

Wittke:

Einflüsse auf den Entwurf von Tunneln im anhydritführenden Gebirge



# Einflüsse auf den Entwurf von Tunneln im anhydritführenden Gebirge

Dr.-Ing. Martin Wittke, Geschäftsführer, WBI – Prof. Dr.-Ing. W. Wittke Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH, Aachen, Deutschland

Der Tunnelbau im quellfähigen Gebirge ist insbesondere vor dem Hintergrund des bevorstehenden Projekts Stuttgart 21 von großer Bedeutung. Um einen sicheren und wirtschaftlichen Entwurf für diese Tunnel zu ermöglichen, ist es unter anderem wichtig, die Ursachen für Schäden und unvorhergesehene Hebungen, die in der Vergangenheit aufgetreten sind, zu erkennen und Wege zu deren Vermeidung zu finden. Mit dem beschriebenen Modell- und Berechnungsverfahren, das erfolgreich anhand von langjährigen Messreihen kalibriert wurde, steht eine gute Grundlage zur Verfügung, Tunnel im quellfähigen Gebirge in Zukunft sicher und wirtschaftlich zu bemessen. Anhand von Berechnungen mit diesem Modell, wird beispielhaft der Einfluss der Höhenlage des Anhydritspiegels und der Ausgangsdurchlässigkeit des Gebirges auf den Entwurf und die Bemessung untersucht. Es zeigt sich, dass beide Faktoren einen entscheidenden Einfluss haben. Selbstverständlich sind darüber hinaus alle übrigen Randbedingungen, wie zum Beispiel die Querschnittsform und -größe, beim Entwurf zu berücksichtigen.

**Influences on the design of tunnels in anhydrite containing rock:** *Tunnelling in swelling rock is of considerable importance, in particular before the background of the forthcoming project Stuttgart 21. To allow for a safe and economic design it is essential to find out the reasons for damages and unforeseen heaving that have taken place in the past and to avoid such occurrences in future. A constitutive model and an analysis procedure based on it, which have been successfully validated with the aid of long term monitoring results, form a sound basis for the safe and economic design of tunnels in swelling rock. By means of analyses carried out using this model the influence of the level of the anhydrite surface and the initial permeability of the rock mass on design and dimensioning is studied exemplary. As a result, both factors have an essential impact. It goes without saying that also all remaining boundary conditions such as shape and dimension of the cross-section need to be considered for the design.*

Der Tunnelbau im quellfähigen Gebirge ist insbesondere vor dem Hintergrund des bevorstehenden Projekts Stuttgart 21, für das mehr als 20 km Tunnel im anhydritführenden Gebirge gebaut werden müssen [1], von großer Bedeutung. Um einen sicheren und wirtschaftlichen Entwurf für diese Tunnel zu ermöglichen, ist es unter anderem wichtig, die Ursachen für Schäden und unvorhergesehene Hebungen, die in der Vergangenheit aufge-

treten sind, zu erkennen und Wege zu deren Vermeidung zu finden.

Quellvorgänge im unausgelaugten Gipskeuper werden außer durch die im Gestein vorhandenen Tonminerale, durch Lösung von Anhydrit und die anschließende Auskristallisation von Gips bestimmt [2,3]. Das Feststoffvolumen nimmt dabei um circa 61 Vol.-% zu, und es kommt dementsprechend zu Hebungen oder zu großen Drücken, wenn diese Hebungen verhindert werden.

