

# **Stoffgesetz, Berechnungsverfahren, felsmechanische Kennwerte und Ausführungsstatik für Tunnel im anhydritführenden Gebirge**

**Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Dr.-Ing. Martin Wittke, Dr.-Ing. Claus Erichsen, Dr.-Ing. Patricia Wittke-Gattermann**

## **Zusammenfassung**

Die Schichtglieder der Formation des Gipskeupers enthalten Anhydrit in unterschiedlichen Mengen. Bei Wasserzutritt geht der Anhydrit in Lösung und kristallisiert zu Gips aus, falls die Lösung nicht mit dem Grundwasser dem Vorfluter zugeführt wird. Diese Umwandlung von Anhydrit in Gips ist mit einer Volumenzunahme verbunden. Falls diese be- oder verhindert wird, kommt es zu großen Quelldrücken. Dieser Vorgang hat in der Vergangenheit zu Schäden an Tunnelbauwerken und zu Hebungen geführt, die bis zur Geländeoberfläche reichen.

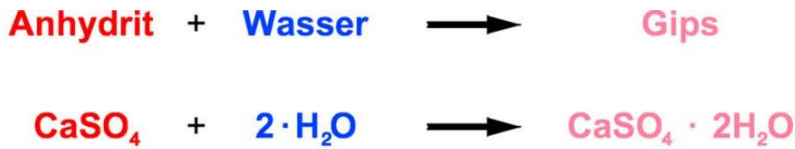
Im ersten Teil des Vortrags wird ein diese Vorgänge beschreibendes Stoffgesetz vorgestellt, mit dem das elastisch-viskoplastische Spannungsdehnungsverhalten eines geklüfteten Felses räumlich beschrieben wird (AJRM). Die Wasserzufuhr zum Anhydrit setzt sich aus einer Kombination aus räumlicher Kluftwasserströmung und Diffusion in das Gestein zusammen. Der Quellvorgang wird mit einem erweiterten Huder-Amberg-Modell beschrieben, bei dem der Quelldruck und die quellbedingten Deformationen auch vom Grad der Umwandlung von Anhydrit in Gips abhängig sind. Dieses Modell wurde in das räumliche FE-Programm der WBI GmbH implementiert und anhand der Messergebnisse eines Versuchsbauwerks kalibriert.

Das komplexe Modell erfordert die Eingabe einer Reihe felsmechanischer und felshydraulischer Parameter. Im zweiten Teil des Vortrages wird deshalb dargestellt, mit welchen Kennwerten für die Festigkeit und Verformbarkeit, für die Wasserdurchlässigkeit und die Diffusion sowie für das Quellverhalten man rechnen kann und wie man diese bestimmt.

Im dritten Teil des Vortrags wird der statische Nachweis für einen Tunnelabschnitt des Projekts Stuttgart 21 dargestellt und gezeigt, wie die Modellvorstellung und das Rechenprogramm erfolgreich angewendet werden.

## **1. Aufgabenstellung**

In die Tonsteine des Gipskeupers ist Anhydrit in feinverteilter Form eingelagert. Dieser geht bei Wasserzufuhr in Lösung und kristallisiert als Gips wieder aus, falls die Lösung nicht mit dem Grundwasser abtransportiert werden kann. Diese Umwandlung ist mit einer Volumenzunahme von 61 % verbunden. Geht man von einem Anhydritgehalt im Gestein von 30 % aus, so beträgt die Volumenzunahme ca. 18 % des Volumens des Ausgangsgesteins (Bild 1, Wittke 2014, Wittke 2003). Wird die Volumenzunahme be- oder verhindert, so entstehen sehr große Quelldrücke.

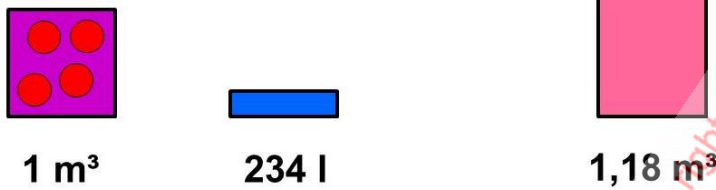


**Volumenzunahme:**



$\Delta V_{\text{Feststoff}} = 61\%$

**Gipskeuper**  
**30 % Anhydrit**



$\Delta V_{\text{Feststoff}} = 18\%$

Bild 1: Quellen von Anhydrit, Prinzip

In geologischen Zeiträumen findet die Umwandlung von Anhydrit in Gips auch in der Natur statt. Deshalb befindet sich oberhalb der Schichten des unausgelaugten Gipskeupers, in denen Sulfat in Form von Anhydrit ansteht, meist eine Schicht in der Gips angetroffen wird (Bild 2, rot- und rosafarbene Schicht, Wittke 2014, Wittke 2015).

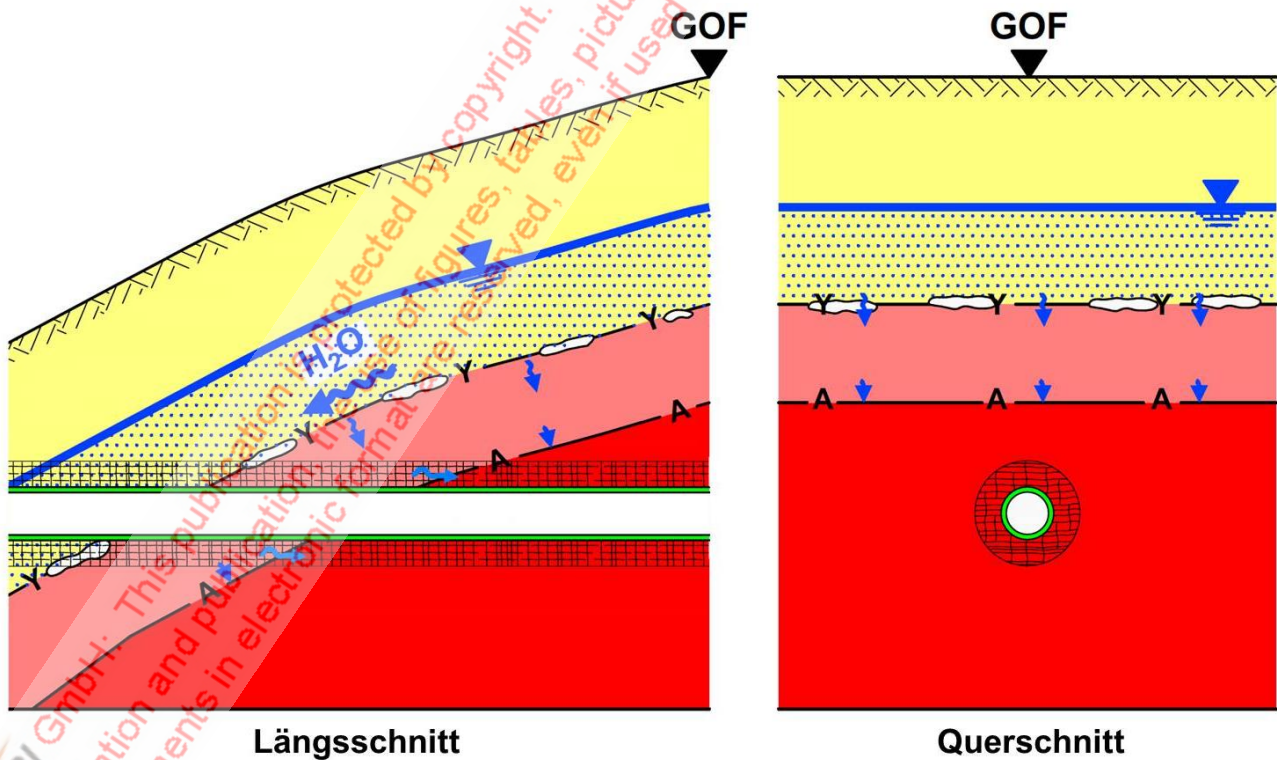


Bild 2: Aufgabenstellung: Bemessung der Innenschale, quellbedingte Hebungen

An der Oberfläche dieses gering durchlässigen Felses, der sogenannten Auslaugungsfront, findet eine Auslaugung des Gesteins statt. Hier geht der Gips bei Wasserzutritt in Lösung und wird mit dem Grundwasser abtransportiert. Zurück bleibt ein Residualgestein, der sogenannte ausgelaugte Gipskeuper (Bild 2, gelb gekennzeichnete Schicht, Wittke 2015). Am Übergang vom unausgelaugten zum ausgelaugten Gipskeuper bildet sich aufgrund der mit der Lösung verbundenen Volumenverluste eine stark durchlässige, teilweise kavernöse Schicht aus.

Baut man einen Tunnel, der alle drei o. g. Schichtglieder des Gipskeupers durchörtert, so besteht auch bei absolut trockenem Vortrieb das Risiko, dass Grundwasser über die vortriebsbedingten Auflockerungszonen zum anhydritführenden Gebirge gelangt und dort quellbedingte Hebungen des Tunnels oder große Quelldrücke auslöst (Bild 2). Dieses Risiko ist größer, wenn der Tunnel über größere Längen in Höhe bzw. in der Nähe der wasserführenden "Auslaugungsfront" verläuft.

Im Folgenden werden die Grundlagen für den Entwurf der Tunnel des Projekts Stuttgart 21 in diesem Gestein erläutert. In konzentrierter und teilweise vereinfachender Form werden die von WBI entwickelten Stoffgesetze und die darauf aufbauenden numerischen Berechnungsverfahren erläutert. Es wird dargelegt, wie das Modell anhand der Ergebnisse des Versuchsbauwerks Freudensteintunnel kalibriert wurde. Am Beispiel einer Ausführungsstatik wird die Anwendung erläutert (Wittke 2014, Wittke 2003, Wittke-Gattermann 1998, Wahlen 2009, Wittke 2016).

## **2. Stoffgesetze und Berechnungsverfahren**

In den letzten vier Jahrzehnten wurde von WBI an der Entwicklung eines Stoffgesetzes und darauf aufbauenden Berechnungsmodellen gearbeitet (Wittke 2014, Wittke 2003, Wittke-Gattermann 1998, Wittke, W. & Kiehl, J. R. 1983).

### **Gefügemodell**

Das Stoffgesetz gründet auf dem im Bild 3 dargestellten Gefügemodell für den unausgelaugten Gipskeuper (Wittke 2014). Dieser ist im südwestdeutschen Raum meist von horizontalen Schichtfugen und zwei vertikalen Kluftscharen durchtrennt. Die Abstände der Schichtfugen liegen im Dezimeterbereich. Für die Klüfte ergeben sich Abstände im Meterbereich. Alle drei Trennflächenscharen sind weitgehend eben. Sie durchtrennen das Gebirge mit unterschiedlicher Erstreckung (Wittke 2014, Wittke 2015). Im Bereich von Störungen und infolge von Auslaugungsvorgängen treten örtlich auch Schichtverbiegungen auf.

Die Tonschluffsteine des Gipskeupers enthalten dünne Lagen aus Sulfat. Außerdem tritt das Sulfat feinverteilt im Gestein oder in Form von Knollen auf (Bild 3, Wittke 2015, Geyer & Gwinner 1991).



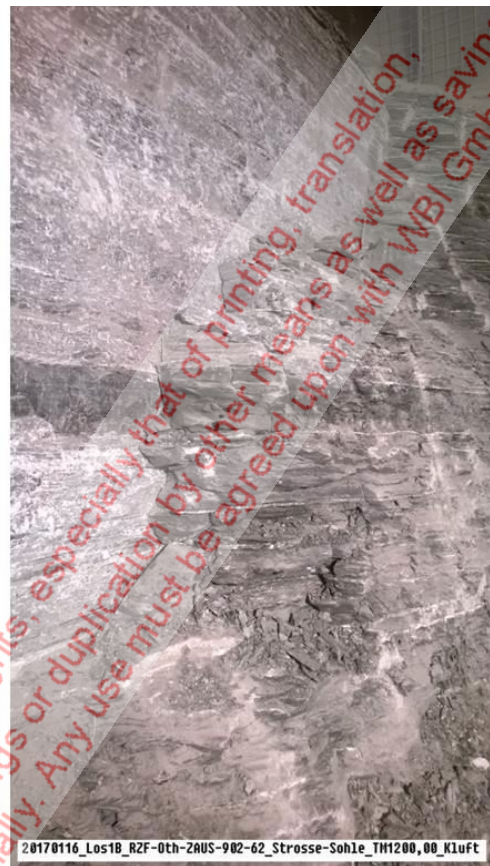
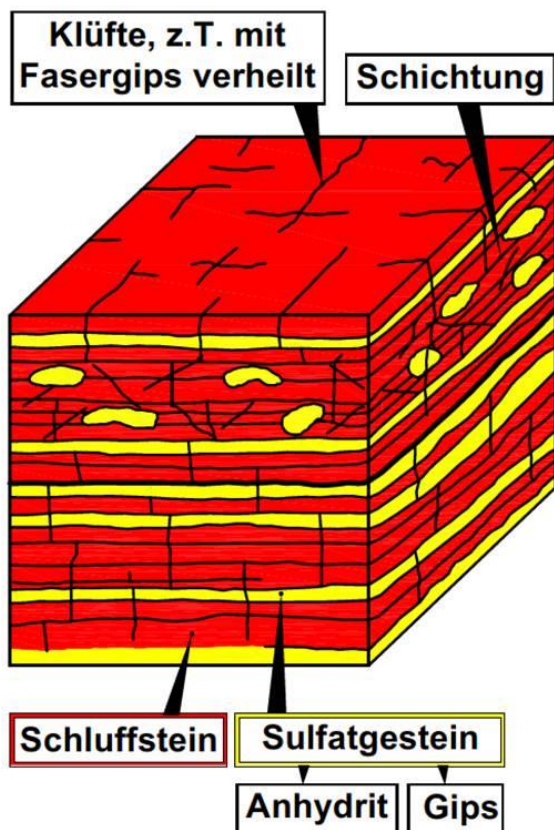


Bild 3: Unausgelaugter Gipskeuper, Gefügemodell

### **Elastisch-Viskoplastisches Spannungs-Dehnungsverhalten**

Ohne den Einfluss des Quellens verhält sich der Fels bei den auftretenden Spannungen weitgehend elastisch-isotrop. Aufgrund der Spannungsumlagerungen entstehen örtlich Gleitungen auf den Trennflächen. Diese werden durch ein viskoplastisches Stoffgesetz beschrieben (Witke 2014).

In Feldversuchen, wie beispielsweise in einem Lastplattenversuch mit unterschiedlicher Orientierung der Lastplatten zum Trennflächengefüge, konnte gezeigt werden, dass die gemessenen E-Moduln nur eine geringe Richtungsabhängigkeit besitzen (Bild 4, Tiefbauamt der Stadt Stuttgart 1957). Die Annahme isotropen Verhaltens im elastischen Bereich ist deshalb berechtigt. Für den E-Modul ergaben sich Mittelwerte von ca. 4.000 bis 5.000 MN/m<sup>2</sup> (Bild 4, Tiefbauamt der Stadt Stuttgart 1957).

Der aus 27 Dilatometerversuchen für das Projekt Stuttgart 21 im Mittleren Gipshorizont erhaltene geometrische Mittelwert für den E-Modul liegt mit  $E = 4.900 \text{ MN/m}^2$  in derselben Größenordnung (Bild 5).

Die in Laborversuchen ermittelte Gesteinsfestigkeit streut aufgrund der unterschiedlichen Sulfatgehalte des Gesteins sehr stark. Für 42 Gesteinsproben aus dem Mittleren Gipshorizont, die aus Erkundungsbohrungen für den Fildertunnel entnommen wurden, ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert von 27,4 MN/m<sup>2</sup> (Bild 6). Die größte Überdeckung der Tunnel

des Projekts Stuttgart 21 beträgt ca. 220 m. Das führt im Bereich des Tunnels zu einer vertikalen Gebirgsspannung von ca. 5,5 MN/m<sup>2</sup> (Bild 6). Ein Vergleich mit der einaxialen Druckfestigkeit zeigt, dass sich das Gebirge nach dem Auffahren der Tunnelröhren und bei den dabei auftretenden Spannungen weitgehend elastisch verhält. Anders als in Steiner & Kaiser & Spaun 2010 postuliert, dürfte die Gesteinsfestigkeit zumindest bei den Tunneln des Projekts Stuttgart 21 keine Auswirkungen auf die quellbedingte Beanspruchung haben.

