

Erfahrungen mit Tunnelbauten im Gipskeuper

Experience with tunnel structures in Gypsum Keuper

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke

Zusammenfassung

Im Artikel wird auf die Schäden und auf die teilweise bis zur Geländeoberfläche reichenden Hebungen hingewiesen, die beim und nach dem Bau von Tunnels im anhydritführenden Gipskeuper aufgetreten sind.

Die Formation des Gipskeupers besteht aus Tonsteinen mit unterschiedlichen Anteilen von Sulfaten, die feinverteilt, linsenförmig und insbesondere in den Grundgipsschichten auch in Form massiver Bänke auftreten. Quellvorgänge entstehen, wenn der Anhydrit bei Wasserzutritt in Lösung geht und an "Ort und Stelle" wieder als Gips auskristallisiert. Das führt zu großen Volumenzunahmen oder bei deren Behinderung zu sehr großen Quelldrücken, die auch bei größeren Überlagerungshöhen zu Hebungen an der Geländeoberfläche führen können.

Erfahrungen an ausgeführten Tunnels zeigen, dass die in diesem Zusammenhang auftretenden Probleme häufig noch nicht beherrscht werden. So sind bei vielen Tunnels in Deutschland und in der Schweiz Schäden und Hebungen aufgetreten. Nur drei der im Beitrag genannten Tunnel konnten ohne Schäden und Hebungen ausgeführt und seit Jahren betrieben werden.

Mit dem Untersuchungsstollen des Freudensteintunnels im anhydritführenden Gipskeuper und den Ergebnissen der an verschiedenen Auskleidungstypen gemessenen Verschiebungen und Spannungen wurde die Möglichkeit der Kalibrierung der von WBI entwickelten Modellvorstellungen und Berechnungsverfahren geschaffen. Die maßgeblichen, felsmechanischen Kennwerte resultieren dabei aus den Ergebnissen felsmechanischer Versuche und der Interpretation von Messergebnissen, die bei Tunnelbauprojekten mit entsprechenden Gebirgsverhältnissen gewonnen wurden. Damit haben die eigenen sowie die in der Literatur veröffentlichten Projekterfahrungen Eingang in die Kalibrierung gefunden.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden als Grundlage für den Entwurf der Tunnel für das Projekt Stuttgart - Ulm herangezogen und im Beitrag zusammenfassend beschrieben.

Executive Summary

During and after the construction of tunnels in anhydritic Gypsum Keuper, damages and partially heavings reaching up to the ground surface, have occurred. Exemplary cases are illustrated in the article.

The formation of Gypsum Keuper consists of claystones and varying portions of sulfates, which are encountered either finely distributed, or in form of lenses, or in form of massive banks. The swelling processes start, when anhydrite is dissolving in presence of water, and then at the same location re-crystallizes as Gypsum. This leads to large volume increase and, if volume increase is inhibited, to very high swelling pressures. Such swelling pressures can lead to heavings at the ground surface, even if the overburden height is large.

Experience with tunnels already constructed show that the problems in connection with these phenomena are not always solved satisfactorily. In many tunnel projects in Germany and Switzerland, damages and heavings have been observed. Only three of the tunnels, which are dealt with in the given article, have been constructed and operated for years without any damage or heaving.

The test gallery, which was constructed in connection with the Freudenstein tunnel in anhydritic Gypsum Keuper, and the results of displacement and stress measurements, which were carried out in different tunnel sections with different lining types, gave WBI the possibility to calibrate the model and analyses methods, which they had elaborated in the past. The decisive rock mechanical parameters result from rock mechanical testing and from interpretation of measurement results gained from tunnel projects in comparable ground condition. Thus, the own as well as the published project experience have been considered in the calibration.

The results of these works form the basis for the design of the tunnels for the project Stuttgart - Ulm and are summarized in the given article.

1. Einleitung

Wie man aus den Zeitungsartikeln in Bild 1 aus den Jahren 2002 und 2010 erkennen kann, sind die Erfahrungen, die beim Tunnelbau in quellfähigem Gipskeuper gemacht wurden, nicht immer positiv gewesen. Sie haben sogar den Weg in die Tagespresse gefunden. Beim Engelbergbasistunnel zeigten sich bereits 2 Jahre nach der Inbetriebnahme erste Schäden. Bekannt wurden auch die Hebungen und Schäden an Gebäuden im Stadtgebiet von Staufen. Diese waren eine Folge der Herstellung von Geothermiebohrungen. Auch in der Schweiz sind Schäden an Tunneln infolge Quellbeanspruchungen aufgetreten, wie beispielsweise am Adlertunnel (Bild 1).

Im nachfolgenden Beitrag wird versucht, das Phänomen des Quellens in kurzer Form zu erläutern, es wird über Erfahrungen beim Tunnelbau berichtet und aufgezeigt, auf welche Weise die Quellproblematik ingenieurmäßig beherrscht werden kann.



Bild 1: Bauen im quellfähigen Gebirge, Öffentliche Wahrnehmung

2. Unausgelaugter Gipskeuper

Die Gipskeuper-Formation ist aus den Grundgipsschichten, den Dunkelroten Mergeln, dem Mittleren Gipshorizont und den Estherienschiefern aufgebaut (Bild 2). Dabei handelt es sich im Ausgangszustand überwiegend um Tonsteine, in die Sulfate in Form von Anhydrit oder Gips linsenförmig oder fein verteilt eingelagert sind. Der Sulfatgehalt ist in den Grundgipsschichten am größten und in den Estherienschiefern am geringsten (Bild 2). Die o. g. Schichten des Gipskeupers sind durch den Bochinger Horizont, die Bleiglanzbank und die Engelhofer Platte voneinander getrennt. Die Leithorizonte besitzen einen deutlich geringeren Sulfatgehalt und sind anders als die dazwischenliegenden Schichten deutlich geklüftet (Bild 2). Aus dieser Klüftung resultiert auch eine größere Durchlässigkeit und Wasserführung (Bild 2, LGRB 2013, LGRB, Geyer & Gwinner 2011, Wittke 2014). Einen Eindruck des gipsführenden, gesteinsartigen Bochinger Horizonts zeigt ein im Zwischenanriff Ulmer Straße aufgenommenes Foto (Bild 3). Man erkennt die weitgehend horizontale Schichtung und auch die vertikale Klüftung dieser Schicht (Wittke & Druffel & Hochgürtel 2015).

Wird dem anhydritführenden Gipskeuper beispielsweise durch den Bau eines Tunnels oder die Herstellung einer Bohrung Wasser zugeführt, so kommt es durch Wasseranlagerung an die Tonminerale zum Quellen von Ton (Bild 4). Im weiteren Verlauf der Wasserzufuhr geht dann der Anhydrit in Lösung. Falls kein Abtransport des Wassers erfolgt, kristallisiert das Sulfat als Gips an Ort und Stelle wieder aus (Bild 4).

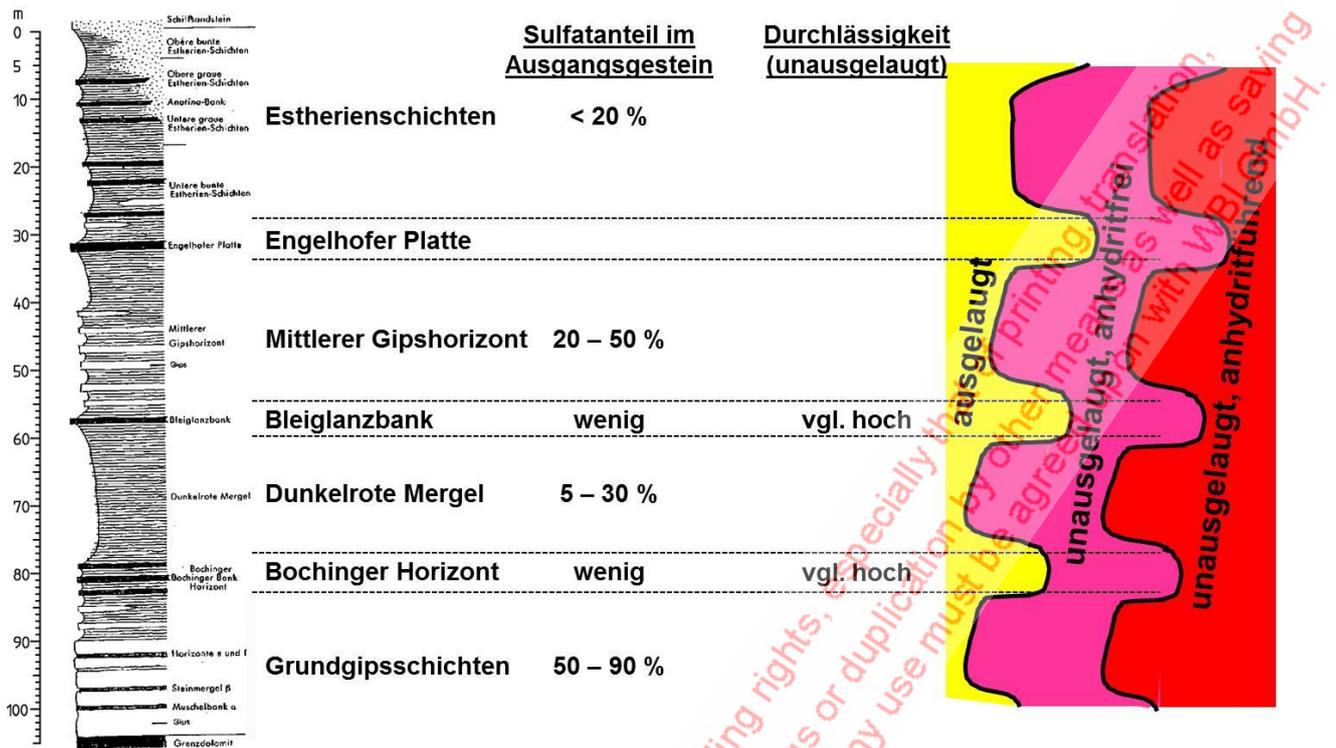


Bild 2: Gipskeuper-Formation (LGRB 2013, LGRB, Geyer & Gwinner 2011, Wittke 2014)



