

Hydrogeologischer Ansatz zur Beurteilung des Quellrisikos anhydritführender Tonsteine im Tunnelbau

Hydrogeological approach to assess the swelling risk of clay-sulfate rocks in tunnel engineering

Christoph Butscher¹, Herbert H. Einstein², Peter Huggenberger³

¹ Dr. Christoph Butscher, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), christoph.butscher@kit.edu

² Prof. Dr. Herbert H. Einstein, Massachusetts Institute of Technology (MIT), einstein@mit.edu

³ Prof. Dr. Peter Huggenberger, Universität Basel, peter.huggenberger@unibas.ch

Zusammenfassung

Das Quellen von anhydritführenden Tonsteinen ist ein bekanntes Risiko im Tunnelbau und kann schwerwiegende Schäden während des Baus und Betriebs von Tunneln verursachen. Dem Quellrisiko wird überwiegend durch Ingenieurmaßnahmen begegnet. Wir schlagen in dieser Arbeit einen zusätzlichen, hydrogeologischen Ansatz vor, um das Problem des Gebirgsquellens besser zu verstehen. Der Ansatz basiert auf der Hypothese, dass das Quellen durch eine Änderung der Grundwasserzirkulation, hervorgerufen durch den Tunnelbau, ausgelöst wird. Wir gehen davon aus, dass es bestimmte hydrogeologische Situationen gibt, die das Gebirgsquellen begünstigen. Deshalb werden mit numerischen Grundwassermodellen Szenarien simuliert, die verschiedene hydrogeologische Bedingungen mit dem Gebirgsquellen in Beziehung bringen. Zunächst werden idealisierte Situationen untersucht, dann wird die Methodik auf ein Fallbeispiel aus dem Schweizer Jura angewendet. Die Ergebnisse zeigen in bestimmten Situationen einen „hydraulischen Kurzschluss“ zwischen grundwasserführenden und anhydritführenden Schichten. Dadurch kommen die anhydritführenden Tonsteine in Kontakt mit Grundwasser und die Umwandlung von Anhydrit in Gips und das Gebirgsquellen werden ausgelöst.

Schlüsselworte: Gebirgsquellen, anhydritführende Tonsteine, Grundwasserfluss, Tunnelbau

Abstract

Water inflow into anhydrite-containing layers of clay-sulfate rocks can trigger the transformation of the sulfate mineral anhydrite into gypsum. This transformation is accompanied by an increase in rock volume and results in the swelling of such rocks. The swelling of clay-sulfate rocks is a major problem in tunneling, causing serious damage to tunnels. The threat of swelling is mostly counteracted by engineered countermeasures. However, there is no consensus among experts as to which countermeasure is optimal. We suggest an additional, hydrogeological approach to better understand the swelling problem. The approach is based on the assumption that changes in groundwater flow systems, which are caused by tunnel excavation, contribute to the swelling phenomena. Specifically, we propose that there are specific hydrogeological situations that favor rock swelling. We present scenario simulations performed with numerical groundwater models that allow us to relate different hydrogeological conditions to rock swelling. We analyze the influence of boundary conditions, the excavation-damaged zone, the sealing properties of the tunnel lining and the geological configuration. The analysis is first performed for synthetic situations and then applied to a case study from the Jura Mountains in Switzerland. Our findings suggest that in certain situations after tunnel excavation, depending on geological and hydraulic conditions, the excavation-damaged zone around the tunnel may provide a “hydraulic short circuit” between aquifers and anhydrite-containing layers. As a result, water gets in contact with anhydrite and triggers the transformation of the anhydrite into gypsum and, thus, rock swelling.

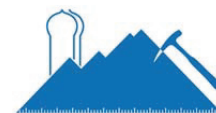
Keywords: Rock swelling, clay-sulfate rocks, groundwater flow, tunnel engineering

1 Einleitung

Beim Tunnelbau in anhydritführenden Tonsteinen führt das Quellverhalten dieser Gesteine häufig zu großen bautechnischen Problemen (EINSTEIN 1996). Das Quellen äußert sich in einer Hebung der Tunnelsohle, einer Beschädigung des Ausbaus oder sogar einer Anhebung der gesamten Tunnelröhre und der Erdoberfläche darüber. Sanierungsarbeiten in beschädigten Tunneln führen zu einer Unterbrechung wichtiger Verkehrswege und verursachen extrem hohe Zusatzkosten. Vom Quellen anhydritführender Tonsteine sind

besonders Tunnel betroffen, die den Gipskeuper queren. Beispiele finden sich im Schweizer und Französischen Jura, sowie in Süddeutschland in der Region Stuttgart (STEINER 1993).

Dem Gesteinsquellen wird zumeist durch Ingenieurmaßnahmen begegnet. Verschiedene Ausbaumethoden zielen entweder darauf ab, der Quelldeformation durch einen mechanischen Widerstand (z. B. verstärkter Ausbau usw.) entgegenzuwirken, oder aber Quelldrücke zu verhindern, indem Deformation zugelassen wird (Widerstands- und Aus-



weichprinzip; PIERAU & KIEHL 1996). KOVÁRI & CHIAVERIO (2007) kombinierten beide Prinzipien und zeigten, wie Quelldrücke kontrolliert werden können, indem man eine begrenzte Deformation in einer „Knautschzone“ unter dem Tunnel zulässt. Die Planung des Tunnelausbaus erfordert die Kenntnis der Beziehung zwischen der Quellhebung und dem Quelldruck. In reinen Tonsteinen zum Beispiel gibt es eine lineare Beziehung zwischen der Quellhebung und dem Logarithmus des Drucks (MADSEN & VONMOOS 1989). Für Tonsteine, die Anhydrit enthalten, fehlt jedoch eine allgemein gültige und mit Experimenten verifizierte Theorie. Deshalb sind genaue Vorhersagen über entstehende Quelldrücke und Deformationen unmöglich, und es ist bei einem konkreten Bauvorhaben schwierig, die am besten geeignete Ausbaumethode zu wählen.

