

Grundlagen der Bemessung und des Entwurfs für Tunnel in anhydritführendem Gebirge

Fundamentals for Design and Dimensioning of the Internal Lining of Tunnels in anhydritic Rocks

Dr.-Ing. Martin Wittke, Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann

Zusammenfassung

Für das Bahnprojekt Stuttgart - Ulm sind mehr als 20 km Tunnel in den quellfähigen Schichten des anhydritführenden unausgelaugten Gipskeupers zu bauen. Die Bemessung der Auskleidung für diese Tunnelabschnitte erfolgt auf der Grundlage einer von WBI in den letzten Jahrzehnten entwickelten Modellvorstellung und dem darauf aufbauenden Berechnungsverfahren, das anhand von Labor- und Großversuchen sowie durch Nachrechnung bestehender Tunnelbauwerke kalibriert wurde. Das Modell sowie die wesentlichen Grundlagen werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt.

Eine Quelldruckbeanspruchung muss bei der Bemessung der Tunnelauskleidung berücksichtigt werden, sobald die durch den Tunnelbau verursachte Auflockerungszone, die eine größere Durchlässigkeit besitzt als der ungestörte Fels, den Anhydritspiegel erreicht. Anhand von zwei Berechnungsbeispielen kann gezeigt werden, dass die Höhenlage des Anhydritspiegels einen entscheidenden Einfluss auf die Bemessung der Auskleidung hat. Infolge Quellen kommt es in Höhe und unmittelbar unterhalb des Anhydritspiegels zu einer örtlich begrenzten Quelldruckbeanspruchung der Innenschale. Diese Beanspruchung führt an gleicher Stelle zu einer sehr großen erforderlichen Biegedruck- und Schubbewehrung.

In Abhängigkeit vom Verlauf des Anhydritspiegels in Tunnellängsrichtung kommt es auch zu einer Biegedruck- und Schubbeanspruchung in Längsrichtung des Tunnels, die bei der Bemessung zu berücksichtigen ist. Da dem Verlauf des Anhydritspiegels eine sehr hohe Bedeutung für die Bemessung der Schale zukommt, muss diese Schichtgrenze im Zuge der Vortriebsarbeiten durch baubegleitende Kartierungen, Erkundungen sowie durch mineralogische Untersuchungen möglichst genau festgestellt werden.

Die aus der Quelldruckbeanspruchung resultierenden, bereichsweise hohen Bewehrungsgehalte sowohl für die Biegedruck- als auch für die Schubbewehrung stellen auch im Hinblick auf die Planung der Bewehrungsführung und die konstruktive Durchbildung eine große Herausforderung dar. Hierüber kann sicherlich in Zukunft noch berichtet werden.

Executive Summary

More than 20 km of tunnels in swelling, anhydritic rocks have to be constructed in connection with the railway project Stuttgart – Ulm. The design and dimensioning for the internal lining of the corresponding tunnel sections is elaborated on the basis of models and corresponding numerical analysis methods, which have been elaborated by WBI during the last years. The model has been calibrated with the aid of laboratory and large-scale field tests

as well as by means of back-analyses of measurement data obtained from existing tunnels during the last years. The model and the corresponding fundamentals are described in this paper.

As soon as the tunnel cross section and the loosened zone in the ground surrounding the tunnel are located adjacent to the anhydrite level, swelling pressures must be accounted for in the design. On the basis of two separate FE-analyses it is outlined that the elevation of the anhydrite level with respect to the tunnel cross section has a remarkable influence on the design of the lining and the reinforcement.

As a consequence of swelling, the lining is loaded mainly in a limited area immediately below the anhydrite level. This loading leads to a considerable amount of reinforcement required to withstand bending and normal thrust as well as the shear loading. Depending on the change of elevation of the anhydrite level along the tunnel, bending and shear forces also occur in longitudinal direction of the tunnel. Such loads must be accounted for in the design. Since the exact elevation and shape of the anhydrite level has a remarkable influence on the design, it is very important to identify this figure with great care during construction by means of mapping, explorations and mineralogical investigations.

The comparatively high amount of bending and shear reinforcement resulting from the analyses also in view of design of reinforcement can be considered a challenging task, which probably will be further dealt with in future publications.

1. Einleitung

Der Tunnelbau im anhydritführenden unausgelaugten Gipskeuper hat in der Vergangenheit vielfach zu Problemen und zu Schäden beim Bau und während des Betriebs geführt (Wittke 2015). Einige Tunnelbauwerke, wie z. B. die Wendeschleife und der Hasenberg-tunnel der S-Bahn Stuttgart und der Freudensteintunnel auf der Neubaustrecke von Mannheim nach Stuttgart, konnten allerdings erfolgreich errichtet werden. Insbesondere da für das Bahnprojekt Stuttgart - Ulm mehr als 20 km Tunnel in den quellfähigen Schichten des Gipskeupers aufgeföhren werden, ist es wichtig, die Ursachen für das unterschiedliche Verhalten der Tunnelbauwerke zu kennen und die richtigen Schlussfolgerungen für den Entwurf von Tunnelbauwerken im quellfähigen Gebirge zu ziehen.

WBI hat sich in den vergangenen Jahrzehnten im Rahmen von Projektarbeit und hausinternen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben dieser Thematik intensiv angenommen und Modelle sowie darauf aufbauende Berechnungsverfahren entwickelt, die es ermöglichen, eine Bemessung der Tunnelauskleidung durchzuführen (Wittke-Gattermann 1998, Wittke 2003, Wahlen 2009). Auf dieser Grundlage werden im nachstehenden Beitrag einige wesentliche Grundsätze für den Entwurf und die Bemessung vorgestellt.

2. Quellgesetz

Bei Kontakt mit Wasser geht Anhydrit (CaSO_4) zunächst in Lösung. Nach Erreichen der Sättigungskonzentration fällt Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) aus der Lösung aus. Dieser Vorgang führt zu einer Vergrößerung des Feststoffvolumens von ca. 61 %.

Der unausgelaugte Gipskeuper hat beispielsweise in den Schichten des Mittleren Gipshorizonts einen Anhydritgehalt von ca. 30 % (Wittke-Gattermann 1998). Bei vollständiger Umwandlung des im Gebirge vorhandenen Anhydrits in Gips kommt es hier bei unbehindertem Quellen und vollständiger Umwandlung des vorhandenen Anhydrits in Gips zu einer Vergrößerung des Feststoffvolumens um ca. 18 % ($0,3 \cdot 1,61 + 0,7 = 1,18$). Dafür müssen einem Kubikmeter Fels ca. 230 l Wasser zugeführt werden (Wittke 2003).

An den Universitäten Karlsruhe und Darmstadt wurden im Auftrag der DB im Zusammenhang mit dem Bau des Freudensteintunnels Langzeitquellversuche durchgeführt. Insgesamt wurden 25 Versuche in Karlsruhe und 18 Versuche in Darmstadt durchgeführt, die in den 80er Jahren begonnen wurden. Die Proben hatten mit wenigen Ausnahmen einen Durchmesser von ca. 8,1 cm und eine Ausgangshöhe von ca. 4 cm (Wittke-Gattermann 1998, Wahlen 2009, Wittke & Wittke & Wahlen 2004, WBI 2006).

Beispielhaft ist in Bild 1 das Ergebnis eines dieser Versuche dargestellt. Mit Ausnahme der Anfangszeit wurden hier bei gleichbleibender Auflast die auftretenden Quellhebungen bzw. -dehnungen gemessen. Nach ca. 20 Jahren traten bei einer Auflast von 2 MN/m^2 , quellbedingte Dehnungen von ca. 17 % auf (WBI 2006).