Bild 3: Zwischenangriff Ulmer Straße (13.11.2014), Unausgelaugter Gipskeuper, anhydritfrei

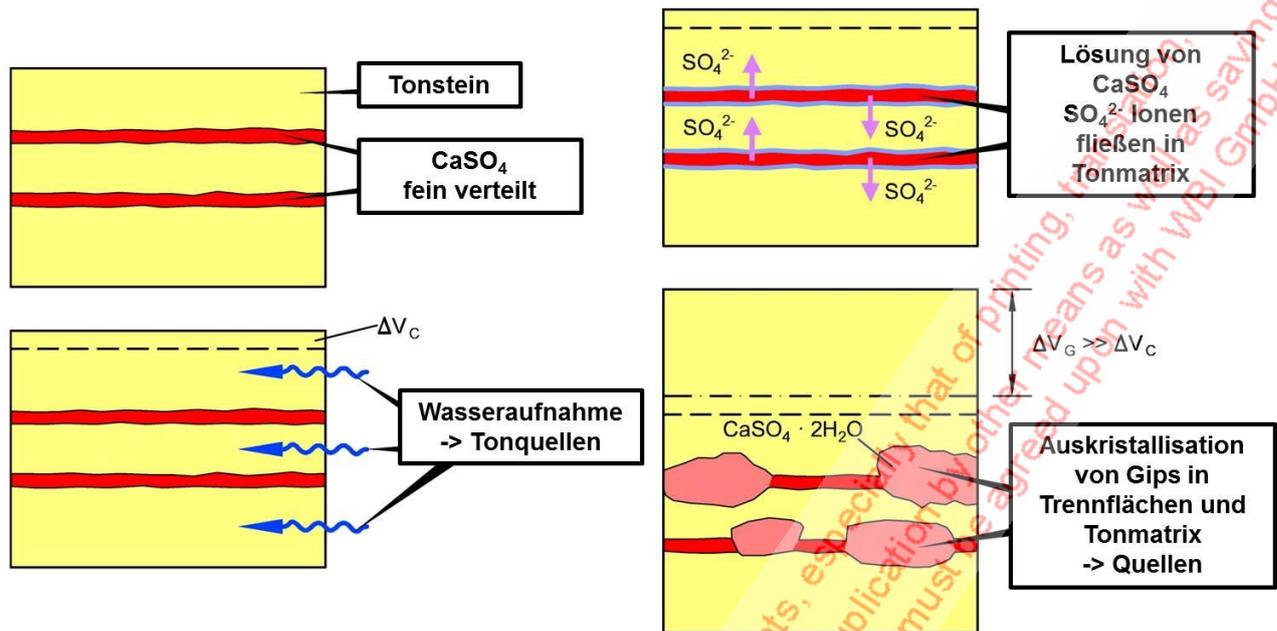


Bild 4: Quellen im Unausgelaugten Gipskeuper (Wittke 2014)

Dieser Vorgang ist mit einer Volumenzunahme von ca. 60 % verbunden (Bild 5). Wird die mit dem Quellen verbundene Volumenvergrößerung durch entsprechende Randbedingungen, wie z. B. eine Stahlbetoninnenschale be- oder verhindert, dann bilden sich große Quelldrücke aus (Bild 5).

In Laborversuchen wurden beispielsweise für Proben aus dem Mittleren Gipshorizont Quelldrücke bis zu 9 - 10 MN/m² nachgewiesen (Wittke 2014, Wittke 2003, Wittke-Gattermann 1998, Wahlen 2009). Bei einer Wichte des Gesteins von ca. 25 kN/m³ entspricht das dem Gewicht einer Felsüberlagerung von ≥ 360 m (Bild 6). Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass die Gebäude der Stadt Staufen, in deren Bereich in ~ 60 m Tiefe anhydritführender Gipskeuper anstand, angehoben wurden (Bild 6, LGRB 2012, LGRB 2010).

Der Vorgang der Umwandlung von Anhydrit in Gips findet auch in der Natur statt. Es gibt deshalb oberhalb des sogenannten Anhydritspiegels (A-A, Bild 6) meist eine mehrere m dicke Schicht, in der der Sulfatanteil in Form von Gips ansteht. Da Gips löslich ist, befindet sich über den gipsführenden Tonsteinen in der Regel eine Zone, in der ein sogenanntes, gipsfreies Residualgestein ansteht (Bild 6, Wittke 2014).

Freies Quellen:



Verhindertes Quellen:

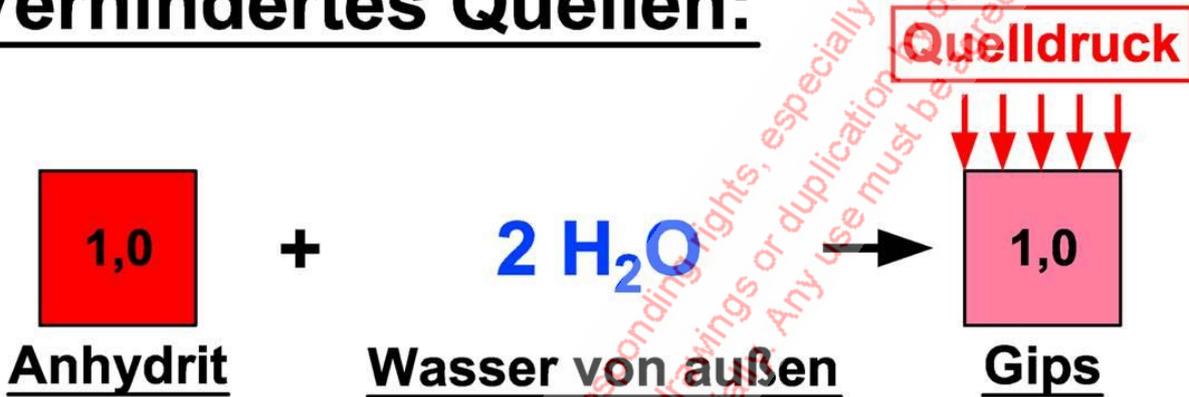


Bild 5: Freies und Verhindertes Quellen

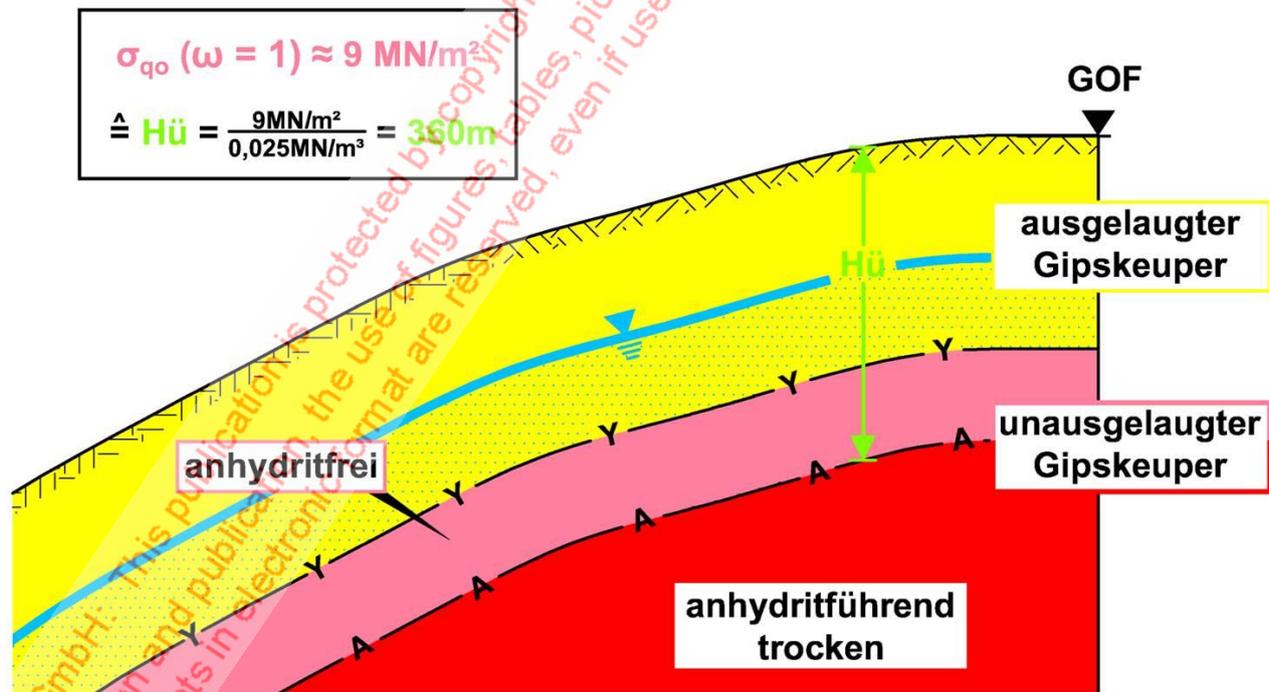
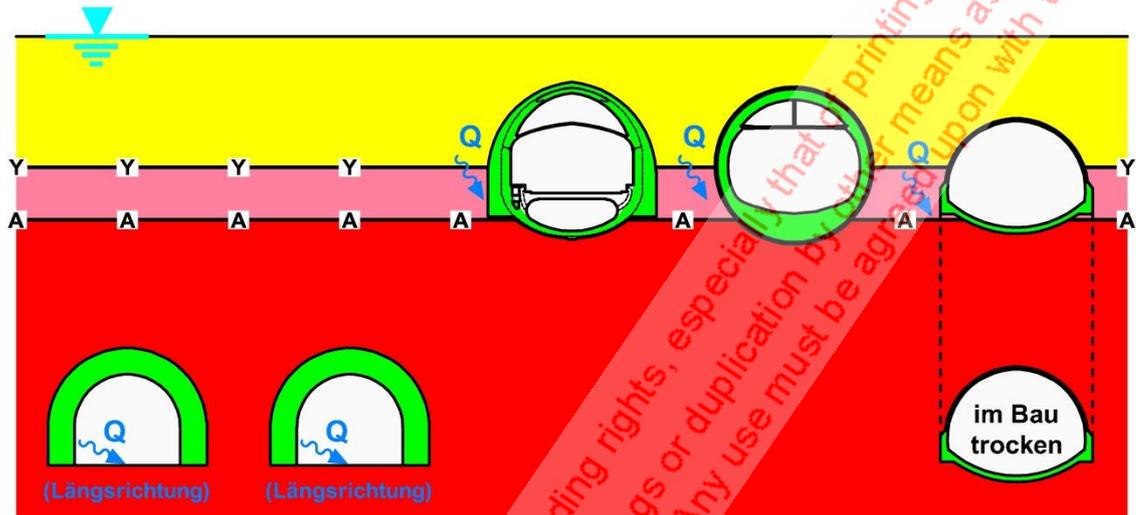


Bild 6: Überlagerung zur Verhinderung von Quellhebungen

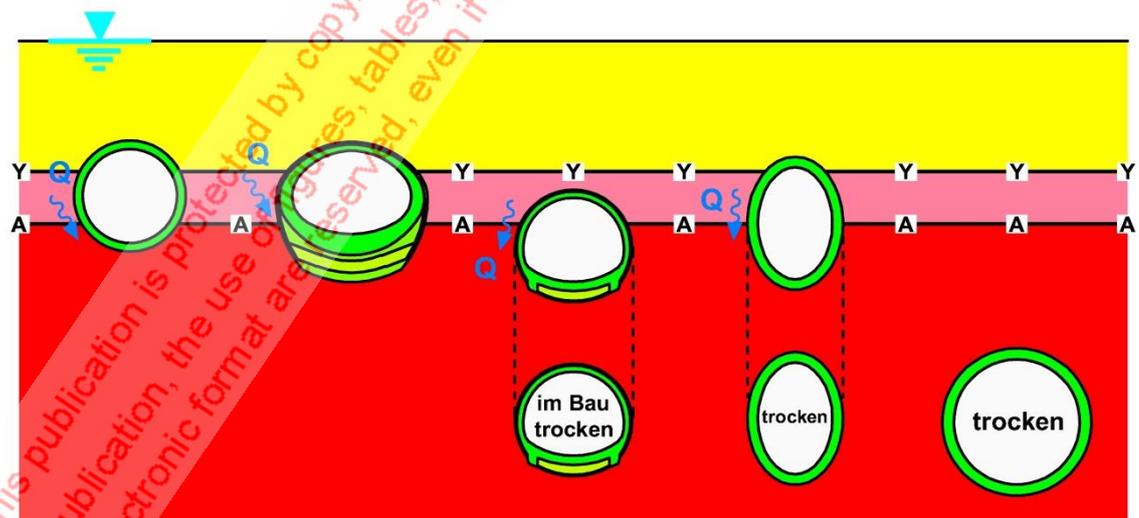
3. Erfahrungen aus dem Tunnelbau

In den Bildern 7 und 8 sind 10 Verkehrstunnel zusammengestellt, die in Deutschland und der Schweiz im anhydritführenden Gebirge gebaut wurden. Erkennbar ist die Höhenlage der Tunnelröhren relativ zum Anhydritspiegel und zur Auslaugungsfront im jeweiligen Projektgebiet.



| | <u>Schanztunnel</u> | <u>Kappelesbergt.</u> | <u>Wagenburgt.</u> | <u>Heslach II</u> | <u>Belchentunnel</u> |
|-----------|---------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| | ~ 1880 | ~ 1880 | ~ 1957 | ~ 1988 | ~ 1966 |
| Hebungen: | ja | ja | ja | ja | ja |
| Schäden: | ja | ja | ja | nein | ja |

Bild 7: Ausgewählte Erfahrungen, Prinzipdarstellung (1/2)



| | <u>Adlertunnel</u> | <u>Engelbergbasist.</u> | <u>Freudensteint.</u> | <u>Hasenberg.</u> | <u>Wendeschleife</u> |
|-----------|--------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|
| | ~ 1999 | ~ 1999 | ~ 1990 | ~ 1984 | ~ 1977 |
| Hebungen: | ja | ja | nein | nein | nein |
| Schäden: | ja | ja | nein | nein | nein |

Bild 8: Ausgewählte Erfahrungen, Prinzipdarstellung (2/2)

Die ältesten Tunnel sind der Schanzunnel und der Kappelbergstunnel. Beide Tunnel sind mit einem Natursteingewölbe ausgekleidet und haben eine offene Sohle. Im Laufe der Jahrzehnte ist es hier zu Sohlhebungen und schließlich auch zu quellbedingten Schäden am Gewölbe gekommen. Da der anhydritführende Gipskeuper sehr gering durchlässig und beim Ausbruch absolut trocken ist, kann das Wasser, das die Quellen ausgelöst hat, nicht aus der oberhalb des Tunnels anstehenden ausgelaugten und wasserführenden Schicht gekommen sein. Vielmehr ist das Wasser als Folge der Längsläufigkeit in den quellfähigen Bereich gelangt. Die Tunnel durchörterten näher zu den Portalzonen die wasserführende Auslaugungsfront, über die das Wasser in die Tunnel gelangt ist. Zwar wurde beim Bau der Tunnel ein Dränagesystem angelegt, dieses war aber beispielsweise beim Schanzunnel im Zeitraum vor der Sanierung nicht mehr funktionsfähig. Die Gleise, die in beiden Tunneln angehoben wurden, wurden im Verlauf der Jahre immer wieder abgesenkt, bis schließlich auch das Gewölbe beschädigt und eine Sanierung unausweichlich wurde (Ericksen & Kurz 1996).

Anders liegen die Verhältnisse bei dem in den Nachkriegsjahren erbauten Wagenburgtunnel. Dieser liegt mit seiner Sohle in der Nähe der wasserführenden Auslaugungsfront. Dadurch wurde die Sohle als Folge von Quelldrücken zerstört und musste erneuert werden. Außerdem ergaben sich auch quellbedingte Hebungen der gesamten Tunnelröhren (Bild 7, Paul & Wichter 1993).

Ähnliche Verhältnisse liegen abschnittsweise auch beim Belchentunnel in der Schweiz vor (Bild 7). Hier traten bereits während des Baus Schäden am Übergang von der Sohle zur Ulme auf. 40 Jahre nach dem Bau, vor der 1. Sanierung in den Jahren 2003 / 2004, waren wieder große Schäden in Höhe der Ulmen zu beobachten (Bild 9). Im Jahr 1986 eingebaute Gleitmikrometer zeigten in den folgenden 25 Jahren Sohlhebungen, die bis ca. 5 m unter die Tunnelsohle reichten (Bild 10, Chiaverio 2014).