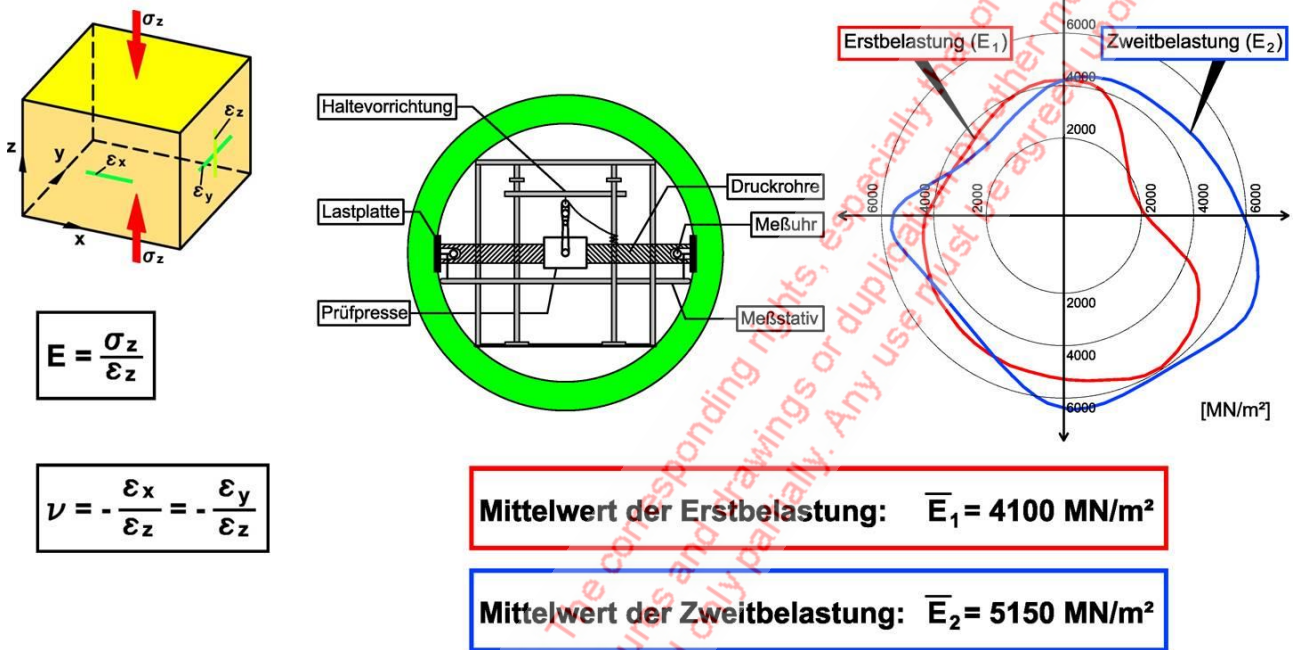


Bild 4: E-Modul, Lastplattenversuch Wagenburgtunnel

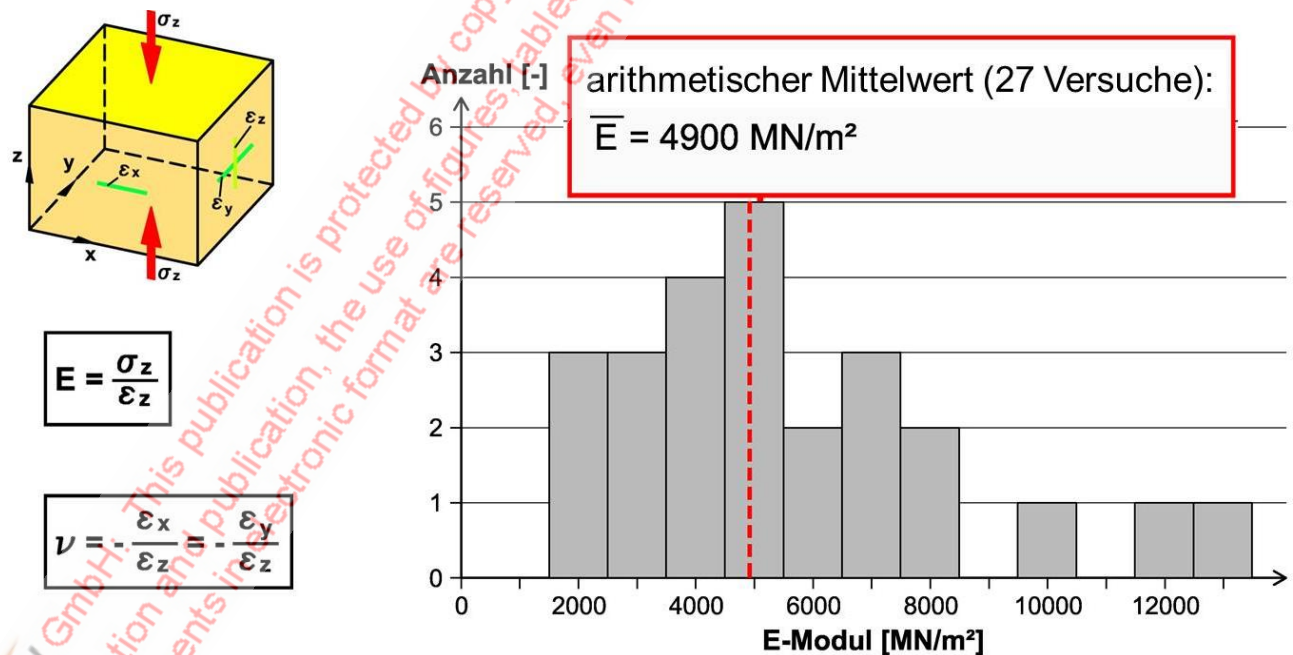


Bild 5: E-Modul, Dilatometerversuche, Fildertunnel, MGH



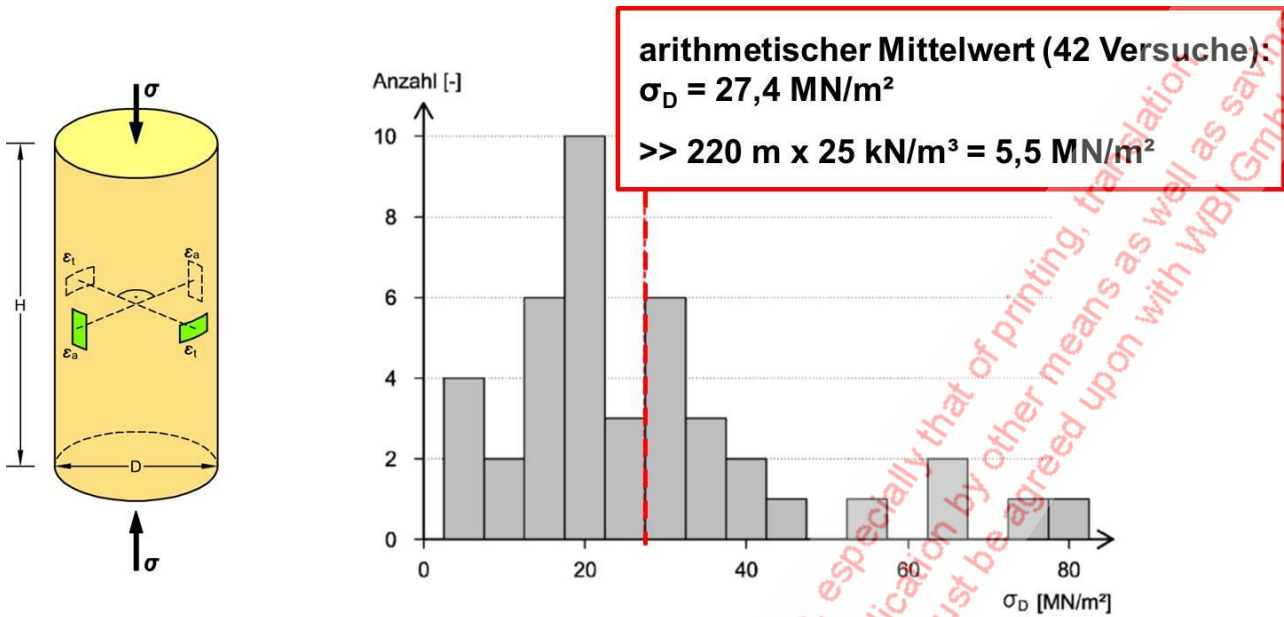


Bild 6: Einaxiale Druckfestigkeit, Gesteinsproben Fildertunnel, MGH

Berücksichtigt werden muss aber die begrenzte Scherfestigkeit auf den Schichtfugen und den Klüften. Hierfür wird das Mohr-Coulomb'sche Bruchkriterium in Ansatz gebracht. Großscherversuche in der Nordröhre des Wagenburgtunnels haben die in Bild 7 rechts dargestellten Scherparameter ergeben (Tiefbauamt der Stadt Stuttgart 1957). Durch Nachrechnung von Verschiebungsmessungen in dem ebenfalls im mittleren Gipshorizont liegenden S-Bahn-Tunnel der Wendeschleife unter dem Hasenberg in Stuttgart, ergeben sich die in Bild 8 zusammengestellten Werte für die Scherfestigkeit auf den Schichtfugen und Klüften (Wahlen 2009).

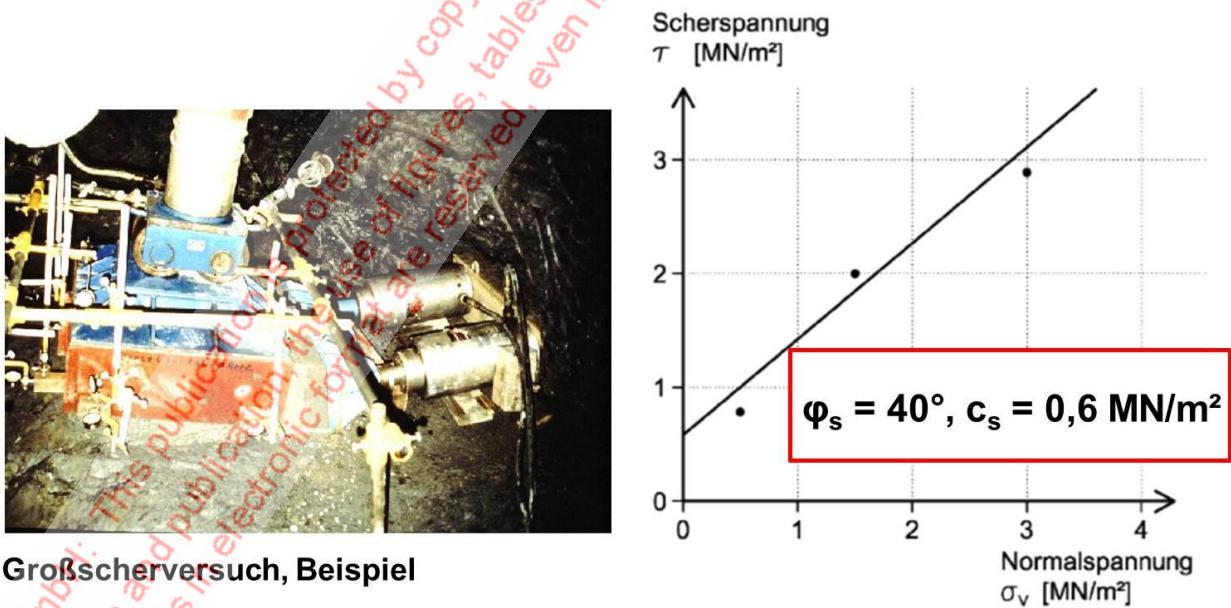
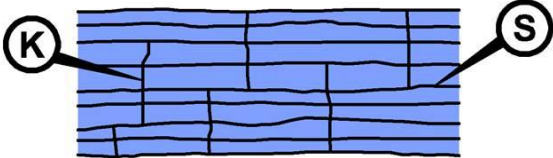


Bild 7: Scherparameter Schichtfugen, Großscherversuche Wagenburgtunnel

Berücksichtigt wird in dem Stoffgesetz auch die Dilatanz bzw. die leichte Öffnung der Trennflächen, die sich bei Schubbeanspruchung aufgrund der Unebenheiten der Trennflä-

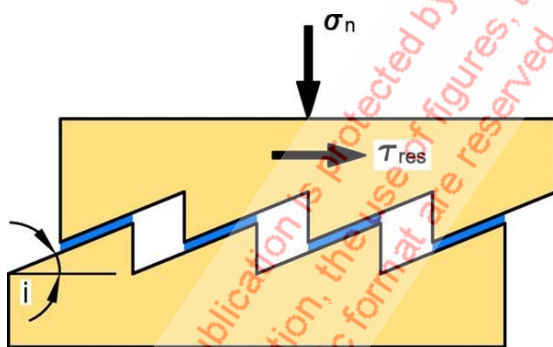
chen ergibt (Bild 9, Wittke 2014, Wittke 2003, Erichsen 1987). In Abhängigkeit von der Gesteinsfestigkeit und den auf den Trennflächen wirkenden Normalspannungen ergibt sich ein Aufgleiten oder ein Abscheren der Rauigkeiten wie im Bild 9 idealisierend dargestellt. Dieser Effekt tritt in Hohlräumnähe auf und ergibt sich aus der Umlenkung der Spannungen um den Hohlraum (Gewölbebildung, Bild 10). Er führt zu einer Erhöhung der Wasserdurchlässigkeit entlang der Trennflächen und erleichtert damit die Wasserzufuhr aus benachbarten, wasserführenden Schichten (Wittke 2003, Erichsen 1987).

Eine Öffnung der Trennflächen ergibt sich auch bei Auftreten von Zugspannungen, beispielsweise oberhalb der Firste von Tunneln (Wittke 2003, Erichsen 1987).

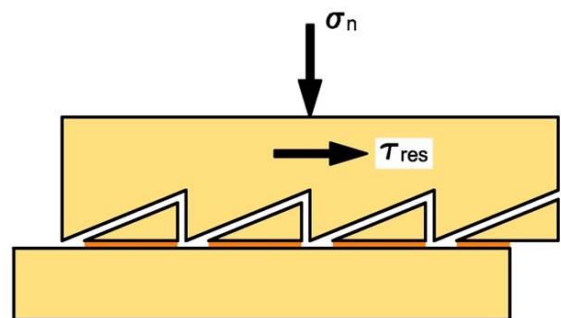


	Schichtung		Klüftung	
	$\varphi_s$ [°]	$c_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi_k$ [°]	$c_k$ [MN/m <sup>2</sup> ]
<b>Wagenburgtunnel (In-Situ-Versuch)</b>	40	0,6	-	-
<b>Wendeschleife, S-Bahn Stuttgart (Nachrechnung)</b>	30	> 0,04	35	0,05 - 0,5

Bild 8: Scherparameter Schichtung und Klüftung

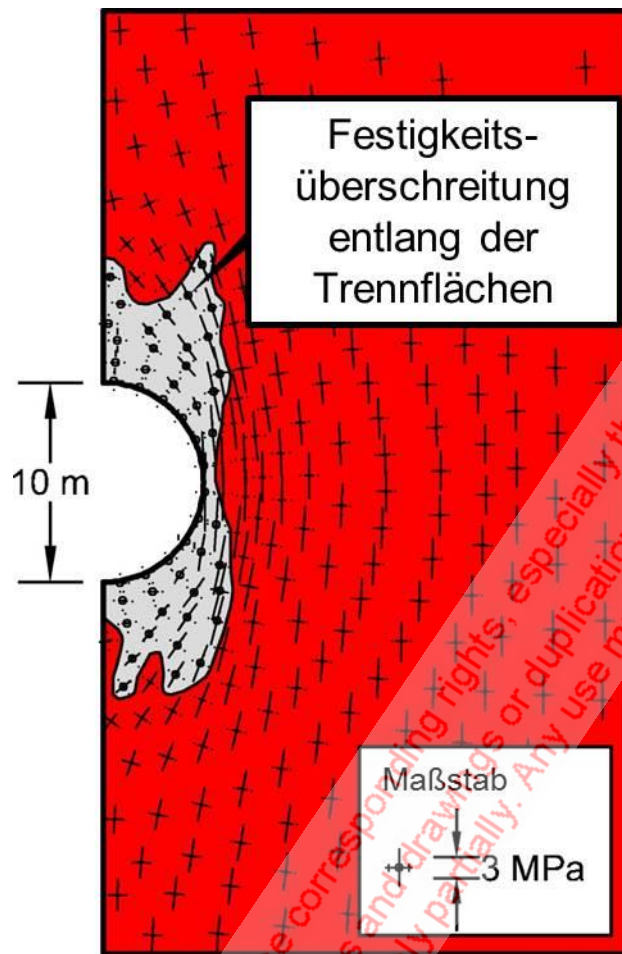


**Aufgleiten**



**Abscheren**

Bild 9: Dilatanz beim Abscheren



### Hauptnormalspannungen und Auflockerungszone

Bild 10: FE-Berechnungen mit dem elastisch viskoplastischen AJRM

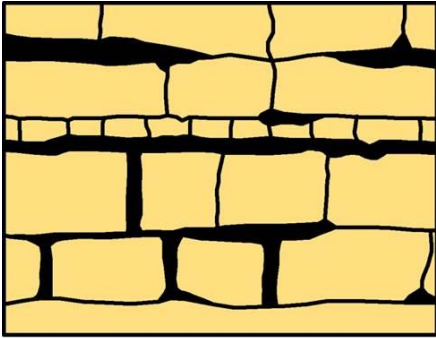
### Wasserzufuhr/Sickerströmung

Die Schichten des Gipskeupers sind Kluftwasserleiter. Die Wasserdurchlässigkeit des Gesteins ist im Vergleich zu der Durchlässigkeit parallel zu den Schichtfugen und den Klüften vernachlässigbar klein (Bild 11, links).

Das Foto im Bild 11, rechts, zeigt - als Beispiel für einen Kluftwasserleiter - eine Baugrube im Buntsandstein neben der Werra. Man erkennt, dass das Wasser der Baugrube über die Trennflächen zuströmt.

Die mittlere Fließgeschwindigkeit des Wassers in einem Spalt konstanter Öffnungsweite ( $2a_i$ ) ist proportional zum wirksamen Gefälle und dem Quadrat der Öffnungsweite der Trennfläche (Bild 12, Wittke 2014). Außerdem geht der reziproke Wert der kinematischen Zähigkeit des Wassers in die Gleichung zur Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit ein.