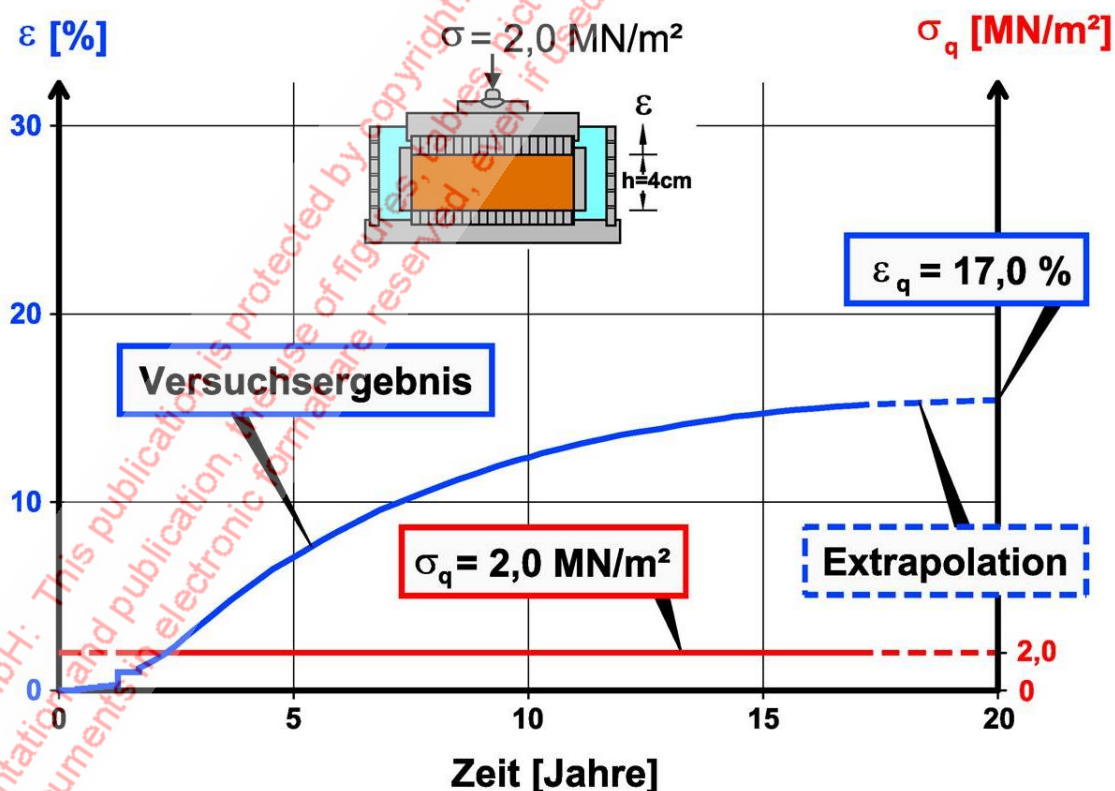


Bild 1: Versuch 1C, TH Karlsruhe, Gemessene Quelldehnungen und Quelldrücke im Zeitraum zwischen 1984 und 2001

Aus verschiedenen Gründen wurden die Randbedingungen bei den o. g. 43 Versuchen häufig geändert. Um eine Auswertung im Hinblick auf die Formulierung eines Quellgesetzes zu ermöglichen, ist es daher erforderlich, entsprechende Wertepaare durch Extrapolation zu ermitteln. Diese Auswertung führt für die Versuche an der TH Karlsruhe zu den in Bild 2 in grüner Farbe dargestellten Punkten (Wahlen 2009 und WBI 2006). Auf der Grundlage der Ergebnisse der Laborversuche kann das in Bild 2 dargestellte Quellgesetz somit für die vollständige Umwandlung von Anhydrit in Gips bestätigt werden (Wahlen 2009, Wittke & Wittke & Wahlen 2004, WBI 2006). Die durch eine Regressionsanalyse bestimmten Quellparameter und die zugehörige Kurve sind in roter Farbe dargestellt. Es ergibt sich ein maximal möglicher Quelldruck für vollständige Umwandlung von ca. 10 MN/m². Die vergleichsweise große Streuung der Versuchsdaten ist vermutlich auf die Inhomogenität der Proben im Hinblick auf den Anhydritgehalt im Ausgangszustand zurückzuführen.

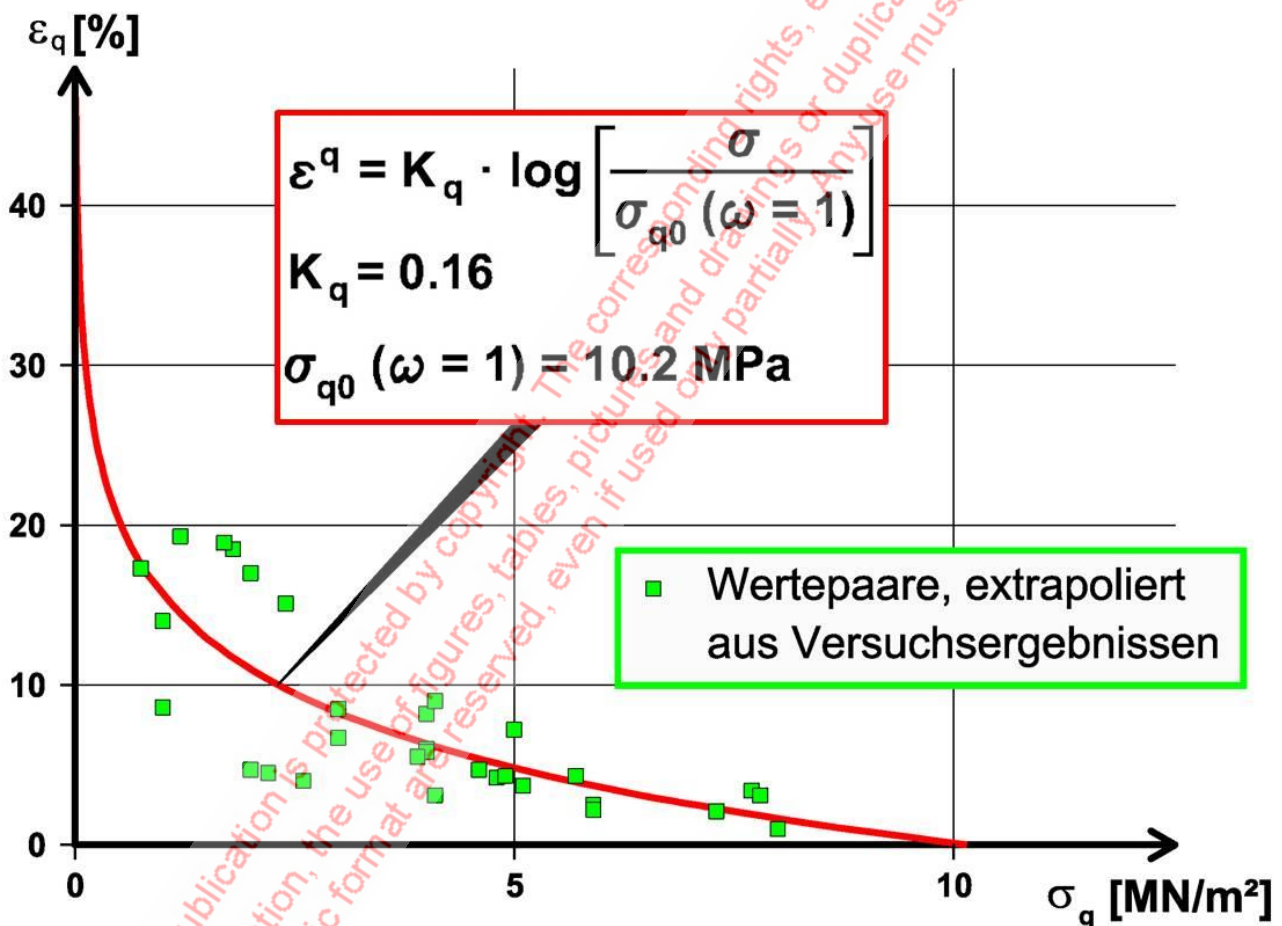


Bild 2: Quellgesetz für vollständige Umwandlung Anhydrit in Gips, Ableitung aus Versuchen an der TH Karlsruhe (Wahlen 2009 und WBI 2006)

Auffallend ist, dass die Versuche trotz der geringen Probenhöhe von nur 4 cm einen Zeitraum von ca. 20 Jahren benötigten, um eine vollständige Umwandlung von Anhydrit in Gips zu erreichen. Diese Zeitabhängigkeit ist hauptsächlich durch die Geschwindigkeit der Wasserzufuhr bestimmt (Wittke 2003). Im Labor kann das Wasser über die Filtersteine von unten und oben in die Probe eindringen (Bild 3). Der Prozess der Wasseraufnahme

und die "Umwandlung" von Anhydrit in Gips können, wie in (Wittke 2003) und (Wahlen 2009) gezeigt wird, im Modell durch die Diffusionstheorie beschrieben werden.