1. Bestehender Belchentunnel
Schadensbild während des Bau des Belchentunnels



1. Bestehender Belchentunnel
Schadensbilder im Tunnel vor der 1. baulichen Instandsetzung von 2003 / 2004



Bild 9: Belchentunnel, Schweiz, Schadensbilder (Chiaverio 2014)



1. Bestehender Belchentunnel

Gleitmikrometer

Messanordnung Gleitmikrometer MQ1 -MQ4 Tunnelröhre Ost

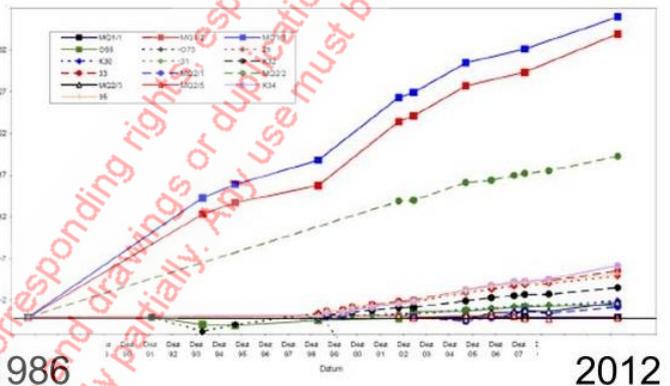
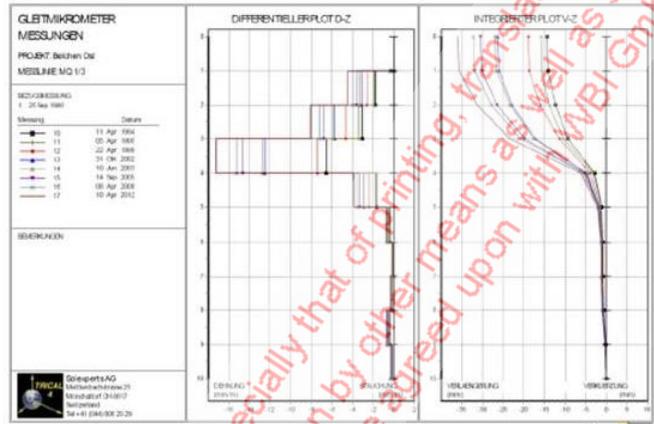
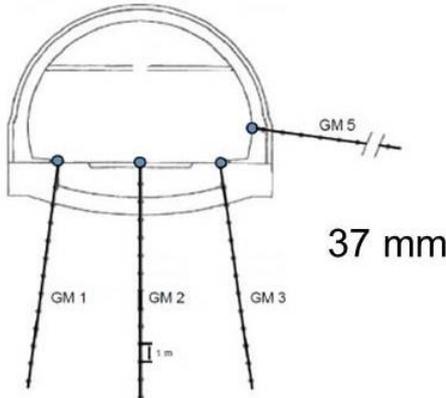


Bild 10: Belchentunnel, Schweiz, Messergebnisse (Chiaverio 2014)

Auch beim Straßentunnel Heschach II liegt der Anhydritspiegel bereichsweise in Höhe der Sohle. Auch hier haben sich Hebungen eingestellt, die Innenschale ist aber ausreichend gegen Quelldruck bemessen. Auch bei dem im Jahr 1999 erbauten Adlertunnel (Wettbewerb TEC21 2007) und dem Engelbergbasistunnel bei Stuttgart sind nach dem Bau Schäden und auch Hebungen aufgetreten (Bilder 8, 11). Beim Engelbergbasistunnel kam es bereits während der Bauzeit über eine längere Strecke zu einem Abscheren der 30 cm dicken Spritzbetonschale am Übergang von der Sohle zur Ulme (Bild 12, Arge Engelberg und Landesamt für Straßenwesen Baden-Württemberg).

Ca. 40 m langer Abschnitt:

- **Anhydritspiegel im und unterhalb des Tunnelquerschnitts**
- **Tagbruch während der Bauzeit, reduzierte Bettung über dem Tunnel**
- **keine Knautschzone**
- **Wasserzutritte**
- **Hebungen infolge Quellen, ca. 7 cm in 12 Jahren**

Bild 11: Adlertunnel, Schweiz (Wettbewerb TEC21 2007)

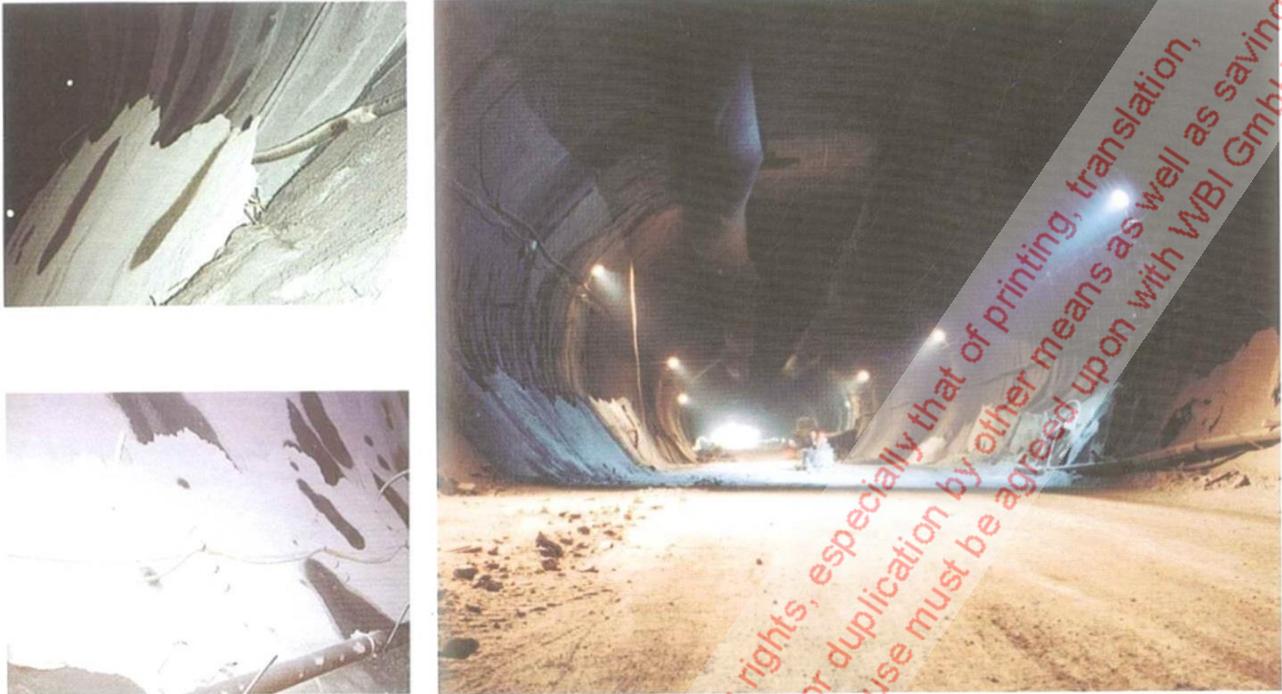


Bild 12: Engelbergbasistunnel, zerstörte Spritzbetonschale (Arge Engelberg und Landesamt für Straßenwesen Baden-Württemberg)

Ohne Schäden während und nach dem Bau wurden nach Kenntnis des Autoren nur der Tunnel der Wendeschleife unter dem Hasenberg, der Hasenbergtunnel der S-Bahn in Stuttgart und der Freudensteintunnel auf der NBS Mannheim - Stuttgart gebaut (Bild 8, Wittke 1978, Wittke & Pierau 1979, Kirschke & Kovari & Brommersberger 1991). Sie weisen auch heute, mehr als 25 Jahre nach dem Bau keine Schäden auf. Der Tunnel der Wendeschleife liegt etwa 15 m unterhalb der Auslaugungsfront im anhydritführenden Gebirge und ist mit einer 1 m dicken Stahlbetonschale ausgekleidet, die verhältnismäßig schwach bewehrt ist (Bild 13). Beim Bau wurde vollkommen trocken gearbeitet und der Fels unmittelbar nach dem Ausbruch mit 5 cm Spritzbeton versiegelt. Der Ausbruch erfolgte im Sprengvortrieb. Ein Kranz von 1 m Dicke entlang des Umfangs wurde mit einer Teilschnittmaschine ausgebrochen (Bild 14, Deutsche Bundesbahn 1985).

Der Freudensteintunnel ist ein zweigleisiger Eisenbahntunnel, der auf der Schnellfahrstrecke der DB von Mannheim liegt und im Jahre 1990 fertiggestellt wurde. Die Felsüberdeckung beträgt hier ~ 100 m (Bild 15). Mit Ausnahme der beiden Täler und der Bereiche, in denen der Tunnel die Auslaugungsfront durchdringt, war auch dieser Tunnel im Bereich des Gipskeupers trocken. Im Unterschied zu den Tunneln unter dem Hasenberg, die mit einer biegesteifen Stahlbetonschale ausgekleidet sind, wurde dieser Tunnel nach dem Verfahren der nachgiebigen Sohlstützung (VNS) ausgebaut. Die Stahlbetoninnenschale erhielt eine Dicke von 80 cm (Bild 16). Die Knautschzone unter der Sohle hat einen geringen Verformungsmodul und lässt damit bis zu einer gewissen Größe quellbedingte Hebungen zu, die einen Abbau der Quelldrücke ermöglichen sollen.