### klüftiger Fels

$$k_{IR} = 0$$

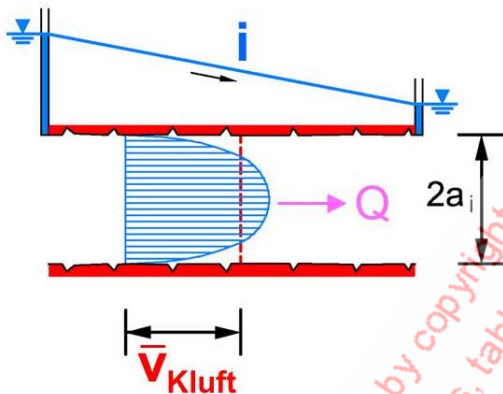
$$k_D \neq 0$$



Staustufe Wahnhausen, Buntsandstein

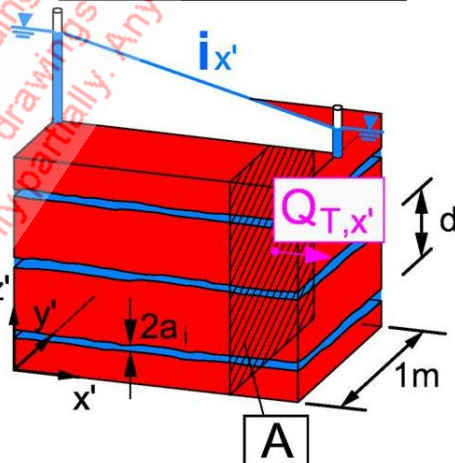
Bild 11: Sickerströmung, Kluftwasserleiter

### 1 Trennfläche



$$\bar{v}_{Kluft} = \underbrace{\frac{g}{12\nu}}_{k_{Kluft}} \cdot (2a_i)^2 \cdot i$$

### Trennflächenschar



$$\bar{v}_{Fels} = \frac{Q_{T,x'}}{A} = \underbrace{\frac{n \cdot 2a_i}{n \cdot d}}_{k_{Fels}} \cdot k_{Kluft} \cdot i_{x'}$$

Bild 12: Sickerströmung, Kluftwasserleiter, Darcy'sches Gesetz

Das Darcy'sche Gesetz für die Sickerströmung parallel zu einer Trennflächenschar ist im Bild 12, rechts dargestellt (Witke 2014). Der Durchlässigkeitsbeiwert ist danach proportional zur dritten Potenz der Spaltweite und umgekehrt proportional zum Trennflächenabstand.

Der Durchlässigkeitsbeiwert der Schichtglieder des Gipskeupers parallel zur horizontalen Schichtung wurde im Rahmen der Vorerkundungen für das Projekt Stuttgart 21 mit Hilfe von Durchlässigkeitsversuchen in vertikalen Bohrungen bestimmt. Beispielhaft sind im Bild

13 die Ergebnisse von 18 im Mittleren Gipshorizont durchgeführten Versuchen dargestellt. Die erhaltenen Werte weisen eine große Streubreite von  $10^{-12}$  bis  $10^{-7}$  m/s auf. Der geometrische Mittelwert ergibt sich zu  $1,3 \cdot 10^{-9}$  m/s.

Geht man von einem mittleren Schichtfugenabstand von 0,1 m aus, so errechnet sich bei einem horizontalen  $k_f$ -Wert von  $10^{-9}$  m/s eine Spaltweite von  $2a_i = 0,005$  mm (Bild 14). Berücksichtigt man einen mittleren Abstand der vertikalen Klüfte von 1 m, so ergäbe sich bei Annahme dieser Spaltweite hierfür ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_{f,v} = 10^{-10}$  m/s (Bild 14). Auf diese Weise erklärt sich die Beobachtung, dass die vertikale Durchlässigkeit des Gebirges bei horizontaler Schichtung geringer ist als in horizontaler Richtung.

Bild 15 zeigt die Ergebnisse einer FE-Berechnung mit dem o. g. Modell eines elastisch-viskoplastischen Spannungsdehnungsverhaltens bei Berücksichtigung der Dilatanz auf den vertikalen Klüften für einen schildvorgetriebenen Tunnel mit einem Durchmesser von 10 m. Man erkennt, dass sich die vertikalen Klüfte aufgrund der Spannungumlagerungen um den Hohlraum öffnen. Da die Wasserdurchlässigkeit, wie oben gezeigt, mit der dritten Potenz der Spaltweite wächst, ergeben sich dadurch Erhöhungen der  $k_f$ -Werte vom Ausgangszustand mit  $10^{-9}$  m/s auf  $> 10^{-3}$  m/s in Hohlraumnähe. Dadurch bedingt bildet sich seitlich und oberhalb des Tunnels eine "aufgelockerte" Zone mit einer Erstreckung von mehreren Metern. Durch die so geöffneten Klüfte kann Wasser zum Gebirge in der Umgebung des Tunnels gelangen, wenn sich dicht oberhalb des Tunnels eine wasserführende Schicht befindet.

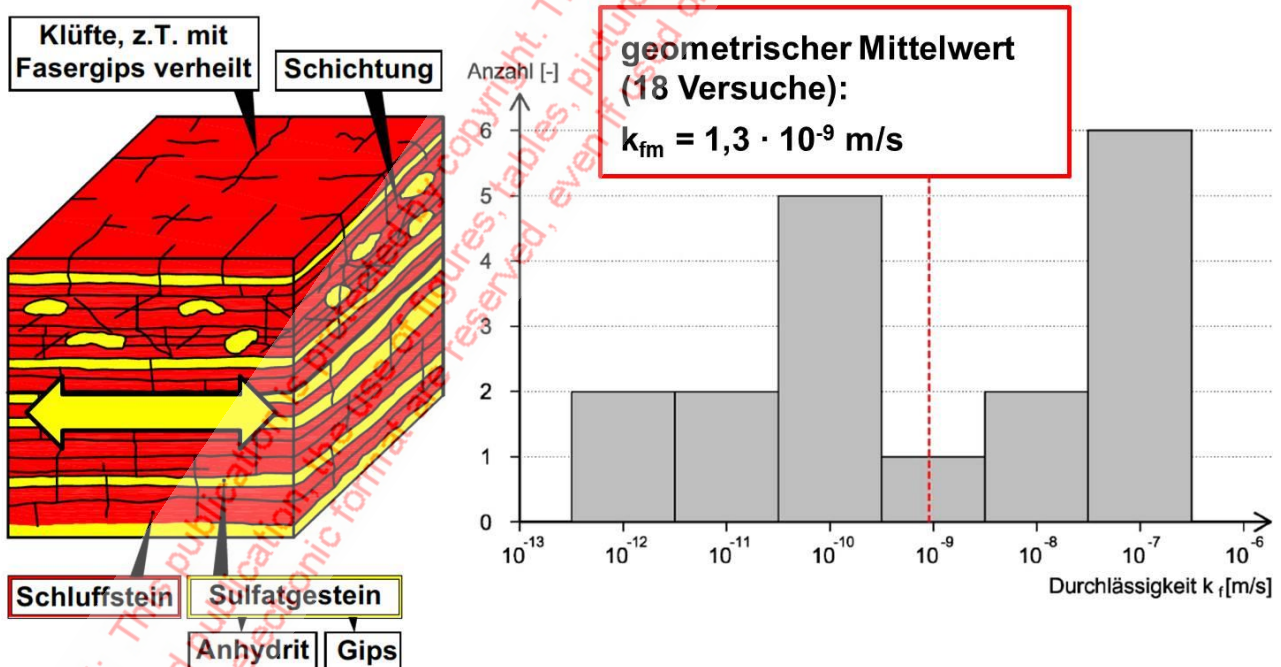


Bild 13: Wasserdurchlässigkeit der Schichtfugen, Bohrlochversuche, Fildertunnel, MGH



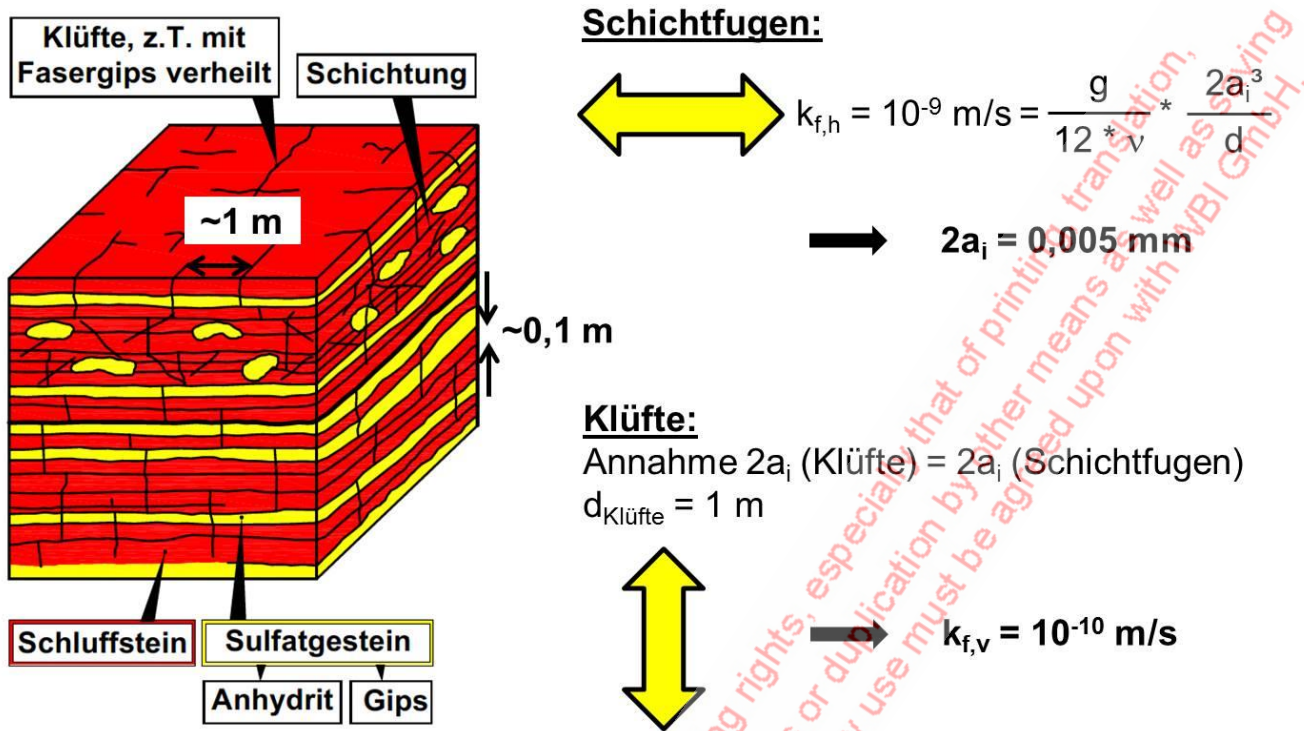


Bild 14: Durchlässigkeit und Trennflächenöffnungsweite

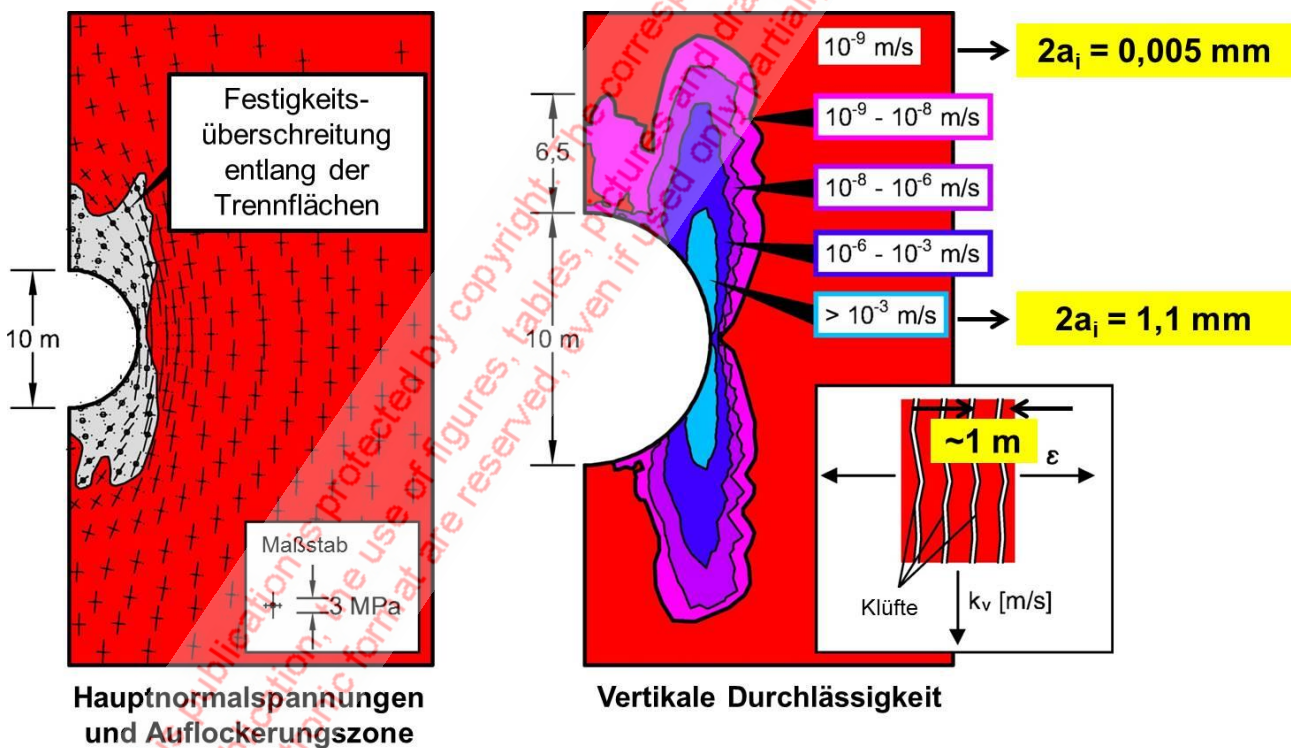


Bild 15: FE-Berechnung, Vergrößerung der Wasserdurchlässigkeit in Hohlraumnähe aufgrund der Dilatanz auf Klüften

### Wasseraufnahme, Lösung und Auskristallisation

Die Darstellung in Bild 16 veranschaulicht in einer Folge von Bildern die Wasseraufnahme des Tonsteins, die Lösung des Anhydrits und die Auskristallisation als Gips, falls die Lö-



sung nicht abfließen kann (Witke 2014, Alonso & Ramon 2012). Dieser Vorgang wird im Modell durch die Theorie der Diffusion beschrieben (Witke 2003).

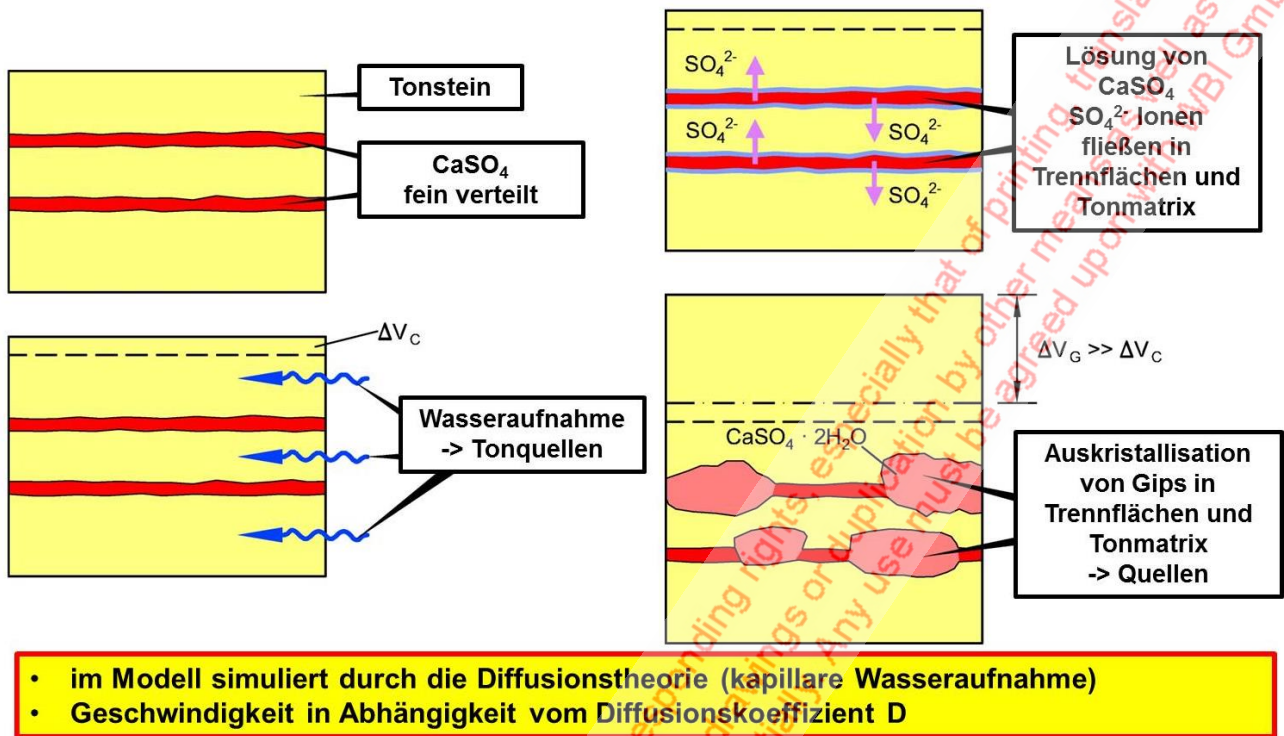


Bild 16: Quellen im Unausgelaugten Gipskeuper

Bild 17 zeigt das Teilergebn eines Laborversuchs an einer Gesteinsprobe (Witke & Witke & Wahlen 2004, Technische Universität Darmstadt 2006, Universität Karlsruhe 2006).