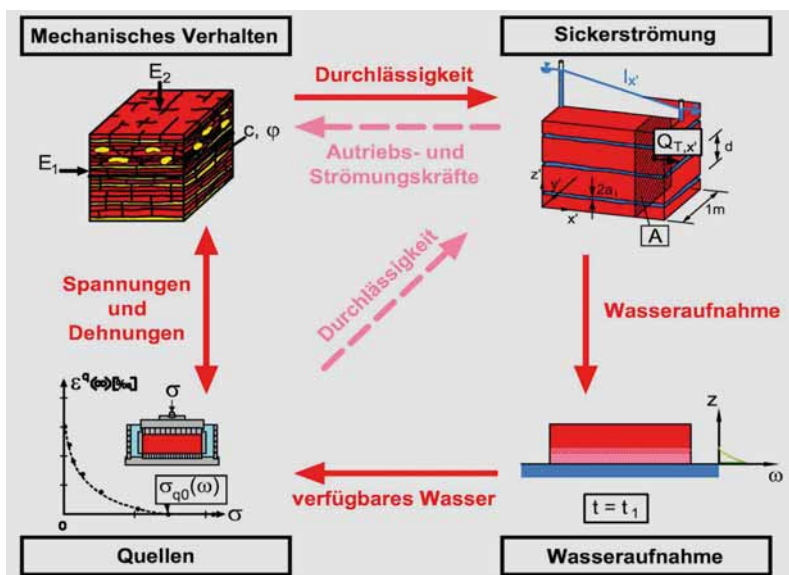
Insbesondere wenn Anhydrit fein verteilt in Tonsteinlagen ansteht, besitzt der unausgelaugte Gipskeuper ein sehr hohes Quellpotenzial. Bei vollständiger Umwandlung des im Gebirge vorhandenen Anhydrits in Gips und unter der Annahme, dass Volumenvergrößerungen vollständig verhindert werden, können maximale Drücke von circa 9 bis 10 MN/m<sup>2</sup> auftreten [4].

## Modellbildung

Um eine sichere und wirtschaftliche Bemessung von Tunneln im quellfähigen Gebirge zu ermöglichen, wurden bei WBI Modelle und Berechnungsverfahren entwickelt, in denen das Spannungsdehnungsverhalten von und die Sickerströmung im klüftigen Fels sowie die Wasseraufnahme des Gesteins und das Quellen berücksichtigt und miteinander gekoppelt sind (Bild 1) [3].

Im ungestörten Zustand ist der unausgelaugte Gipskeuper in der Regel horizontal geschichtet und vertikal geklüftet (Bild 2) [8]. Die Schicht-

Bild 1. Modellbildung.



fugen haben meist eine größere Erstreckung. Dementsprechend sollte nach den Ergebnissen durchgeführter Kalibrierungsberechnungen für ausgeführte Tunnelbauwerke in Bezug auf die Schichtfugen keine Kohäsion und ein Reibungswinkel von etwa 30° angesetzt werden. Da die nahezu vertikalen Klüfte oft an den Schichtfugen absetzen und größere Abstände besitzen als die Schichtfugen, kann für die Klüfte von höheren Scherfestigkeiten ausgegangen werden. Der charakteristische Verformungsmodul für den Fels beträgt rund 4.000 MN/m<sup>2</sup>. Der charakteristische Wert für die Wasserdurchlässigkeit wurde zu 10<sup>-9</sup> m/s bestimmt. Der Fels ist im ungestörten Zustand somit in der Regel nur sehr gering durchlässig.

**Validierung**

Die für den Tunnelbau im unausgelaugten Gipskeuper entwickelten Modellvorstellungen wurden anhand langjähriger Messreihen, die im Untersuchungsstollen im Freudensteintunnel durchgeführt wurden, erfolgreich kalibriert (Bild 3).

Der Stollen wurde abschnittsweise nach dem Ausweichprinzip (Bild 3, Schnitt 1-1), dem Widerstandsprinzip (Schnitt 2-2) und mit einem Hufeisenquerschnitt mit nach unten verankerten Sohlplatten (Schnitte 3-3 und 4-4) ausgebaut.

Anschließend wurde der Fels unterhalb der Stollensohle gezielt über 6 m lange, in einem Raster von circa 1 m x 1 m angeordnete Bohrungen bewässert.