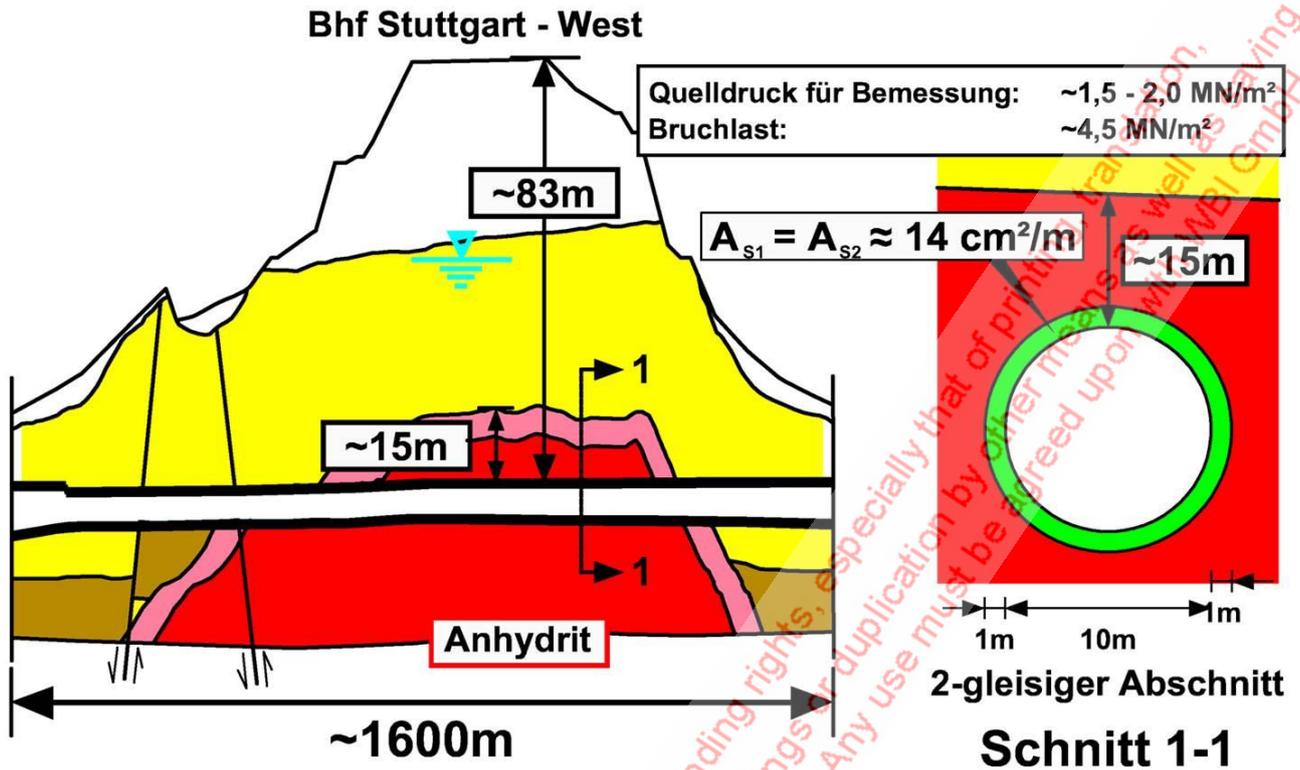
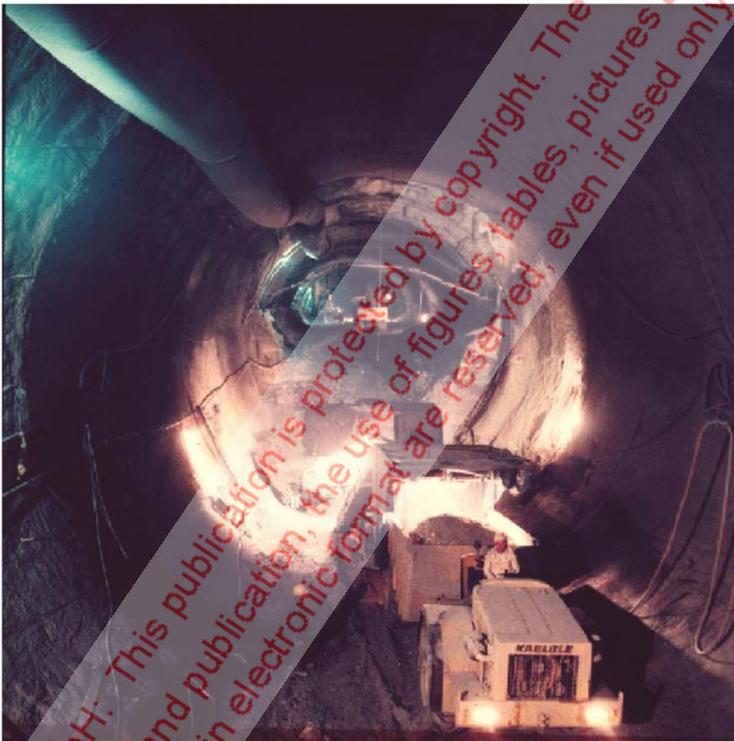


Bild 13: S-Bahn Stuttgart, Wendeschleife



- $\varnothing = 10 \text{ m}$
- Versiegelung: 2- 5 cm
- Fels trocken
- trockener Vortrieb

Bild 14: S-Bahn Stuttgart, Wendeschleife (Deutsche Bundesbahn 1985)