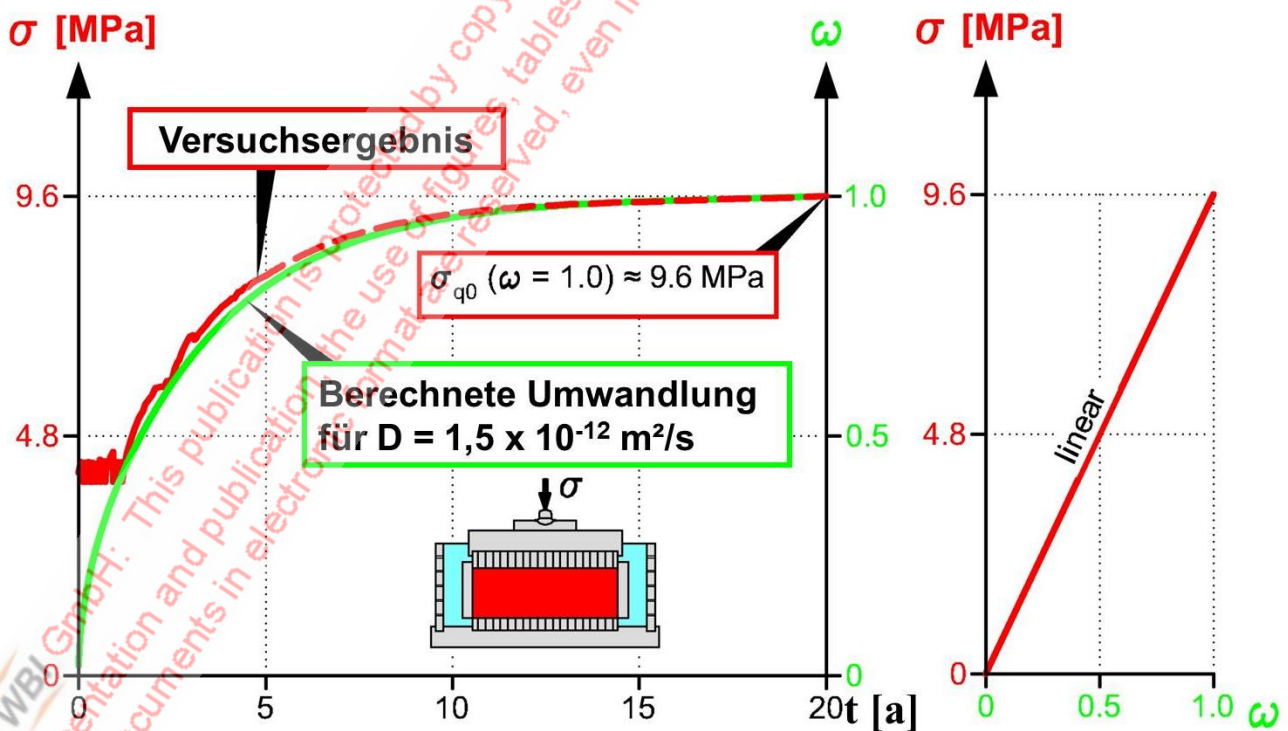


Bild 17: Entwicklung des Quelldrucks und Umwandlungsgrads

Der gemessene Quelldruck steigt hier nach einer Quellhebungsphase von ca. 1 Jahr im Verlauf von ca. 5 Jahren auf einen Wert von ca. 7 bis 8 MN/m<sup>2</sup> an. Die gestrichelte Linie zeigt die Extrapolation des Versuchsergebnisses auf einen Zeitraum von 20 Jahren und vollständige Umwandlung von Anhydrit in Gips (max. Quelldruck  $\sigma_{q0} = 9,6$  MN/m<sup>2</sup>). Der Verlauf dieser Kurve lässt sich nach der Diffusionstheorie bei Annahme eines Diffusionskoeffizienten von  $1,5 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s gut nachvollziehen (Bild 17).

### Volumenvergrößerung/Quelldruck

Bild 18 zeigt die Ergebnisse von Quellversuchen, die an den Universitäten Karlsruhe und Darmstadt durchgeführt wurden (Wittke & Wittke & Wahlen 2004, Technische Universität Darmstadt 2006, Universität Karlsruhe 2006). Die Dauer der Versuche betrug bis zu 20 Jahre. Man erkennt, dass man den gemessenen Zusammenhang zwischen quellbedingter Dehnung  $\varepsilon_q$  und der aufgetragenen Spannung  $\sigma_q$  gut mit einer logarithmischen Funktion beschreiben kann, die dem Gesetz von Huder-Amberg entspricht (Wittke 2014, Wittke 2003, Huder & Amberg 1970). Die Interpretation führt zu einem maximal möglichen Quelldruck von ca. 10,2 MN/m<sup>2</sup>.

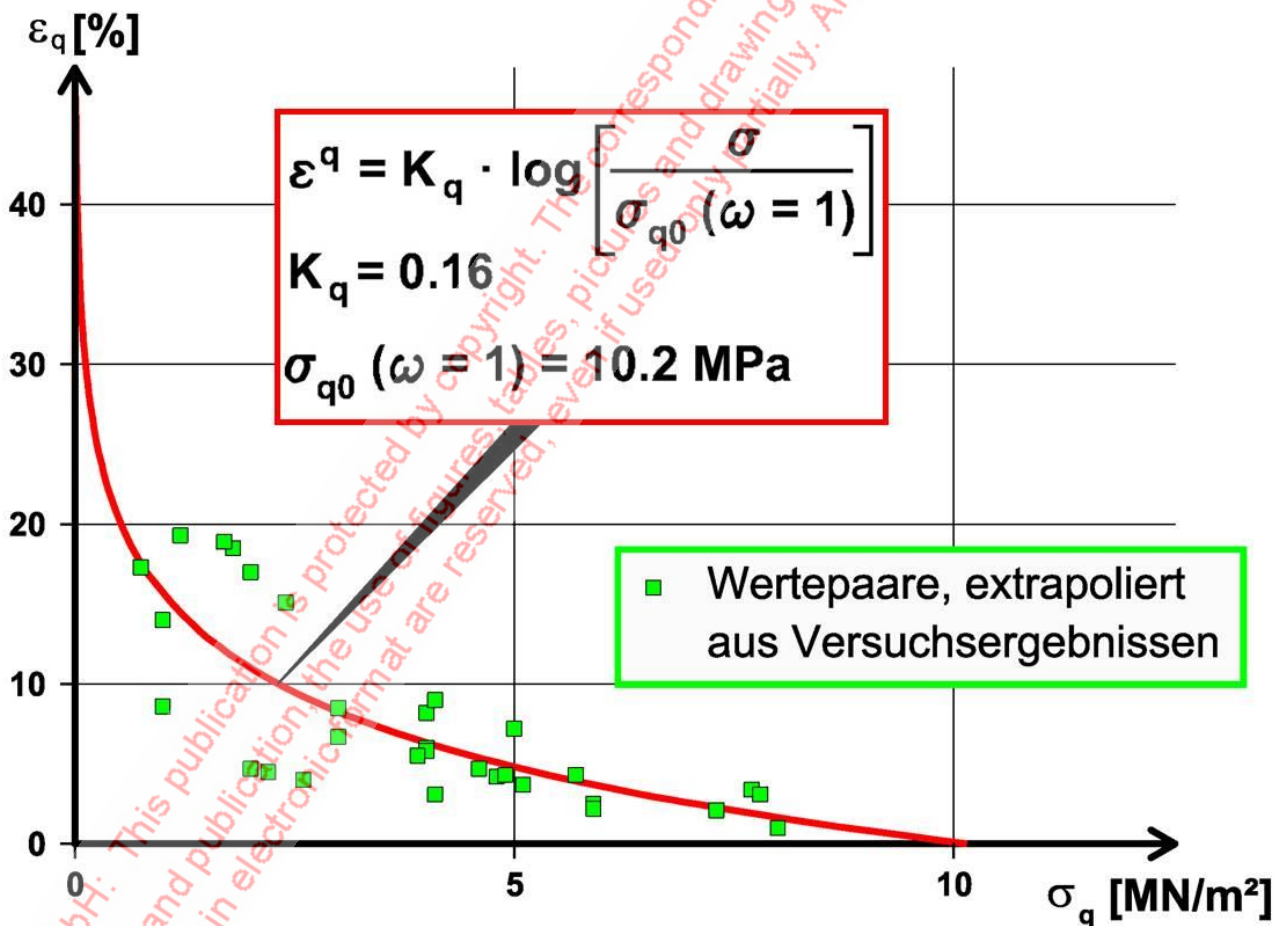


Bild 18: Quellgesetz für vollständige Umwandlung Anhydrit in Gips, Ableitung aus Versuchen an den Universitäten Karlsruhe und Darmstadt

Die relativ große Streuung der Einzelergebnisse resultiert aus der Inhomogenität des Gesteins im Hinblick auf den Sulfat- und Anhydritgehalt, die sich aufgrund der geringen Abmessungen der untersuchten Proben stärker in den Ergebnissen niederschlägt.

### **Berechnungsverfahren und Kennwertsatz zur Kalibrierung des Modells**

Parallel zur Entwicklung des Felsmechanischen Modells erfolgte auch die Entwicklung eines dreidimensionalen Berechnungsverfahrens nach der FE-Methode, in das das Stoffgesetz integriert wurde. Mit dem Modell lassen sich beliebige räumliche Aufgabenstellungen lösen (Wittke 2003).

Bild 19 enthält eine Zusammenstellung der Kennwerte, mit denen die Kalibrierung des Modells anhand der Messergebnisse des Versuchsbauwerks im Freudensteintunnel erfolgt ist (Wittke 2014, Wahlen 2009). Sie eignen sich zur Beschreibung des elastisch-viskoplastischen Verhaltens, der Wasserzufuhr und des Quellens in den Schichten des Mittleren Gipshorizonts, der Dunkelroten Mergel und dem oberen Teil der Grundgipschichten im südwestdeutschen Raum (Wittke 2015).

<b><u>Elastisch-Viskoplastisch:</u></b>	<b><u>Wasserzufuhr:</u></b>
$\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$	$k_{f,h} = 10^{-9} \text{ m/s}$
$E = 4.000 \text{ MN/m}^2$	$k_{f,v} = 10^{-10} \text{ m/s}$
$\nu = 0,25$	$d_k = 1,0 \text{ m}$
$\sigma_{1ax} = 20 - 30 \text{ MN/m}^2$	$d_s = 0,1 \text{ m}$
-> Gestein elastisch	$D = 1,5 * 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
$C_k = 50 - 500 \text{ kN/m}^2$	<b><u>Quellen:</u></b>
$\varphi_k = 35^\circ$	$\sigma_{q0} (\omega=1) = 10,2 \text{ MN/m}^2$
$C_s = > 40 \text{ kN/m}^2$	$K_q = 0,16$
$\varphi_s = 30^\circ$	

Bild 19: Kennwerte für die Kalibrierung des Modells an Messergebnissen des Versuchsbauwerks im Freudensteintunnel

### **3. Versuchsbauwerk Freudensteintunnel**

Seitlich des zweigleisigen NBS-Tunnels Freudenstein an der Schnellfahrstrecke von Mannheim nach Stuttgart wurde während der Bauzeit ein Versuchsstollen eingerichtet (Bild 20, Prommersberger 1991). Hier wurde im Bereich des Schnitts 1-1 ein Versuchsblock nach dem Ausweichprinzip (VNS) hergestellt. Im benachbarten Bereich wurden 4 kreisförmige Versuchsblöcke mit einer Innenschale aus Stahlbeton mit unterschiedlicher Dicke gebaut (Widerstandsprinzip). Schließlich wurden 5 Tunnelblöcke hufeisenförmig ausgebrochen und im Gewölbe mit Spritzbeton gesichert. Die Stahlbetonsohlen wurden



mit Vorspannkern nach unten geankert. In einem dieser fünf Blöcke wurde unterhalb der Sohlplatte eine Knautschzone angeordnet.

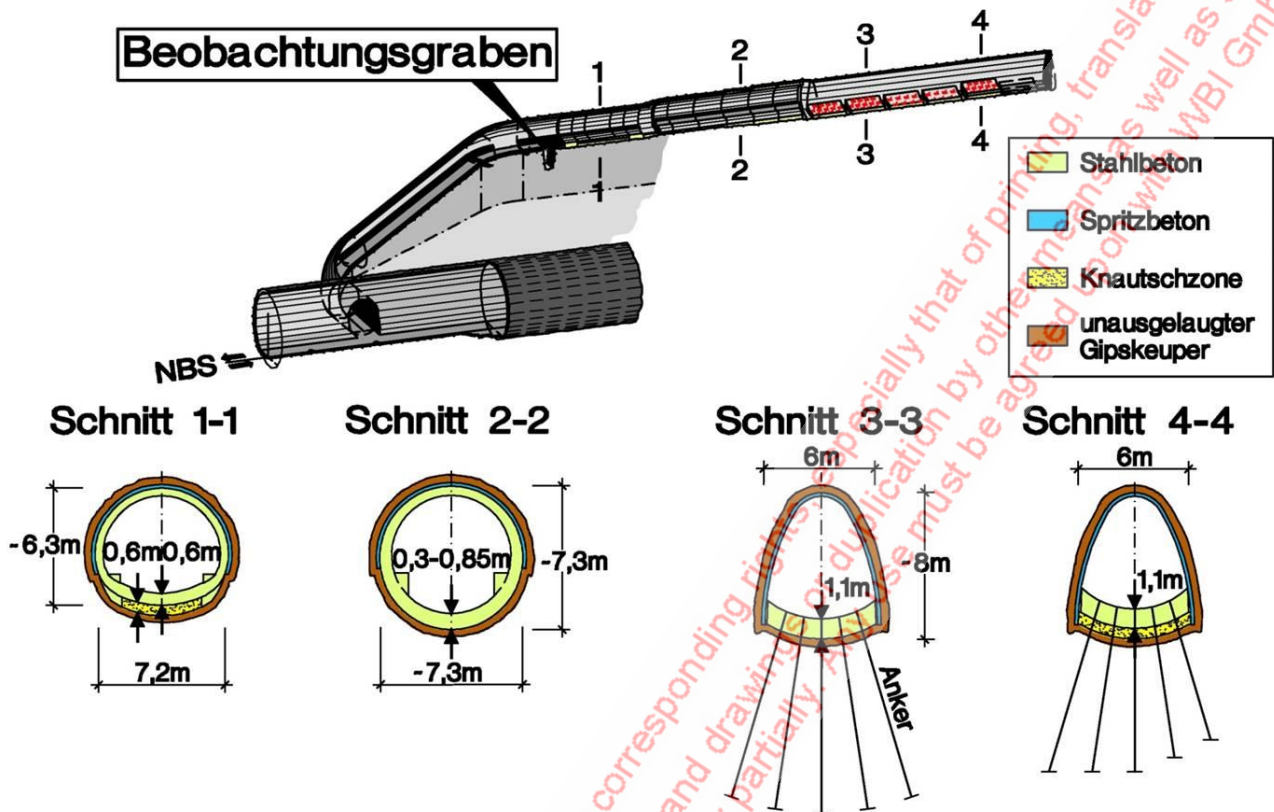


Bild 20: Versuchsstollen Freudensteintunnel

Nach dem Bau des Stollens im trockenen Zustand, wurde das Gebirge unterhalb der Tunnelsohle über radiale Bohrungen bewässert (Bild 21, Prommersberger 1991, Wittke 2003, Wittke-Gattermann 1998, Wahlen 2009). Dadurch wurde das Quellen in dem zum mittleren Gipshorizont gehörenden Gebirge ausgelöst. Die daraus resultierenden Spannungen und Dehnungen sowie die vom Fels aufgenommenen Wassermengen wurden über einen Zeitraum von 20 Jahren gemessen (Geotechnisches Ingenieurbüro Prof. Fecker 2007). Die Messergebnisse wurden WBI von der DB zur Verfügung gestellt und dazu verwendet, das oben beschriebene Modell und Berechnungsverfahren zu kalibrieren (Wahlen 2009).

Das Bild 22 zeigt das für einen nach dem Widerstandsprinzip erstellten Block verwendete FE-Netz. Die Kalibrierungsrechnungen wurden mit dem in Bild 19 zusammengestellten Kennwertsatz begonnen. Die Berechnungen zeigen, dass sich als Folge des Ausbruchs unterhalb der Tunnelsohle eine vertikal entlastete Zone ausbildet, in der die hier maßgebliche Durchlässigkeit parallel zu den Schichtfugen im Vergleich zum ungestörten Gebirge anwächst (Bild 23). In diese Zone dringt das Wasser über die Bewässerungsbohrungen ein und erzeugt nach 20 Jahren die im linken Teil des Bilds 24 dargestellten Quelldrücke. Infolge der quellbedingten Dehnungen wird die Durchlässigkeit im Bereich des Gebirges im Verlauf der Zeit deutlich geringer (Bild 24, rechts). Unmittelbar neben den Bohrungen ist der Durchlässigkeitsbeiwert parallel zur Schichtung sogar geringer als im Ausgangszustand.