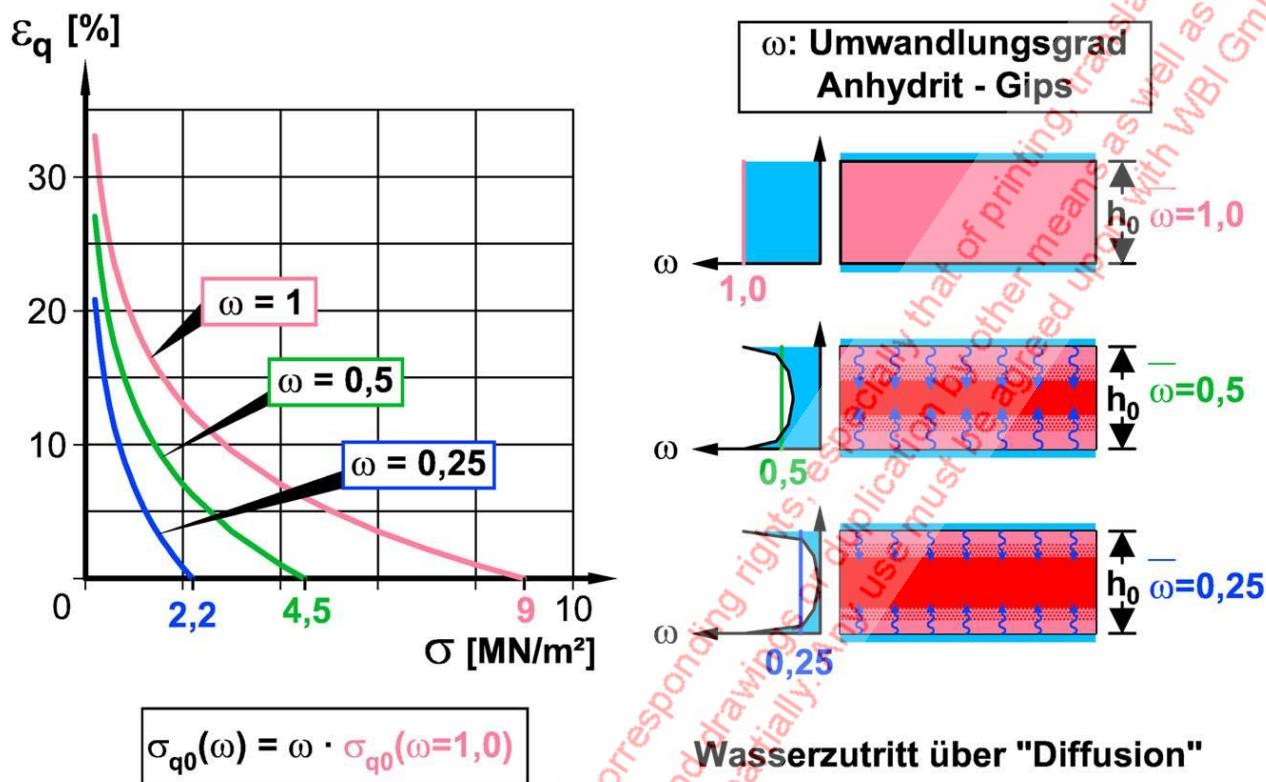


Bild 3: Quellgesetz für teilweise Umwandlung von Anhydrit in Gips

Wie in (Wittke 2003, Wahlen 2009, Wittke & Wittke & Wahlen 2004) gezeigt wird, kann aus den Ergebnissen der Messungen und Beobachtungen des Großversuchs im Untersuchungsstollen U1 des Freudensteintunnels sowie durch die numerische Interpretation der Ergebnisse durch das in (Wittke 2003) vorgestellte Modell und Berechnungsverfahren gezeigt werden, dass das Quellgesetz auch für Zustände gilt, in denen nur Teile des im Gebirge vorhandene Anhydrits in Gips umgewandelt wurden. Die Quellparameter $k_q(\omega)$ und $\sigma_{q0}(\omega)$ hängen dann vom Grad der Umwandlung von Anhydrit in Gips ω ab.

Weitere Untersuchungen und von WBI durchgeführte Kalibrierungsrechnungen für ausgewählte Tunnelbauwerke im südwestdeutschen Raum haben gezeigt, dass der maximal wirkende Quelldruck σ_{q0} linear vom Wasserdargebot bzw. vom Umwandlungsgrad ω abhängig ist (Bild 3). Für Fels mit einem Anhydritanteil von 30 % führt dieses Ergebnis zu der Schlussfolgerung, dass beispielsweise bei Zufuhr von ca. 115 l Wasser pro m^3 Fels und bei vollständiger Behinderung der Verschiebungen maximale Quelldrücke von ca. 4 bis 5 MN/m^2 auftreten.

3. Vorgänge beim Tunnelbau

In der Natur stehen die anhydritführenden Schichten meist unterhalb von grundwasserführenden Zonen an. Dennoch ist der Anhydrit trocken, und es treten keine messbaren Quellhebungen auf, wenn keine Eingriffe vorgenommen werden. Dieser Umstand kann durch

das Vorhandensein einer abgedichteten bzw. dichten Zone im Bereich des Anhydritspiegels erklärt werden.

Werden Tunnel in diesem Bereich gebaut, wird diese dichte Zone allerdings unterbrochen. Durch Spannungumlagerungen bildet sich im Gebirge um den Tunnel herum eine Auflockerungszone, in der die Öffnungsweiten der Trennflächen im Vergleich zum Ausgangszustand vergrößert sind (Bild 4, rechts oben, Wittke 2003 und Wittke 2014). Durch diese Bereiche kann Wasser über die Trennflächen unter bestimmten Bedingungen in das ursprünglich trockene Gebirge gelangen. Das so zur Verfügung stehende Wasser wird vom Gestein aufgenommen, und es kommt zu Quellerscheinungen, wie sie in Bild 4 links unten schematisch dargestellt sind.

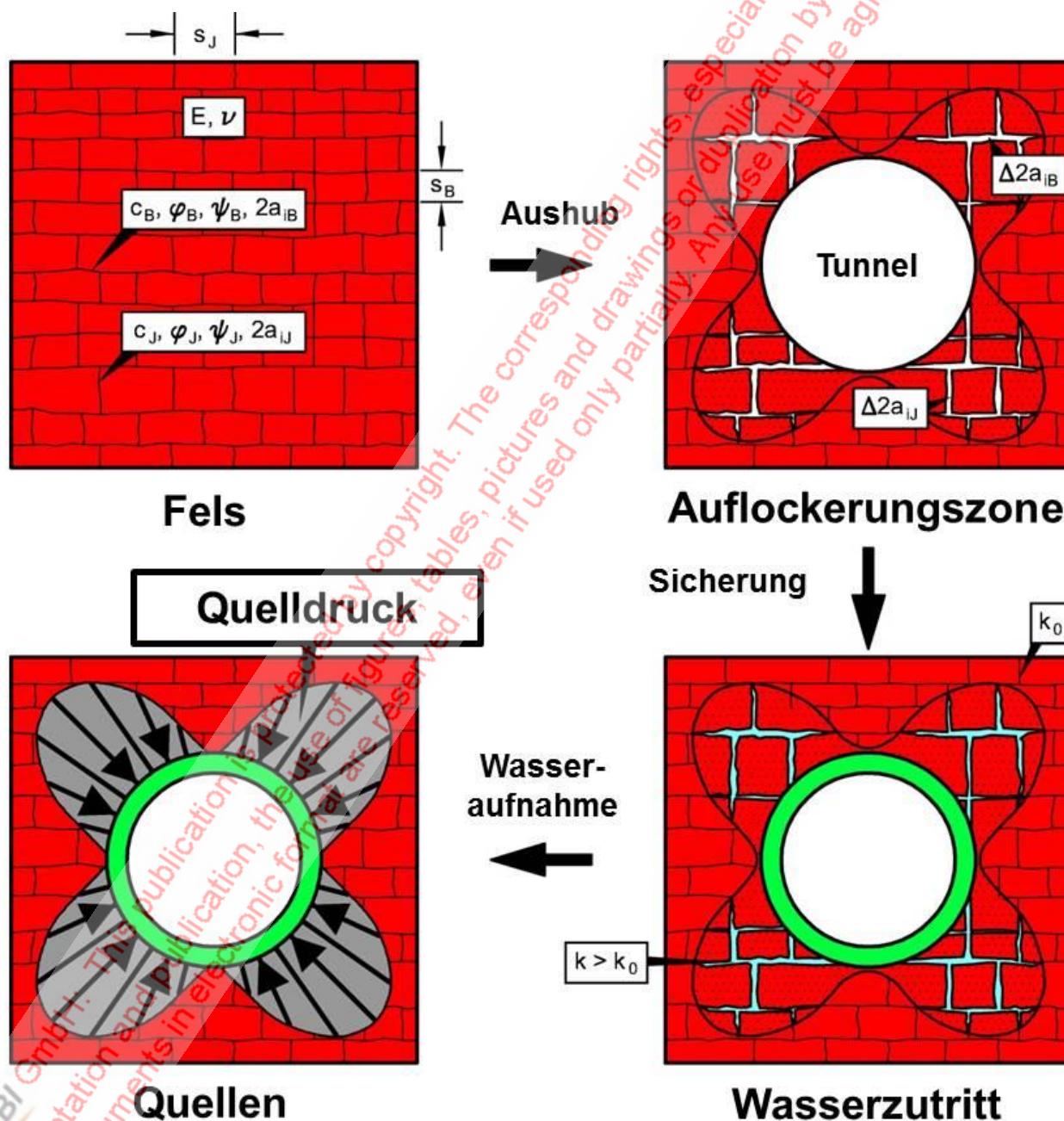


Bild 4: Wasserzutritte und Quellen beim Tunnelbau

Der Wasserzutritt in die quellfähigen Bereiche erfolgt wie erläutert im Wesentlichen über die Trennflächen. Die Durchlässigkeit eines klüftigen Fels ist dabei vom Abstand der Trennflächen und in der dritten Potenz von der Öffnungsweite der Trennflächen abhängig (Wittke 2014). D. h. bereits eine sehr kleine Öffnung der Trennflächen führt zu einer deutlichen Erhöhung der Durchlässigkeit des Gebirges.