Beim Quellen anhydritführender Tonsteine wirken verschiedene Mechanismen zusammen. Darunter finden sich die osmotische Wasseraufnahme und Hydratation von Tonmineralen und die Umwandlung von Anhydrit in Gips. In Hinblick auf die Quellmechanismen gibt es noch viele offene Fragen. Allen Mechanismen ist jedoch gemein, dass der Zutritt von Wasser eine wichtige Rolle spielt. Anhydritführende Tonsteine entwickeln deutlich höhere Quelldrücke als reine Tonsteine (MADSEN & NÜESCH 1991). Dies deutet darauf hin, dass die Umwandlung von Anhydrit in Gips als Quellmechanismus eine besondere Rolle spielt. Die Umwandlung wird verursacht durch Wasseraufnahme des (wasserfreien) Sulfats Anhydrit in das (wasserführende) Sulfat Gips ($\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Diese Reaktion ist in einem offenen System (d. h. freier Wasserzutritt von außen) verbunden mit einer Volumenzunahme des umgewandelten Sulfats von ungefähr 60 %. In Abb. 1 wird eine Volumenbilanz für die Umwandlung von Anhydrit in Gips in Ton-Sulfat-Gesteinen gezeigt (offenes System, konstantes Volumen des Porenwassers). Wenn also Wasserzutritt zu anhydritführenden Tonsteinen eine Voraussetzung für das Gesteinsquellen ist, dann ist es wahrscheinlich, dass die Grundwasserzirkulation ein wichtiger kontrollierender Faktor für den Quellprozess ist.

Trotz der großen Bedeutung der Grundwasserzirkulation für den Quellprozess wurden hydrogeologische Gegebenheiten bei der Untersuchung der Phänomene und Prozesse bisher wenig beachtet. ANAGNOSTOU (1995) untersuchte den Einfluss der Sickerströmung auf das Gebirgsquellen, und ALONSO & OLIVELLA (2008) den Einfluss der Evaporation an den Tunnelwänden. BUTSCHER et al. (2011a) analysierten die Auswirkungen des Tunnelbaus auf regionale Fließsysteme in Abhängigkeit des geologisch-hydrogeologischen Gebirgsaufbaus. Ihre Ergebnisse deuten auf verschiedene Effekte hin, die eine Anhydritlösung und Gipsfällung begünstigen könnten, darunter erhöhte Fließraten, eine Änderung des Herkunftsgebiets des Grundwassers, Wasserzutritt aus Störzonen und eine Änderung des hydro-geochemischen Gleichgewichts.

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Annahme, dass eine Änderung der Grundwasserzirkulation, verursacht durch den Tunnelbau, das Quellen beeinflussen kann. Weil es aber nicht jedes Mal, wenn ein Tunnel den Gipskeuper quert, zum Quellen kommt, nehmen wir außerdem an, dass Ände-

rungen der Grundwasserzirkulation nur unter bestimmten Bedingungen zum Gebirgsquellen führen. Deshalb verwenden wir lokale numerische Grundwassermodelle, um den Einfluss verschiedener hydrogeologischer Bedingungen auf das Quellpotenzial anhydritführender Tonsteine systematisch zu analysieren. Die Auswirkungen des Tunnelbaus auf die Grundwasserzirkulation werden zunächst für synthetische, konzeptionelle Situationen untersucht. Verschiedene geologisch-hydrogeologische Situationen und Eigenschaften des Tunnels, die den Zutritt von Grundwasser zu anhydritführenden Schichten beeinflussen können, werden dabei in Szenarien berücksichtigt. Dadurch kann der Einfluss verschiedener Faktoren auf das Quellpotenzial anhydritführender Tonsteine separat betrachtet werden.

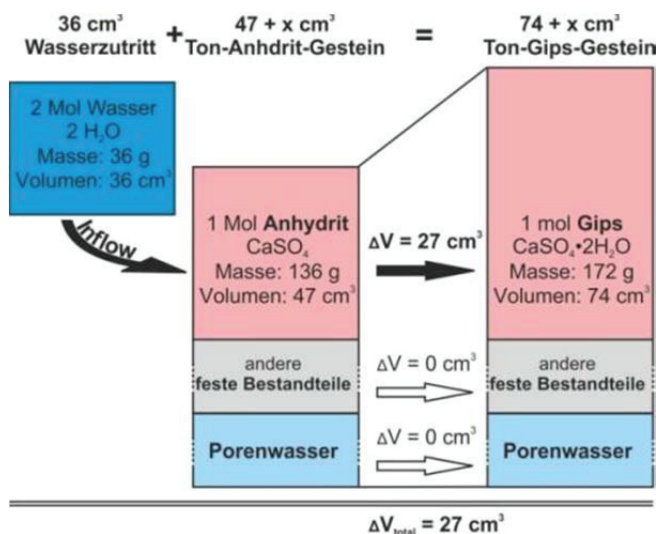


Abb. 1: Massen- und Volumenbilanz für die Umwandlung von Anhydrit in Gips bei Wasserzutritt (nach BUTSCHER et al. 2011b).