Durch die Bewässerung wurden gezielt Quellvorgänge ausgelöst. Die resultierenden Verschiebungen, Spannungsänderungen und auch die aufgenommenen Wassermengen wurden gemessen. Die Kalibrierungsrechnungen haben gezeigt, dass sich mit den in dem Bild 2 zusammengestellten Kennwerten sämtliche Messergebnisse für die unterschiedlichen Ausbaumethoden abbilden lassen. Da die angenommenen Kennwerte auch durch die Ergebnisse von Labor- und Feldversuchen begründet werden können, kann davon ausgegangen werden, dass die genannten Modelle und Kennwerte als eine Grundlage für den Entwurf und die Bemessung von Tunneln im quellfähigen Gebirge verwendet werden können.

Nähere Informationen zur Kalibrierung und Validierung der Modelle können unter anderem [6, 7] entnommen werden.

**Planung und Bau**

**Einfluss der Lage des Anhydritspiegels im Vergleich zum Tunnel**

Beim Entwurf von Tunneln im quellfähigen Gebirge sind wie bei allen Bauwerken die jeweiligen Randbedingungen zu betrachten. Dies gilt auch beim Vergleich unterschiedlicher Bauvorhaben.

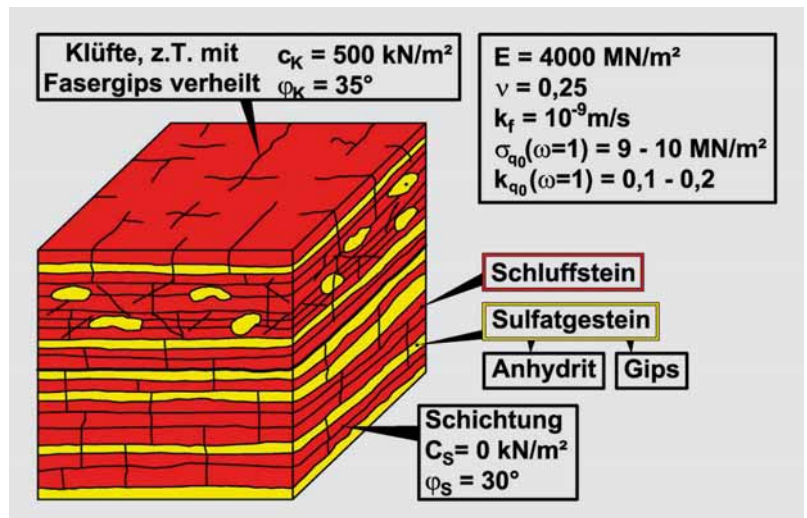


Bild 2. Unausgelaugter Gipskeuper, Gefügemodell und Kennwerte.

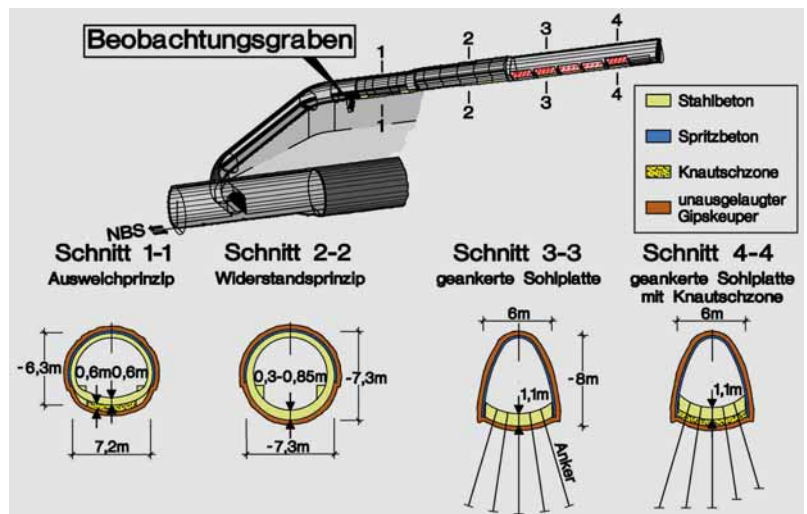
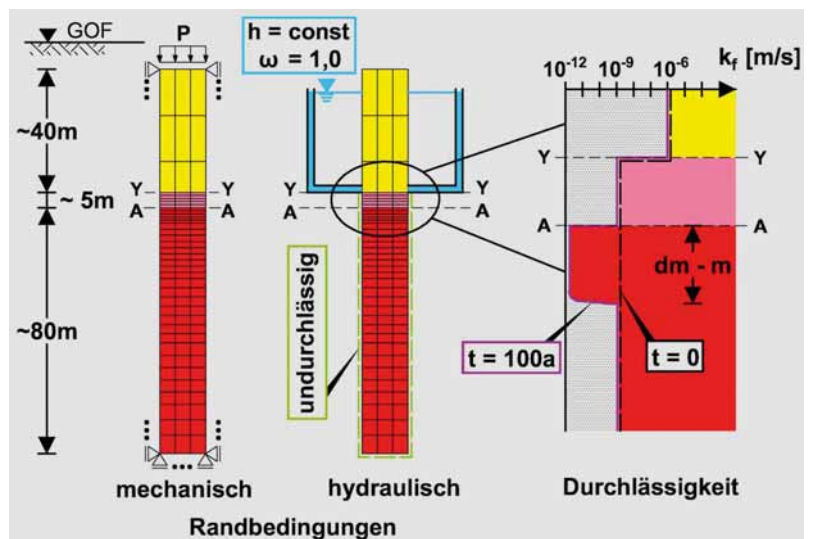