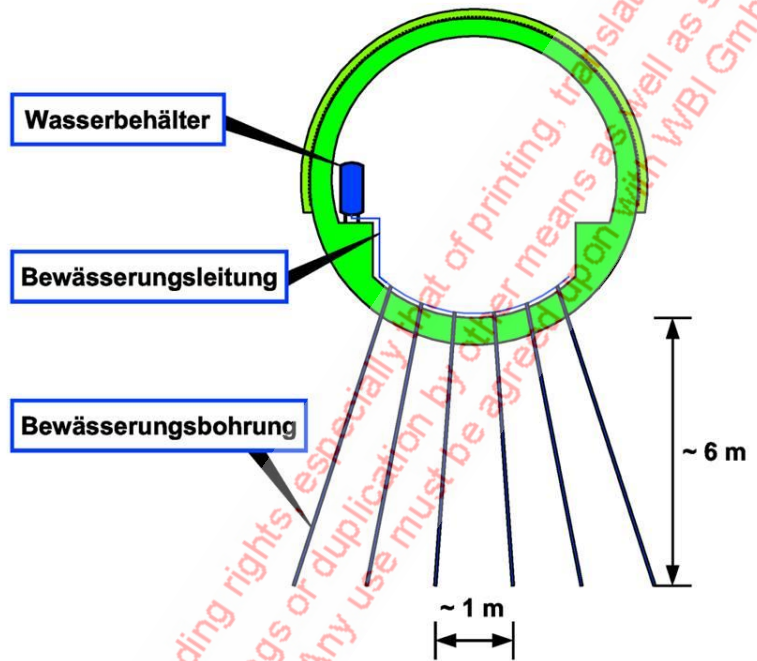
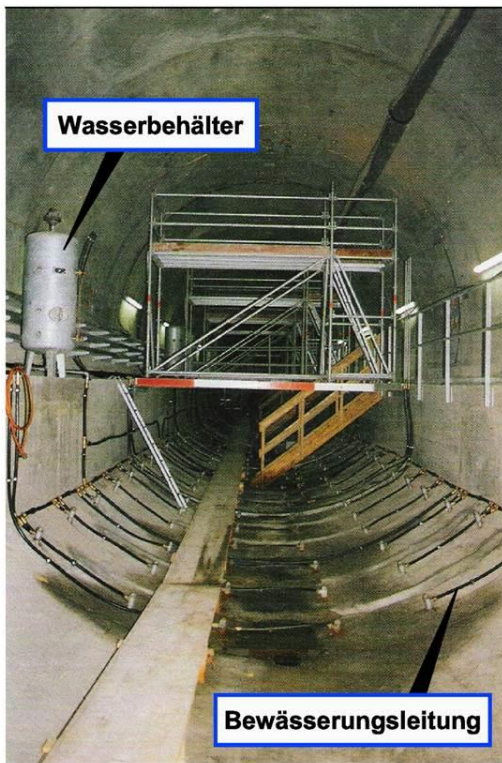


Bild 21: Untersuchungsstollen im Freudensteintunnel

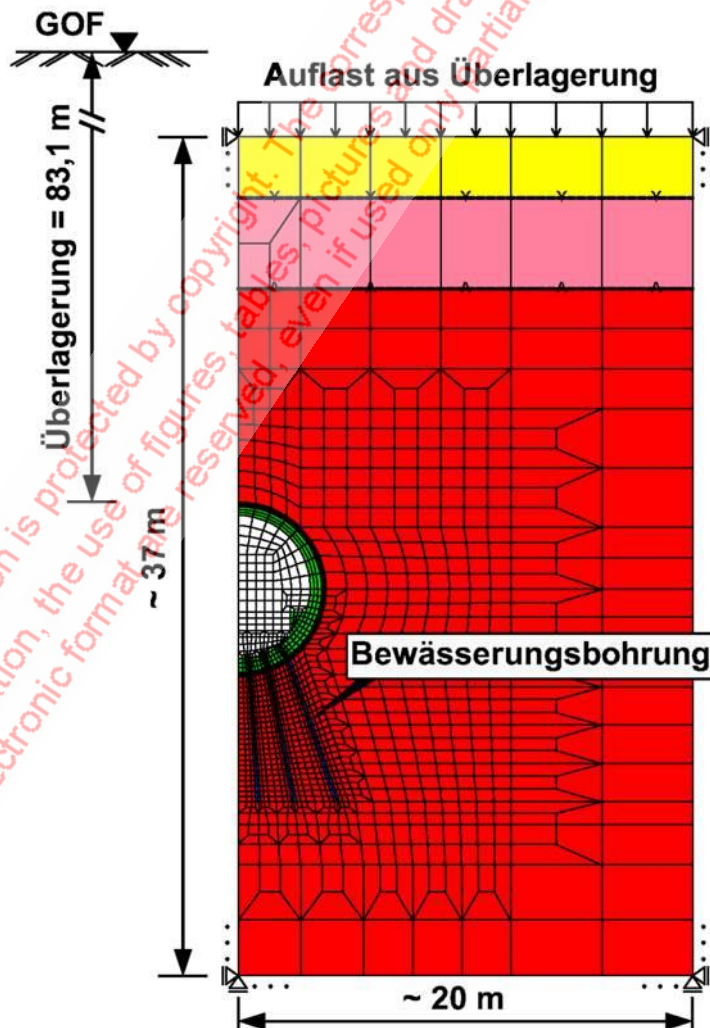
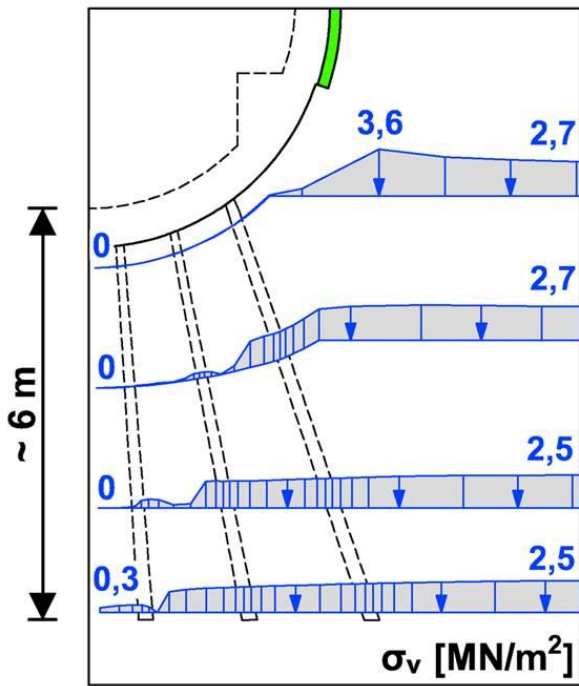
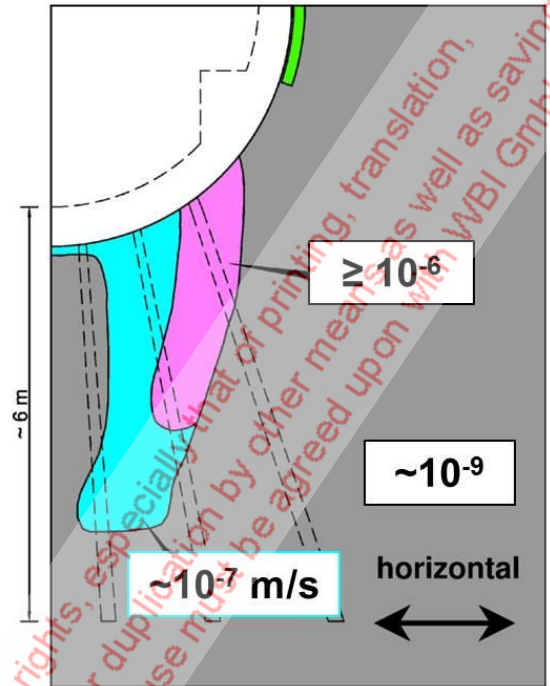


Bild 22: Kalibrierung Block VIII, FE-Netz



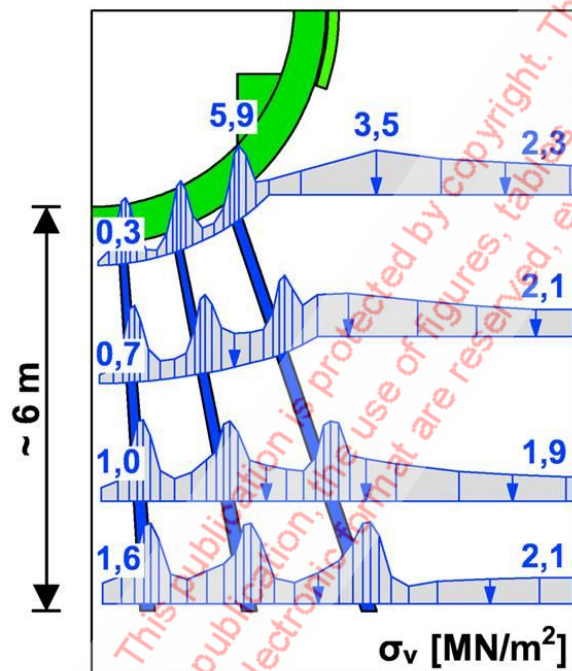


### Vertikalspannungen

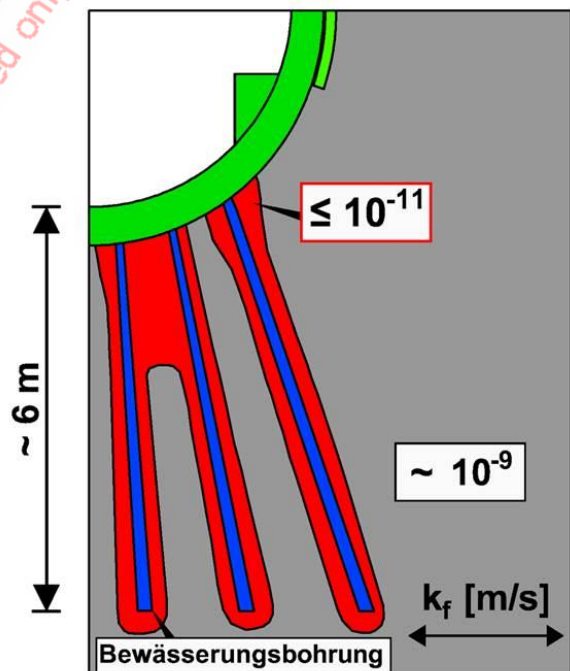


### Durchlässigkeit (horizontal)

Bild 23: FE-Berechnung, Ergebnisse vor Quellen



### Vertikalspannungen



### Durchlässigkeit (horizontal)

Bild 24: FE-Berechnung, Ergebnisse nach 20 Jahren Quellen



Die über 20 Jahre gemessenen Sohlhebungen sowie der aus der Kalibrierungsrechnung resultierende Verlauf sind im Bild 25 dargestellt. Im Bild 26 wird die über die Zeit vom Fels aufgenommene Wassermenge mit den Ergebnissen der Kalibrierungsberechnungen verglichen. Es zeigt sich in beiden Fällen eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung.

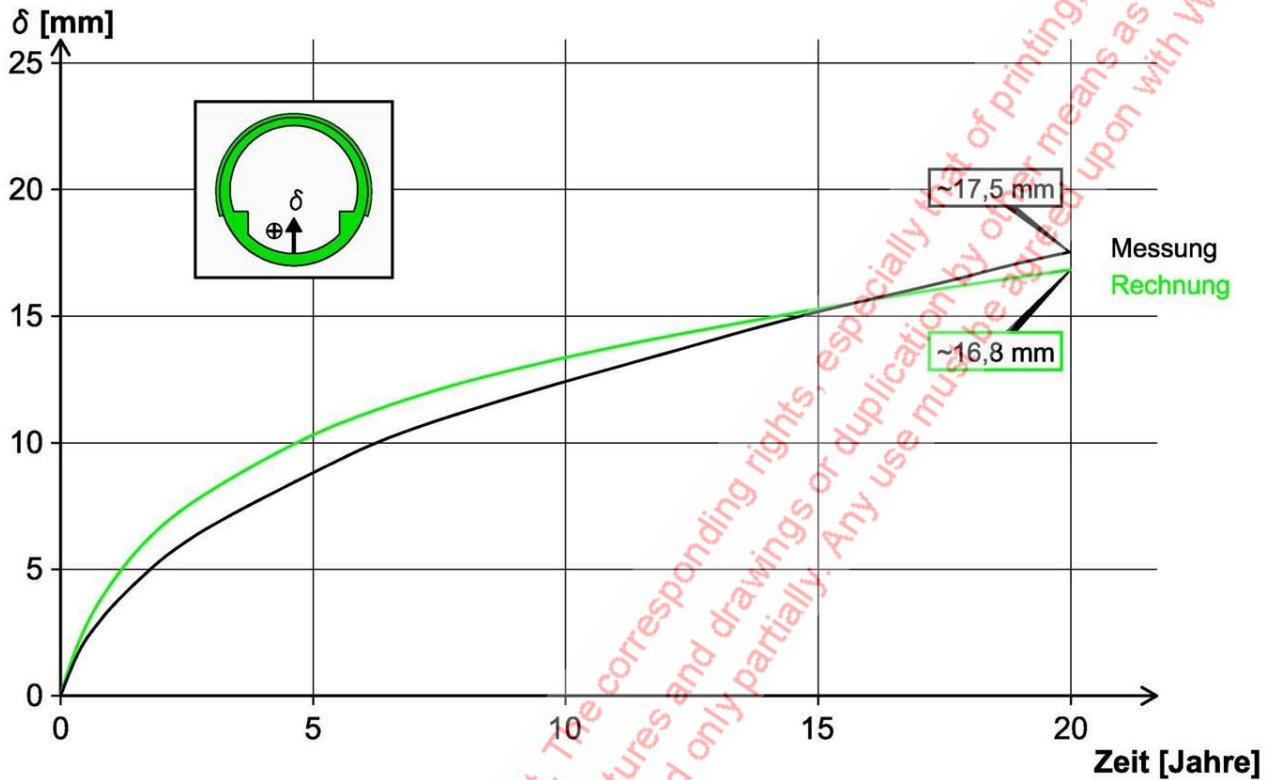


Bild 25: Sohlhebungen

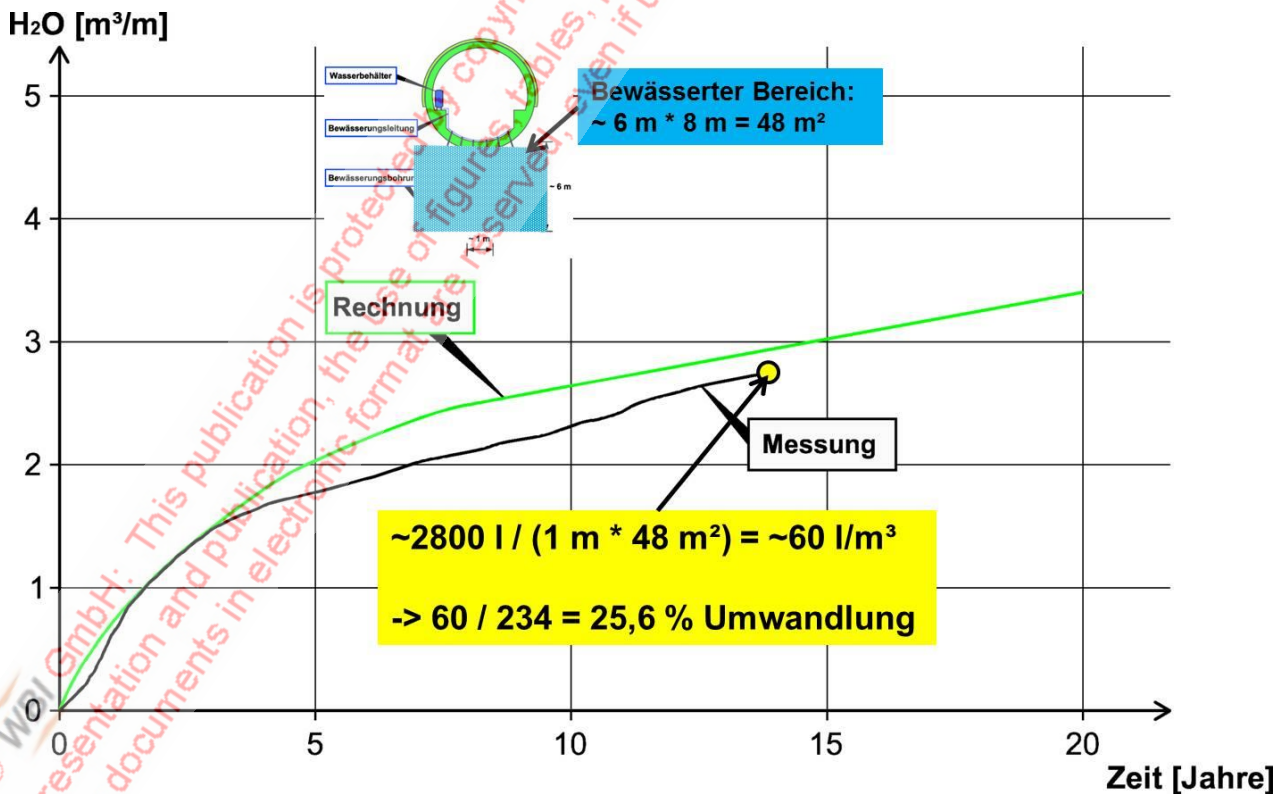


Bild 26: Wassermengen

Bild 27 zeigt einen Blick in den Stollenabschnitt, der mit geankerten Sohlplatten ausgerüstet ist (Bahnprojekt Stuttgart-Ulm 2017). Den zeitlichen Verlauf der in den Blöcken XI bis XIV gemessenen Sohlhebungen zeigt das Bild 28. Man erkennt, dass die Sohlhebungen von der Größe der mittleren Ankerspannungen abhängen (Wittke & Wittke & Wahlen 2004). Trägt man die zu verschiedenen Zeitpunkten gemessenen Sohlhebungen über der mittleren Ankerspannung auf, so ergeben sich Verläufe, die denen des Quellgesetzes in Bild 18 entsprechen (Bild 29).