Dieser Sachverhalt soll an dem in Bild 5 dargestellten Berechnungsbeispiel erläutert werden. Durch den Bau eines Tunnels mit einem Durchmesser von 10 m kommt es zu einer Gewölbebildung im Gebirge im Nahbereich des Tunnels. Die dadurch bedingte Schiefstellung der Hauptnormalspannungen führt insbesondere oberhalb und unterhalb der Ulmen zu einer Schubbeanspruchung entlang den horizontalen Schichtfugen und den vertikalen Klüften. Diese Beanspruchung führt durch Aufgleitbewegungen (Dilatanz) insbesondere in der unmittelbaren Umgebung des Tunnels zu einer deutlichen Erhöhung der Durchlässigkeit von 10^{-9} m/s im Ausgangszustand auf max. $> 10^{-3}$ m/s (Bild 5, Wittke 2003 und Wittke 2014). Die Berechnungen wurden mit dem Programmsystem FEST03 durchgeführt.

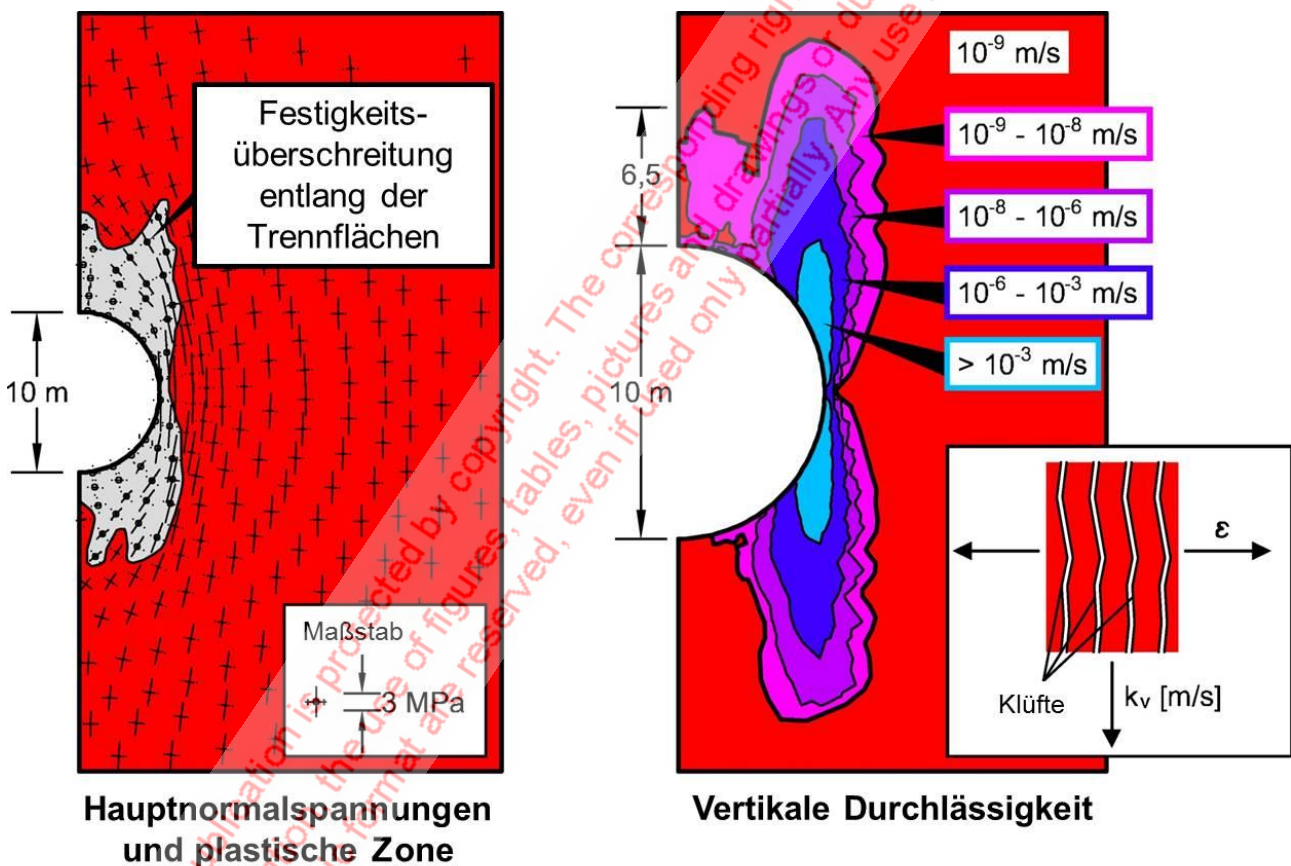


Bild 5: Erhöhung der Durchlässigkeit infolge Tunnelbau, Berechnungsbeispiel

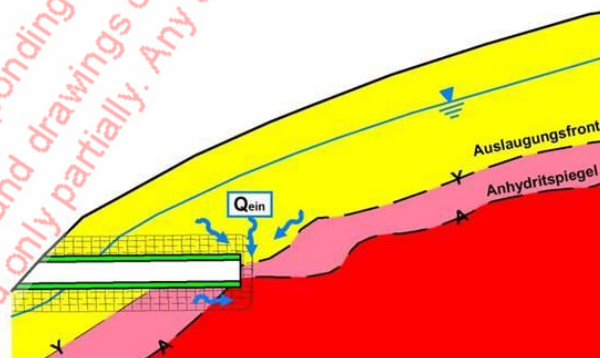
In Abhängigkeit von der Lage des Tunnels zum quellfähigen Gebirge und zu den wasserführenden Schichten - insbesondere der Auslaugungsfront - hat die Bildung der Auflockerungszone unterschiedliche Auswirkungen auf den Entwurf und die Bemessung von Tunnels.

Die für den Tunnelbau schwierigsten Verhältnisse liegen vor, wenn der obere Teil des Tunnelquerschnitts im wasserführenden Gebirge liegt und im Bereich der Sohle Anhydrit ansteht. In einem solchen Fall können, sofern keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden, bereits während des Baus größere Wassermengen im Bereich der Ortsbrust und auch dahinter über die Auflockerungszone in das quellfähige Gebirge gelangen (Bild 6, Punkt 1). Das gilt, sofern die Auflockerungszone bis zum Anhydritspiegel reicht, auch wenn das quellfähige Gebirge etwas unterhalb der Tunnelsohle ansteht (Bild 7).

Etwas günstiger stellt sich die Situation dar, wenn der Tunnel unterhalb der Auslaugungsfront liegt und auch die Auflockerungszone nur noch geringfügig in die wasserführenden Schichten einschneidet. Dann können nur noch geringere Wassermengen von oben in das quellfähige Gebirge gelangen (Bild 6, Punkt 2). Wenn der Tunnel einen ausreichend großen Abstand zum wasserführenden Gebirge hat und die Auflockerungszone nicht mehr bis zum Anhydritspiegel reicht, können Quellvorgänge nur noch durch Wasser ausgelöst werden, das in Tunnellängsrichtung über die Auflockerungszone zufließt oder durch unsachgemäße Bauausführung in den Untergrund eingebracht wird (Bild 6, Punkt 3).

