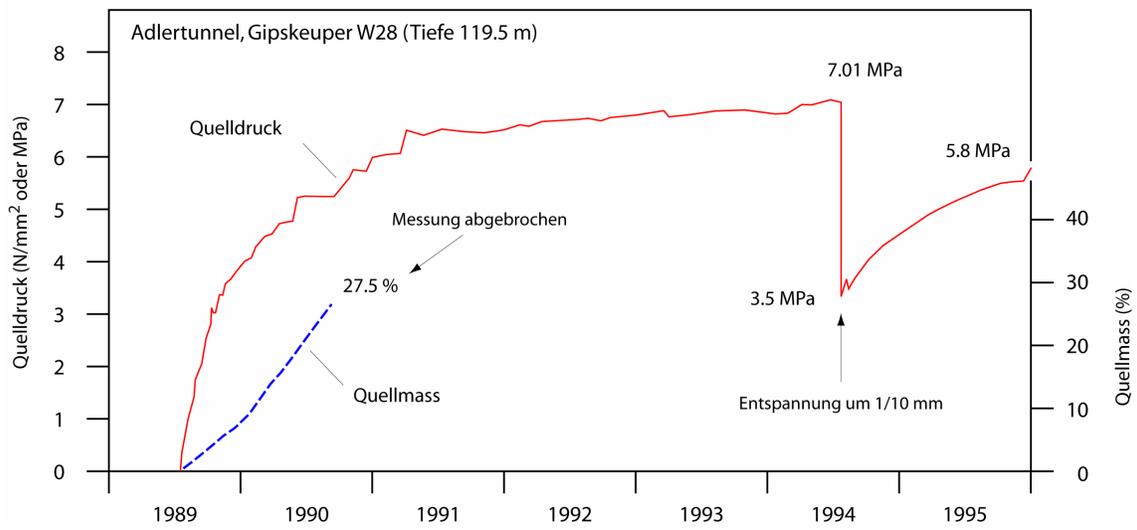
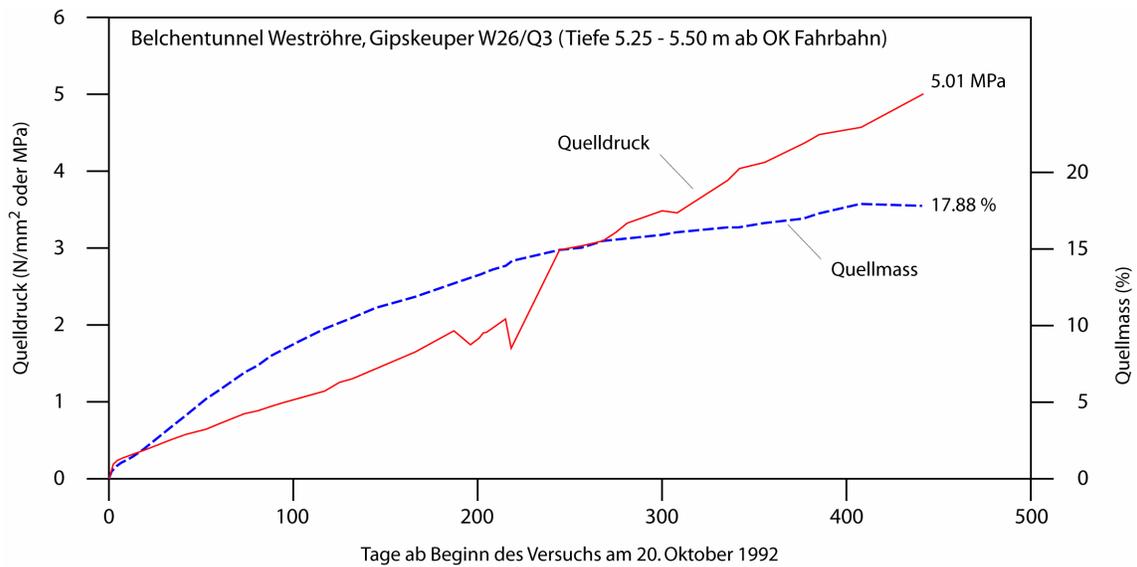


Fig. 33: Zwei typische Quelldruckversuche an Proben aus dem Belchentunnel (Nationalstrasse N2, oben) und dem Adlertunnel (SBB, unten). Im Fall der Probe W26/Q3 (oben) wurde der Versuch nach rund 450 Tagen bei immer noch ansteigendem Quelldruck abgebrochen. Die Probe W28 erreichte nach rund 2 Jahren ein Niveau mit deutlich verringerter Zunahme des Quelldrucks. Auf eine Entlastung der Probe am Anfang des sechsten Versuchsjahres folgte ein erneuert heftiger Anstieg des Quelldrucks.

Ort der Probennahme, Probennr.	Entnahmetiefe ab OKT/ OK Fahrbahn	Schichteinfallen	Wassergehalt der Probe	Maximaler Quelldruck (MPa)	Max. unbehinderte Quellung (%)	Axialdeformation der Probe (%)	Bemerkungen
N2 Belchentunnel							
W26/Q2	4.30 - 4.40 m	ca. 70°		-	3.00		teilw. vergipst zu ca. 25% vergipst
W26/Q3	5.25 - 5.50 m	ca. 70°		5.010	17.88		
W26/Q4	7.40 - 7.70 m	ca. 70°		-	42.00		
W26/Q5	9.30 - 9.60 m	ca. 70°		-	28.97		
W71/Q1	2.30 m	+/- horizontal		-	6.41	-	
W71/Q3	2.80 m	+/- horizontal		-	18.92	-	
W71/Q4	3.30 m	+/- horizontal		-	38.12	-	
W71/Q5	3.70 - 3.75 m	+/- horizontal		-	68.65	-	
W71/Q6	4.35 - 4.45 m	+/- horizontal		0.458	55.61	0.7	
W71/Q9	6.50 - 6.57 m	+/- horizontal		0.449	59.40	0.63	
W71/Q13	10.55 - 10.64 m	+/- horizontal		0.230	9.70	0.39	
W71/Q15	12.80 - 13.00 m	+/- horizontal		2.412	-	1.82	
W71/Q17	16.95 - 17.20 m	+/- horizontal		0.626	32.40	0	
W190/Q2	3.30 - 3.70 m	ca. 90°		0.170	0.42		vollst. vergipst vollst. vergipst zu ca. 90% vergipst zu ca. 50% vergipst Spuren von Gips
W190/Q3	3.70 - 4.00 m	ca. 90°		0.040	0.54		
W190/Q4	4.35 - 4.55 m	ca. 90°		0.040	0.46		
W190/Q6	6.55 - 6.70 m	ca. 90°		0.110	2.85		
W190/Q8	10.00 - 10.30 m	ca. 90°		3.520	5.76		
W190/Q13	15.05 - 15.30 m	ca. 90°		0.700	18.00		
Gabel Mittelwert Median				0.04 ... 5.01 1.147 0.454	0.42 ... 68.65 22.73 18.00		

Ort der Probennahme, Probennr.	Entnahmetiefe ab OKT/ OK Fahrbahn	Schichteinfallen	Wassergehalt der Probe	Maximaler Quelldruck (MPa)	Max. unbehinderte Quellung (%)	Axialdeformation der Probe (%)	Bemerkungen
B2000 Adlertunnel							
K12	88.90 - 89.20 m	+/- horizontal		0.220	1.00		vorw. dolomit. vorw. dolomit.
K15	90.60 - 91.05 m	+/- horizontal		0.100	0.09		
K17/2	108.85 - 109.08 m	+/- horizontal		6.910	> 43.00		
W18	106.44 - 106.84 m	+/- horizontal	1.6	0.758	28.40	2.51	
W20	111.00 - 111.30 m	+/- horizontal	0.6	1.019	32.60	3.74	
W24	113.30 - 113.57 m	+/- horizontal		3.350	> 12.00		
W28	119.49 - 119.69 m	+/- horizontal		7.100	> 25.00		
W30	122.38 - 122.53 m	+/- horizontal	0.3	0.389	17.98	0.36	
Gabel Mittelwert Median				0.10 ... 7.01 2.481 0.700	0.09... >43.0 20.01 12.00		

Ort der Probennahme, Probenr.	Entnahmetiefe ab OKT/ OK Fahrbahn	Schichteinfallen	Wassergehalt der Probe	Maximaler Quelldruck (MPa)	Max. unbehinderte Quelldehnung (%)	Axialdeformation der Probe (%)	Bemerkungen
J2 Umfahrung Sissach (Chienbertunnel)							
RB20/50	122.48 - 122.72 m	+/- horizontal	12.9	0.460	1.08		
RB20/55	136.00 - 136.25 m	+/- horizontal	5.6	0.330	2.37		
RB20/57	146.38 - 146.50 m	+/- horizontal	0.17	0.110	1.73		
Gabel				0.11 ... 0.46	1.08 ... 2.37		
Mittelwert				0.300	1.727		
Median				0.330	1.730		

Tab. 9: Zusammenstellung der Resultate Quelldruck- und Quellhebungsexperimente.