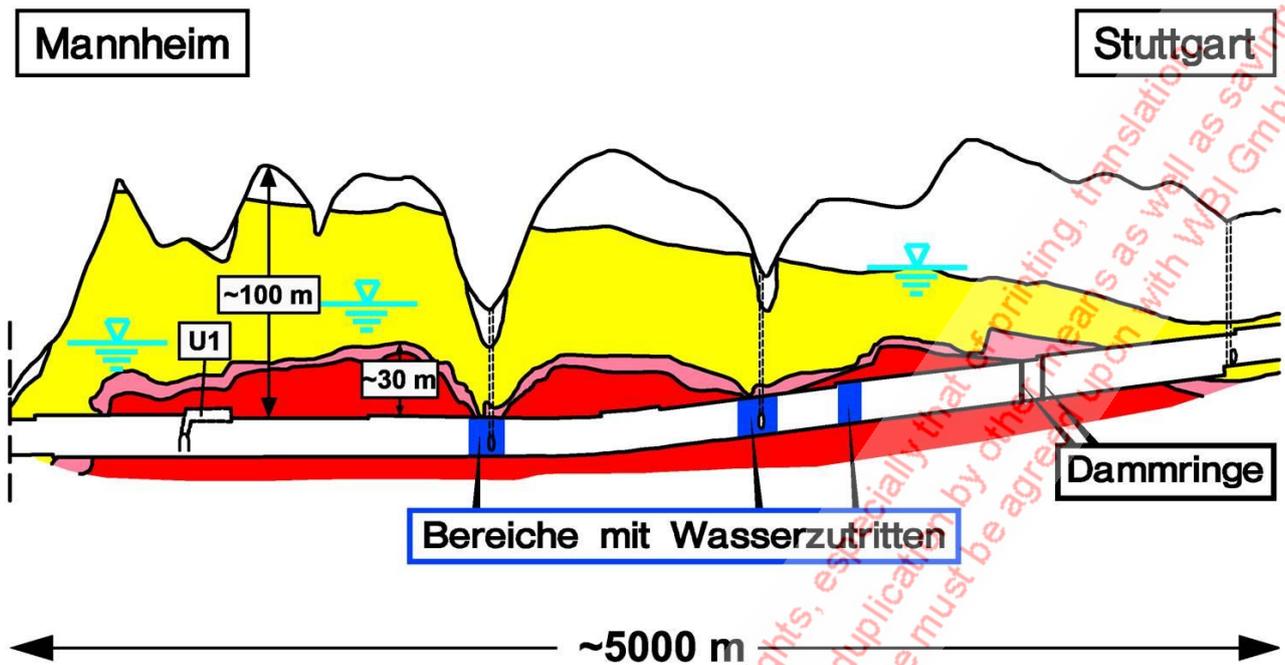


Bild 15: Freudensteintunnel, NBS Mannheim-Stuttgart

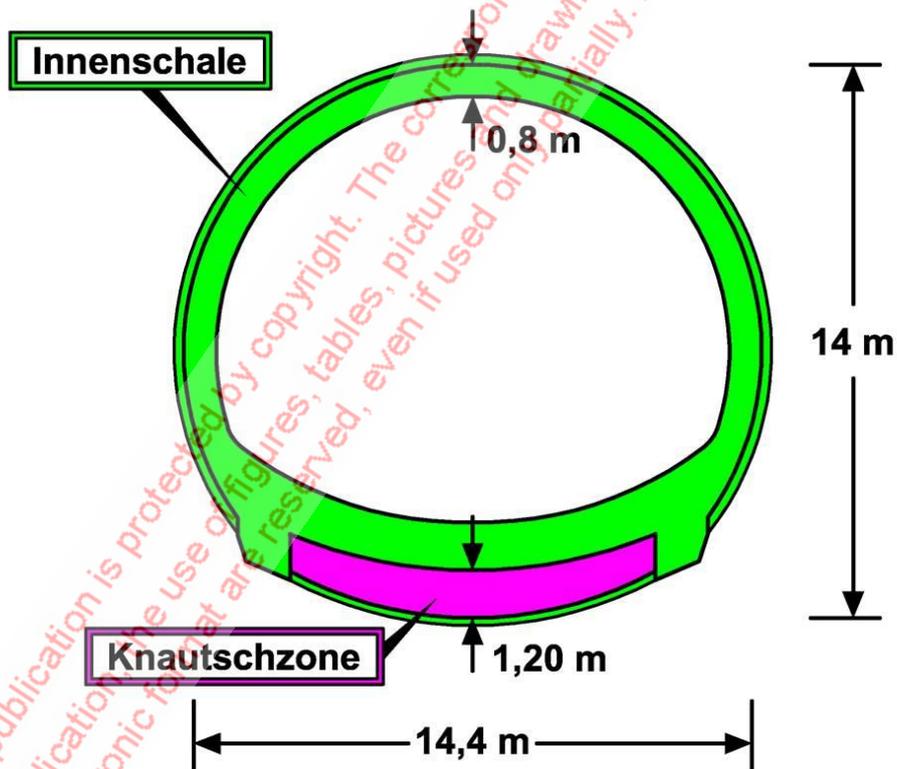


Bild 16: Freudensteintunnel, Querschnitt

4. Felsmechanisches Modell und Kennwerte

Schon seit vielen Jahren bemühen sich der Autor und seine Mitarbeiter um die Entwicklung eines felsmechanischen Modells und eines zugehörigen Berechnungsverfahrens, mit denen sich die beim Tunnelvortrieb im klüftigen Fels auftretenden Änderungen der Span-

nungen und Verschiebungen, die Sickerströmung und die Wasseraufnahme durch das Gestein und die durch das Quellen ausgelösten Änderungen der Spannungen und Dehnungen sowie der Durchlässigkeit beschreiben bzw. ermitteln lassen. Große Fortschritte konnten dabei durch die Messergebnisse aus den Untersuchungsstollen im Freudensteintunnel erzielt werden (Bild 17). Hier wurden kreisförmig ausgebrochene Tunnelabschnitte mit einer Stahlbetonauskleidung versehen und in anderen Abschnitten eine Stahlbetonauskleidung mit einer Knautschzone in Höhe der Sohle ausgebildet. Außerdem erhielt ein Stollenabschnitt ein mit Spritzbeton gesichertes, hufeisenförmiges Profil mit einer geankerten Stahlbetonsohle mit und ohne Knautschzone (Bild 17).

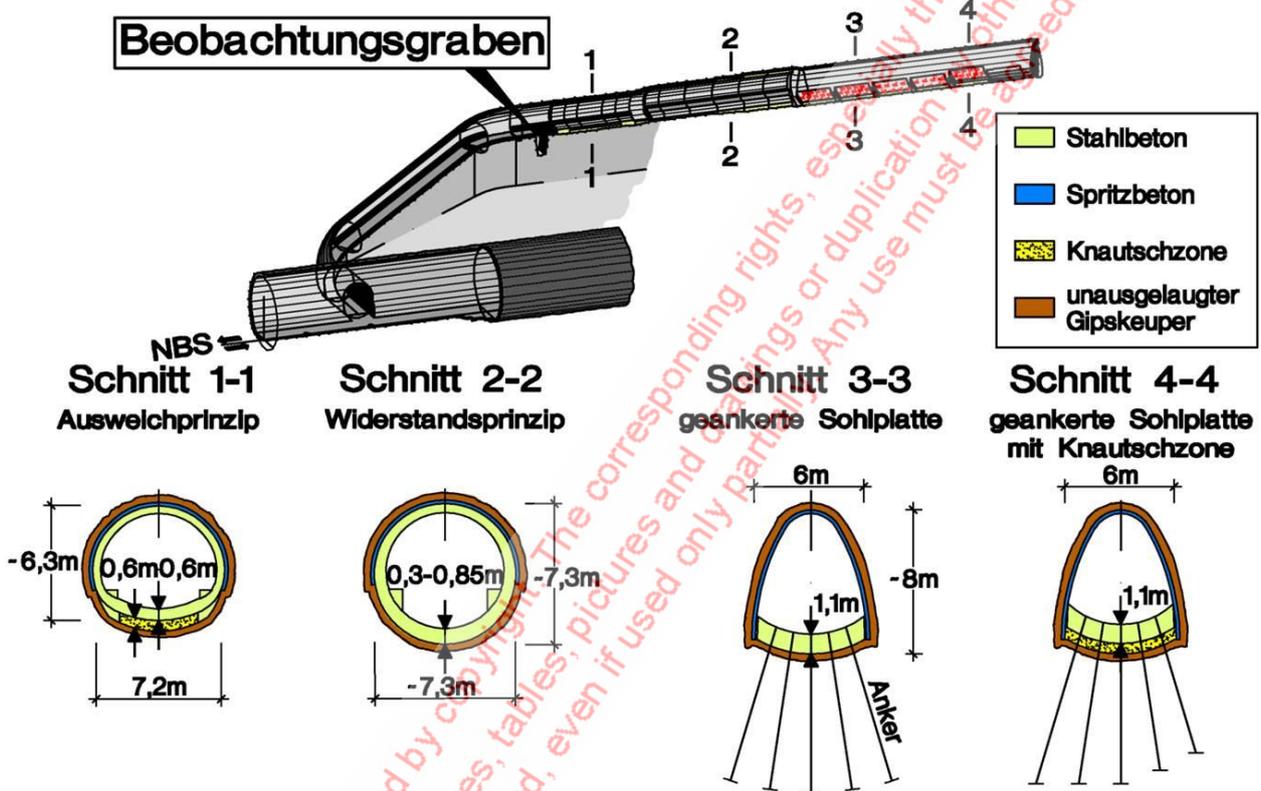


Bild 17: Untersuchungsstollen im Freudensteintunnel

Nach der Fertigstellung wurde der Fels unterhalb der Sohle über Bohrungen bewässert und dadurch das Quellen ausgelöst (Bild 18). Die dadurch resultierenden Verschiebungen und Spannungen im Stahlbeton und in den Ankern wurden über 20 Jahre gemessen. Begleitet wurde dieses Untersuchungsprogramm durch Quellversuche an Gesteinsproben im Labor.

Die Ergebnisse standen in der Planungsphase des Projektes Stuttgart - Ulm zur Verfügung und wurden zur Kalibrierung der entwickelten Modelle genutzt (Witke-Gattermann 1998, Wittke 2003, Wahlen 2009). Außerdem wurden Nachrechnungen von Spannungen und Verschiebungen vorgenommen, die an ausgeführten, in quellfähigem Gebirge liegenden Tunneln durchgeführt worden waren. Diese Arbeiten stellen auch eine Entwurfsgrundlage für die im anhydritführenden Gipskeuper liegenden Tunneln des Projekts Stuttgart - Ulm dar.

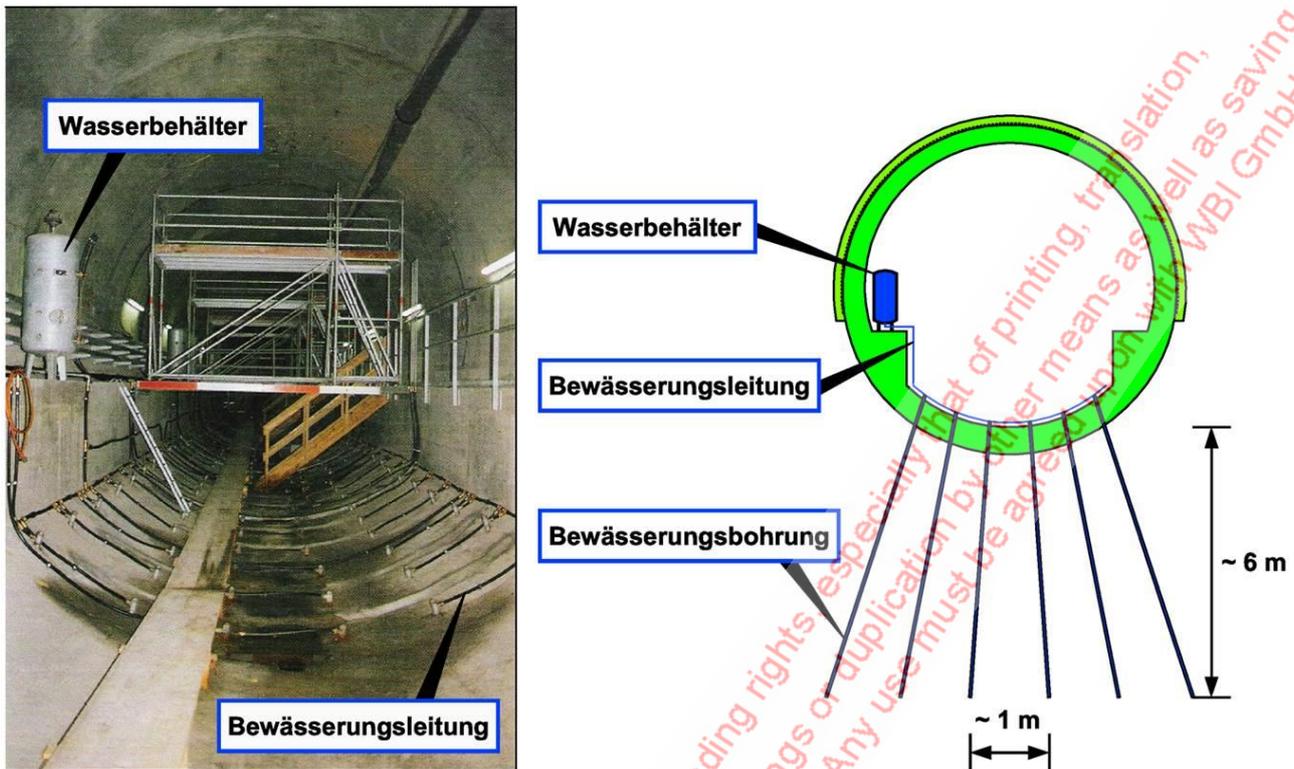


Bild 18: Untersuchungsstollen im Freudensteintunnel

Das verwendete Gefügemodell ist auf der linken Seite des Bildes 19 dargestellt (Witke 2003, Witke 2014).