Fig. 1: Mass/volume balance of the transformation of anhydrite into gypsum caused by water inflow (after BUTSCHER et al. 2011b).

In einem nächsten Schritt wird die Methodik auf ein Fallbeispiel aus dem Schweizer Jura (Chienbergtunnel) angewendet. Die Fallstudie des Chienbergtunnels ist für ein Prozessverständnis besonders geeignet, weil das Quellen nur in zwei eng umgrenzten Abschnitten auftritt. Andere Abschnitte im Gipskeuper zeigen dort bis heute keine Quellerscheinungen. Es wird gezeigt, wie durch einen Vergleich der Grundwasserzirkulation in Tunnelabschnitten mit und ohne Gebirgsquellen das Auftreten der Quellerscheinungen erklärt werden kann.

2 Konzeptionelle Untersuchungen

2.1 Grundlagen und Modelle

Die Untersuchungen beruhen auf der Annahme, dass Grundwasserfließraten in den anhydritführenden Schichten des Gipskeupers vor dem Tunnelbau zu gering für die Umwandlung von Anhydrit in Gips sind. Durch den Tunnelbau werden jedoch veränderte hydraulische Bedingungen geschaffen, die die Fließraten stark erhöhen, sodass die Umwandlung von Anhydrit in Gips und somit das Gebirgsquellen ausgelöst wird. Uns interessiert besonders, wie sich verschiedene Faktoren auf die Erhöhung der Fließraten in

anhydritführenden Schichten nach dem Tunnelbau auswirken. Dadurch wollen wir verstehen, welche Bedingungen für ein potenzielles Quellen besonders kritisch sind.

Zunächst wurde ein Referenzmodell entwickelt (Abb. 2), welches Bedingungen widerspiegelt, die beim Tunnelbau im Gipskeuper häufig angetroffen werden (z. B. BERDUGO et al. 2009). Mit diesem numerischen Grundwassermodell werden Fließraten am Anhydritspiegel unterhalb des Tunnelquerschnitts vor und nach dem Tunnelbau berechnet. Anschließend werden Szenarien definiert, und wiederum die Fließraten am Anhydritspiegel berechnet. Damit soll abgeschätzt werden, wie sich verschiedene Faktoren (Grundwasserfließrichtung, Tunnelverkleidung, Auflockerungszone, Lage Gips-/Anhydritspiegel) auf Fließraten am Anhydritspiegel und somit auf das Quellrisiko auswirken. Das Referenzmodell sieht beispielsweise vor, dass das hydraulische Potenzial mit der Tiefe abnimmt („abströmendes Grundwasser“). Diese Bedingungen sind typisch in topographischen Hochlagen. Im Szenarium „Aufströmendes Grundwasser“ nimmt das Potenzial (vor dem Tunnelbau) mit der Tiefe zu. Diese Bedingungen finden sich in Tallagen (z. B. HUBBERT 1940). Die Durchlässigkeit der Tunnelverkleidung wurde für das Referenzmodell mit Tunnel abgeschätzt, indem für die Tunnelverkleidung eine Mächtigkeit von 1 m und eine hydraulische Leitfähigkeit des Betons von

$2,3E-9$ m/s angenommen wurden. Das Szenarium „Tunnelverkleidung dichter“ sieht eine 10-mal geringere hydraulische Leitfähigkeit der Tunnelverkleidung vor. Weitere Eigenschaften des Referenzmodells und der Szenarien sind in Tab. 1 kurz zusammengefasst.

Neben den Fließraten am Anhydritspiegel wurde außerdem ein Quellpotenzial abgeschätzt. Das Quellpotenzial wird als maximal zu erwartende Hebungsrate der Tunnelsohle ausgedrückt. Dazu wurden folgende Berechnungen und Annahmen gemacht: Aus der Fließrate am Anhydritspiegel wurde berechnet, wie viel Volumenzunahme durch die Umwandlung von Anhydrit in Gips maximal erreicht werden kann (36 cm^3 Wasser reagieren mit 47 cm^3 Anhydrit zu 74 cm^3 Gips; siehe Abb.1).

Wir nehmen an, dass das Volumen des Porenraums konstant bleibt, dass die Volumenzunahme des Gesteins nur durch Dehnung in vertikaler Richtung stattfindet, und dass die Zone mit Gesteinsquellen auf einen Bereich von 10 m unterhalb des Tunnelquerschnitts begrenzt ist. In unserem Beispiel würde also ein Wasserzufluss von 36 m^3 zu einer Volumenzunahme von 27 m^3 und somit zu einer Sohlhebung von 2,7 m führen. Dies ist ein theoretischer Maximalwert der Sohlhebung, der annimmt, dass alles zufließende Wasser durch die Reaktion $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ „verbraucht“ wird.