Bild 3. Versuchsstollen U1 Freudensteintunnel, 20 Jahre Messen und Beobachten.

Bild 4. Natürliche Abdichtung.





Wittke:  
Einflüsse auf den Entwurf von Tunneln im anhydritführenden Gebirge

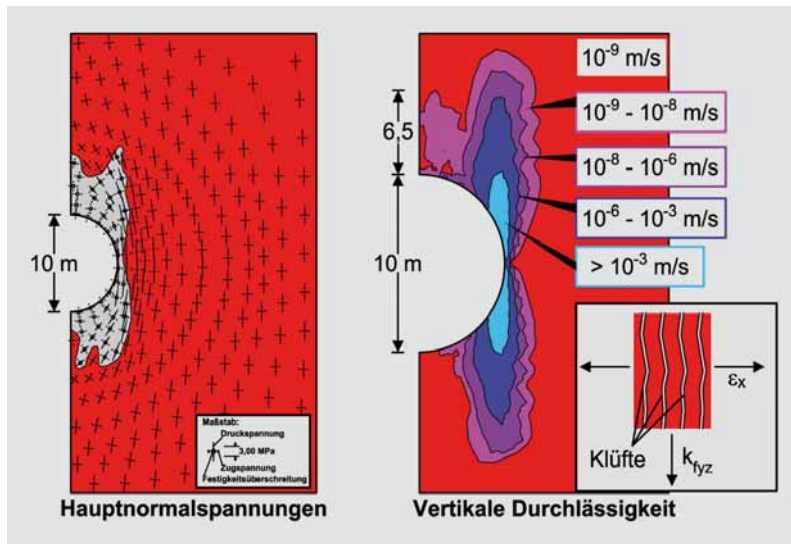


Bild 5. Ermittlung der Auflockerungszone.