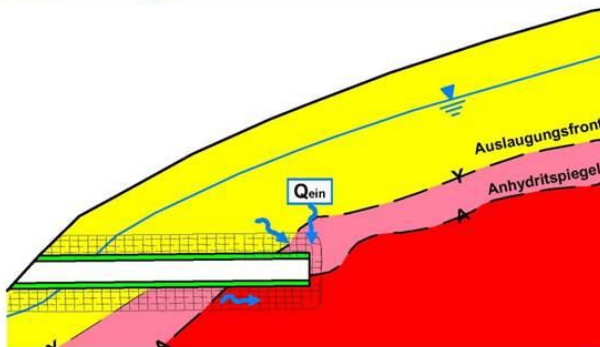
1

**Anhydrit im Bereich der Sohle;
Wasserführender ausgelaugter
Gipskeuper im Bereich der Firste**



2

**Anhydrit im Bereich der Sohle;
Wasserführender ausgelaugter
Gipskeuper oberhalb der Firste,
aber im Einflussbereich der
Auflockerungszone**



3

**Tunnel vollständig im anhydrit-
führenden, unausgelaugten
Gipskeuper**

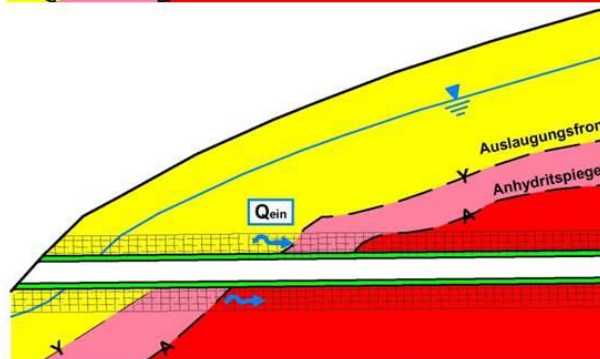


Bild 6: Erhöhung der Durchlässigkeit infolge Tunnelbau, Berechnungsbeispiel

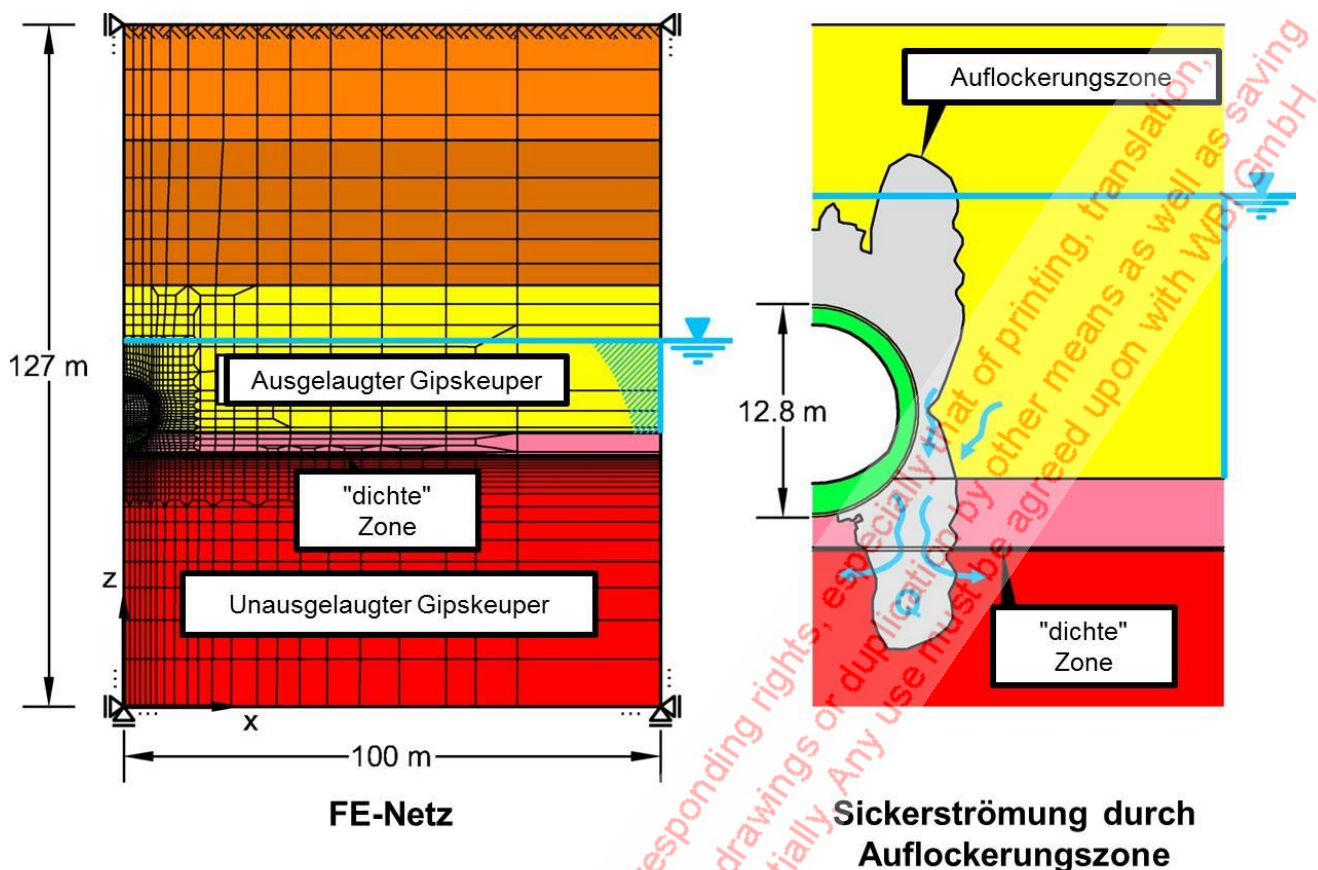


Bild 7: Anhydritspiegel unterhalb der Tunnelsohle, Wasserzutritte infolge Erhöhung der Durchlässigkeit beim Tunnelbau, Berechnungsbeispiel

4. Einfluss der Höhenlage des Anhydritspiegels auf die Bemessung der Tunnelauskleidung

Üblicherweise nähert sich der Anhydritspiegel im Tunnelbau im Verlauf des Vortriebs von unten an den Tunnelquerschnitt an. Eine Quelldruckbeanspruchung ist in solchen Fällen bei der Bemessung zu berücksichtigen, sobald der Abstand zwischen der Tunnelsohle und dem Anhydritspiegel kleiner ist als die Ausdehnung der Auflockerungszone im Gebirge (Bild 7).

Die Höhenlage des Anhydritspiegels im Vergleich zum Tunnelquerschnitt hat dabei eine entscheidende Bedeutung für die Bemessung. Das soll nachfolgend anhand der Ergebnisse von 2 FE-Berechnungen erläutert werden, die mit dem Modul SWELL des Programmsystems FEST03 durchgeführt wurden (Witke 2003 und Witke 2014).

Im ersten Fall wird angenommen, dass der Anhydritspiegel in Höhe der Querschnittsmitte ansteht. Das wasserführende Gebirge steht unmittelbar oberhalb der Tunnelfirste an (Bild 8, graue Schicht im linken Bild). Infolge des Baus des Tunnels kommt es in der Umgebung des Tunnels zu Überschreitungen der Festigkeit entlang der Trennflächen (Bild 8, Mitte). In den entsprechenden Bereichen vergrößert sich, wie oben beschrieben, die Durchlässigkeit des Gebirges im Vergleich zum Ausgangszustand. Somit kann Wasser von oben in die quellfähigen Schichten unterhalb des Anhydritspiegels gelangen. Die dadurch ausge-

lösten Quellvorgänge führen nach 100 Jahren zu den in Bild 8 rechts dargestellten Radialdrücken auf die Innenschale. Man erkennt, dass es durch die Quellvorgänge zu einer nahezu singulären Beanspruchung der Innenschale in Höhe des Anhydritspiegels kommt, während die auf die Innenschale wirkenden Radialdrücke im Bereich der Sohle und der Firste deutlich kleiner sind. Rechnerisch tritt ein maximaler Radialdruck von $3,3 \text{ MN/m}^2$ auf.