Bild 27: Untersuchungsstollen U1, Geankerte Sohlplatten

Aus Extensometermessungen hat sich ergeben, dass der größte Teil der quellbedingten Verschiebungen aus einem Tiefenbereich von 2 m unterhalb der Sohle resultiert (Bild 30, Wittke-Gattermann 1998, Wahlen 2009). Dividiert man die o. g. Sohlhebungen durch diese 2 m, so ergeben sich die in Bild 30 dargestellten Verläufe der mittleren quellbedingten Dehnungen über die Spannungen. Diese Kurven lassen sich mit dem o. g. Quellgesetz gut beschreiben, wenn man die in der Tabelle in Bild 30 zusammengestellten Quellparameter  $K_q$  und  $\sigma_{q0}$  in die Gleichung einführt. Man erkennt daraus, dass das Quellgesetz auch für unterschiedliche Zeitpunkte gilt und damit auch für Fälle, in denen nur ein bestimmter Prozentsatz des im Gebirge vorhandenen Anhydrits in Gips umgewandelt ist (Wittke 2003).

Im Bild 26 wurde die vom Gebirge aufgenommene Wassermenge in Abhängigkeit von der Zeit für einen "Widerstandsblock" dargestellt. Nimmt man an, dass der bewässerte Bereich ein Volumen von ca. 48 m<sup>3</sup> je laufenden Meter Tunnel hat, so ergibt sich, dass ca. 60 l Wasser pro m<sup>3</sup> Fels aufgenommen wurden. Geht man davon aus, dass für eine vollständige



ge Umwandlung des im Gebirge vorhandenen Anhydrits in Gips ca. 234 l Wasser pro m<sup>3</sup> Fels erforderlich sind (Bild 1, Wittke 2003), so ergibt sich, dass im Verlauf des betrachteten Zeitraums von ca. 14 Jahren im Mittel 25,6 % des Anhydrits in Gips umgewandelt wurden (Bild 26).

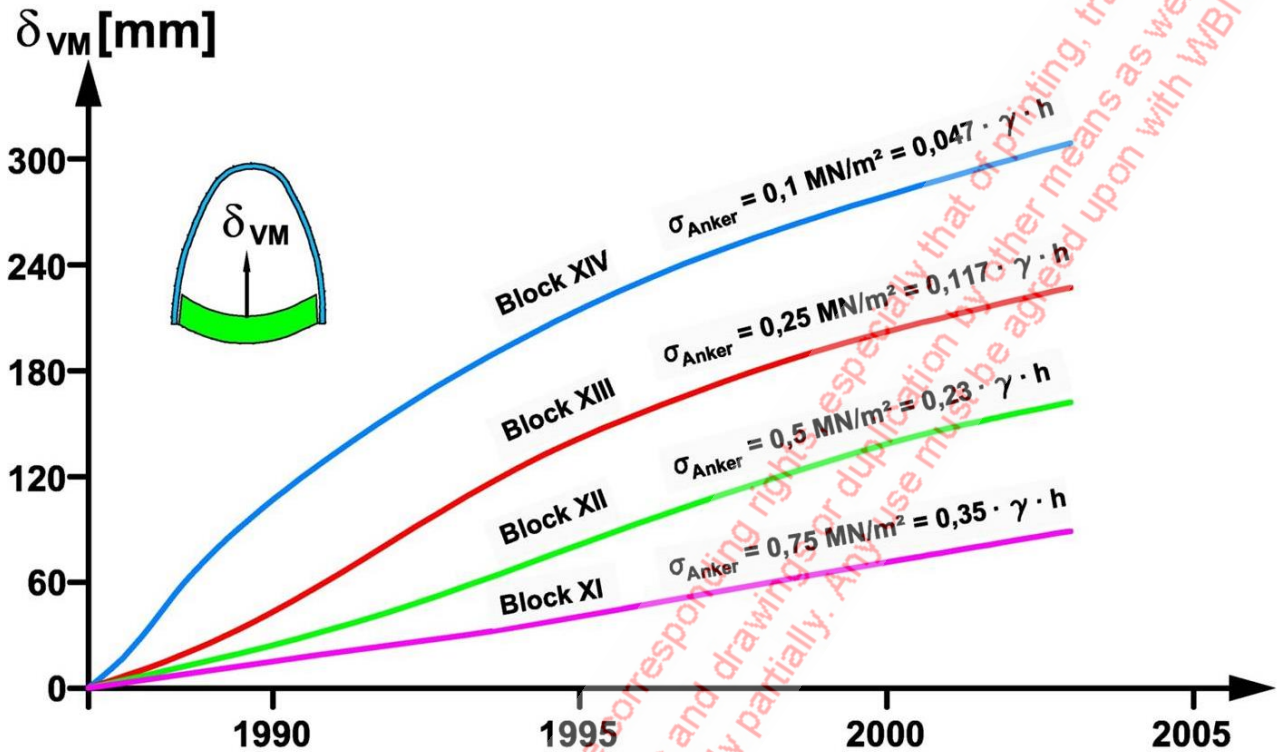


Bild 28: Mittlere Sohlhebungen, Zeitdiagramm

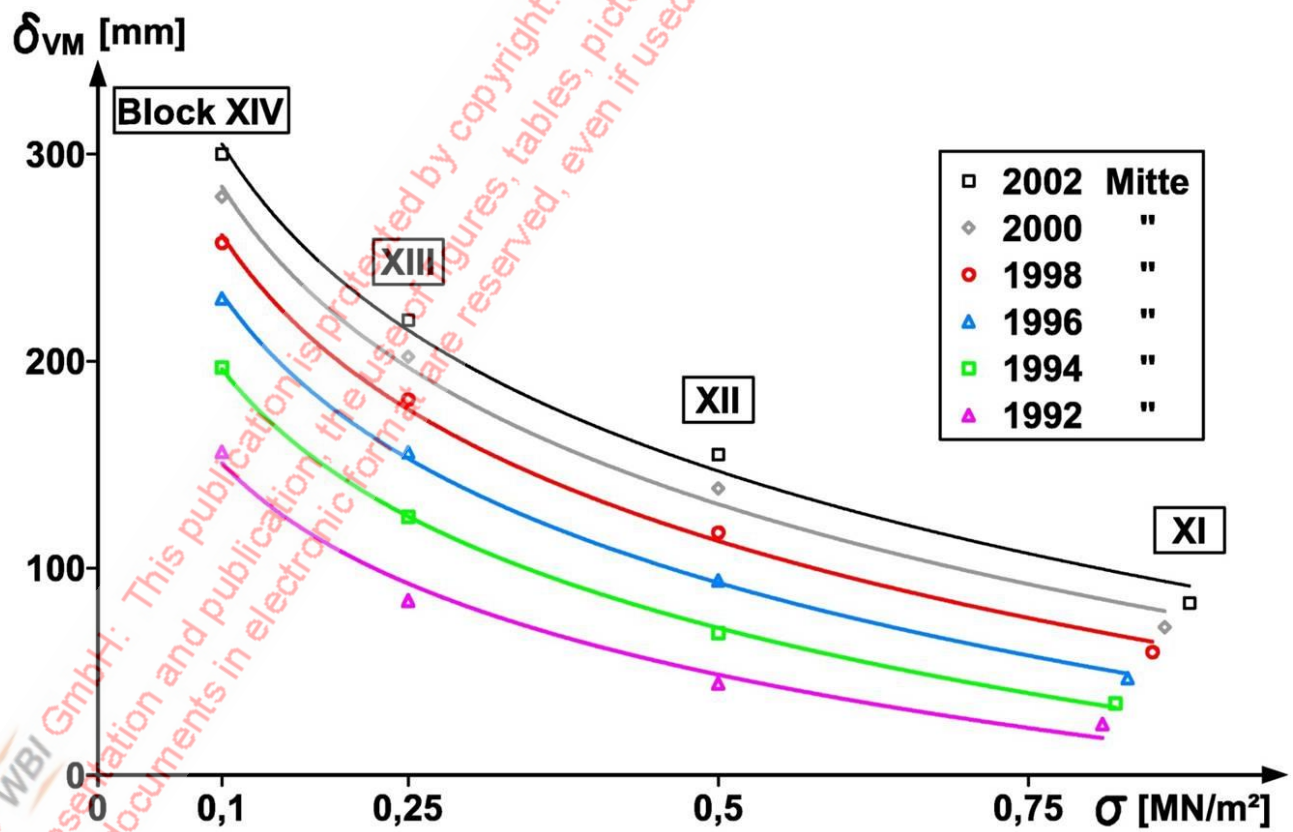


Bild 29: Sohlhebungen-Ankerspannungs-Diagramm für verschiedene Zeitpunkte (Umwandlungsgrad)



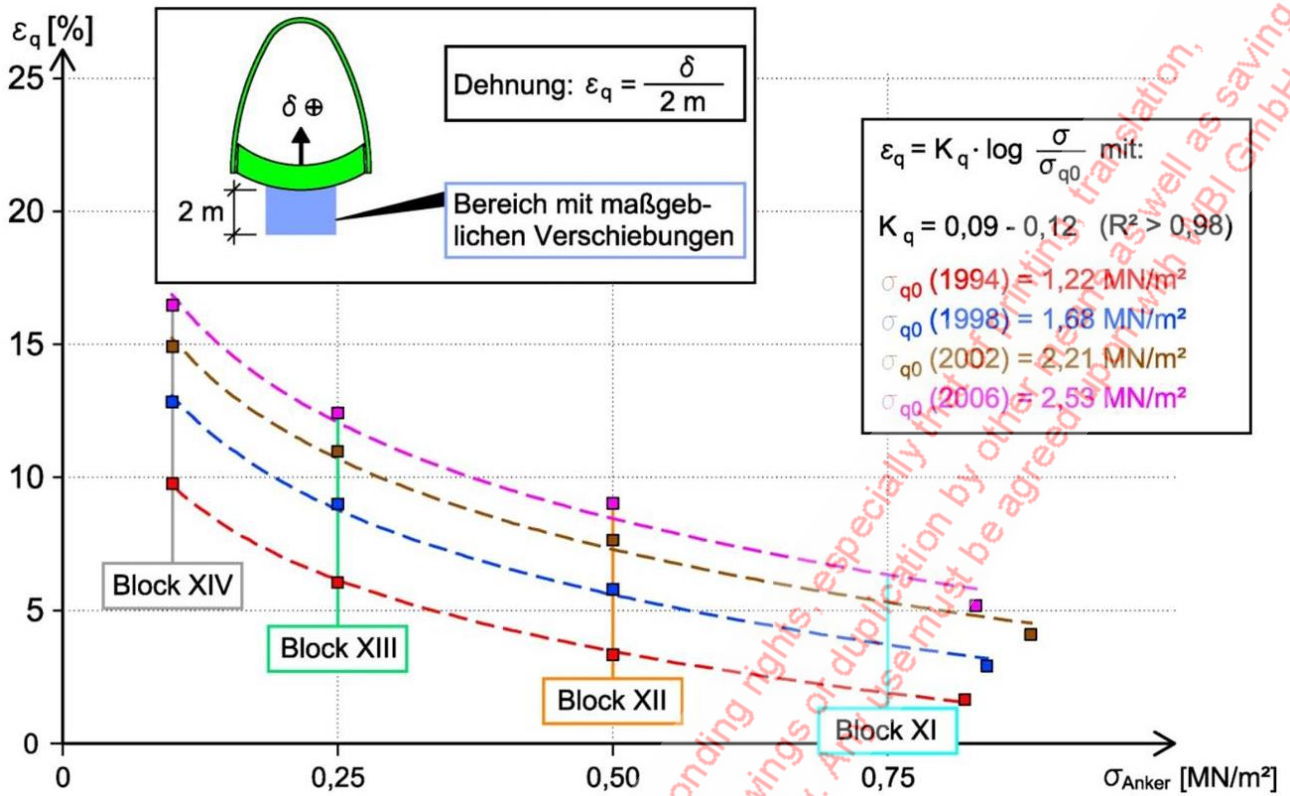


Bild 30: Gemessene Sohlhebungen - geankerte Sohlplatten

Im Bild 31 sind die im Bereich der geankerten Sohlplatten über die Zeit aufgenommenen Wassermengen aufgetragen.

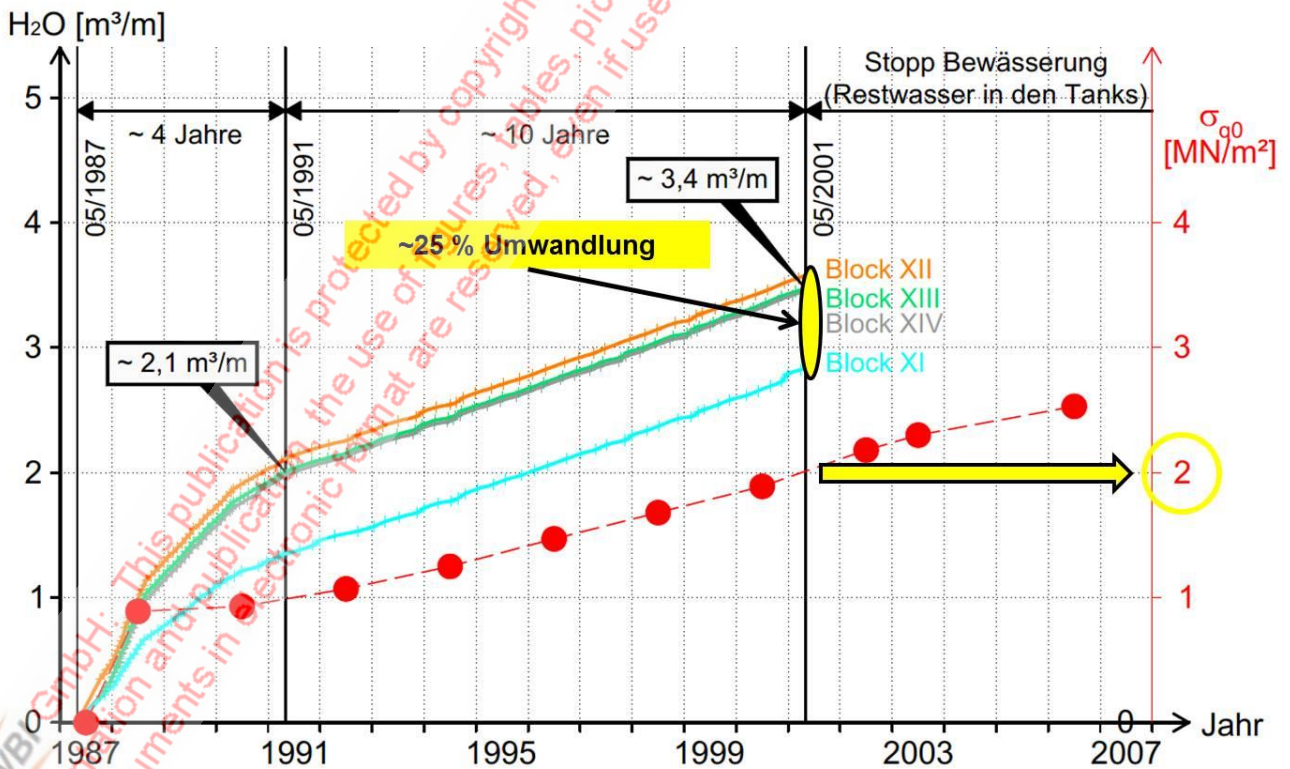


Bild 31: Geankerte Sohlplatten, Wasserzugabe und Entwicklung des Quelldrucks

Geht man davon aus, dass auch hier nach einem Zeitraum von ca. 14 Jahren etwa 25 % des Anhydrits in Gips umgewandelt wurden, so müsste sich der gemessene Quelldruck auch hier mit einem Quellparameter von  $\sigma_{q0} \sim \frac{1}{4} \cdot 9,0 \text{ MN/m}^2 = 2,25 \text{ MN/m}^2 \sim 2,0 \text{ MN/m}^2$  ergeben (abweichend von den Ergebnissen der Laborversuche ergibt sich aus den Kalibrierungsrechnungen ein Quellparameter von  $\sigma_{q0} (\omega = 1) = 9,0 \text{ MN/m}^2$ , Wittke 2014, Wahlen 2009).

Der aus den Messergebnissen für die geankerten Sohlplatten für verschiedene Zeitpunkte abgeleitete Quellparameter  $\sigma_{q0}$  ist ebenfalls in Bild 31 dargestellt. Man erkennt, dass dieser Quelldruck tatsächlich im Bereich der erwarteten Größe liegt. Auch der Verlauf des Quellparameters über die Zeit entspricht in der Tendenz dem zeitlichen Verlauf der aufgenommenen Wassermengen.

#### 4. Ausführungsstatik

Als Grundlage für die Ausführungsstatik der Tunnel des PFA 1.5 des Projekts Stuttgart wurde ein 3D-Untergrundmodell erstellt, in dem die Ergebnisse der Vorerkundungen und die Ergebnisse der baubegleitend durchgeführten Kartierungen und der vom Querschnitt aus nach oben und unten durchgeführten Erkundungsbohrungen berücksichtigt wurden (Bilder 32 bis 34).