3.8.4 Diskussion der Resultate

Die Versuche zeigen eine grosse Streuung und bestätigen somit die bisher publizierten Resultate. Die Gabel über alle hier durchgeführten Experimente reicht von 0.04 bis 7.0 MPa Quelldruck und 0.1 bis knapp 70% Quelldehnung. Betrachtet man die Experimente allerdings etwas genauer, so lassen sich trotzdem einige Tendenzen erkennen.

Im Belchentunnel weisen nicht etwa die Proben aus dem unvergipsten Bereich die grössten Quelldrücke und stärksten Quelldehnungen auf, sondern die bereits leicht vergipsten Proben. Die Proben mit dem geringsten Quellpotential stammen demgegenüber erwartungsgemäss aus stark oder vollständig vergipsten Bereichen oder aus Gesteinsfolgen mit geringem Sulfatanteil.

So zeigen auch die Adlertunnel-Proben, welche alle aus tiefen Sondierbohrungen stammen, ansehnliche Quellhebungen von bis zu über 43% und maximale Quelldrücke bis zu 7 MPa. Ausnahmen bilden einzig Proben, bei welchen spätere Analysen zeigten, dass sie praktisch kein Anhydrit enthielten.

Die geringen Werte der Proben aus den Sondierbohrungen für den Chienbertunnel (Umfahrung Sissach) sind auf eine vergleichsweise kurze Experimentdauer, die relativ geringe Überlast und die bereits vorgängig vorhandene Vergipsung zurückzuführen.

3.8.5 Schlussfolgerungen

Die Resultate erlauben folgende Schlüsse:

- Unvergipstes oder nur leicht vergipstes, tonhaltiges Sulfatgestein zeigt bei experimentellen Untersuchungen durchwegs hohe Quelldrücke und / oder Quelldehnungen. Die an solchen Proben gewonnenen Werte von bis zu 7 oder gar 8 MPa bzw. bis zu 70% Quellhebung sind auf Situationen anzuwenden, welche der Konfiguration der Experimente entsprechen. Dies sind insbesondere Tunnelwasserzutritte beim Tunnelvortrieb in das frisch aufgelockerte Gestein, namhafte Bergwasserzutritte im geklüfteten Fels oder in Nachbarschaft zu Aquiferen sowie grössere, dem Meteorwasser ausgesetzte Geländeanschnitte (Wichter 1989).
- Die moderateren Werte von bereits stärker vergipsten Proben sind, je nach Situation, für entsprechende Konfigurationen wie z.B. Bauwerke im Bereich des Anhydritspiegels, kurzfristige Sanierungsmassnahmen in älteren Tunnels, anzuwenden.

- Wichtig ist es auch, die räumliche und prozentuale Verteilung der verschiedenen Lithologien zu kennen, um die Messwerte richtig zuzuordnen. Die statistischen Angaben (Gabel, Mittelwert, Median etc.), wie sie in der Tab. 9 aufgeführt sind, sollen nur die Variabilität der Werte aufzeigen. Sie dürfen keinesfalls direkt für die Dimensionierung von Tunnelbauwerken verwendet werden.
 - Prinzipiell wäre es wünschenswert, die Quelldruckexperimente erst nach einer eingehenden Studie der lithologischen Verhältnisse, des aktuellen Vergipsungszustandes und des Vergipsungspotentials anzusetzen. So wäre eine sorgfältige Auswahl des Probenmaterials gewährleistet, welches dann auch zu den gewünschten statistischen Aussagen führt. Da Quelldruckexperimente, insbesondere an Sulfatgesteinen, in der Regel aber mehrere Jahre dauern, sind die Gutachter meist gezwungen, die Proben ohne längere Voranalysen und Auswahlentscheide in die Apparaturen einzubauen. Es ist daher wichtig, möglichst viele Quelldruckexperimente an unterschiedlichen Proben durchzuführen. Und es muss dann auch in Kauf genommen werden, dass verschiedene der gewonnenen Resultate keine konkreten Aussagen für das betreffende Bauwerk liefern können.
-
- Da die natürliche und durch Untertagebauten induzierte Vergipung, abhängig von klimatischen, morphologischen, tektonischen, stratigraphischen und lithologischen Faktoren sehr unterschiedlich voranschreitet, können ohne genaue Lokalkenntnisse und Vorstudien keine Faustregeln über den idealen Probenahmeort gegeben werden. Wie die aufgeführten Beispiele zeigen, kann man in einigen älteren Tunnels noch in wenigen Dezimetern Abstand auf praktisch unvergipstes, voll quellfähiges Material stossen, während anderenorts der aktuelle Quellprozesse in einigen Zehnermetern Entfernung stattfinden. Das Quellpotential lässt sich leider meist nur sehr schlecht von blossem Auge an Bohrkernen voraussagen. Aufschluss geben erfahrungsgemäss erst die eingehenden mikroskopischen und mineralogischen Untersuchungen. Wenig Sinn macht die Fortführung von Quellmessungen, sobald sich anhand eingehender Untersuchungen herausstellt, dass die Gesteine bereits vollständig vergipst oder gar ausgelaugt sind.
 - Problematisch wird die Interpretation der Quellexperimente wenn Langzeit-Prognosen erwünscht sind. Keinesfalls darf ein Abklingen der Quellprozesse überinterpretiert werden. In der Natur dauern Quellprozesse ohne erkennbares Abklingen oft über Jahrzehnte an. Auch ist es nicht ausgeschlossen, dass Quellprozesse, ausgelöst durch natürliche oder künstliche Vorgänge und Eingriffe erst mit jahrelanger Verzögerung einsetzen. Bei Langzeitprognosen muss daher mit lang andauernden maximalen Quelldrücken von bis zu 8 MPa ausgegangen werden, welche lokal oder über weitere Strecken zu verschiedenen Zeitpunkten auftreten können.

4. Zusammenfassung und Empfehlungen

4.1 Unterschiedliche Prozesse

Bei der Tonquellung und der Volumenzunahme durch Gipsbildung handelt es sich, physikalisch wie chemisch, um zwei unterschiedliche Prozesse. Die Tonquellung erfolgt durch die Anlagerung von Wassermolekülen an der Oberfläche der Tonminerale. Demgegenüber führen beim Quellen im Zusammenhang mit dem Ersatz des Anhydrits durch Gips („Gipsquellen“) wachsende Gipskristalle zu einer Volumenzunahme.

Ursache für die Tonquellung ist eine physikalisch-chemische Reaktion der Tonoberfläche mit Wasser. Betroffen von der Tonquellung sind vor allem Gesteine mit bestimmten Tonmineralen, insbesondere Smekтите wie z.B. Montmorillonit, Mixed-Layer Minerale, wie z.B. Illit/Montmorillonit, oder Chlorit/Smektit resp. Chlorit/Vermiculit, welche als Corrensit bezeichnet werden. Andere weit verbreitete Tonminerale wie z.B. Illit oder Kaolinit sind nicht quellfähig. Natürliche Ton-, Lehm- und Mergelgesteine bestehen aus unterschiedlichen Mischungen dieser Tonminerale mit weiteren nicht quellfähigen Komponenten, wie z.B. Calcit oder Quarz. Im tonhaltigen Gebirge liegt der Wassergehalt der quellfähigen Tonminerale meist im Gleichgewicht mit dem Überlagerungsdruck vor. Damit eine Wasseraufnahme erfolgen, und somit ein Quellen einsetzen kann, muss das Gestein vorgängig entlastet werden (z.B. durch den Bau einer Kaverne). Diese Entlastung führt in der Regel auch zu einer erhöhten Wasserwegsamkeit. Da ein beachtlicher Unterschied in der Ionenkonzentration zwischen den Doppelschichten der Tonteilchen und dem Porenwasser besteht, ziehen die Tonteile das Wasser durch Osmose an. Diese osmotische Quellung ist abhängig vom Abstand zwischen den wasserzugänglichen Oberflächen der Tonminerale, der Anzahl und der Wertigkeit ihrer gebundenen Kationen. Die Tonquellung ist prinzipiell ein reversibler Prozess. Beim Aufbau eines Gegendrucks, insbesondere bei experimentellen Untersuchungen, kann das an die Tonminerale angelagerte Wasser wieder ausgepresst werden. Der dabei aufzuwendende Druck entspricht dabei dem Quelldruck, der bei der Anlagerung der Wasserschichten entwickelt wurde.