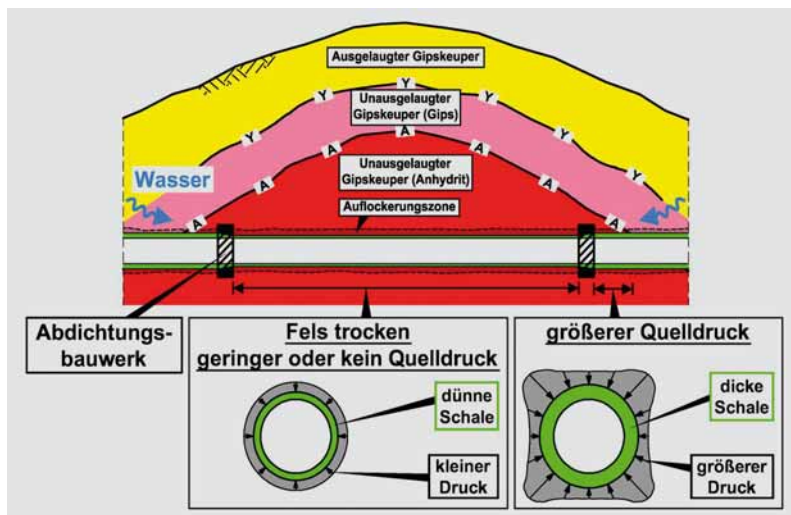
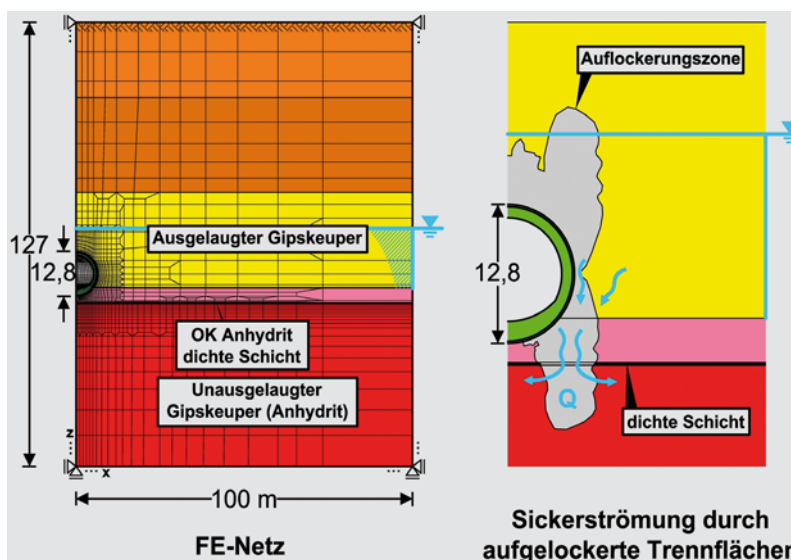


Bild 6. Abdichtung der Auflockerungszone.

Bild 7. Anhydritspiegel unterhalb der Tunnelsohle, Beispiel.



Im Rahmen dieses Beitrags soll als eine wesentliche Randbedingung für den Tunnelbau der Einfluss der Lage des Anhydritspiegels im Vergleich zum Tunnel näher betrachtet werden.

Unterhalb des Anhydritspiegels ist der unausgelaugte Gipskeuper in der Regel trocken [8], obwohl darüber meist grundwasserführende Schichten, wie zum Beispiel der ausgelaugte Gipskeuper anstehen. Dieser Umstand kann durch eine quellbedingte, natürliche Abdichtung des Gebirges im Bereich des Anhydritspiegels erklärt werden.

Diese natürliche Abdichtung des Gebirges lässt sich auch durch einfache Modellberechnungen mit dem oben beschriebenen Modell zeigen (Bild 4). Bei der betrachteten Säule kann Wasser von oben in den quellfähigen Gipskeuper eindringen. Dieses Wasser löst Quellvorgänge aus, die nach einem Berechnungszeitraum von etwa 100 Jahren zu einer deutlichen Verringerung der Durchlässigkeit in einer dezimeter- bis meterdicken Zone unterhalb des Anhydritspiegels führen. Diese Abdichtung führt nahezu zu einer Unterbrechung der Wasserzufuhr von oben, sodass das Gebirge unterhalb trocken bleibt und es nicht zu Quellvorgängen kommen kann.

### Anhydritspiegel oberhalb der Tunnelfirste

Durch die natürliche Abdichtung bedingt, können Tunnel trocken aufgefahren werden, wenn sie einen ausreichenden Abstand zum Anhydritspiegel haben. Allerdings bildet sich durch Spannungsumlagerungen im Gebirge um den Tunnel herum eine Auflockerungszone aus, die eine erhöhte Durchlässigkeit gegenüber dem umgebenden Gebirge besitzt.