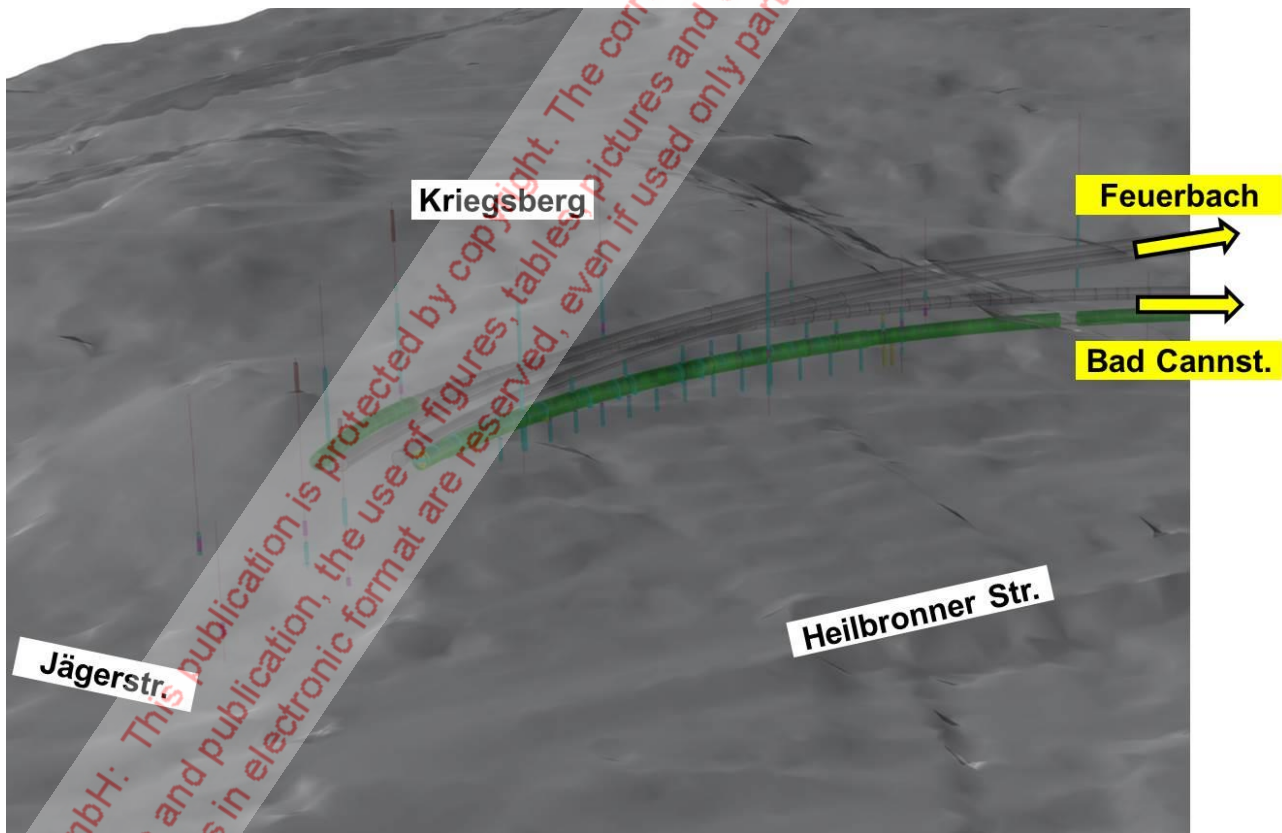


Bild 32: PFA 1.5: Vortriebe unter dem Kriegsberg

Beispielhaft soll ein Auszug aus den statischen Berechnungen für den in Bild 34 gekennzeichneten Berechnungsquerschnitt BQ erläutert werden. Das verwendete FE-Netz, der



Schichtenverlauf, die Grundwasserverhältnisse und die angenommenen Durchlässigkeitsbeiwerte sind in Bild 35 dargestellt. Für den unterhalb der Tunnelachse anstehenden anhydritführenden Bereich konnte nachgewiesen werden, dass nur 50 % des im Gebirge vorhandenen Sulfats aus Anhydrit bestehen.

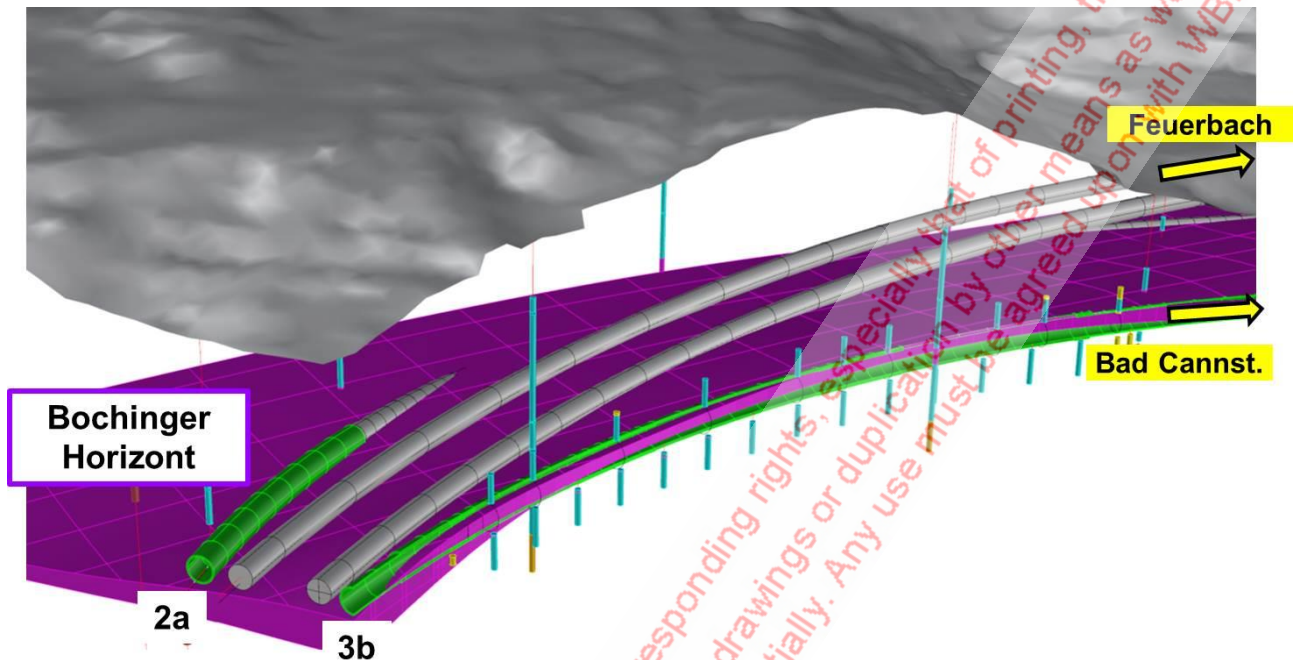


Bild 33: PFA 1.5: Vortriebe unter dem Kriegsberg, Bochinger Horizont

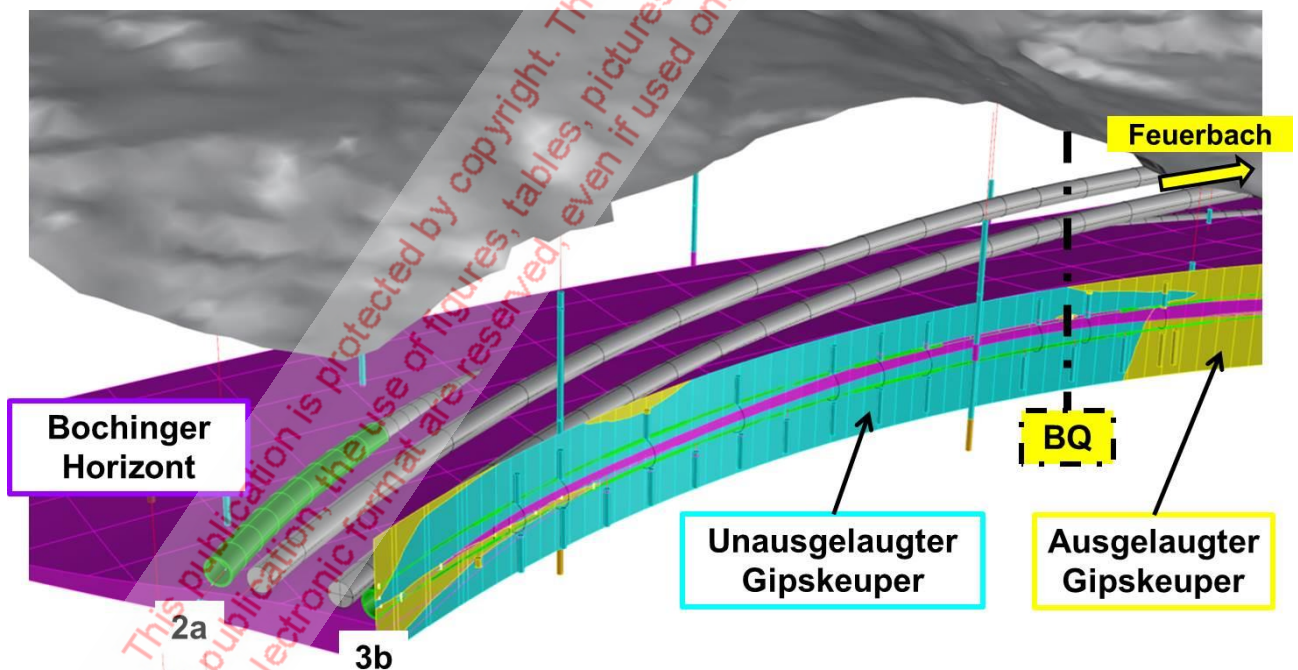


Bild 34: PFA 1.5: Vortriebe unter dem Kriegsberg, Berechnungsquerschnitt

Die ausbruchsbedingte Erhöhung der Durchlässigkeit des Gebirges in horizontaler und vertikaler Richtung ist in Bild 36 dargestellt. Die "aufgelockerte Zone" reicht danach ca. 4 bis 6 m über die Firste. Diese Zone wird im Nahbereich des Tunnels durch Injektionen mit



Acrylatgel abgedichtet (Bild 37, Erichsen 2015, Wittke & Strangfeld 2016). Diese Abdichtung wird in den vorgestellten Berechnungen berücksichtigt.