Ob in bestimmten Gesteinen ein Gipswachstum einsetzt und daraus eine Volumenzunahme und ein Quelldruck resultiert, hängt ebenfalls von verschiedenen Parametern ab. Wie beim Tonquellen muss in erster Linie der Wasserzutritt gewährleistet sein. Zudem müssen die zirkulierenden Wässer eine genügende Konzentration an Sulfationen aufweisen, so dass Gips ausfallen und die Gipskristalle wachsen können. Die Sulfationen können prinzipiell auch von entfernten Quellen in das betrachtete Gestein eingeschwemmt werden und dort zur Gipsbildung führen. Besonders anfällig auf Gipsbildung ist allerdings anhydrithaltiges Gestein, wo die Lösung des Anhydrits Sulfationen freisetzt. Bei der Lösung des Anhydrits und der Ausfällung von Gips handelt es sich um thermodynamische Prozesse deren Ausmass und Geschwindigkeit von der Temperatur, vom Umgebungsdruck und der Gesamtmineralisation (bzw. Aktivität) der zirkulierenden Lösungen abhängt. Damit das Volumen zunimmt und sich ein Quelldruck einstellt, muss der neu auskristallisierte Gips mehr Volumen einnehmen als der gelöste Anhydrit. Wird das Wasser von aussen zugeführt und kein Sulfat weggeschwemmt, erfolgt bei vollständiger Lösung des Anhydrits und Ausfällung von Gips sowie bei unbehinderter Quellung eine Volumenzunahme von rund 61%. Der thermodynamisch berechnete theoretische Quelldruck von Gips beträgt 20 MPa (Sahores 1962). In der Natur werden diese Werte allerdings kaum je erreicht, da das Sulfat z. T. ausgeschwemmt, und der Druck einzelner Kristallkeime im Gestein verteilt wird. Zudem behindern zu hohe lokale Drücke die Anhydritlösung und Gipsfällung, was zu einer negativen Rückkoppelung führt. Das Gipsquellen ist unter den hier interessierenden Bedingungen ein irreversibler Prozess, der nicht, wie beim Tonquellen, durch Anwenden eines Gegendruckes rückgängig gemacht werden kann. Wohl ist aus der Natur unter Druck- (und Temperatur-) Einwirkung ein Ersatz des Gip-

ses durch Anhydrit bekannt, doch ist dieser Prozess so langsam, dass er weder bei Untertagebauten noch in Experimenten eine Rolle spielt.

Der entscheidende Faktor für die Prognose von Quellmass- und Quelldruckentwicklungen ist allerdings die Tatsache, dass, in für Untertagebauwerken relevanten Zeiträumen, eine Volumenzunahme oder Druckentwicklung durch Gipsneubildungen nur in tonhaltigen Gesteinen stattfindet. Neben dem eher marginalen Problem von Gipsbildungen in ursprünglich sulfatfreien Ton- und Mergelgesteinen steht hier vor allem das Quellen von tonhaltigen Sulfatgesteinen, namentlich der weit verbreiteten Wechsellagerungen von Anhydrit und dolomitischem Mergel im Zentrum des Interesses. Eine schlüssige, allseits akzeptierte Erklärung dieses Phänomens steht noch aus. Es wird hier postuliert, dass das (dem Gipsquellen vorausgehende) Tonquellen zu einer mechanischen Zerklüftung des an sich sehr dichten Anhydritgesteins und somit zum notwendigen Wasserzutritt führt. Zudem begünstigen die absorbierenden und retardierenden Eigenschaften der Tonminerale eine Aufkonzentrierung der zirkulierenden Sulfatlösungen.

Massive, ungeklüftete und tonarme (< 1% quellfähige Tonminerale) Anhydritgesteine zeigen im Zeitraum, der für den Bau- und Betrieb von Untertagebauwerken relevant ist, praktisch keine nennenswerten Quellphänomene.

Es muss somit bei Untertagebauten zwischen einem „reinen“ Tonquellen und einem kombinierten Ton-Sulfatquellen unterschieden werden. Beim „reinen“ Tonquellen spielen der Anteil an quellfähigen Tonmineralen, deren Hydrationsgrad (Anzahl angelagerte Wasserschichten), die Wertigkeit ihrer Kationen, der Betrag der Entlastung der Gebirgsspannung durch das Bauwerk sowie die Möglichkeit (Wegsamkeit, Menge) eines Wasserzutritts eine zentrale Rolle. Beim kombinierten Ton-Sulfatquellen kommen zudem noch die absoluten Druck- und Temperaturverhältnisse und die Konzentration der zirkulierenden Lösungen (Sulfatgehalt und Gesamtmineralisation) hinzu. Die erwähnte Zerklüftung der Anhydritlagen durch quellende Tonlagen wie auch die Verfügbarkeit an gelöstem Sulfat hängen stark von der mineralogischen-texturellen Zusammensetzung des Gesteins, insbesondere vom Durchmischungsgrad von Ton/Mergel- und Anhydritlagen ab.

Betrachtet man die Vielzahl unabhängiger Faktoren und deren Variabilität, so erstaunt es nicht, dass durchörterte ton- und sulfathaltige Gesteine sich betreffend Einsetzen, Geschwindigkeit und Ausmass der Quellung oft sehr unterschiedlich verhalten.

4.2 Ähnliche aber nicht identische Prozessabläufe

Aus der Sicht des Ingenieurs zeigen das „reine“ Tonquellen und das Quellen von ton- und anhydrithaltigen Gesteinen diverse Ähnlichkeiten. Beide Prozesse können sofort oder erst nach einer gewissen Verzögerung eintreten, sie können sehr lange andauern, oder auch, nach einem allfälligen Abklingen, nach Jahren erneut einsetzen. Dies führte dazu, dass in der Vergangenheit oft nicht exakt zwischen den beiden Phänomenen unterschieden wurde. Sowohl bei der Prognose wie bei der Prävention der beiden Prozesse empfiehlt sich allerdings eine differenzierte Betrachtung.

Bei der „reinen“ Tonquellung sind die internen Parameter in der Regel invariabel. Zwar unterscheiden sich Tongehalt, Anteil quellfähiger Tonminerale, Ladung der Kationen und Textur des Gesteins von Ort zu Ort. Doch bleiben diese Eigenschaften während des Quellprozesses unverändert. Zudem ist das osmotische Gleichgewicht zwischen der Oberfläche der Tonminerale und dem Porenwasser so gross, dass eine Änderung der Zusammensetzung des letzteren kaum einen grossen Einfluss auf den Prozessablauf hat. Das Tonquellen ist deshalb prinzipiell ein endlicher Prozess, der beim Erreichen

eines Gleichgewichts der Drücke abklingt. Erst eine erneute Störung dieses Gleichgewichts oder eine namhafte Änderung des Wasserzutrittes können hier zu einem Wiedereinsetzen des Quellprozesses führen.

Demgegenüber treten beim Ton-Sulfatquellen auch Lösungs- und Fällungsprozesse auf. Die Irreversibilität der Vorgänge und der Umstand, dass auch Material (Calcium- und Sulfationen) ein- oder ausgeschwemmt werden können, führen dazu, dass dieser Prozess oft länger andauert und aus schwieriger fassbaren Gründen (wieder) einsetzen kann, als beim „reinen“ Tonquellen.

Schliesslich führt die Kombination von quellenden Tonmineralien und auskristallisierendem Gips in der Regel zu höheren Gesamtdrücken als sie von sulfatfreien tonführenden Gesteinen her bekannt sind.