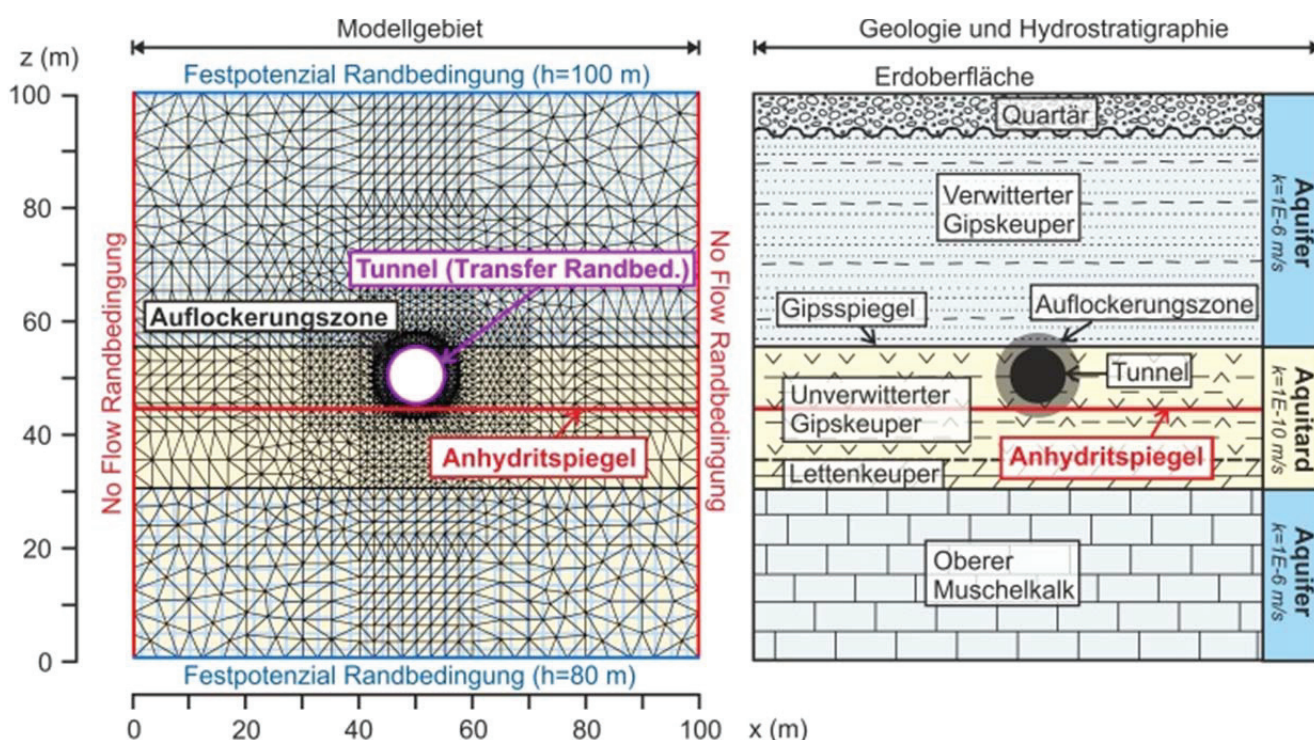


Abb. 2: Aufbau des Referenzmodells und der zugrunde liegenden geologisch-hydrogeologischen Situation (nach BUTSCHER et al. 2011b).
 Fig. 2: Setup of reference model and corresponding geological-hydrogeological setting (after BUTSCHER et al. 2011b).



Tab. 1: Kurze Beschreibung des Referenzmodells (mit und ohne Tunnel; siehe auch Abb. 2) und der Szenarien.

Tab. 1: Short description of the reference model (with and without tunnel; see also Fig. 2) and of scenarios.

Modell/Szenario	Beschreibung
Referenzmodell ohne Tunnel	Horizontale Schichtlagerung; Abfolge (von oben): Aquifer (Quartär, verwitterter Gipskeuper; $k = 1E-6$ m/s; Mächtigkeit = 45 m), Aquitard (unverwitterter Gipskeuper, Lettenkeuper; $k = 1E-10$ m/s; Mächtigkeit = 25 m), Aquifer (Oberer Muschelkalk; $k = 1E-6$ m/s; Mächtigkeit = 30 m); Grundwasserfließrichtung von oben (hydraul. Potenzial = 100 m) nach unten (hydraul. Potenzial=80 m).
Referenzmodell mit Tunnel	Wie Referenzmodell ohne Tunnel, jedoch: Tunnel (Radius = 10 m; Tunnelverkleidung mit $k = 2,3E-9$ m/s und Mächtigkeit = 1 m) im obersten Teil des Aquitards; Auflockerungszone um Tunnel (Mächtigkeit = 2,5 m; $k = 1E-4$ m/s) schneidet Gips- und Anhydritspiegel.
Aufströmendes Grundwasser	Wie Referenzmodell mit Tunnel, jedoch: Grundwasserfließrichtung von unten (hydraul. Potenzial = 100 m) nach oben (hydraul. Potenzial = 80 m).
Tunnelverkleidung dichter	Wie Referenzmodell mit Tunnel, jedoch: Tunnelverkleidung mit $k = 2,3E-10$ m/s.
Auflockerungszone weniger durchlässig	Wie Referenzmodell mit Tunnel, jedoch: Auflockerungszone $k = 1E-8$ m/s.
Anhydritspiegel unter Auflockerungszone	Wie Referenzmodell mit Tunnel, jedoch: Anhydritspiegel 4 m tiefer (2,5 m unterhalb Auflockerungszone)
Gipsspiegel über Auflockerungszone	Wie Referenzmodell mit Tunnel, jedoch: Gipsspiegel 5 m höher (2,5 m oberhalb Auflockerungszone)