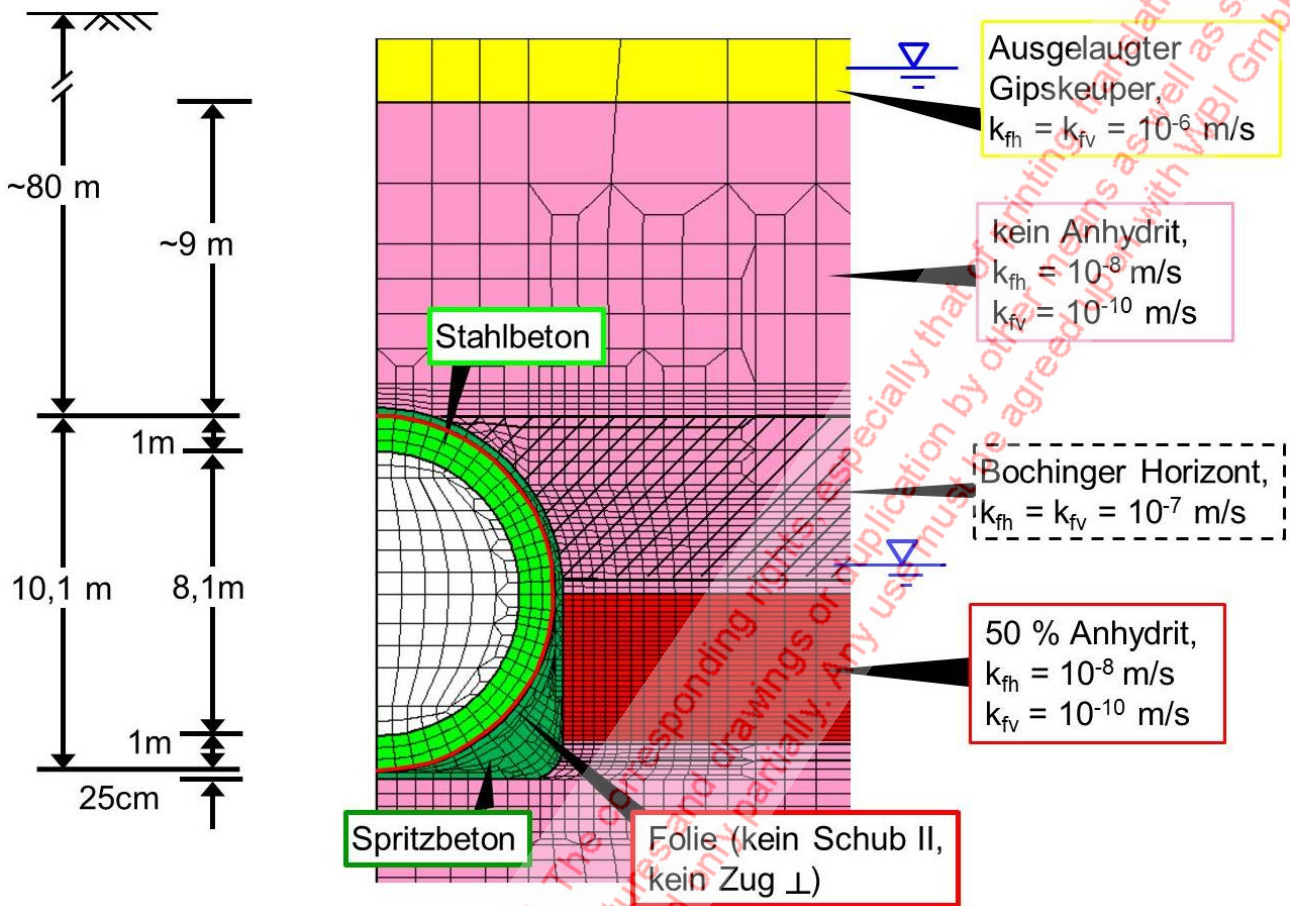


Bild 35: Linse 1 Bad Cannstatt, FE-Netz, Detail

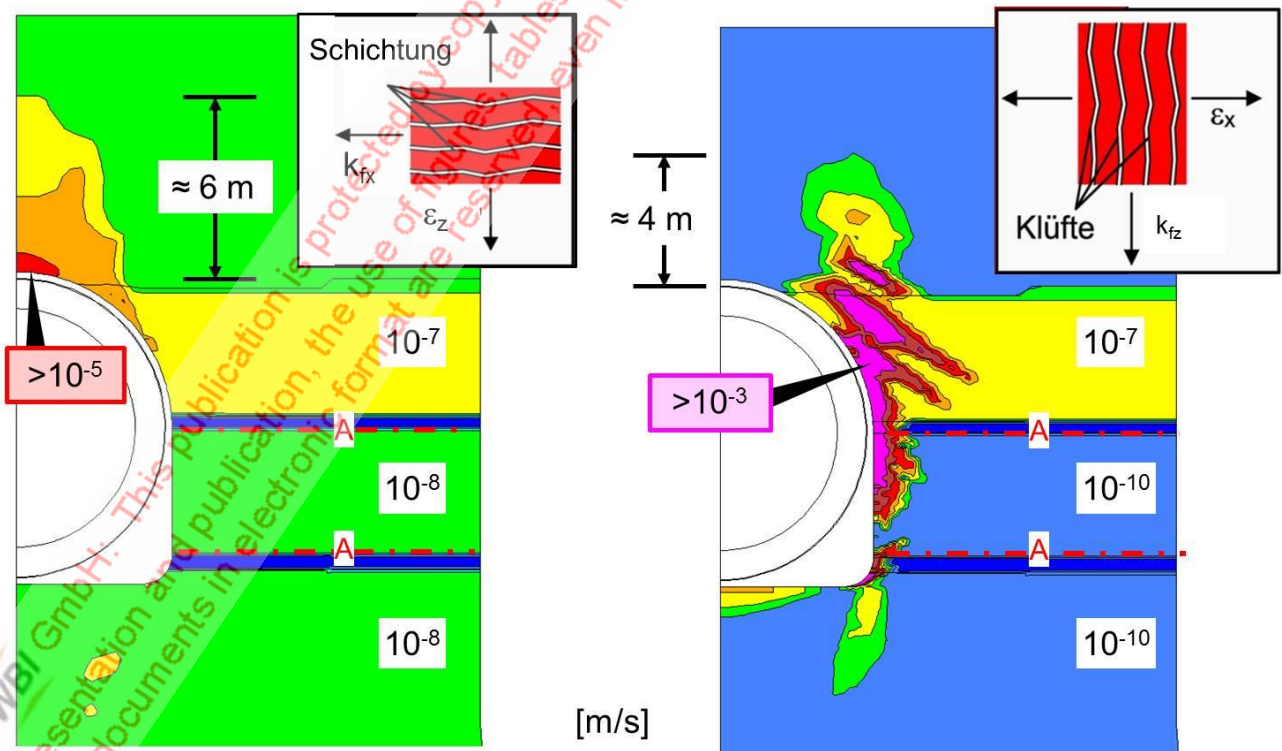


Bild 36:  $k_f$ -Werte nach Ausbruch und Sicherung, ohne Injektionen

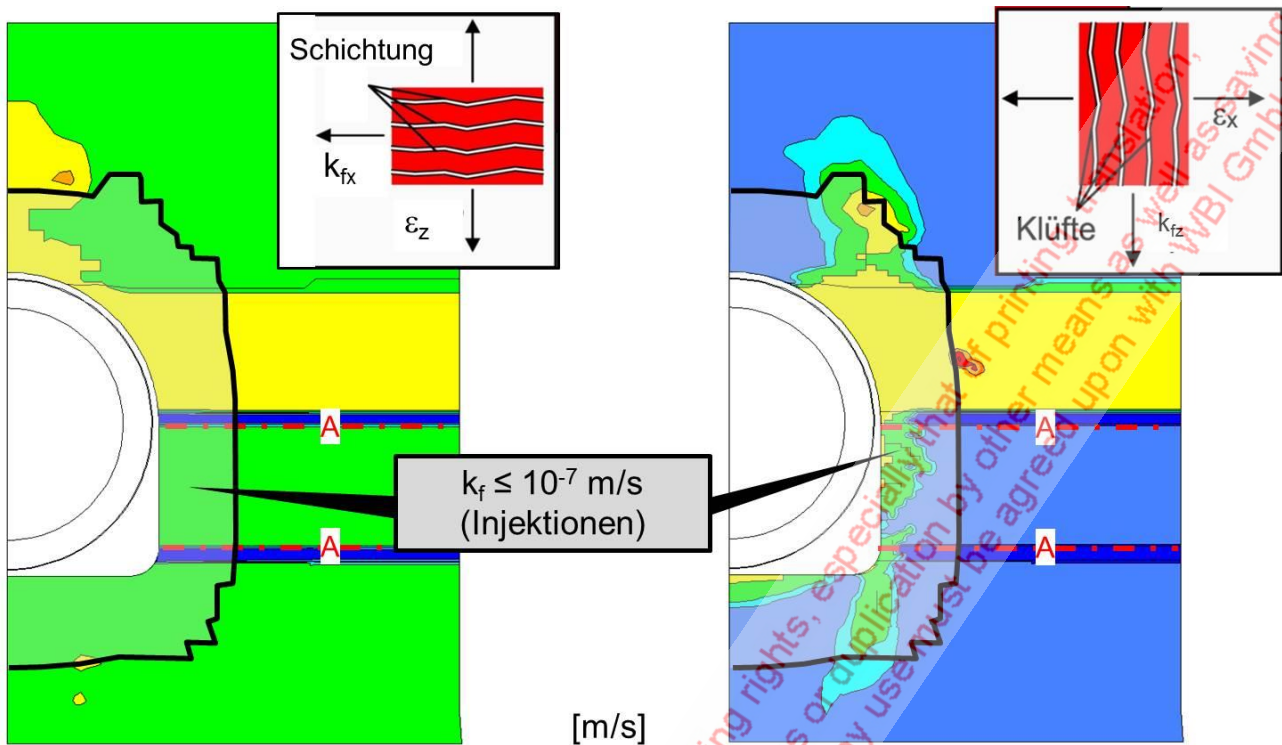


Bild 37:  $k_f$ -Werte nach Ausbruch, Sicherung und Injektionen

Nach 100 Jahren Quellen ergibt sich in Höhe des Anhydritspiegels ein maximaler Quelldruck von ca.  $4 \text{ MN/m}^2$  (Bild 38). Dieser bewirkt die in Bild 39 dargestellten Schnittgrößen. Durch die große Biege- und Schubbeanspruchung in Höhe der Ulmen ergeben sich vergleichsweise große erforderliche Bewehrungsanteile in diesem Bereich (Bild 40).

**$0,5 \text{ MN/m}^2$**

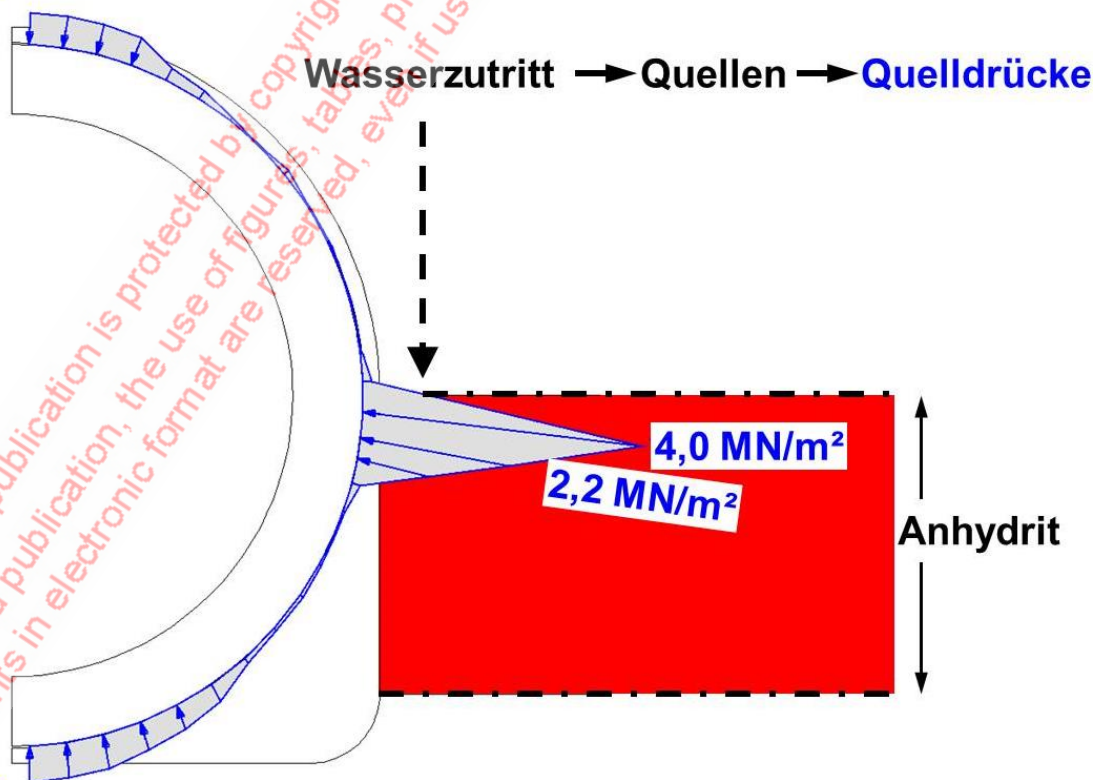


Bild 38: Radialdruck auf die Innenschale nach 100 Jahren Quellen

Das Berechnungsverfahren ermöglicht auch eine Prognose der Verschiebungen. Auf die Darstellung der Ergebnisse wird im Rahmen dieser Veröffentlichung jedoch verzichtet.

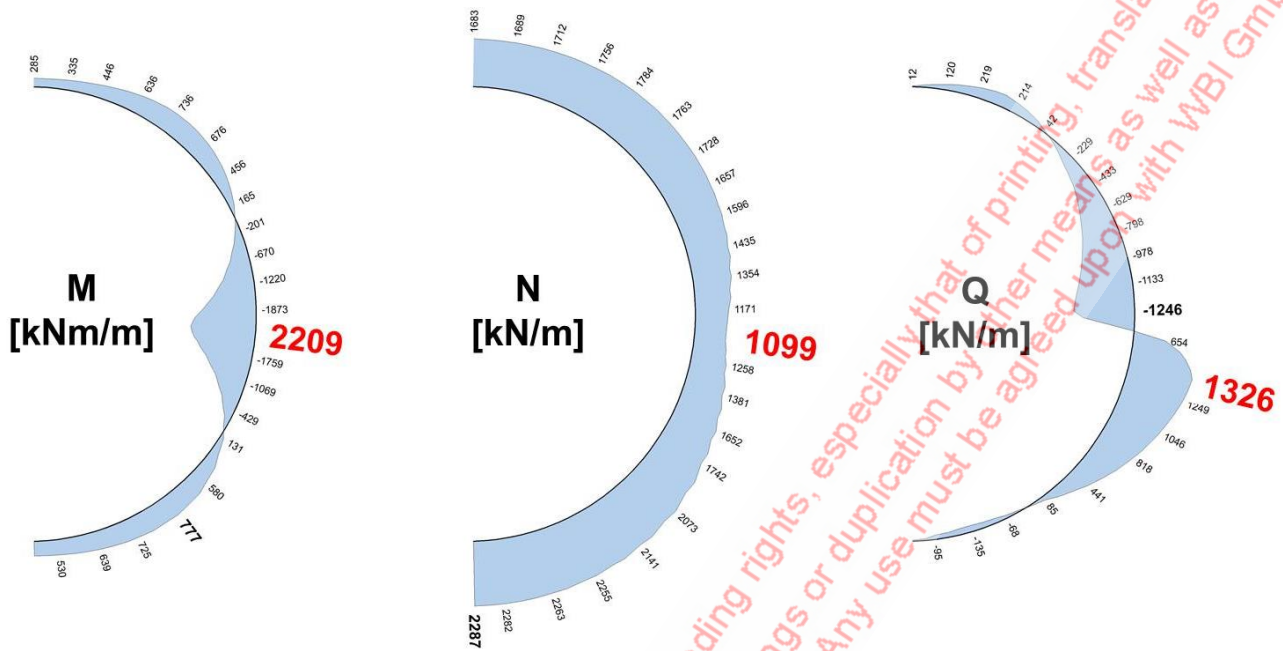


Bild 39: Schnittgrößen in der Innenschale nach 100 Jahren Quellen

Annahmen: DIN 1045-1(2008); GZT;  $\gamma = 1.35$ ;  $h = 100 \text{ cm}$  (fest);  $d_1 = 14 \text{ cm}$ ; C 45/55; BSt 500 S(A); Asym. Bew.;  $\gamma_C = 1.50$ ,  $\gamma_S = 1.15$ ;  $\alpha_C = 0.85$

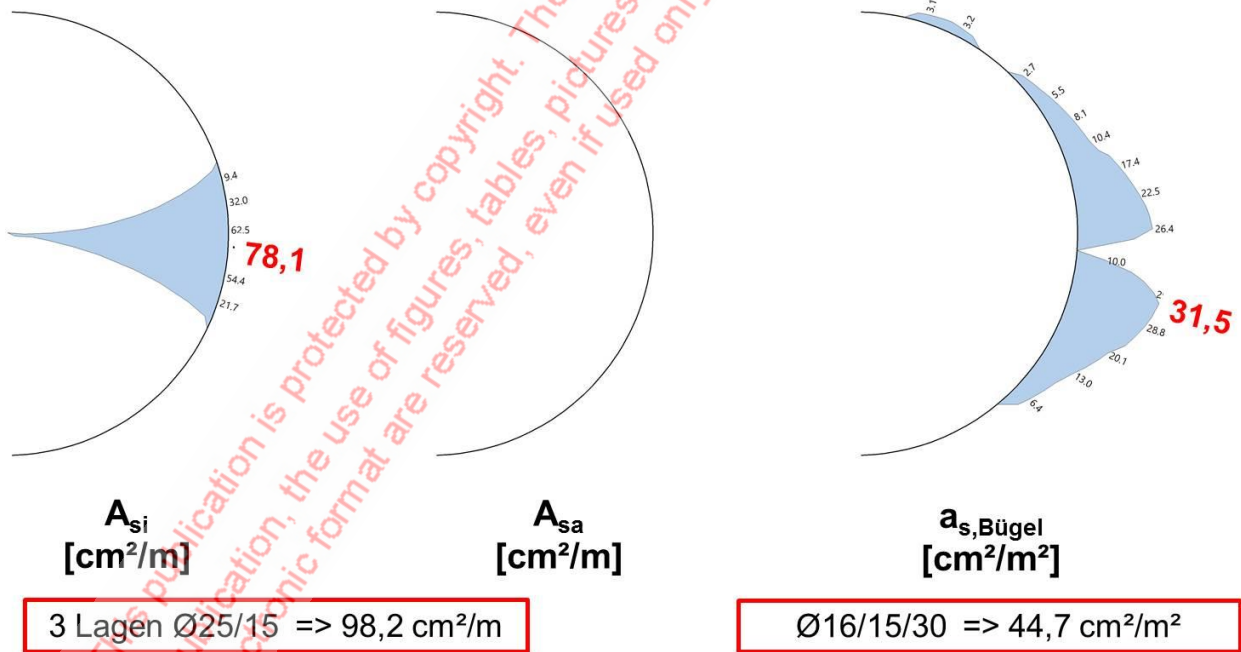


Bild 40: Bemessung der Innenschale im GZT (Eigengewicht, Gebirgsdruck, Quelldruck und Temperatur)



## 5. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man folgendes feststellen:

1. Das Modell und das darauf aufbauende Berechnungsverfahren ermöglichen eine hinreichend zuverlässige Planung von Tunneln im anhydritführenden Gebirge.
2. Die erforderlichen felsmechanischen Kennwerte wurden
  - in Labor- und Feldversuchen,
  - mit Hilfe einer Kalibrierung am Versuchsbauwerk Freudensteintunnel sowie
  - mittels Validierungen an verschiedenen ausgeführten Tunnelnermittelt.
3. Wesentlich für die Bemessung einer Tunnelschale und die zu erwartenden Hebungen sind folgende Faktoren:
  - Höhenlage Anhydritspiegel sowie Anhydritgehalt.
  - Höhenlage der Auslaugungsfront/des wasserführenden Gebirges.
  - Lage der Leithorizonte wie Bochinger Horizont und Bleiglanzbank.
  - Vorhandensein von Störungen.
  - Durchlässigkeit des Gebirges im Ausgangszustand.
  - Grundwasserspiegel.

## Literatur

Alonso, E. E.; Ramon, A.: Gypsum crystal growth in tunnels. Harmonising Rock Engineering and the Environment. Taylor & Francis Group, 2012.

Bahnprojekt Stuttgart-Ulm e.V.: Walter Wittke kennt den Stuttgarter Untergrund wie kein anderer. Zeitschrift Bezug - das Projektmagazin, Ausgabe 19, Stuttgart, März, 2017.

Erichsen, C.: Gekoppelte Spannungs-Sickerströmungsberechnungen von Bauwerken in klüftigem Fels unter Berücksichtigung des nichtlinearen Spannungsverschiebungsverhaltens von Trennflächen. Dissertation und Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau, RWTH Aachen, Heft 15, Aachen, 1987.

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.

Geotechnisches Ingenieurbüro Prof. Fecker & Partner GmbH (G/I/F): Freudensteintunnel, zusammenfassender Bericht Versuchsstrecke U1, 64. Bericht zur geotechnischen Beratung. Stuttgart, Mai 2007 (unveröffentlicht, erstattet an die DB ProjektBau GmbH).

Geyer, O. F.; Gwinner, P.: Geologie von Baden-Württemberg, 4. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermüller), Stuttgart, 1991.

Huder, J.; Amberg, G.: Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. Schweizerische Bauzeitung, Band 88, Heft 43, S. 975 - 980, 1970.

Prommersberger, G.: Ingenieurbauwerke - DB Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart - Der Freudensteintunnel, IBW, Heft 7, 1991.

Steiner, W.; Kaiser, P. K.; Spaun, G.: Spröbruch in wenig festem Fels als Auslöser von Quellvorgängen: Beobachtungen und Analysen. Zeitschrift Geomechanics and Tunneling 3, Nr. 5, Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2010.

Tiefbauamt der Stadt Stuttgart: Der Wagenburgtunnel: Die Arbeiten des Tiefbauamtes der Stadt Stuttgart, Sonderheft Folge 1, 1957.

TU Darmstadt, Versuchsanstalt für Geotechnik: Geotechnische Laborversuche: Schwellhebungsversuche an Gesteinsproben (Anhydritproben) des Freudensteintunnels der Neubaustrecke Mannheim-Stuttgart (Pfb 10a), Prüfbericht VA02006-01. Darmstadt, 2006 (unveröffentlicht, erstellt für DB ProjektBau GmbH).

Universität Karlsruhe (TH), Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik: Langzeit-Schwellversuche Freudensteintunnel. Karlsruhe, 2006 (unveröffentlicht, erstellt für DB ProjektBau GmbH).

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

Wittke, M.: Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau im anhydritführenden Gebirge. WBI-PRINT 13, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 2003.

Wittke, M.: Knautschzone versus U-Profil im quellfähigen Gipskeuper. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016.

Wittke, W.; Kiehl, J. R.: Evaluation of the Deformability of Anisotropic Rock Masses from the Results of Field Tests. Proc. 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Australia, 1983.

Wittke, W.; Wittke, M.; Wahlen, R.: Zum Quellgesetz für den anhydritführenden, unausgelaugten Gipskeuper. Geotechnik 27, Nr. 2, S. 112 - 117, 2004.

Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin, 2014. ISBN-Nr.: 978-3-433-03079-0.

Wittke, W.: Baugrundverhältnisse des Bahnprojekts Stuttgart-Ulm. Vortrag anlässlich des Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 16.04.2015. WBI-PRINT 18, Weinheim, 2015.

Wittke, M.; Strangfeld, W.: Injektionen zur Abdichtung von gering durchlässigem, anhydrit-führenden Fels bei Tunneln des Projekts Stuttgart 21. Vortrag anlässlich des Forums Injektionstechnik 2016, Bauwerke und Baugrund sicher abdichten, Köln, 2016.

Wittke-Gattermann, P.: Verfahren zur Berechnung von Tunneln in quellfähigem Gebirge und Kalibrierung an einem Versuchsbauwerk. WBI-PRINT 1. Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1998.

© WBI GmbH: This publication is protected by copyright. The corresponding rights, especially that of printing, translation, presentation and publication, the use of figures, tables, pictures and drawings or duplication by other means as well as selling the documents in electronic format are reserved, even if used only partially. Any use must be agreed upon with WBI GmbH.