4.3 Wasserzutritt / Entlastung

Zwei entscheidende Phänomene, welche die beiden Quellprozesse beeinflussen, sind die Entlastung des Gebirges im Umfeld des Untertagebauwerkes und der Wasserzutritt. Mit der Entlastung geht in der Regel auch eine Zerrüttung des umliegenden Felsens und somit einer Erhöhung der Wasserwegsamkeit einher. Der Grad dieser Zerrüttung hängt allerdings entscheidend von der Art der Vortriebsweise ab.

Beim Wasserzutritt ging man bislang immer davon aus, dass das Wasser von der Tunnelachse in das Gebirge vordringt. Das Wasser, so die gängige Annahme, stammt von Wassereinbrüchen aus durchlässigeren Gesteinen und fliesst entlang der Tunnelachse, sei es als sichtbares Tunnelwasser oder diffus in der begleitenden zerrütteten Zone, in die fraglichen Ton-, Mergel- und Sulfatgesteinsbereiche, wo es dann wieder versickert. Es wurde hier dargelegt, dass durchaus auch eine umgekehrte Fliessrichtung denkbar ist. So wie das Untertagebauwerk die lithostatische Druckverteilung, d.h. den eigentlichen Gebirgsdruck stört, so stört es auch die hydrostatische Druckverteilung. Entsprechend ist in den meisten Situationen mit einer Fliessrichtung vom Fels zum Untertagebauwerk zu rechnen, das heisst, der Tunnel oder die Kaverne wirken als Drainage. Da sich die verschiedenen beobachteten Phänomene mit dem einen oder aber mit dem anderen Modell besser erklären lassen, wurde eine Kombination beider Modelle als Ursache für die Quellphänomene vorgeschlagen. Auf einen Zutritt von Tunnelwasser in den zerrütteten Fels weist insbesondere das schnelle Einsetzen des Quellen nach dem Auffahren des Bauwerkes hin. Andererseits spricht die klare Zonierung bei der Vergipsung eher für einen Fluss vom Gebirge zum Bauwerk. Es wird deshalb postuliert, dass sich nach einer ersten Sättigung des durch Tunnelvortrieb und Entlastung geschaffenen Kluftraums durch Tunnelwasser ein kommunizierendes hydraulisches System etabliert, bei dem das Untertagebauwerk als Vorflut wirkt.

4.4 Experiment und Prognose

Die Übertragbarkeit von Laborresultaten auf Untertagebauten und deren Dimensionierung war lange Thema ausführlicher Diskussionen. Oft wurde dabei auch die Probenpräparation und Konfiguration der Experimente in Frage gestellt. Hier wurde zwischenzeitlich, unter der Federführung eines der Autoren dieser Arbeit, eine verbindliche und anerkannte Norm erarbeitet (Madsen 1999). Diese Norm wurde selbstverständlich auch bei den hier durchgeführten und vorgestellten Experimenten angewandt. Sie liefert bei sulfatfreien Proben zuverlässige und repräsentative Werte

Die Grenzen der Reproduzierbarkeit der natürlichen Prozesse im Labor, welche in quellenden sulfathaltigen Gesteinen auftreten, wurden hier ausgeleuchtet. Die gängige experimentelle Konfiguration (Madsen 1999) repräsentiert hier in vielen aber nicht allen Aspekten einen „worst case“. Problematisch sind insbesondere die Konzentration der Sulfatlösung, die Wasserzirkulation, der Masstab- und vor allem der Zeitfaktor. Es ist also nicht ausgeschlossen, dass experimentell untersuchte Gesteine vereinzelt ein deutlich grösseres Quellpotential haben können, als es die Laborwerte vermuten lassen. Andererseits kann das Quellen in der Natur deutlich verzögerter und verhaltener einsetzen als im entsprechenden Experiment. Allerdings wird man sich auch hier in Zukunft auf das Normverfahren nach Madsen (1999) abstützen müssen, da sich die Komplexität des Ton-Sulfatquellens wohl kaum je in einem vernünftigen Kosten- und Zeitrahmen im Labor abbilden lässt.

Ferner ist auch zu beachten, dass meist nur die vermeintlich quellfähigsten Gesteinstypen (Lithologien) des zu beprobenden Abschnitts oder Formation für Quellexperimente ausgewählt werden. Es wird also wiederum der „worst case“ gesucht. Ob sie diesen auch repräsentieren, zeigt allerdings meist erst der Verlauf des Versuchs. Es ist daher wichtig, das Ausgangsmaterial und das Endprodukt der Experimente auch mineralogisch zu untersuchen, um die Resultate adäquat interpretieren zu können. Sollte allerdings ein repräsentativer Wert des Quellpotentials einer Formation gewonnen werden, so ist eine umfangreiche Beprobung nach dem Zufallsprinzip unabdingbar.

Insbesondere bei Experimenten an sulfathaltigen Gesteinen wird innert nützlicher Frist oft kein Abklingen der Quellung festgestellt. Hier sind somit Langzeitversuche (mehr als 5 Jahre) weiterhin unabdingbar.

Es wurde verschiedentlich darauf hingewiesen, dass das Quellverhalten von ton- und sulfathaltigen Gesteinen von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden, welche zudem nur teilweise im Labor nachgebildet oder untersucht werden können. Es können hier somit keine generellen, allgemein oder doch zumindest über ein weites Gebiet gültige Zahlen genannt werden.

Die hier durchgeführten Messungen zeigen allerdings diverse Tendenzen auf. So weisen z. B. Proben, welche aus Bohrungen gewonnen wurden, die 25 Jahre nach dem Bau des Belchentunnels aus dem Tunnel abgeteuft wurden, mit zunehmender Tiefe ab Fahrbahn ein zunehmendes Quellpotential auf. Dies gilt tendenziell sowohl für sulfatreie wie für sulfatführende Proben. Andererseits setzt bei ihnen die Quellung meist schneller ein. Eine entsprechende Tendenz eines zunehmenden Quellpotentials mit zunehmender Tiefe (ab OK Terrain) konnte ebenfalls, wenn auch mit einer breiten Streuung, bei den Proben aus den verschiedenen Sondierbohrungen (Chienbergtunnel, Adlertunnel, Bözbertunnel) festgestellt werden.

Bei sulfatführenden Proben erreicht die Quellung in einem bestimmten Zeitraum höhere Werte, wenn die Proben bereits zu Beginn Gips enthalten. So konnte der grösste maximale Quelldruck (5 MPa) aller Proben aus dem Belchentunnel bei einer Probe festgestellt werden, welche schon bei Versuchsbeginn zu ca. 25% vergipst war. Der vorhandene Gips wirkt also offenbar als Keim für weitere Gipsbildung. Zudem spielt die bereits vorhandene Wasserwegsamkeit sicher auch eine Rolle.

Die schon bekannte Anisotropie des Quellens in geschichteten Gesteinen konnte sowohl in Feld wie auch in Laborexperimenten erneut bestätigt werden.

Experimente an massiv mit bis zu 8 MPa vorbelasteten Callovien- und Opalinuston-Proben haben gezeigt, dass sich durch dieses Verfahren die Quellung nur in vereinzelt Fällen mindern oder gar unterdrücken lässt.

Schliesslich hat sich bestätigt, dass sulfatführende Proben tendenziell verhaltener, dann aber stärker und länger quellen. So beträgt der grösste hier für sulfatfreie Proben festgestellte und als zuverlässig betrachtete maximale Quelldruck rund 2,5 bis 2,75 MPa. Diese Werte wurden sowohl für Molassemergel (Bözbertunnel) wie für verschiedene Ton- und Mergelgesteine des Juras festgestellt, so an Proben aus dem Callovionton des Grellingertunnels und dem Opalinuston des Belchentunnels. Die Mehrzahl der Werte streut jedoch zwischen 0,5 und 2,0 MPa. Bei den sulfathaltigen Proben konnten dagegen vereinzelt Werte von bis zu 7 MPa (Adlertunnel) festgestellt werden. Die Streuung ist hier sehr gross, was allerdings nicht nur auf die Heterogenität der Proben und ihrer Vorgeschichte zurückzuführen ist, sondern auch auf den Umstand, dass viel Versuche abgebrochen werden mussten, bevor der Quelldruck einen annähernd stabilen Wert erreicht hatte.