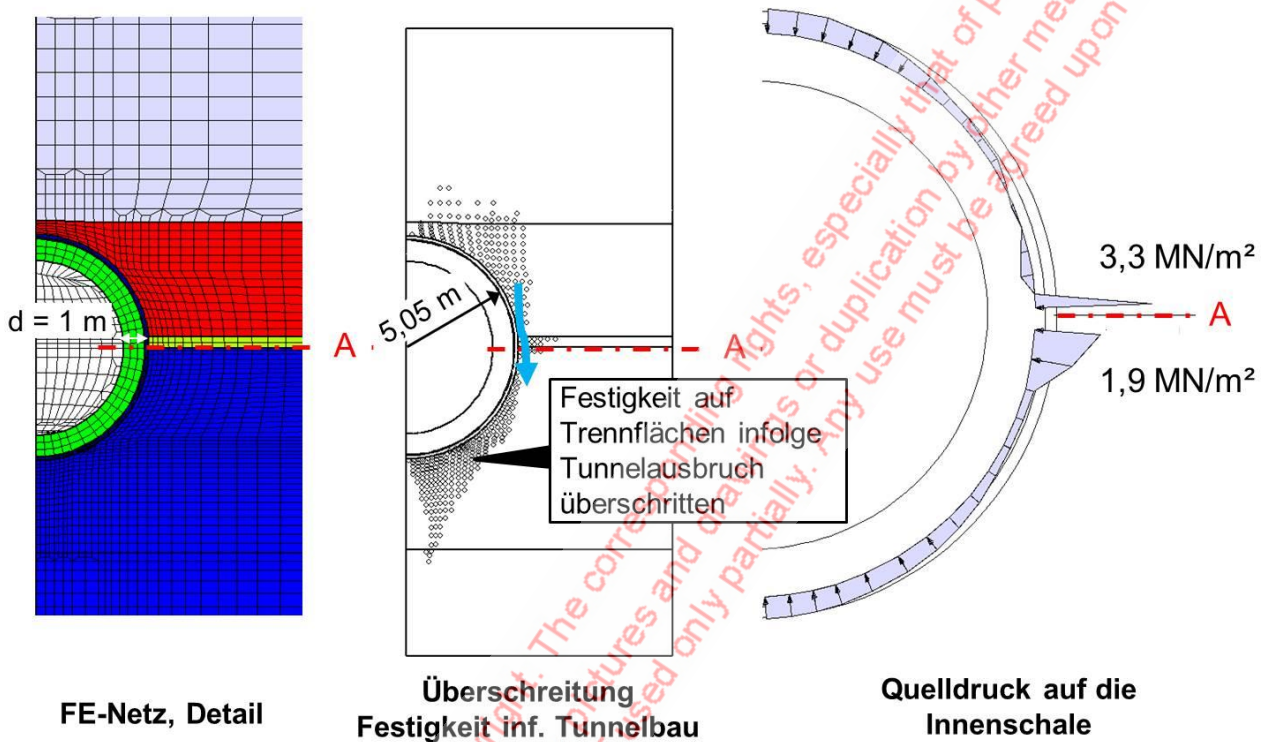


Bild 8: Anhydritspiegel in Höhe der Ulme, FE-Netz, Zonen mit Festigkeitsüberschreitung auf Trennflächen und Quelldruckbeanspruchung der Innenschale nach 100 Jahren Quellen

Die Quelldruckbeanspruchung führt zu den in Bild 9 dargestellten Schnittgrößen. Im Bereich, in dem die größten radialen Quelldrücke auftreten, d. h. in Höhe des Anhydritspiegels, sind die Momentenbeanspruchung (Zug innen) und die Querkräfte am größten. Gleichzeitig sind die Normalkräfte in der Schale hier aufgrund der kleineren Beanspruchung in z-Richtung am geringsten. Aus der Bemessung für eine 1 m dicke Schale resultiert für den Lastfall Quelldruck in diesem Bereich eine maximale Biegedruckbewehrung von ca. $120 \text{ cm}^2/\text{m}$ auf der Innenseite des Querschnitts (Bild 10). Auf der Außenseite ergibt sich die größte Biegedruckbewehrung im Bereich der Sohle. Die örtlich begrenzte radiale Quelldruckbeanspruchung führt darüber hinaus zu einer vergleichsweise großen erforderlichen Schubbewehrung.

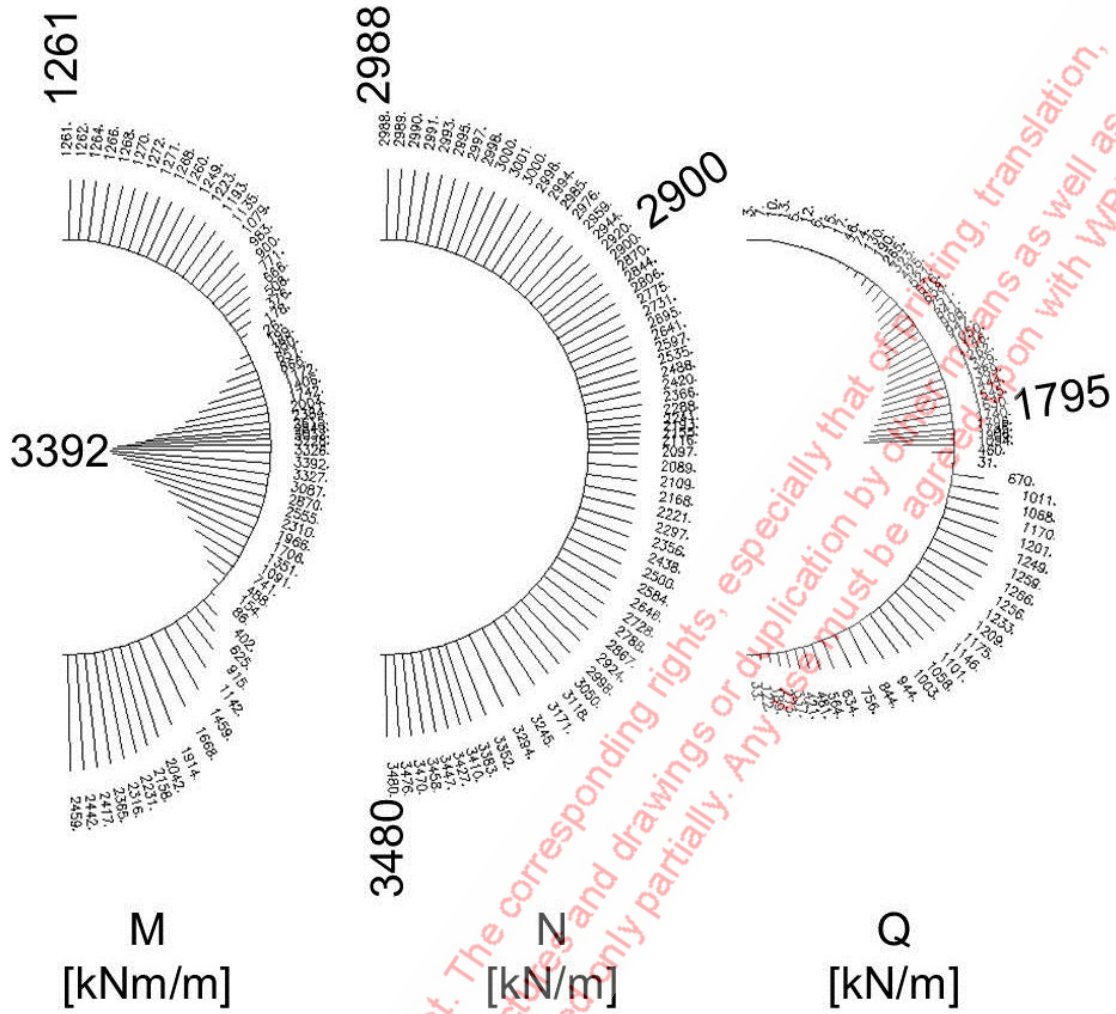
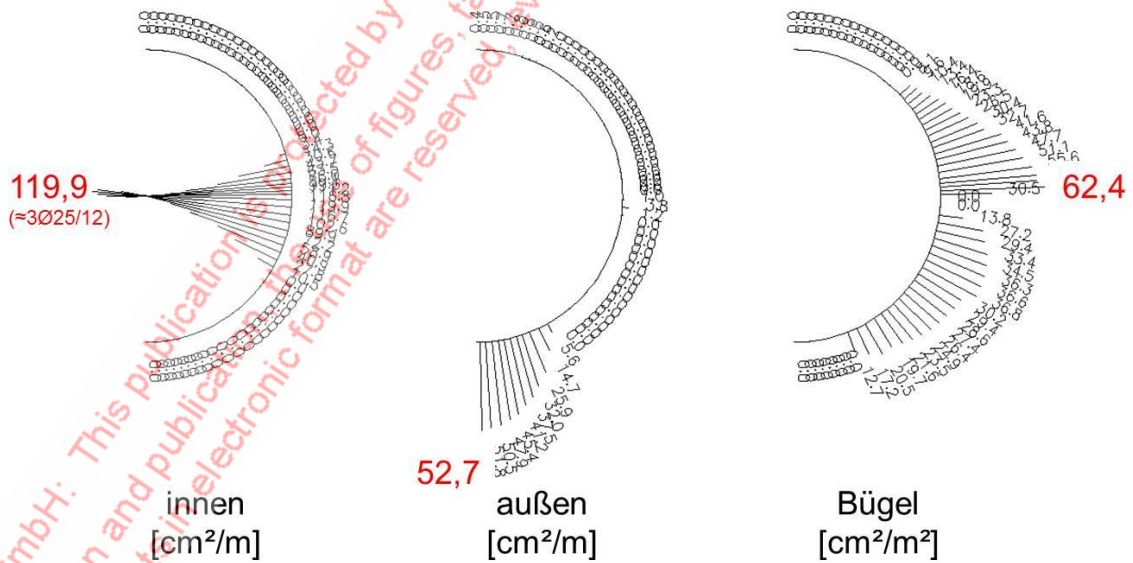