Um einen Eindruck über die Ausdehnung einer solchen Auflockerungszone zu gewinnen, sind in Bild 5 die Ergebnisse von FE-Berechnungen dargestellt, die für einen ungesicherten Tunnel mit einem Durchmesser von etwa 10 m durchgeführt wurden. In den in dem Bild 5 links grau markierten Bereichen kommt es infolge der Spannungsumlagerungen zu Festigkeitsüberschreitungen entlang der horizontalen Schichtflächen und der vertikalen Klüfte. Diese führen zu dilatanten Verschiebungen und somit zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit. Durch dilatante Verschiebungen auf den Klüften vergrößert sich beispielsweise die vertikale Durchlässigkeit in dem entsprechenden Bereich oberhalb und unterhalb der Ulmen von ursprünglich  $10^{-9}$  m/s auf Werte  $> 10^{-3}$  m/s im unmittelbaren Nahbereich des Tunnels.

Durchbricht diese Auflockerungszone die natürliche Abdichtungszone im Bereich des Anhydritspiegels, kann Wasser in die Umgebung des Tunnels gelangen. Außerdem kann Wasser in Tunnellängsrichtung durch diese Zone fließen. Um das zu verhindern, sollten im Bereich des Übergangs zwischen den wasserführenden und den quellfähigen Schichten Abdichtungsbauwerke errichtet werden, die diese Zonen abdichten (Bild 6). Wenn der restliche Bereich

des Tunnels einen ausreichend großen Abstand zum Anhydritspiegel hat, kann der von der Wasserseite abgewandte Teil des Tunnels gegen einen geringeren Quelldruck bemessen werden, da das Gebirge hier trocken ist. Im Bereich und auf der „Wasserseite“ der Abdichtungsbauwerke sind allerdings Quelldrücke bei der Bemessung zu berücksichtigen.

### Anhydritspiegel unterhalb der Tunnelsohle

Liegt der Anhydritspiegel unterhalb der Tunnelsohle, kann es ebenfalls zu Quellvorgängen kommen, sobald die beschriebene Auflockerungszone die dichte Zone im Bereich des Anhydritspiegels durchbricht, wie dies bei dem Beispiel im Bild 7 der Fall ist. Bei dieser Konstellation kann Wasser aus dem wasserführenden Gebirge durch die Auflockerungszone in den quellfähigen Bereich eindringen und dort zu Quellvorgängen führen.

Da der obere Teil des Tunnels bei dem hier gewählten Beispiel im stark verformbaren, ausgegauten Gebirge liegt, zeigen die Berechnungen, dass sich sowohl der Tunnel als auch das Gebirge oberhalb und neben dem Tunnel hebt (Bild 8).

Da das Quellen von der Wasserzufuhr abhängt, hat die angenommene Ausgangsdurchlässigkeit des Gebirges im quellfähigen Bereich einen deutlichen Einfluss auf die Hebungen. Für eine Ausgangsdurchlässigkeit von  $10^{-6}$  m/s, die an der oberen Grenze des zu erwartenden Schwankungsbereichs liegt, ergeben sich nach einem Simulationszeitraum von 11,5 Jahren Sohlhebungen von circa 6 cm. Für eine Ausgangsdurchlässigkeit von  $10^{-7}$  m/s ergeben sich zum gleichen Zeitpunkt nur Hebungen von etwa 2 bis 3 cm.

In weiteren Berechnungen wurde ein Tunnel untersucht, der unterhalb der Sohle eine Knautschzone besitzt (VNS-Prinzip, Widerstands-/Ausweichprinzip). Der Tunnel schneidet in das quellfähige Gebirge ein. Der obere Teil des Querschnitts soll im anhydritfreien, aber unausgauten Gipskeuper liegen (Bild 9).

Obwohl eine Knautschzone vorgesehen wurde, ergeben sich in diesem Fall deutliche Sohlhebungen, wenn die Ausgangsdurchlässigkeit des Gebirges  $10^{-6}$  m/s beträgt (Bild 9). Bei einer Ausgangsdurchlässigkeit des Gebirges von  $10^{-8}$  m/s hebt sich die Tunnelsohle dagegen nur geringfügig.