Gleiche Tendenzen, wiederum bei einer grossen Streuung und Überlappung, konnten bei den unbehinderten Quelldehnungsversuchen beobachtet werden. Während die Werte bei den sulfatfreien Gesteinen bis zu 20 % betragen, erreichen sie bei einigen sulfatführenden Gesteinen bis zu 50 %, in einem Fall sogar an die 70 % (Belchentunnel).

4.5 Mögliche Massnahmen zur Verhinderung des Quellens

Seit der Erkenntnis, dass das Quellen der Tonminerale und der Ersatz des Anhydrits durch Gips durch die Zufuhr von Wasser verursacht werden, zielen verschiedene Anstrengungen darauf, den Zutritt von Wasser zu den quellfähigen Gesteinen zu vermeiden. Da bislang einzig der Zutritt von Wasser vom Untertagebauwerk ins Gebirge in Betracht gezogen wurde, zielten die Anstrengungen alle darauf das Zufließen und Versickern von Stollenwasser zu vermeiden. Diese Massnahme, welche insbesondere in der Bauphase nicht immer leicht zu bewerkstelligen ist, führten im Allgemeinen zu einer Verzögerung und Verminderung der Quellphänomene. Gänzlich vermieden werden konnten sie dadurch bislang allerdings nicht.

Aus der Erkenntnis, dass Druckentspannung und Zerrüttung des Gesteins das Einsetzen und eventuell auch die Intensität des Quellens beeinflussen, werden deshalb heute grosse Anstrengungen unternommen, den Vortrieb durch die Problemzonen möglichst schonend voranzutreiben. Durch die Vermeidung einer unnötigen Auflockerung soll das Einsickern von Tunnelwasser und die tunnelparallele Wasserzirkulationen unterhalb der Sohle unterbunden werden. Erfahrungen haben gezeigt, dass so das Quellrisiko deutlich verringert oder zumindest das Einsetzen der Quellprozesse verzögert werden kann.

Dass trotz allen Massnahmen das Quellen nicht gänzlich unterbunden werden kann, liegt sehr wahrscheinlich daran, dass es auch von Wasser gespeist wird, welches dem Bauwerk zuströmt. Diese meist sehr geringe Strömung wird durch die Störung des hydrostatischen Gleichgewichts durch den Tunnel hervorgerufen, der als Drainage wirkt. Ein solcher Zustrom wird freilich kaum zu unterbinden sein.

Ergänzend sei noch auf die Möglichkeit einer Wasserzufuhr über die Luftfeuchtigkeit im Untertagebauwerk hingewiesen. Die osmotischen Kräfte der Kationen-bestückten Tonoberflächen könnten hier die treibende Kraft sein. Es gilt jedoch zu bedenken, dass die Temperatur unter Tage über weite Strecken des Jahres wärmer ist als die Aussentemperatur. Eine nennenswerte Abgabe von Luftfeuchtigkeit käme deshalb einzig im Sommer in Frage.

Die neben einer Verringerung der Wasserzufuhr am häufigsten praktizierte Möglichkeit, die Quellbewegungen einzudämmen, oder zumindest das Bauwerk von ihren Folgen zu schützen, ist eine steife

Ummantelung. Für deren Dimensionierung sind exakte Prognosen zum Quellpotential unabdingbar. Sofern nicht von den bekannten Maximalwerten, also z.B. 7 MPa für sulfathaltige Gesteine in der Nordschweiz, ausgegangen werden soll, sind objektspezifische Abklärungen unabdingbar.

4.6 Empfehlungen für die Projektierung von Untertagebauten

Quellfähige Ton- und Sulfatgesteine sind und bleiben ein ernsthaftes Problem für alle Untertagebauten. Arbeiten wie diese tragen zur Verbesserung der Kenntnisse bezüglich der auslösenden Grössen, der ablaufenden Prozesse und der zu erwartenden Drucke bei. Sie können allerdings keine technisch machbaren und finanziell tragbaren Methoden vorschlagen, wie das Quellen gänzlich unterbunden werden kann. Langzeitbeobachtungen haben gezeigt, dass Massnahmen wie die möglichst vollständige Unterbindung von Wasserzutritten, der Aufbau eines Gegendrucks mittels steifer Einbauten oder das Zulassen von Quellvorgängen in Knautschzonen den Quellprozess oder das Auftreten von Schäden am Untertagebauwerk zwar verzögern aber nicht gänzlich verhindern können. Das Tückische am Quellprozess ist gerade sein langes Andauern und sein Wiedereinsetzen nach Phasen der Ruhe.

Die erste Regel für die Projektierung von Untertagebauten bleibt also, die entsprechenden Gesteinsformationen tunlichst zu meiden oder deren Querung auf die minimal mögliche Länge zu beschränken. Müssen entsprechende Formationen zwingend durchfahren werden, ist die Streckenführung so zu wählen, dass der Anteil an anhydritführenden Tongesteine sowie an Tongesteinen mit quellfähigen Tonmineralen möglichst klein ist. Bei Tunnel sind längere Streckenführungen im quellfähigen Gestein in unmittelbarer Nachbarschaft zur Oberfläche oder zu stark wasserführenden Gesteinen (Sandsteine, verkarstete Kalke) zu meiden oder auf ein absolutes Minimum zu beschränken. Bei Streckenabschnitten in tonhaltigen Sulfatgesteinen ist in der Regel zwischen Vergipsungsfront und Anhydritspiegel mit einem raschen, unterhalb der Vergipsungsfront mit einem verzögerten Einsetzen des Quellprozesses zu rechnen.

Eine genaue Kenntnis der betroffenen Lithologien, des aktuellen Quellzustandes, des Quellpotentials sowie der Lage des Bergwasserspiegels und – bei den Sulfatgesteinen – des Gips- und Anhydritspiegels sowie der Vergipsungsfront ist unabdingbar. Diese Daten sind vorgängig mit geeigneten Sondierungen zu ermitteln. Dabei ist allerdings zu beachten, dass die Sondierungen die verschiedenen Gleichgewichte nicht stören. Bohrungen sind deshalb anschliessend, wenn möglich, auf ihrer vollen Länge zu versiegeln. Zur Ermittlung der orts- und formationsspezifischen Kennwerte sind möglichst repräsentative Proben zu wählen. Die Daten sind durch Langzeitversuche an bergfrischen Proben zu ermitteln, welche nach den einschlägigen Normen präpariert wurden. Vorgängig und nach den Experimenten sind die Proben mineralogisch zu analysieren.

Vor und während dem Bauvortrieb sind alle Veränderungen im Umfeld des Bauwerkes, wie Hebungen, Senkungen, Änderungen des Bergwasserspiegels oder des Gebirgsdrucks sorgfältig zu beobachten und zu interpretieren.

Eine regelmässige und enge Zusammenarbeit zwischen Geologen, Felsmechanikern und Tunnelbauern bzw. –betreibern in der Projektierungs-, Bau- und Betriebsphase hat eine optimale Koordination der Anstrengungen und eine bessere Korrelation der Befunde und Prognosen zur Folge.

4.7 Ausblick

Erhebliche Defizite im Prozessverständnis und somit in der Prognose der zu erwartenden Quellphänomene bestehen weiterhin im Bereich der tonführenden Anhydritgesteine. Ausschlaggebend sind hierfür insbesondere die Vielzahl der Parameter, welche den für das Bauwerk relevanten Vergipsungsprozess beeinflussen. Diese reichen von der Mineralogie und Petrographie über die präexistente Zerklüftung und Vergipsung des Gebirges bis hin zur Art des Vortriebes und der Störung des hydro- und lithostatischen Umfeldes durch das Bauwerk.

Um die Vielfalt der sich gegenseitig beeinflussenden Parameter besser in den Griff zu bekommen, sind einerseits verfeinerte Laborexperimente, andererseits aber auch eine systematische Auswertung aller in-situ Befunde aus den verschiedenen Tunnelbauwerken der letzten Jahre notwendig.

Bei den Laborexperimenten steht vor allem eine vertiefte mineralogische Begleitung der Langzeitversuche im Vordergrund. Die Proben sind entsprechend dem Auftreten der verschiedenen Lithologien in den fraglichen sulfatführenden Abschnitten auszuwählen, so dass später statistische Aussagen über den gesamten Fels gemacht werden können. Für eine statistische Auswertung ist aber darauf zu achten, dass nur Resultate von Laborversuchen einfließen, die unter denselben Versuchsbedingungen gewonnen worden sind. Die Textur und Mineralogie der Proben ist vor und nach dem Experiment sorgfältig zu analysieren, so dass auch hier detaillierte Aussagen möglich sind. Da lange Versuchszeiten notwendig sind, müssen genügend Apparate zur Verfügung stehen.