Für den Fels wird ein linear-elastisches, transversal isotropes Verhalten angenommen, das bei Überschreiten der Festigkeit auf den Trennflächen und im Gestein, die mit dem Mohr Coulomb'schen Bruchkriterium beschrieben wird, durch viskoplastisches Verhalten abgelöst wird. Die instationäre Wasserzufuhr über Sickerströmung durch die Trennflächen wird mit Hilfe der Darcy'schen Gesetzes beschrieben (Witke 2014). Die Wasseraufnahme durch das Gestein wird mit Hilfe der Gleichungen für die Diffusion beschrieben.

Insgesamt benötigt man mehr als 20 Kennwerte um den Prozess zu beschreiben. Bei der Ermittlung dieser Kennwerte kommt uns die Homogenität der Gipskeuperschichten in Baden-Württemberg zur Hilfe. Sie ermöglicht es, dass man die für ein Tunnelprojekt ermittelten Kennwerte auf andere Bereiche übertragen kann. Außerdem hat sich gezeigt, dass immer nur einige der Kennwerte einen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse und damit auf den Entwurf haben.

In Bild 19 auf der rechten Seite sind die für den Vorgang wesentlichen Phänomene und die diese beschreibenden Kennwerte mit ihren Dimensionen zusammengestellt. Außerdem sind Zahlenangaben gemacht, die die Größenordnung dieser Kennwerte für den Gipskeuper im Raum Stuttgart wiedergeben. Die rechte Spalte der Tabelle zeigt die Wege zur Bestimmung der Kennwerte auf. Sie bestehen aus der Durchführung von Erkundungen, Kartierungen, der Durchführung von Labor- und Feldversuchen und der Nachrechnung von an Bauwerken gemessenen Spannungen und Verschiebungen.

Beispielhaft zeigt Bild 20 die Ergebnisse von Lastplattenversuchen, wie sie vor vielen Jahren im Erkundungsstollen der Nordröhre des Wagenburgtunnels durchgeführt wurden. Zum Vergleich sind in Bild 21 die Ergebnisse der für den Fildertunnel durchgeführten Dilatometerversuche dargestellt. Die Werte streuen aufgrund des Maßstabeffekts (geringes untersuchtes Felsvolumen) stärker. Der Mittelwert stimmt aber gut mit den Ergebnissen der Lastplattenversuche aus dem Wagenburgtunnel überein.

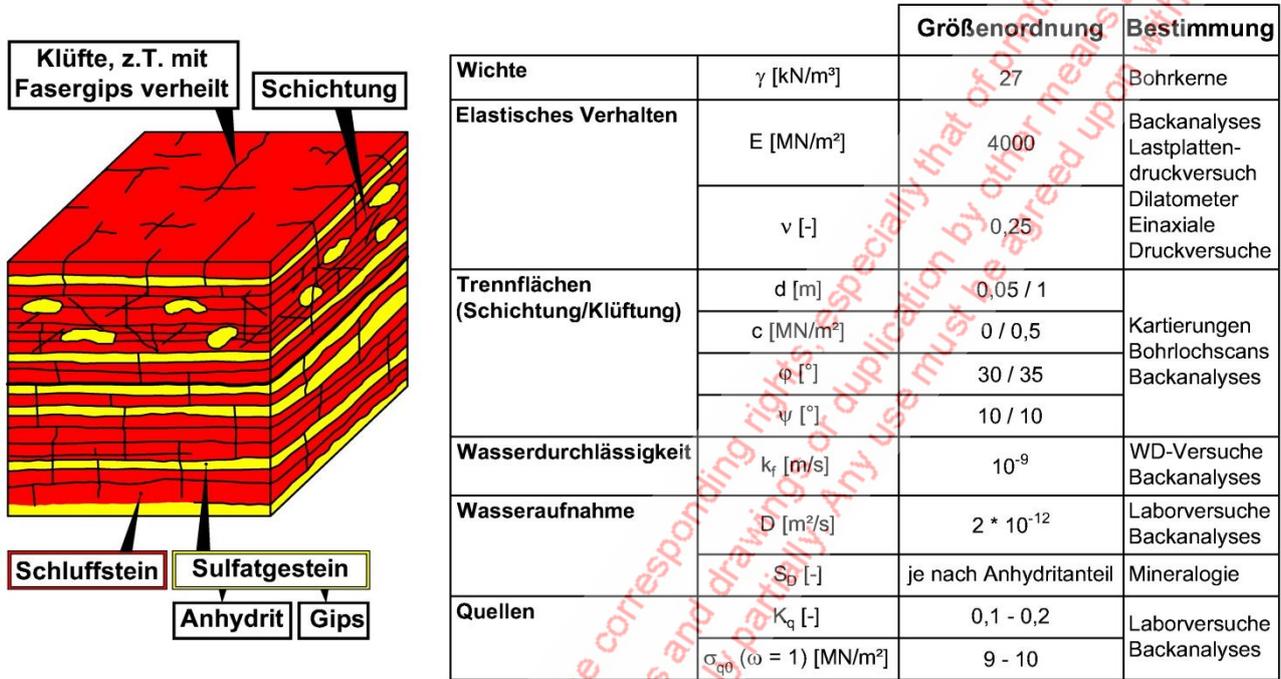


Bild 19: Unausgelaugter Gipskeuper, Gefügemodell und Kennwerte

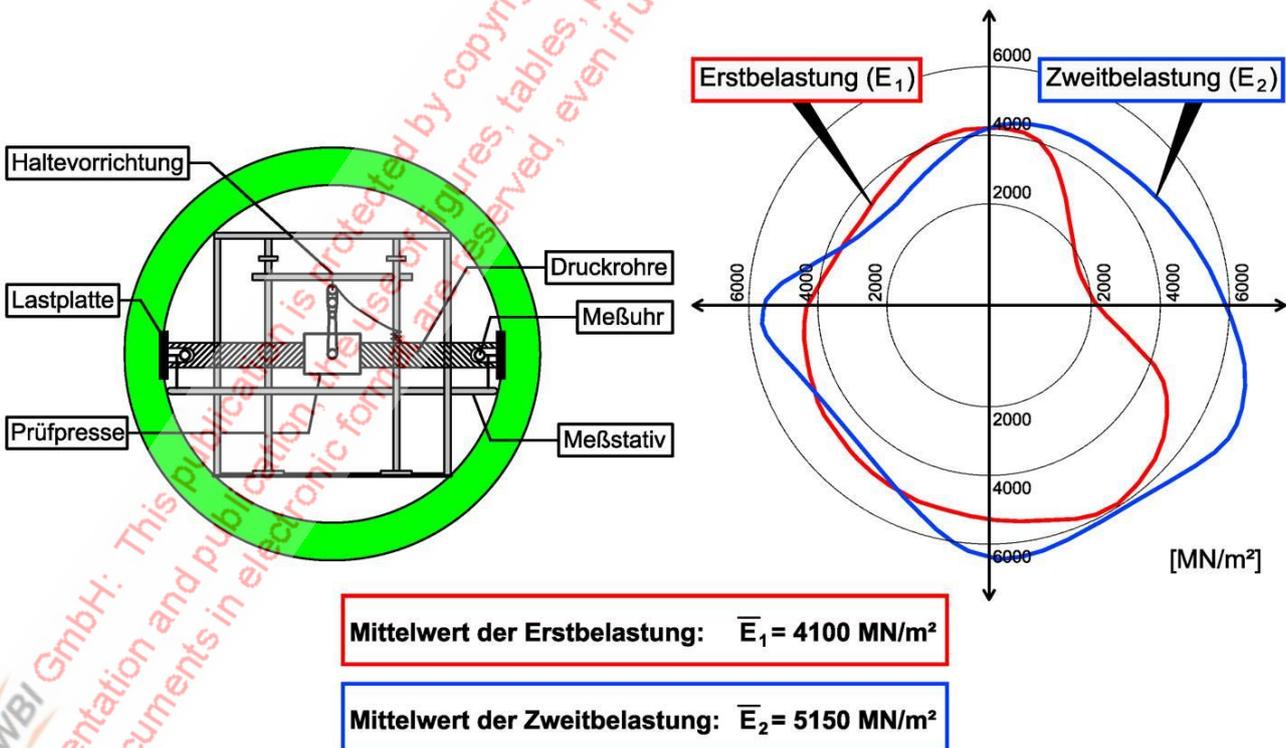


Bild 20: E-Moduln aus Lastplattenversuch

Die Scherparameter der Schichtung und der Klüftung, wie sie aus Untersuchungen für den Wagenburgtunnel, die Wendeschleife und den Fildertunnel ermittelt wurden, sind in Bild 22 zusammengestellt. Sie liegen innerhalb eines relativ engen Streubereichs.