Um Möglichkeiten zu untersuchen, Hebungen auch in dem Fall zu verhindern, dass das Gebirge eine hohe Ausgangsdurchlässigkeit besitzt, wurde in einem weiteren Fall der Einfluss von Abdichtungsinjektionen im Bereich der Auflockerungszone untersucht (Bild 10). Die Berechnungen zeigen einen deutlich positiven Effekt.

### Anhydritspiegel in Höhe der Querschnittsmitte

Berechnungen für einen kreisförmigen, nach dem Widerstandsprinzip ausgeführten Tunnel,

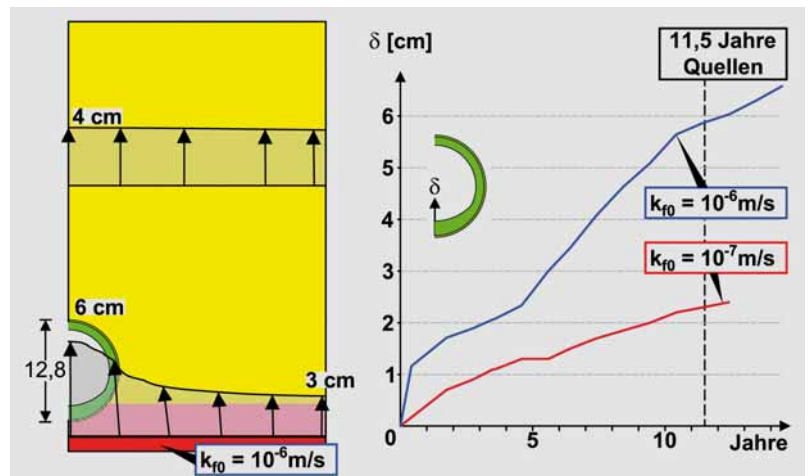


Bild 8. Anhydritspiegel unterhalb der Tunnelsohle, Quellhebungen.

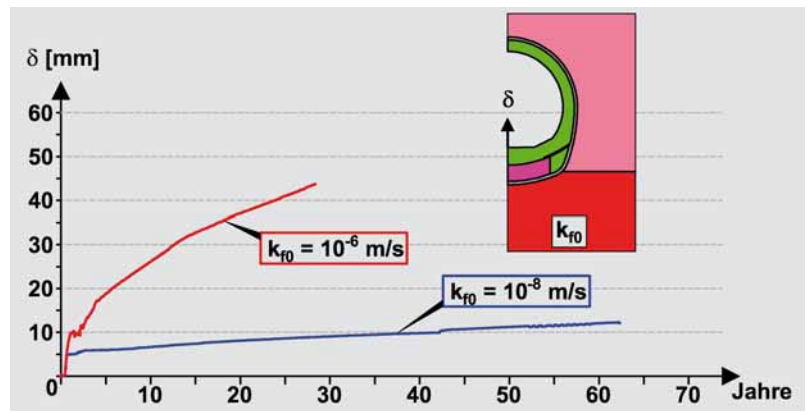


Bild 9. Anhydritspiegel im Bereich der Tunnelsohle, Quellhebungen, erhöhte Durchlässigkeit.