In den letzten Jahren wurden für verschiedene bestehende, im Bau befindliche oder geplante Tunnelbauwerke sehr viele Abklärungen betreffend der lithologischen Situation und ihrer Veränderung während des Baus und Betriebs der Anlage durchgeführt. Dazu gehören auch eine grosse Zahl von Langzeitmessungen zu Hebungsbewegungen und Druckentwicklungen. All diese zerstreuten Einzelberichte harren einer systematischen Sichtung und Bearbeitung. Eine Auswertung dieser Unterlagen gestattet eine systematische Analyse der Vielzahl der den Quellprozess beeinflussenden Parameter und ermöglicht eine Vertiefung der hier formulierten Hypothesen.

Besondere Aufmerksamkeit verdient aus den hier dargelegten Gründen das hydraulische Strömungsfeld im Umfeld von Tunnelbauwerken. Eine Auswertung der vorhandenen Unterlagen sowie spezielle in-situ Messungen können hier wertvolle Fakten liefern.

Die bisherigen Untersuchungen haben sich auf das Gebiet des Tafel- und Faltenjuras beschränkt. Es hat sich verschiedentlich gezeigt, dass die hier gewonnenen Erfahrungen nicht unbedingt auf alpine Sulfatgesteine übertragen werden kann. Warum das so ist, wäre sicher ein weiterer interessanter Ansatz für zukünftige Forschungsarbeiten.

Anhang I

Literaturverzeichnis

- Amstad, C. & Kovári, K. 2001: Untertagebau in quellfähigem Fels. ASTRA, Forschungsauftrag 52/94
- Anagnostou, G. 1992: Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quellfähigem Gestein. Institut für Geotechnik Band 201, 8/92.
- Beiche, H. 1991: Bemessung und Bau eines Tunnels in anhydrithaltigem Gebirge (B-14 Tunnel in Stuttgart). Geotechnik, Sonderheft.
- Beck, A., Golta, A. 1972: Tunnelsanierungen der Schweizerischen Bundesbahnen. Schweiz. Bauzeitung 36, Sonderdruck.
- Berner, D. 1991: Die Geologie des Freudensteintunnels. Ibw-Ingenieurbauwerke 7 (1991) 60 – 116.
- Bolt, G.H. 1956: Physico-Chemical Analysis of the Compressibility of Pure Clays. Géotechnique, VI, 86-93.
- Brux, G. 1998: Einflüsse des Bergwassers auf die Dauerhaftigkeit von Bauwerken. Schweizer Baublatt 18 (1998), 4-8.
- Dronkert, H. 1987: Diagenesis of Triassic evaporites in northern Switzerland. *Eclogae geologicae Helveticae* 80/2,397-414.
- Dronkert, H., Bläsi, H.-R., and Matter, A. 1990: Facies and origin of Triassic Evaporites from the NAGRA Boreholes, Northern Switzerland. *Geologische Berichte der Landeshydrologie und -geologie* 12.
- Dunham, K. C. 1948: A contribution to the petrology of the Permian evaporite deposits of Northeastern England. *Proceedings of the geological Society of Yorkshire* 27, 217-227.
- Eckhardt, H., Labhart, T., Arnold, A., Gerber, M., Rück, P., Baumer, A. 1997: Festgesteine für Bauzwecke. In: Kündig R. et al. (Hrsg.): die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweiz. Geotechnische Kommission Zürich.
- Einfalt, H.-C. 1975: Ergebnisse der Untersuchungen an den Calciumsulfatmineralien aus dem Gipskeuper, Forschungsbericht. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, Heft 184.
- Einfalt, H.-C., Fecker, E., Götz, H.-P. 1979: Das Dreiphasensystem Ton, Anhydrit, Gips und dessen zeitabhängiges Verhalten bei Zugabe von wässrigen Lösungen. 4. Internationaler Felsmechanik-Kongress, Montreux.
- Einstein, H.H. 1979: Tunneling in swelling rock, *Underground Space*, 4, 51-61.
- Einstein, H.H. 1993: Swelling Rock. *International Society for Rock Mechanics*, Vol. 1, Nr. 3, 57-60.
- Einstein, H.H. 1996: Tunneling in Difficult Ground – Swelling Behaviour and Identification of Swelling Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29, 113-124.
- Einstein, H.H., Bischoff, N. & Hofmann, E. 1972: Verhalten von Stollensohlen in quellendem Mergel. *Berichte des Symposiums für Untertagebau*, Luzern.
- Erichsen, C. & Kurz, G. 1995: Sanierung eines alten im quellenden Gipskeuper gelegenen Eisenbahntunnels. *Tunnelbau 1996*, Glückauf GmbH., Essen, 183-202.
- Fecker, E. 1995: Untersuchungen von Schwellvorgängen und Erprobung von Auskleidungskonzepten beim Freudensteintunnel. *Tunnelbau 1996*, Glückauf GmbH., Essen, 165-182.

- Fecker, E. & Wullschläger, D. 1991: Geotechnische Meßeinrichtungen in der Untersuchungsstrecke U1 des Freudensteintunnels, Meßergebnisse.- IBW, 7, 195 – 213.
- Fecker, F. 1981: Influence of swelling rock on tunnelling. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Nr. 24, 27-32, Aachen/Essen.
- Flückiger, A. 1994: Anhydritquellung, Proceedings of the International Meeting for Young Researchers in Applied Geology, Lausanne, Switzerland, 103-107.
- Golta, A. 1976: Schwellvorgänge im Planum schweizerischer Bahntunnels. Rock Mechanics, Supplementum 5, Vienna, 231-243.
- Golta, A. 1988: Rekonstruktion des Oberen Hauensteintunnels. Bericht der Schweizerischen Bundesbahnen SBB für das Wisenbergtunnel-Projekt.
- Grob, H. 1972: Schwelldruck im Belchentunnel. Internationales Symposium für Untertagbau, Luzern, 99- 119.
- Grob, H. 1975: Swelling and heave in Swiss tunnels. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, IAEG, Krefeld, 13,55-60.
- Hardie, L. A. 1967: The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure –American Mineralogist 52, 171-200.
- Hauber, L. & Stucky, K. 1997: Gips und Salz . In: Kündig R. et al. (Hrsg.): die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweiz. Geotechnische Kommission Zürich.
- Hauber, L., Noher, H.P., Meyer, M. & Horal, G. 2000: Geologie im Bereich Adlertunnel. tec 21, 49/50, 9-12.
- Henke, K.F., Krause, H., Müller, L., Kirchmayer, M., Einfalt, H.-C. & Lippmann, F. 1975: Sohlhebungen beim Tunnelbau im Gipskeuper. Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Verkehr, Stuttgart.
- Holliday, D. W. 1970: The petrology of secondary gypsum rocks: a review. Journal of Sedimentary Petrology 40, 734-244.
- Hofmann, F., Mumenthaler, Th., Witzig, E.. 1997: Tone, Sande und Gesteine für spezielle Anwendungen. In: Kündig R. et al. (Hrsg.): die mineralischen Rohstoffe der Schweiz. Schweiz. Geotechnische Kommission Zürich.
- Huder, J., Amberg, G. 1970: Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. Schweiz. Bauzeitung, Jahrgang 88, Heft 43, 975 – 980.
- International Society for Rock Mechanics, Commission on Swelling Rock and Working Group on Swelling Rock of the Commission on Testing Methods (Einstein, H.H., Co-ordinator) 1989: Suggested Methods for Laboratory Testing of Argillaceous Swelling Rocks", 1989, International Journal of Rock Mechanics, Mining Science and Geomechanics, Abstracts, 26,415-426.
- International Society for Rock Mechanics, Commission on Swelling Rock and Working Group on Swelling Rock of the Commission on Testing Methods 1994: Comments and Recommendations on Design and Analysis Procedures for Structures in Argillaceous Swelling Rock, 1994 October.
- International Society for Rock Mechanics, Commission on Swelling Rock (Madsen, F.T. Co-ordinator) 1993: Suggested Methods for Laboratory Testing of Rocks Containing Clay and Anhydrite..
- Jasmund, K. & Lagaly, G. 1993: Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt. Steinkopff Verlag.