Bild 9: Anhydritspiegel in Höhe der Ulme, Schnittgrößen nach 100 Jahren Quellen



G45/55, BSt 500/550, h = 100 cm, d₁ = 15 cm

Bild 10: Anhydritspiegel in Höhe der Ulme, erforderliche Bewehrung für den Lastfall Quellen (100 Jahre Quellen)

Auch wenn der Anhydritspiegel im oberen Bereich der Ulme ansteht, kommt es zu einer örtlich begrenzten Quelldruckbeanspruchung der Schale in Höhe bzw. unmittelbar unterhalb des Anhydritspiegels (Bild 11). Hier beträgt der größte errechnete Radialdruck nach 100 Jahren Quellen ca. $3,7 \text{ MN/m}^2$. Die zugehörigen Schnittgrößen sind in Bild 12 dargestellt. Auch in diesem Fall treten das größte Biegemoment und die größte Querkraftbeanspruchung in Höhe des Anhydritspiegels auf. Die aus der Bemessung für den Lastfall Quellen für eine 1 m dicke Schale resultierende Schubbewehrung ist erwartungsgemäß größer als im zuvor vorgestellten Fall (Bild 13 und 11). Die größte erforderliche Biegedruckbewehrung ist dagegen etwas geringer als für den Fall, in dem der Anhydritspiegel in Höhe der Querschnittsmitte ansteht.

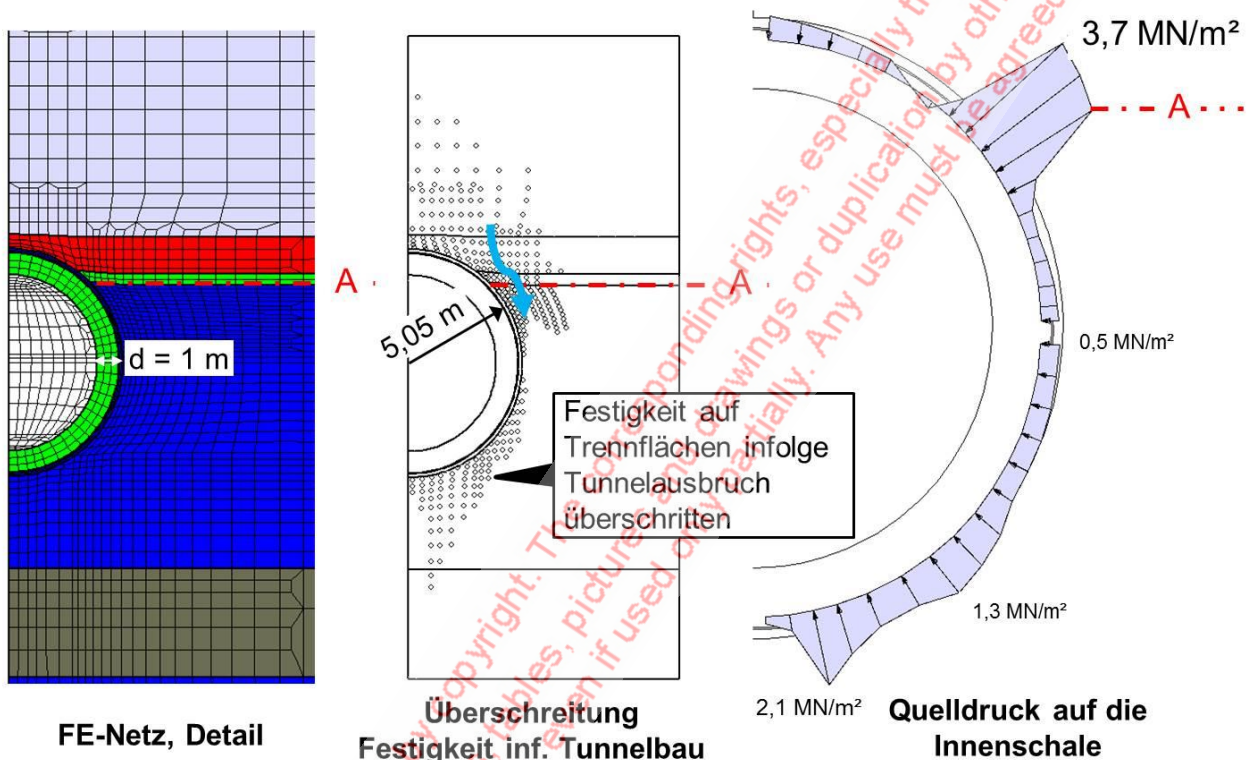


Bild 11: Anhydritspiegel am Übergang zwischen Firste und Ulme, FE-Netz, Zonen mit Festigkeitsüberschreitung auf Trennflächen und Quelldruckbeanspruchung der Innenschale nach 100 Jahren Quellen

Diese Beispiele zeigen, dass die Höhenlage des Anhydritspiegels im Vergleich zum Tunnel einen entscheidenden Einfluss auf die Bemessung der Innenschale hat und dass diese daher entsprechend genau berücksichtigt werden muss.

In Fällen, in denen der Tunnelquerschnitt und die aus dem Vortrieb resultierende Auflockerungszone einen ausreichend großen Abstand zu den wasserführenden Schichten haben, kann, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, nur Wasser, das in Längsrichtung zuströmt, zu Quellvorgängen führen, sofern die Bauausführung sachgerecht erfolgt. Wenn die Wasserzufuhr in Längsrichtung durch bautechnische Maßnahmen - z. B. Abdichtungsbauwerke (Wittke 2015, Erichsen 2015) - sicher verhindert wird, kann theoretisch in solchen Abschnitten ganz auf eine Bemessung der Innenschale gegen Quellen verzichtet werden.

Allerdings ist es empfehlenswert, der Bemessung der Innenschale auch in einem solchen Fall im Sinne einer Risikoabschätzung eine gewisse Quelldruckbeanspruchung zugrunde zu legen.