2.2 Ergebnisse der konzeptionellen Untersuchungen

Abb. 3 zeigt die berechneten Fließraten am Anhydritspiegel unter dem Tunnelquerschnitt für das Referenzmodell vor und nach dem Tunnelbau sowie für die verschiedenen Szenarien. Das Quellpotenzial ist als maximal mögliche Rate der Sohlhebung dargestellt. Im Referenzmodell ohne Tunnel sind die Fließraten am Anhydritspiegel aufgrund der geringen hydraulischen Leitfähigkeit des unverwitterten Gipskeupers sehr klein. Nach dem Tunnelbau (Referenzmodell mit Tunnel) entsteht durch den Tunnel und die ihn umgebende Auflockerungszone eine Verbindung zwischen dem Aquifer (verwitterter Gipskeuper) oberhalb des Tunnels und dem Anhydritspiegel in der Auflockerungszone unter der Tunnelsohle („hydraulischer Kurzschluss“). Dadurch kommt es zu einer starken Erhöhung der Fließraten am Anhydritspiegel und zu einem großen Quellpotenzial, das einer maximalen Hebungsrates von ca. 39 cm/Jahr entspricht.

Das Szenarium mit aufströmenden Grundwasserverhältnissen zeigt gegenüber dem Referenzmodell mit Tunnel eine Erniedrigung der Fließraten am Anhydritspiegel und somit ein etwas geringeres Quellpotenzial (Hebungsrates ca. 25 cm/Jahr). Insgesamt ist der Unterschied gegenüber dem Fall mit abwärts strömendem Fließen jedoch geringer als die Unterschiede, die zwischen dem Referenzmodell und den weiteren Szenarien festgestellt werden. Wird die Tunnelverkleidung dichter als im Referenzmodell angenommen (hydraulische Leitfähigkeit der Tunnelverkleidung 10-mal kleiner) sind die Fließraten am Anhydritspiegel deutlich reduziert und das Quellpotenzial (ca. 4 cm/Jahr) ist wesentlich geringer. Dies kann dadurch erklärt werden, dass durch eine dichtere Tunnelverkleidung das hydraulische Potenzial in der Umgebung des Tunnels weniger abgesenkt wird und der Grundwasserzfluss zum Tunnel gehemmt wird (verringerte Drainagewirkung des Tunnels). Eine ähnlich starke Reduktion der Fließraten am Anhydritspiegel ergibt sich für das Szenarium, in dem für die Auflockerungszone um den Tun-

nel eine geringere (aber gegenüber dem unveränderten Gipskeuper immer noch erhöhte) hydraulische Leitfähigkeit angenommen wird. Das Quellpotenzial (ca. 3 cm/Jahr) ist geringer als im Referenzmodell, weil Wasserwegsamkeiten vom Aquifer über dem Tunnel zum Anhydritspiegel unter dem Tunnel über die Auflockerungszone weniger gut ausgebildet sind. Die Lage des Tunnels relativ zum Anhydrit- und Gipsspiegel wirkt sich stark auf die Fließraten am Anhydritspiegel und das Quellpotenzial aus. Liegt der Anhydritspiegel unterhalb der Auflockerungszone um den Tunnel (Quellpotenzial ca. 0,3 cm/Jahr) oder der Gipsspiegel oberhalb der Auflockerungszone um den Tunnel (Quellpotenzial ca. 2 cm/ Jahr) kommt es nicht zu einer hydraulischen Verbindung zwischen dem Aquifer (verwitterter Gipskeuper) oberhalb des Tunnels und dem Anhydritspiegel unter der Tunnelsohle. Wasserwegsamkeiten zum Anhydritspiegel werden durch den geringleitenden unverwitterten Gipskeuper behindert (kein „hydraulischer Kurzschluss“).

3 Fallbeispiel Chienbergtunnel

3.1 Grundlagen und Modelle Chienbergtunnel

Der in Kapitel 2 vorgestellte Ansatz wird nun auf den Chienbergtunnel angewendet. Der Chienbergtunnel liegt im Schweizer Tafeljura und dient als Umfahrung des Orts Sissach. Der geologische Aufbau des Gebiets ist aus Abb. 4 und 5 ersichtlich. Im Chienbergtunnel traten während des Baus in zwei begrenzten Abschnitten im Gipskeuper Quellerscheinungen auf, die bis heute anhalten. In anderen Abschnitten, die ebenfalls im Gipskeuper liegen, werden keine Quellerscheinungen beobachtet. Es wurden numerische Grundwassermodelle entwickelt, welche das hydraulische Potenzial und Fließpfade zum Anhydritspiegel in der Umgebung der Tunnelröhre in einem Schnitt senkrecht zur Tunnelachse simulieren. Dabei werden jeweils ein Abschnitt mit (Profil A; Abb. 4) und ohne Quellen (Profil B; Abb. 5) miteinander verglichen. Dadurch soll eine Erklärung gefunden werden, warum es in einem Abschnitt zum Gebirgsquellen kam, im anderen jedoch nicht.