- Jordan, P. 1994: Evaporite als Abscherhorizonte: Eine gefügekundlich-strukturgeologische Untersuchung am Beispiel der Nordwestschweizer Trias. Beiträge zur geologischen Karte der Schweiz (N.F.) 164.
- Jordan, P., Noack, Th & Widmer, Th., 1990: The evaporite shear zones of the Jura Boundary Thrust - new evidence from Wisen well (Northern Switzerland). *Eclogae geol. Helv.* 83, 525-542.
- Jordan, P. & Nüesch, R. 1989: Deformational behaviour of shale interlayers in evaporite detachment horizons (Jura Overthrust Switzerland). *Journal of Structural Geology*, 11, 859-871.
- Kälin, J.J. & Schmid, L.R. 1992: Quellerscheinungen im Tunnelbau. Vergleich Theorie und Praxis. *Tunnel* 4/92, 188-198.
- Kiehl, J. R. 1991: Ein dreidimensionales Quellgesetz und seine Anwendung auf den Felshohlraumbau. Proc. 9. Nat. Felsmechanik Symposium, Aachen
- Kirschke, D. 1992: Neue Versuchstechniken und Erkenntnisse zum Anhydritschwellen. Proc. German Rock Mechnic Symposium, Aachen.
- Kirschke, D. 1995: Neue Versuchstechniken und Erkenntnisse zum Anhydritschwellen. *Tunnelbau 1996*, Glückauf GmbH., Essen, 203-225.
- Kirschke, D., Kuhnenn, K. & Prommersberger, G. 1991: Der Freudensteintunnel – Eine Herausforderung für den planenden Ingenieur. *iwb Ingenieurbauwerke*, 7, 5-57.
- Knacke, G. & Gans, W. 1974: The thermodynamics of the system $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$. *Zeitschrift für physikalische Chemie [N.F.]* 104, 41-48.
- Kovári, K. 1998: Tunnelbau in druckhaftem Gebirge. *Tunnel*, 98, 5, 12-31.
- Kovári, K., Amstad, Ch. & Anagnostou, G. 1987: Tunnelbau in quellfähigen Gebirge. *Mitteilungen Schweizerischen Gesellschaft für Boden und Felsmechanik* Nr. 115, Frühjahrstagung in Biel.
- Kovári, K., Madsen, F.T. & Amstad, Ch. 1981: Tunnelling with Yielding Support in Swelling Rocks. Proc. Int. Symp. Weak Rock, Tokyo, 1019-1026.
- Krause, H. 1976: Sulphate rocks in Baden-Württemberg and their importance in relation to civil engineering. - *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 13, 45-49.
- Krause, H. 1977: Zur Geologie und Statistik des Tunnelbaus in Baden-Württemberg unter besonderer Berücksichtigung der Keupertunnel. *Jahreshefte geologisches Landesamt, Baden-Württemberg*, 19, 35-57.
- Lagaly, G. 1993: Praktische Verwendung und Einsatzmöglichkeiten von Tonen. In: K. Jasmund/G.Lagaly (Hrsg.): *Tonminerale und Tone*. Steinkopff Verlag Darmstadt.
- Madsen, F.T. 1976: Quelldruckmessung an Tongesteinen und Berechnung des Quelldruckes nach der DLVO-Theorie. Diss. ETH 5825. Mitteilung des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik. Nr. 108. ETH Zürich.
- Madsen, F.T. 1979: Determination of the Swelling Pressure of Claystones and Marlstones using Mineralogical Data. Proc. 4th Int. Conf. on Rock Mechanics, Montreux.
- Madsen, F.T. 1995: Das Ton-Elektrolytsystem und seine geotechnische Bedeutung. Habilitationsschrift ETH Zürich.
- Madsen, F.T. 1996: Tonmineralogische Grundlagen der Scherfestigkeit tonhaltiger Lockergesteine. Instabile Hänge und andere risikorelevante natürliche Prozesse, Monte Verità, Birkhäuser Verlag, 33-53.

- Madsen, F.T. 1999: Suggested methods for laboratory testing of swelling rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 26, 191 – 306.
- Madsen, F.T., Flückiger, A., Hauber, L., Jordan, P., and Voegtli, B. 1995: New investigations on swelling rocks in the Belchen tunnel, Switzerland, *Proceedings for the 8th International Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, Japan, 263-267.
- Madsen, F.T. & Müller-Vonmoos, M. 1985: Swelling Pressure Calculated from Mineralogical Properties of a Jurassic Opalinum Shale. *Clay & Clay Minerals* 6, 501-509.
- Madsen, F.T. & Müller-Vonmoos, M. 1988: Das Quellverhalten der Tone. *Tagung über Tonmineralogie und Bodenmechanik*, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETHZ, Mitteilung Nr. 133, 39-51.
- Madsen, F.T. & Müller-Vonmoos, M. 1989: The swelling behaviour of clays. *Applied Clay Sciences*, Volume 4, 143-156.
- Madsen, F.T. & Nüesch, R. 1990: Langzeitquellverhalten von Tongesteinen und tonigen Sulfatgesteinen: Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, ETHZ.
- Madsen, F.T. & Nüesch, R. 1991: The Swelling Behaviour of Clay- Sulphate Rocks. *7th International Congress on Rock Mechanics*, Aachen, Germany, 1, 285-288.
- Marshall, W.L. & Slusher, R. 1966: Thermodynamics of the Calcium sulfate dihydrate in aqueous Sodium chloride solution, 0-110°C. *Journal of physical Chemistry* 70, 4015.
- Matter, A., Peters, T.J., Bläsi, H.-R., Meyer, J., Ischi, H. & Meyer, C. 1988a: Sondierbohrung Weiach, Geologie. *Nagra technischer Bericht NTB 86-01*.
- Matter, A., Peters, T.J., Bläsi, H.-R., Schenker, F. & Weiss, H.- P. 1988b: Sondierbohrung Schafisheim, Geologie. *Nagra technischer Bericht NTB 86-03*.
- Meyer, M. 2001: Die Geologie des Adlertunnels. *Bulletin für angewandte Geologie* 6/2, 199 – 208.
- Mitchell, J.K. 1992: *Fundamentals of Soil Behaviour*. John Wiley & Sons, New York.
- Müller, W. H., Maef, H., Graf, H. R. 2002: Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland. *Nagra technischer Bericht NTB 99-08*.
- Nagel, D. 1986: Sohlhebungen in den Keupertunnels von Baden-Württemberg. In: *Tunnelbau* (Hrsg. L. Wichter). *Kontakt & Studium*, Bd. 184, Bauwesen. Expertverlag, Sindelfingen.
- Nüesch, R. 1991: Das mechanische Verhalten von Opalinuston. *Diss. ETH Zürich, Mitt. Geol. Inst. ETH und Uni Zürich, Neue Folge Nr. 293*.
- Nüesch, R., Ko, S.C. 2000: Influence of mineralogical composition to experimental swelling behaviour of shaly anhydrite rocks. *Applied Mineralogy*, eds. Rammelmaier et al., Balkema.
- Nüesch, R., Steiner, W., and Madsen, F.T. 1995: Long time swelling of anhydritic rocks: mineralogical and microstructural evaluation. *Proceedings for the 8th International Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, Japan, 133-138.
- Ogniben, L. 1957: Secondary gypsum in the Sulphur Series, Sicily, and the so-called integration. *Journal of sedimentary Petrology* 27,64-79.
- Paul, A. 1993: Sohlhebungen beim Tunnelbau im Gipskeuper. *Mechanismen – Auswirkungen - Bemessungsphilosophien*. Manuskript zum Lehrgang Felsmechanik und Ingenieurgeologie in Sargans am 13. und 14. 5. 1993.