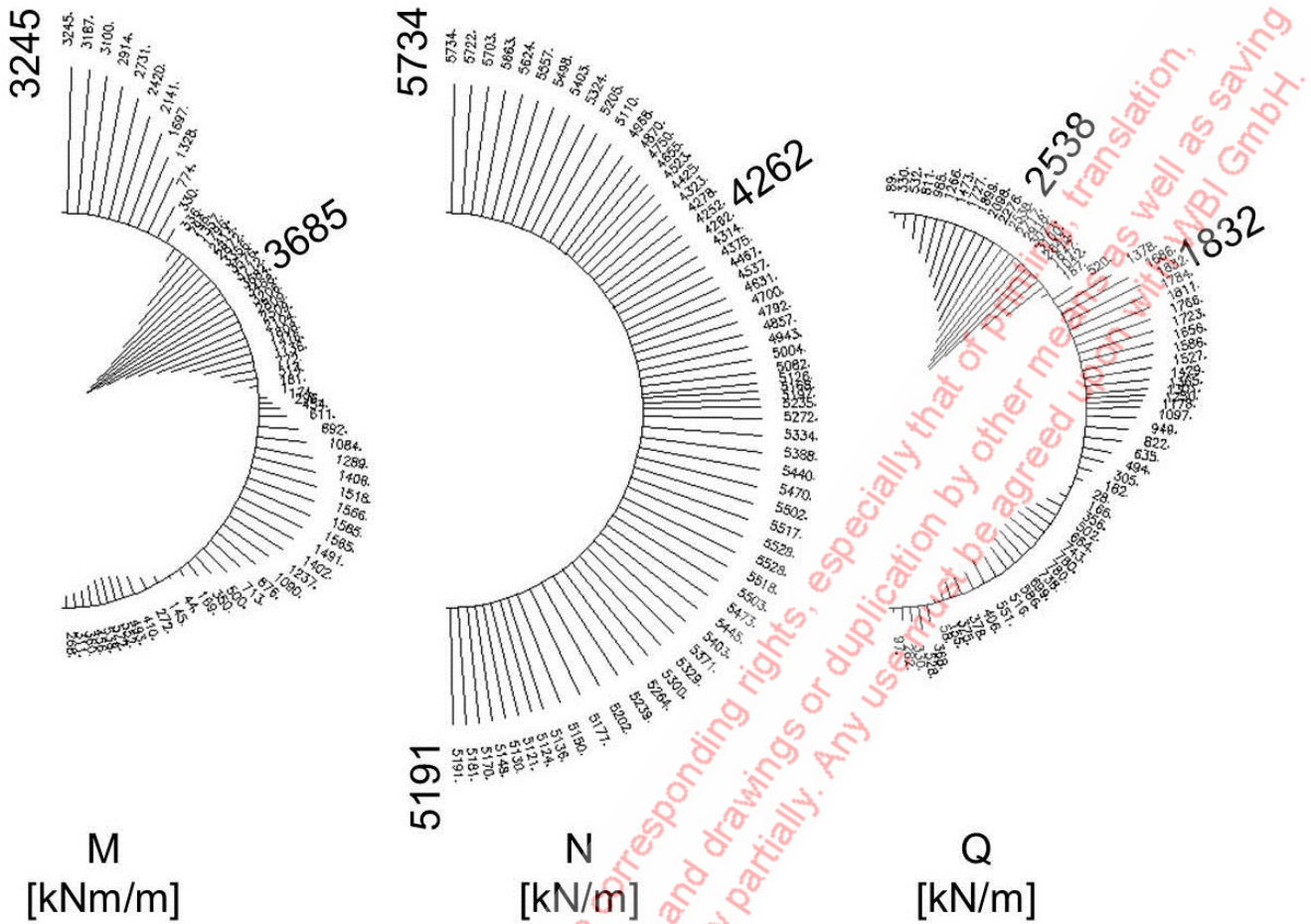
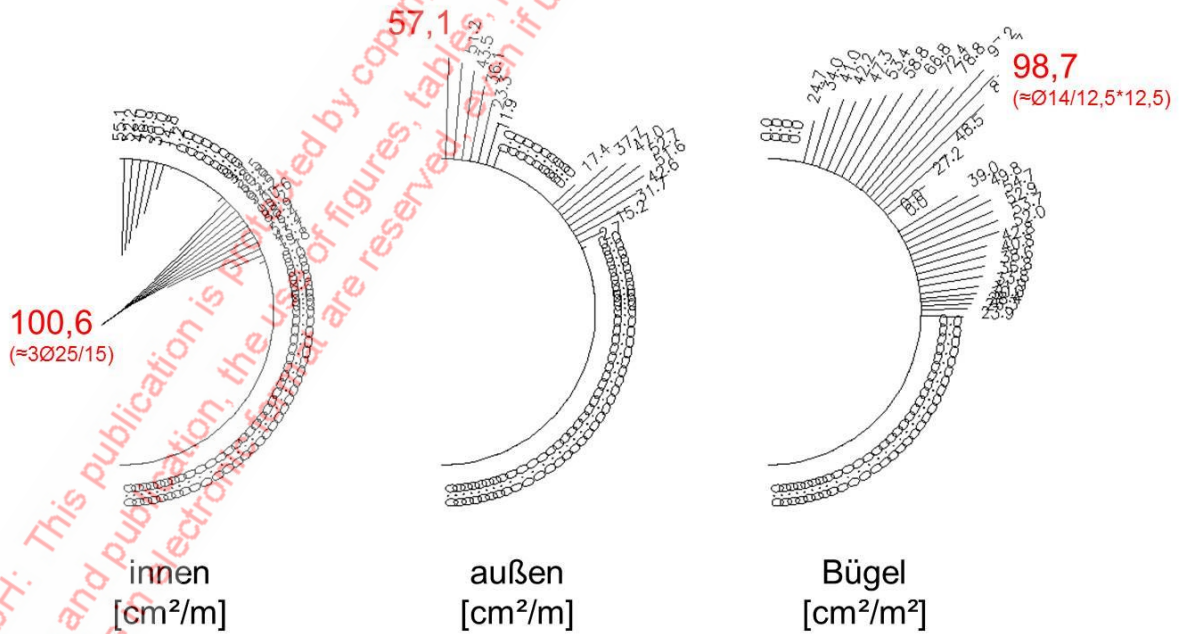


Bild 12: Anhydritspiegel am Übergang zwischen Firste und Ulme, Schnittgrößen nach 100 Jahren Quellen



C45/55, BSt 500/550, h = 100 cm, d_i = 15 cm

Bild 13: Anhydritspiegel am Übergang zwischen Firste und Ulme, erforderliche Bewehrung für den Lastfall Quellen (100 Jahren Quellen)

Grundsätzlich sind außer der Beanspruchung der Tunnelschale auch quellbedingte Verformungen zu beachten. Vor dem Hintergrund der maximal möglichen Quelldrücke muss man davon ausgehen, dass unter bestimmten Umständen bei Überdeckungen bis zu ca. 400 m langfristig quellbedingte Hebungen auftreten können, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden, diese zu ver- bzw. zu behindern (vgl. Wittke 2015 und Erichsen 2015).

5. Beanspruchung der Tunnelschale in Längsrichtung

Die in Abschnitt 4 beschriebenen Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Höhenlage des Anhydritspiegels bei der Bemessung von Tunnelschalen berücksichtigt werden muss. Bereits eine Verschiebung von nur wenigen dm bis m führt zu einer deutlich unterschiedlichen Beanspruchung.

Diese Unterschiede in der Beanspruchung führen insbesondere in Fällen, in denen der Anhydritspiegel in Tunnellängsrichtung steil ansteigt bzw. abfällt, auch zu einer Biege- und Schubbeanspruchung in Tunnellängsrichtung (Bild 14). Eine Quelldruckbeanspruchung tritt nur in Bereichen auf, in denen auch Anhydrit vorhanden ist. Dementsprechend muss die Schale auch in Längsrichtung für Quelldruckbeanspruchungen bemessen und entsprechend bewehrt werden.

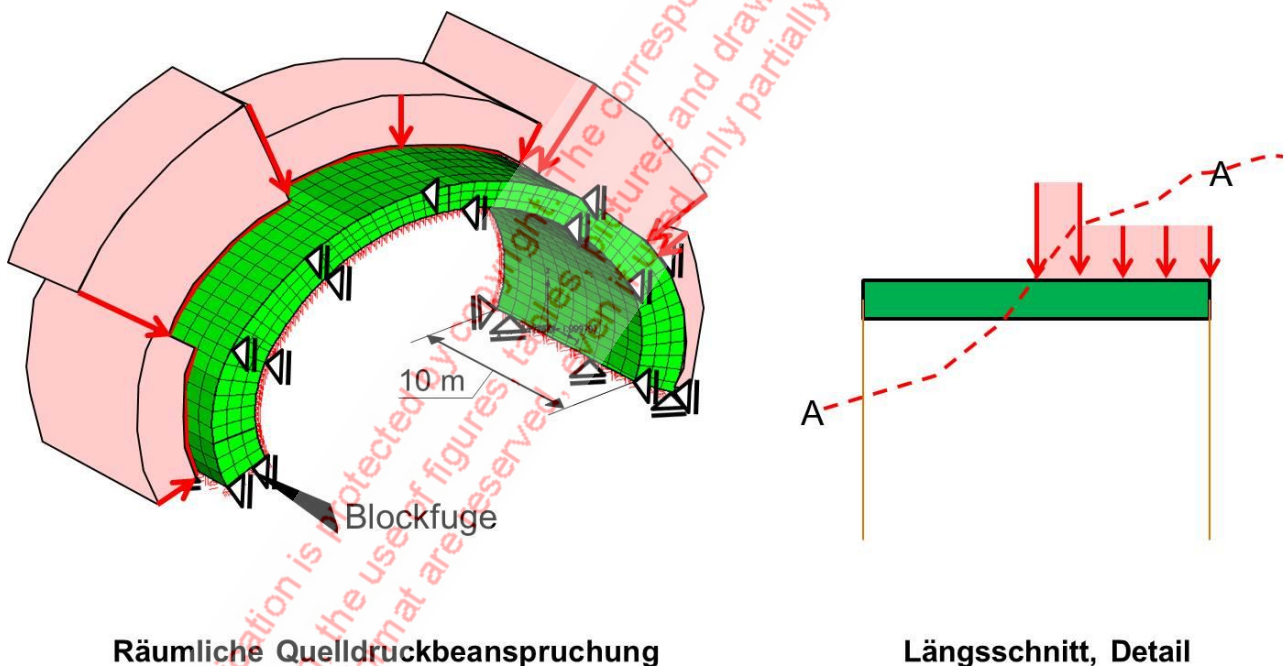


Bild 14: Beanspruchung der Innenschale in Längsrichtung, Prinzip

Literatur

Erichsen, C.: Entwurfskonzepte für die Tunnel des Projekts. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.

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

WBI GmbH: Stuttgart 21 – Quellversuche der TH Karlsruhe an Proben aus dem Freudensteintunnel, Auswertung und Interpretation, November 2006 (unveröffentlichtes Gutachten).

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, W.; Wittke, M.; Wahlen, R.: Zum Quellgesetz für den anhydritführenden, unausgelaugten Gipskeuper. Geotechnik Nr. 2, Verlag Glückauf, Essen 2004.

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

Wittke, W.: Erfahrungen mit Tunnelbauten im Gipskeuper. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.

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.