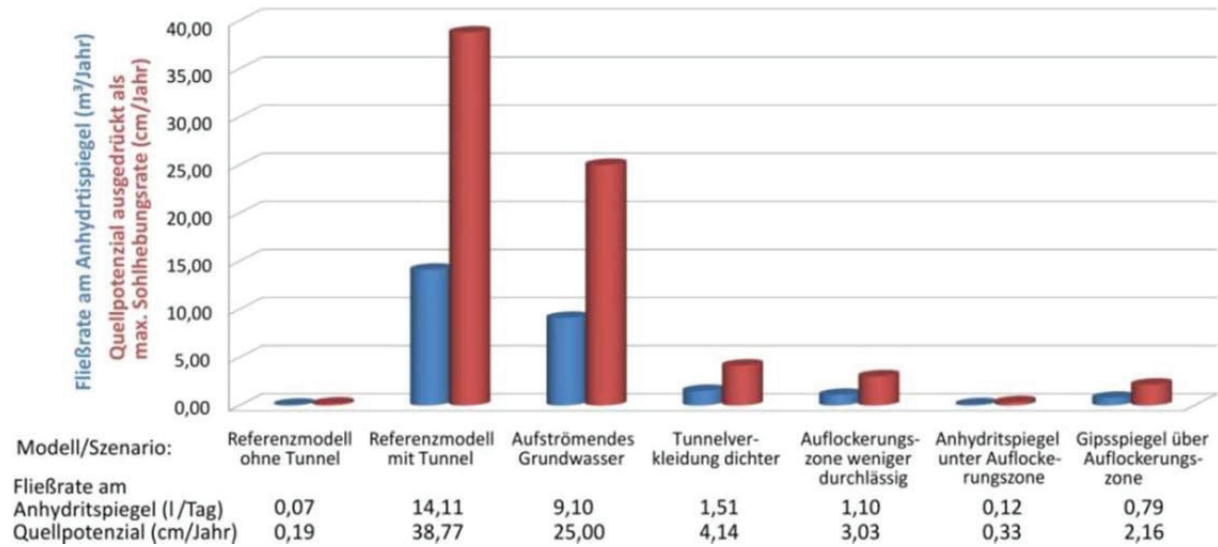


Abb. 3: Berechnete Fließraten (blau) am Anhydritspiegel unterhalb des Tunnelquerschnitts für die verschiedenen Modelle und Szenarien; und das sich aus den Fließraten ergebende Quellpotenzial (rot), ausgedrückt als maximale Rate der Sohlhebung.

Fig. 3: Flow rates (blue) at anhydrite level under the tunnel perimeter calculated for different models and scenarios; and swelling potential (red), expressed as maximum floor heave rate.

3.2 Ergebnisse Chienbergtunnel

Abb. 4 (Profil A) zeigt den Abschnitt mit Quellen. Der Tunnel schneidet im Bereich der Krone den verwitterten Gipskeuper an, der Anhydritspiegel liegt etwas oberhalb der Tunnelsohle im unverwitterten Gipskeuper.

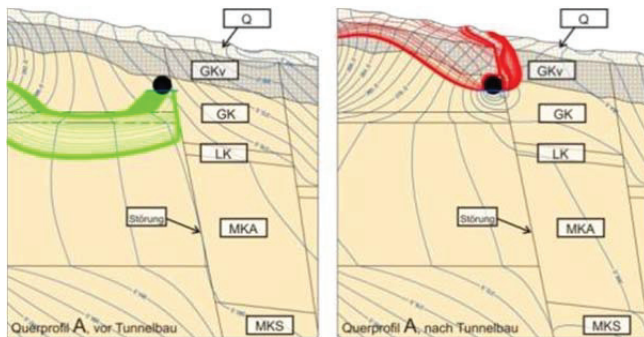


Abb. 4: Modelliertes hydraulisches Potenzial und Fließwege zum Anhydritspiegel für das Profil A (Hebungszone) vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts) (nach BUTSCHER et al. 2011c). Q: Quartär; GK(v): BMv: Bunte Mergel verwittert; Gipskeuper (verwittert); LK: Lettenkeuper; MKA: Muschelkalkaquifer; MKS: Muschelkalkstauer.

Fig. 4: Modeled hydraulic head and flow paths towards anhydrite level for cross-section A (swelling zone) before (left) and after tunnel excavation (right) (after BUTSCHER et al. 2011c). For notation of geological units see German caption.

Vor dem Tunnelbau strömt das Grundwasser dem Anhydritspiegel von unten durch den unverwitterten Gipskeuper zu (Abb. 4 links). Aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des unverwitterten Gipskeupers sind die Fließraten gering. Nach dem Tunnelbau verbinden der Tunnel und die ihn umgebende Auflockerungszone den grundwasserführenden verwitterten Gipskeuper oberhalb des Tunnels mit dem Anhydritspiegel im Bereich der Tunnelsohle („hydraulischer Kurzschluss“; Abb. 4 rechts). Die Absenkung des

hydraulischen Potenzials in der Tunnelumgebung und die Bereitstellung von Wegsamkeiten für das Grundwasser in der Auflockerungszone führen dazu, dass Grundwasser aus dem verwitterten Gipskeuper von oben um die Tunnelröhre herum mit hohen Fließraten zu anhydritführenden Schichten fließen kann, wodurch es zur Umwandlung von Anhydrit in Gips und somit zum Gebirgsquellen kommen kann.