Anzahl [-]

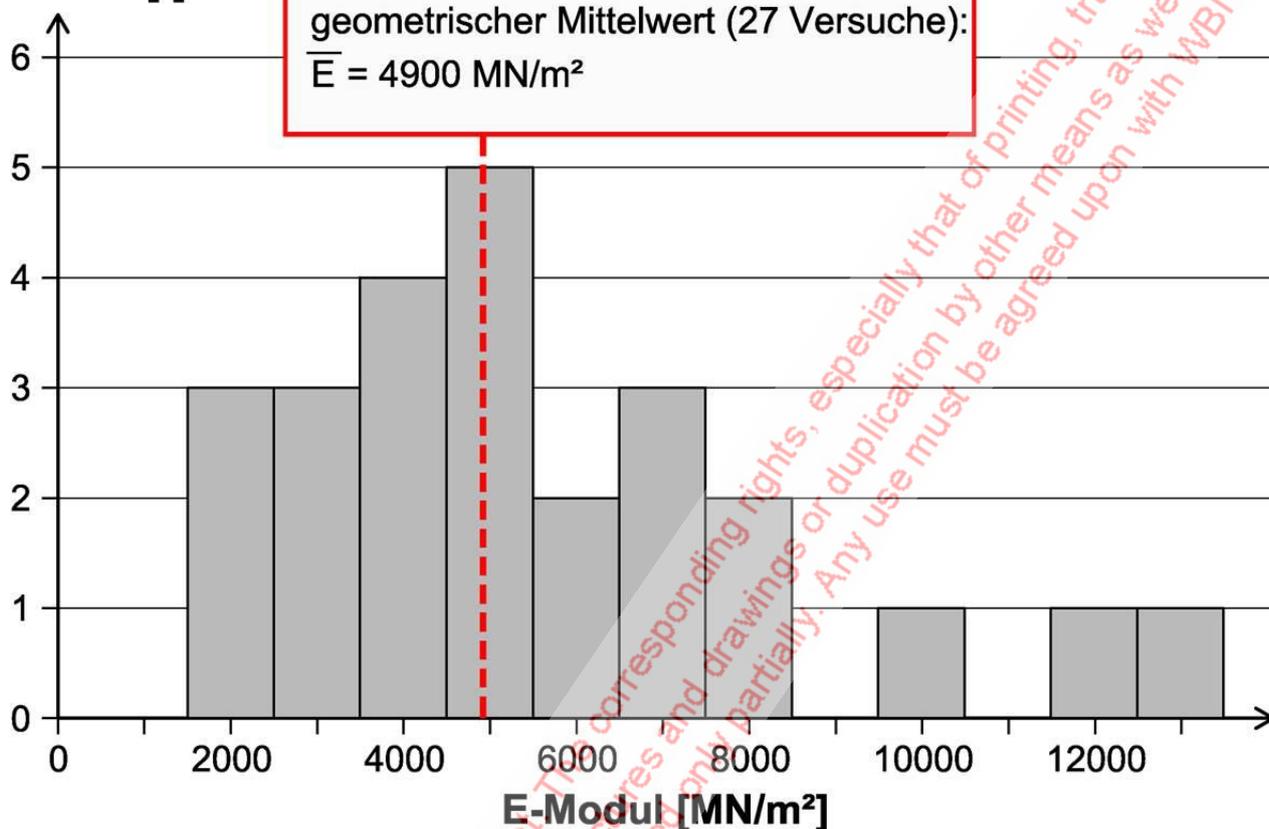
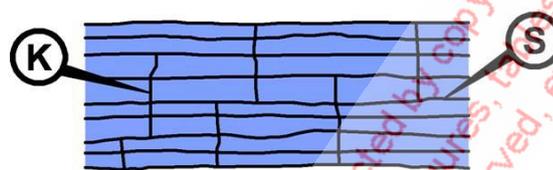


Bild 21: E-Moduln aus Dilatometerversuchen



| | Schichtung | | Klüftung | |
|---|--------------------|------------------|--------------------|-------------------|
| | φ_s [°] | c_s [MN/m²] | φ_k [°] | c_k [MN/m²] |
| Fildertunnel, Stuttgart 21 (Erkundungen) | 30 | 0 - 0,2 | 35 | 0,1 - 0,6 |
| Wagenburgtunnel (In-Situ-Versuch) | 40 | 0,6 | - | - |
| Wendeschleife, S-Bahn Stuttgart (Nachrechnung) | 30 | > 0,04 | 35 | 0,05 - 0,5 |

Bild 22: Festigkeit auf den Trennflächen

Ähnliche Untersuchungen wurden für alle anderen Kennwerte des Modells angestellt (Wittke 2014, Wittke 2003, Wahlen 2009).

Literatur

Arge Engelberg und Landesamt für Straßenwesen Baden-Württemberg: Engelberg-Basistunnel und Autobahndreieck Leonberg, Neubau und Modernisierung eines Verkehrsknotenpunktes.

Böttcher, K.-H.; Schmidt, I.; Erichsen, C.: S-Bahn Stuttgart - Streckenverlängerung vom Flughafen nach Filderstadt-Bernhausen - Die Untertunnelung des Flughafens. Vortrag zur Baugrundtagung, Stuttgart, 1998.

Deutsche Bundesbahn, Bundesbahndirektion Stuttgart: Die Wendeschleife. In: Der Tunnel, Verbindungsbahn der S-Bahn Stuttgart, Dokumentation ihrer Entstehung. Stuttgart, 1985.

Erichsen, C.; Kurz, G.: Instandsetzung des Schanztunnels - Entwurf und Ausführung, Geotechnik 1996, Nr. 3, 173 - 183, 1996.

Geyer, O. F.; Gwinner, M. P.: Geologie von Baden-Württemberg. Schweizerbart, Stuttgart, 2011.

Kirschke, D.; Kovari, K.; Brommersberger, G.: Bemessungsgrundlagen und Konstruktion der Sohle des Freudensteintunnels, ibw 7, 40 - 57, Dezember 1991.

LGRB: Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Freiburg, 01.03.2010.

LGRB: Zweiter Sachstandsbericht zu den seit dem 01.03.2010 erfolgten Untersuchungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Freiburg, 01.06.2012.

LGRB: Geologische Übersichtskarte, 1 : 300.000, 2013.

LGRB: Geologische Karte von Baden-Württemberg, 1 : 25.000, Blätter 7120, 7121, 7220, 7221, Stuttgart.

Paul, A.; Wichter, L.: Das Langzeitverhalten von Tunnelbauwerken im quellenden Gebirge - Neuere Messergebnisse vom Stuttgarter Wagenburgtunnel, Proc. 10. Nat. Felsmechanik Symposium, Aachen 1992, Sonderheft der Geotechnik, 1 - 15, 1993.

Chiaverio, F.: Belchentunnel. Vortrag anlässlich des Kolloquiums Tunnel in anhydritführendem Gebirge. ETH Zürich, 03.04.2014

Wahlen, R.: Validierung eines Berechnungsverfahrens für Tunnelbauwerke in quellfähigem Gebirge. WBI-PRINT 17, Verlag Glückauf GmbH, Essen 2009.

Wettbewerbe TEC21: Adlertunnel, Schweiz, 41/2007.

Wittke, M.: Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge. Geotechnical engineering in research and practice, WBI-PRINT 13. Essen: Glückauf, 2003.

Wittke, M.; Druffel, R.; Hochgürtel, T.: Zugangsstollen Ulmer Straße, Beherrschung von Wasserzutritten im Bereich der Auslaugungsfront. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.

Wittke, W.: Fundamentals for the design and construction of tunnels located in swelling rock and their use during construction of the turning loop of the subway Stuttgart. Publications of the Institute for Foundation Engineering, Soil Mechanics, Rock Mechanics and Water Ways Construction, RWTH Aachen, Vol. 6, 1978.

Wittke, W.; Pierau, B.: Fundamentals for the design and construction of tunnels in swelling rock. In: Proc. 4th ISRM Congr., Vol. 2, Montreux, 1979.

Wittke, W.: Rock Mechanics - Theory and Applications with Case Histories. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1990.

Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2014.

Wittke-Gattermann, P.: Verfahren zur Berechnung von Tunnels in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk. Geotechnical engineering in research and practice, WBI-PRINT 1. Verlag Glückauf GmbH, Essen 1998.