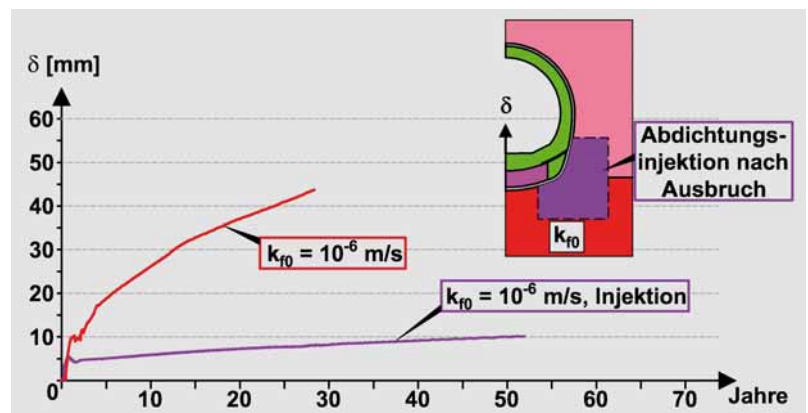
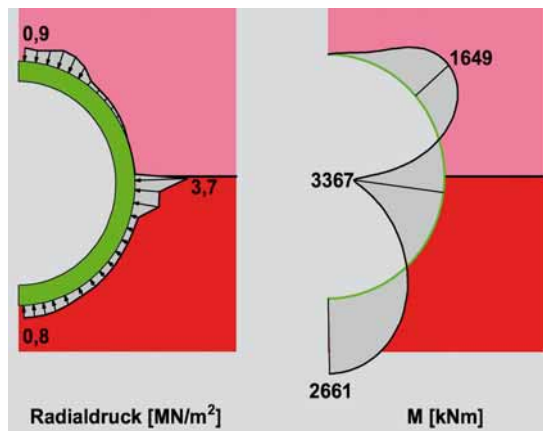


Bild 10. Anhydritspiegel im Bereich der Tunnelsohle, Quellhebungen, erhöhte Durchlässigkeit, Injektionen.

bei dem der Anhydritspiegel in Höhe der Ulmen ansteht, zeigen, dass sich in diesem Fall deutliche Quelldrücke im Bereich der Ulmen einstellen, wohingegen im Bereich der Sohle nahezu keine Quelldrücke auftreten (Bild 11). Dementsprechend kommt es zu einer deutlichen Momentenbeanspruchung, die beim Entwurf des Tunnels berücksichtigt werden sollte.

Wittke:

Einflüsse auf den Entwurf von Tunneln im anhydritführenden Gebirge



**Bild 11. Anhydritspiegel in Höhe der Querschnittsmitte, Berechnungsergebnisse nach 100 Jahren Quellen.**

Diese Quelldruckbeanspruchung kann durch die Anordnung einer Knautschzone im Bereich der Sohle nicht verhindert werden. Gegebenenfalls wird die Beanspruchung der Schale als Folge der geringen Bettung im Bereich der Sohle bei Anordnung einer Knautschzone sogar noch größer.

#### Quellennachweis

[1] Penn, S.; Breidenstein, M.: Herausforderungen beim Tunnelbau für das Großprojekt Stuttgart 21 –

Wendlingen-Ulm. In: Proc. 20. Symp. Felsmechanik und Tunnelbau, Mining & Geo 03, 2012.

[2] Rauh, F.: Untersuchungen zum Quellverhalten von Anhydrit und Tongesteinen im Tunnelbau. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Vol. 11, München, 2009.

[3] Wittke, M.: Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 13, Glückauf: Essen, 2003.

[4] Wittke, W.; Wittke, M.; Wahlen, R.: Zum Quellgesetz für den anhydritführenden, unausgelaugten Gipskeuper. geotechnik 27(2), 112-117, 2004.

[5] Wittke, W.; Züchner, F.: Felsmechanische Eigenschaften des Stuttgarter Baugrunds und ihre Auswirkungen auf den Tunnelbau. geotechnik 31 (2), 101-107, 2008.

[6] Wahlen, R.: Validierung eines Berechnungsverfahrens für Tunnelbauwerke in quellfähigem Fels. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 17, VGE: Essen, 2009.

[7] Wahlen, R.; Wittke, W.: Kalibrierung der felsmechanischen Kennwerte für Tunnelbauten in quellfähigem Gebirge. geotechnik 32 (4), 226-233, 2009.

[8] Wittke, W.: Grundlagen für die Bemessung und Ausführung von Tunneln in quellendem Gebirge und ihre Anwendung beim Bau der Wendeschleife der S-Bahn Stuttgart. Veröffentl. des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 6, 1978.