Abb. 5 (Profil B) zeigt den Abschnitt ohne Quellen. Auch hier schneidet der Tunnel im Bereich der Krone den verwitterten Gipskeuper an, der Anhydritspiegel liegt jedoch etwas unterhalb der Tunnelsohle.

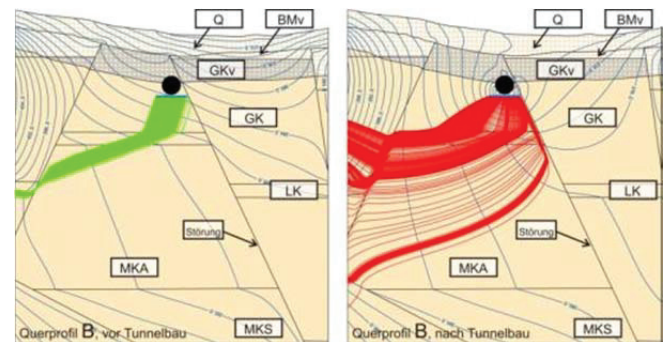


Abb. 5: Modelliertes hydraulisches Potenzial und Fließwege zum Anhydritspiegel für das Profil B (ohne Quellen) vor (links) und nach dem Tunnelbau (rechts) (nach BUTSCHER et al. 2011c). Notation der geologischen Einheiten: siehe Abb. 4.

Fig. 5: Modeled hydraulic head and flow paths towards anhydrite level for cross-section B (no swelling) before (left) and after tunnel excavation (right) (after BUTSCHER et al. 2011c). For notation of geological units see German caption of Fig. 4.

Das Grundwassermodell zeigt, dass sowohl vor als auch nach dem Tunnelbau der Anhydritspiegel von unten durch den geringdurchlässigen unverwitterten Gipskeuper angeströmt wird. Die Fließraten am Anhydritspiegel sind somit



auch nach dem Bau des Tunnels sehr gering, und der Wasserzutritt zu anhydritführenden Schichten ist vernachlässigbar. Die Umwandlung von Anhydrit in Gips und das Gebirgsquellen finden deshalb nicht statt. Die mit den Modellen nach dem Tunnelbau berechneten Fließraten am Anhydritspiegel unter dem Tunnelquer-schnitt und die dazugehörenden, wie in Kapitel 2 berechneten Quellpotenziale sind in Abb. 6 dargestellt.

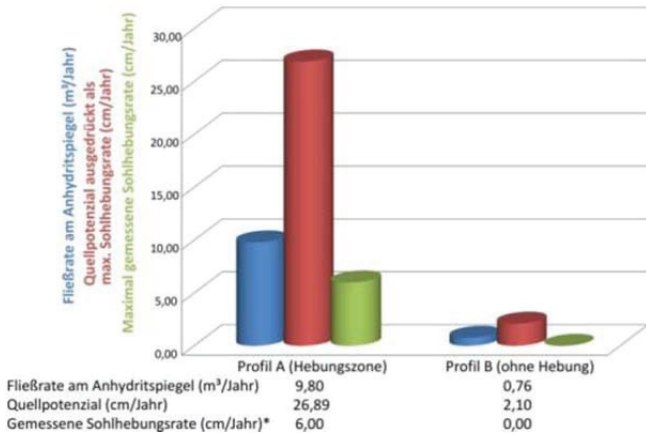


Abb. 6: Vergleich der Profile A (Hebungszone) und B (ohne Hebung) nach dem Tunnelbau bezüglich der Fließraten am Anhydritspiegel, des Quellpotenzials und der beobachteten Hebungsraten (*AEGERTER UND BOSSHARDT AG & GRUNER AG 2001, zitiert aus ANAGOSTOU 2005).

Fig. 6: Comparison of cross-sections A (swelling zone) and B (no swelling) after tunneling with respect to flow rates at anhydrite level, swelling potential and observed heave rates (*AEGERTER UND BOSSHARDT AG & GRUNER AG 2001, cited from ANAGOSTOU 2005).

Es zeigt sich, dass die Fließraten und das Quellpotenzial nach dem Tunnelbau in der Zone mit Quellerscheinungen (Profil A) deutlich höher sind als in der Zone ohne Quellerscheinungen (Profil B). Zum Vergleich mit dem hier angegebenen Quellpotenzial ist außerdem die tatsächliche maximal beobachtete Hebungsrate des Abschnitts mit Quellen (ca. 6 cm/Jahr; AEGERTER UND BOSSHARDT AG & GRUNER AG 2001, zitiert aus ANAGOSTOU 2005) dargestellt. Die tatsächlichen Hebungsraten betragen nur ca. ein Viertel des Quellpotenzials (ca. 27 cm/Jahr). Dieser Unterschied ist auf die vereinfachten Annahmen bei der Berechnung des Quellpotenzials zurückzuführen. Das so berechnete Quellpotenzial ist aber gut geeignet, das relative Risiko des Auftretens von Quellerscheinungen zu charakterisieren.