- Paul, A. & Wichter, L. 1995: Das Langzeitverhalten von Tunnelbauwerken in quellendem Gebirge – Neuere Messergebnisse vom Stuttgarter Wagenburgtunnel. Tunnelbau 1996, Glückauf GmbH., Essen, 135-164.
- Peters, T.J., Matter, A., Bläsi, H.-R. & Gautschi, A. 1986: Sondierbohrung Böttstein, Geologie Nagra technischer Bericht NTB 85-01.
- Peters, T.J., Matter, A., Bläsi, H.-R., Isenschmid, Ch., Kleboth, P., Meyer, Ch. & Meyer, J. 1989a Sondierbohrung Leuggern, Geologie. Nagra technischer Bericht NTB 86-05.
- Peters, T.J., Matter, A., Isenschmid, Ch., Meyer, J. & Ziegler, H.J. 1989b Sondierbohrung Kaisten, Geologie. Nagra technischer Bericht NTB 86-04.
- Pierau, B. & Kiehl, J.R. 1995: Widerstands- und Ausweichprinzip: Vergleich zweier Entwurfsmethoden für Tunnelbauten in quellfähigem Gebirge. Tunnelbau 1996, Glückauf GmbH, Essen, 226-247.
- Prasad, N. 1979: Sedimentology of the Keuper from the Belchen tunnel – Eastern Swiss Jura. Dissertation Universität Basel.
- Pressel, W. & Kauffmann, J. 1860: Der Bau des Hauensteintunnels auf der Schweizerischen Centralbahn. Bahnmaier's Buchhandlung, Basel und Biel.
- Priesnitz, K. 1969: Das Karstrelief des südlichen Harzvorlandes im Lichte neuerer Arbeiten zum System $\text{CaSO}_4\text{-NaCl-H}_2\text{O}$. Fünfter Internationaler Kongress für Speläologie, Stuttgart.
- Ramsay, J. G. & Huber, M. I. 1983: The techniques of modern structural geology. Volume 1: Strain analysis. Academic Press, London, New York.
- Reimann, M. 1984: Die unterschiedliche Vergipsungsbereitschaft permischer und triadischer Sulfatvorkommen dargestellt an ausgewählten Beispielen mit neuen Hinweisen auf die Lagerstätten-Prospektion; Zeitschrift der deutschen geologischen Gesellschaft 135.
- Rick, B. 1990: Geotechnische und hydrochemische Folgen der Verwitterung sulfathaltiger Gesteine (Gipskeuper des Schweizer Jura). Mitteilungen des geologischen Institutes der ETH und Universität Zürich [N.F.] 289.
- Sahores, J. 1962: Contribution a l'etude des phenomenes mechaniques accompagnant l'hydratation de l'anhydrite. -Thèse Faculté des Sciences, Université Toulouse.
- Scheffer, F. & Schachtschabel, P. 1992: Lehrbuch der Bodenkunde, 13. Auflage, Enke, Stuttgart.
- Schillinger, G. 1970: Die Felsdrücke im Gipskeuper beim Bau des Belchentunnels. Strasse und Verkehr, 1970, 10, 579-584.
- Schmid, L. R. 1995: Tunnelbauten im Angriff aggressiver Bergwässer. Schweiz. Ingenieur und Architekt, Nr. 44
- Shearman, D. J. 1985: Syndepositional and late diagenetic alteration of primary gypsum to anhydrite. in: Schreiber, B. C. & Harner, H.L. (Ed.): 6th Symposium on Salt, Proceedings vol.I, 41-50, Salt Institute, Alexandria, Virginia.
- Sonnenfeld, P. 1984: Brines and Evaporites. Academic Press, Orlando, San Diego, New York.
- Spaun, G. 1979: Ueber die Ursachen von Sohlhebungen im Gipskeuper. Bericht der 2. Nationalen Tagung Ingenieur-Geologie, 143-151
- Steiner, W. 1993: Swelling Rock in Tunnels: Rock Characterization, Effect of Horizontal Stresses and Construction Procedures: International Journal of Rock Mechanics, Mining Science & Geomechanics, Abstracts, Vol. 30, No.4, pp 361 -380.

- Steiner, W., Rossi, P.P. & Devin, P. 1989: Flatjack measurements in the lining of the Hauenstein tunnel as a design base of the New Wisenberg tunnel. Proceedings of the International Congress on Tunnelling, Toronto.
- Vögtli, B. & Jordan, P. 1996: Quelldruckentwicklung in Ton- und Sulfatgesteinen. Schweizer Ingenieur und Architekt 18 (1996), 350 – 352.
- Von Moos, A. 1949: Quellerscheinungen an schweizerischen Molassemergeln. Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau und Erdbau an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich. Nr. 19
- Wichter, L. 1989: Quellen anhydrithaltiger Tongesteine. Bautechnik 66 / 1, 1- 6.
- Widmer, T. 1991: Stratigraphie und Sedimentologie der Evaporite des Muschelkalkes im Basler Tafeljura. Beiträge zur Geologie der Schweiz, geotechnische Serie 79.
- Wiedemann, K., Frank, Stroebel, W., Beisswenger, K., Joerges, Heeb & Brintzinger 1957: Der Wagenburgtunnel. Herausgeber Tiefbauamt der Stadt Stuttgart.
- Wiesmann, E. 1917: Der Bau des Hauensteintunnels. Denkschrift. Kümmerli & Frey, Bern und W.Ernst & Sohn, Berlin .
- Yilmaz, Isik 2001: Gypsum/anhydrite: some engineering problems. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 59, 227-230.

Anhang 2

Quellennachweis

- FORSCHUNGSPROJEKT QUELLVERHALTEN DER JURAGESTEINE:
Leitung Dr. L. Hauber, Projektmitarbeiter Dr. B. Vögtli und Dr. P. Jordan:
Teilprojekt „Quellverhalten von Ton- und Sulfatgesteinen im Bereich von Untertagebauwerken der Nordschweiz unter natürlichen naturnahen und experimentellen Bedingungen“,
Zwischenbericht vom Dezember 1992
- FORSCHUNGSPROJEKT QUELLVERHALTEN DER JURAGESTEINE:
Leitung Dr. L. Hauber, Projektmitarbeiter Dr. B. Vögtli und Dr. P. Jordan:
Teilprojekt „Quellverhalten von Ton- und Sulfatgesteinen im Bereich von Untertagebauwerken der Nordschweiz unter natürlichen naturnahen und experimentellen Bedingungen“,
2. Zwischenbericht vom Januar 1994
- FORSCHUNGSPROJEKT QUELLVERHALTEN DER JURAGESTEINE:
Leitung Dr. L. Hauber, Projektmitarbeiter Dr. B. Vögtli und Dr. P. Jordan:
Teilprojekt „Quellverhalten von Ton- und Sulfatgesteinen im Bereich von Untertagebauwerken der Nordschweiz unter natürlichen naturnahen und experimentellen Bedingungen“,

Der Prozess der natürlichen In situ-Vergipsung im offenen System: Ein neues Modell
Zwischenbericht vom Januar 1995
- FORSCHUNGSPROJEKT QUELLVERHALTEN DER JURAGESTEINE:
Leitung Dr. L. Hauber, Projektmitarbeiter Dr. B. Vögtli und Dr. P. Jordan:
Teilprojekt „Quellverhalten von Ton- und Sulfatgesteinen im Bereich von Untertagebauwerken der Nordschweiz unter natürlichen naturnahen und experimentellen Bedingungen“,
4. Zwischenbericht vom Januar 1996
- FORSCHUNGSPROJEKT QUELLVERHALTEN DER JURAGESTEINE:
Leitung Dr. L. Hauber, Projektmitarbeiter Dr. B. Vögtli und Dr. P. Jordan:
Teilprojekt „Quellverhalten von Ton- und Sulfatgesteinen im Bereich von Untertagebauwerken der Nordschweiz unter natürlichen naturnahen und experimentellen Bedingungen“,
5. Zwischenbericht vom Januar 1997
- LITERATURSTUDIE zum Thema SULFATQUELLUNG:
A. Flückiger, F.T. Madsen, R. Nüesch
Bericht April 1993
- VSS BELCHENTUNNEL: ANHYDRITQUELLUNG
A. Flückiger, F.T. Madsen, R. Nüesch
Jahresbericht 1993

- ANHYDRITQUELLUNG:
A. Flückiger, F.T. Madsen, R. Nüesch
 Jahresbericht 1994
- FORSCHUNGSPROJEKT QUELLVERHALTEN DER JURAGESTEINE:
S.C. Ko, R. Nüesch, and F.T. Madsen, Tonmineralogisches Labor, Institut für Geotechnik, ETH-Zurich. Interim Report 5/26/1997
- FORSCHUNGSPROJEKT QUELLVERHALTEN DER JURAGESTEINE:
R. Nüesch
 „Tonminerale und Sulfatgesteine als Ursache für druckhaftes Verhalten von Gesteinen“.
 Tonquellung. Zwischenbericht vom Januar 2000.