4 Grenzen des Ansatzes

Der hydrogeologische Ansatz macht vereinfachende Annahmen. So wurde hier nur eine Schnittlage senkrecht zur Tunnelachse betrachtet. Eine Grundwassermodellierung in einer Schnittlage parallel zur Tunnelachse würde das Verständnis weiter verbessern und wurde von BUTSCHER et al. (2011c) vorgestellt. Diese Schnittlage ist jedoch problematisch, weil die Tunnelröhre das Modellgebiet in zwei Bereiche (über und unter dem Tunnel) aufteilt, die im Modell hydraulisch voneinander getrennt sind. Zur gesamten Beurteilung der Grundwasserzirkulation und deren Auswirkungen sind dreidimensionale Modelle am besten geeignet. Die

hier vorgestellte 2D Betrachtung zeigt aber schon, was wesentlich zu den kritischen Phänomenen beiträgt.

Unberücksichtigt blieb außerdem, dass die Lösung von Anhydrit und Ausfällung von Gips auch von der Mineralisierung des Grundwassers abhängt. Wir nehmen hier an, dass zuströmendes Grundwasser bezüglich des Anhydrits untersättigt ist und deshalb den Anhydrit löst. Dabei wird es zunehmend an Sulfat aufgesättigt, bis es zur Ausfällung von Gips kommt (Anhydrit ist unterhalb ca. 40 °C löslicher als Gips; z. B. MARSAL 1952). Der Ansatz setzt voraus, dass das zuströmende Grundwasser so lange mit dem Anhydrit in Kontakt bleibt, bis es bezüglich des Gipses übersättigt ist.

5 Schlussbemerkungen

In diesem Artikel wurde ein hydrogeologischer Ansatz vorgestellt, mit dem das Quellpotenzial anhydritführender Tonsteine im Tunnelbau mit Hilfe von numerischen Grundwassermodellen abgeschätzt werden kann. Voraussetzung ist eine Kenntnis des geologischen Aufbaus des Untergrunds nicht nur im Bereich des Tunnels, sondern auch seitlich und unterhalb der Tunnelachse. Außerdem müssen die Lage des Gips- und Anhydritspiegels, die hydraulischen Eigenschaften des Untergrunds und die hydraulische Randbedingungen bekannt sein. Dies erfordert in der Planungs- und Erkundungsphase zwar einen erhöhten Aufwand (z. B. Pumpversuche, Porenwasserdruckmessungen). Dieser Aufwand steht jedoch in keinem Verhältnis zu den enormen Kosten, die bei der Sanierung von Tunneln im Gipskeuper teilweise schon unmittelbar nach dem Bau erforderlich sind.

Literatur

AEGERTER UND BOSSHARDT AG & GRUNER AG (2001): Hebungen Tm 850 bis 930 - Grundlagen und mögliche Massnahmen. – Bericht vom 15.08.2001.

ALONSO, E.E. & OLIVELLA, S. (2008): Modelling tunnel performance in expansive gypsum claystones. – Konferenz IACMAG, Goa 1.-6. Oktober 2008, 891-910.

ANAGOSTOU, G. (1995): Seepage flow around tunnels in swelling rock. Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., 19: 705-724.

ANAGOSTOU, G. (2005): Hebungen Chienbergtunnel. – Bericht ETH Zürich vom 14.11.2005.

BERDUGO, I.R., ALONSO, E.E., ROMERO, E. & GENS, A. (2009): Tunnelling and swelling in Triassic sulphate-bearing rocks. Part I – Case studies from Baden-Württemberg. – Revista Epsilon, 12: 1-17.

BUTSCHER, C., HUGGENBERGER, P. & ZECHNER, E. (2011A): Impact of tunneling on regional groundwater flow and implications for swelling of clay-sulfate rocks. – Engineering Geology, 117: 198-206.

BUTSCHER, C., EINSTEIN, H.H. & HUGGENBERGER, P. (2011B): Effects of tunneling on groundwater flow and swelling of clay-sulfate rocks. – Water Resour. Res., 47: W11520.

BUTSCHER, C., HUGGENBERGER, P., ZECHNER, E. & EINSTEIN, H.H. (2011C): Relation between hydrogeological setting and swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling. – Engineering Geology, 122: 204-214.

- EINSTEIN, H.H. (1996): Tunnelling in difficult ground – Swelling behaviour and identification of swelling rocks. – *Rock Mech. Rock Eng.*, 29(3): 113-124.
- HUBBERT, M.K. (1940): The theory of ground-water motion. *Journal of Geology*, 48(8): 785–944.
- KOVÁRI, K. & CHIAVERIO, F. (2007): Modulares Knautschsystem für Tunnel in stark quellfähigem Gebirge. – STUVA Tagung, Köln 26-29. November 2007, 195-200.
- MADSEN, F.T. & NÜESCH, R. (1991): The swelling behaviour of clay-sulfate rocks. 7. Int. Kongress über Felsmechanik, Aachen September 1991, 263-267.
- MADSEN F.T. & VONMOOS M. (1989): The swelling behaviour of clays. – *Applied Clay Science*, 4: 143-156.
- MARSAL, D. (1952): Der Einfluß des Druckes auf das System CaSO₄-H₂O. *Heidelberger Beiträge zur Mineralogie und Petrographie*, 3: 289-296.
- PIERAU, B. & KIEHL, J.R. (1996): Widerstands- und Ausweichprinzip: Vergleich zweier Entwurfsmethoden für Tunnelbauten in quellfähigem Gebirge. – *Taschenbuch für den Tunnelbau 1997*: 226-247.
- STEINER, W. (1993): Swelling rock in tunnels: Characterization, effect of horizontal stresses and construction procedures. – *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 30(4): 361-380.