

# Planung und Herstellung von Innenschalen im quellfähigen Gebirge mit großen Bewehrungsgehalten

**Dr.-Ing. Claus Erichsen, Dipl.-Ing. Ralf Druffel  
Dipl.-Ing. Andreas Boettcher**

## Zusammenfassung

Ungefähr 1.000 m der Tunnelröhren nach Bad Cannstatt liegen im anhydritführenden, quellfähigen Gipskeuper. Diese wurden zwischenzeitlich trocken aufgefahren. Nennenswerte Quellhebungen sind nicht aufgetreten.

Während der Durchführung der Tunnelvortriebe wurden die temporäre Ortsbrust und Bohrungen, mit denen das Gebirge oberhalb und unterhalb der Tunnelröhren erkundet wurde, kartiert, und es wurden Proben zur Bestimmung des Anhydritgehalts entnommen. Auf dieser Grundlage wurden für die verschiedenen Tunnelabschnitte unterschiedliche Berechnungsquerschnitte entwickelt, die die Grundlage für die statischen Nachweise zur Beanspruchung der Stahlbetoninnenschale auf Quelldruck bildeten.

Für die Planung der Tunnelinnenschalen wurde das Widerstandsprinzip zu Grunde gelegt. Maßgebend für die Größe der Beanspruchungen und damit für die Menge der Bewehrungen waren dabei die Schichtenfolge, der Anhydritgehalt im Gipskeuper und die Möglichkeiten des Zutritts von Grundwasser zum anhydritführenden Fels.

Die statischen Berechnungen führten zu einer Bewehrung in Umfangsrichtung, die aus einer bis zu fünf Lagen mit Stabdurchmessern von 25 mm und einem gegenseitigen Abstand von 15 cm besteht. Zusammen mit der Längs- und Schubbewehrung ergaben sich Bewehrungsgehalte zwischen ~ 180 und 400 kg/m<sup>3</sup>.

Für das Herstellen dieser hochbewehrten und vergleichsweise dicken Innenschalen wurde ein spezieller Beton entwickelt. Hierzu wurden umfangreiche Versuche im Baustofflabor ausgeführt. In 1:1-In-situ-Versuchen wurden das Fließverhalten und die Verarbeitbarkeit sowie das Einbringen und die Verdichtung des Betons untersucht.

Nach Fertigstellung der Vortriebe und Räumung der Sohlauffüllungen wurde mit dem vorlaufenden Einbau der Abdichtung begonnen und mit den ersten Sohlbetonagen.

Aufgrund des hohen Bewehrungsgrades, dem Einbau von speziellen Abdichtungen, Dräagen und Kontrollsystemen in der Innenschale liegt die Wochenleistung zur Herstellung der Sohlen und Gewölbe deutlich hinter den "standardmäßigen" bekannten Ansätzen von Innenschalen.

Hinzu kommt, dass in dem eingleisigen Tunnelquerschnitt mit  $R = 4,05$  m aufgrund der beengten Platzverhältnisse ein Begegnungsverkehr nicht möglich ist und aufgrund der besonderen Baustellenverhältnisse die Andienung nur von einer Seite erfolgen kann.

## 1. Einleitung

Für das Infrastrukturprojekt Stuttgart 21 werden im PFA 1.5 Tunnel für die Fernbahn und für die S-Bahn Richtung Bad Cannstatt ausgeführt (Bild 1). Für die Fernbahn werden zwei eingleisige Tunnelröhren mit Kreisquerschnitt mit einer Gesamtlänge von ca. 5.000 m hergestellt. Ca. 1.000 m der eingleisigen Tunnelröhren für die Fernbahn liegen im unausgelaugten, anhydritführenden Gipskeuper, der quellfähig ist.

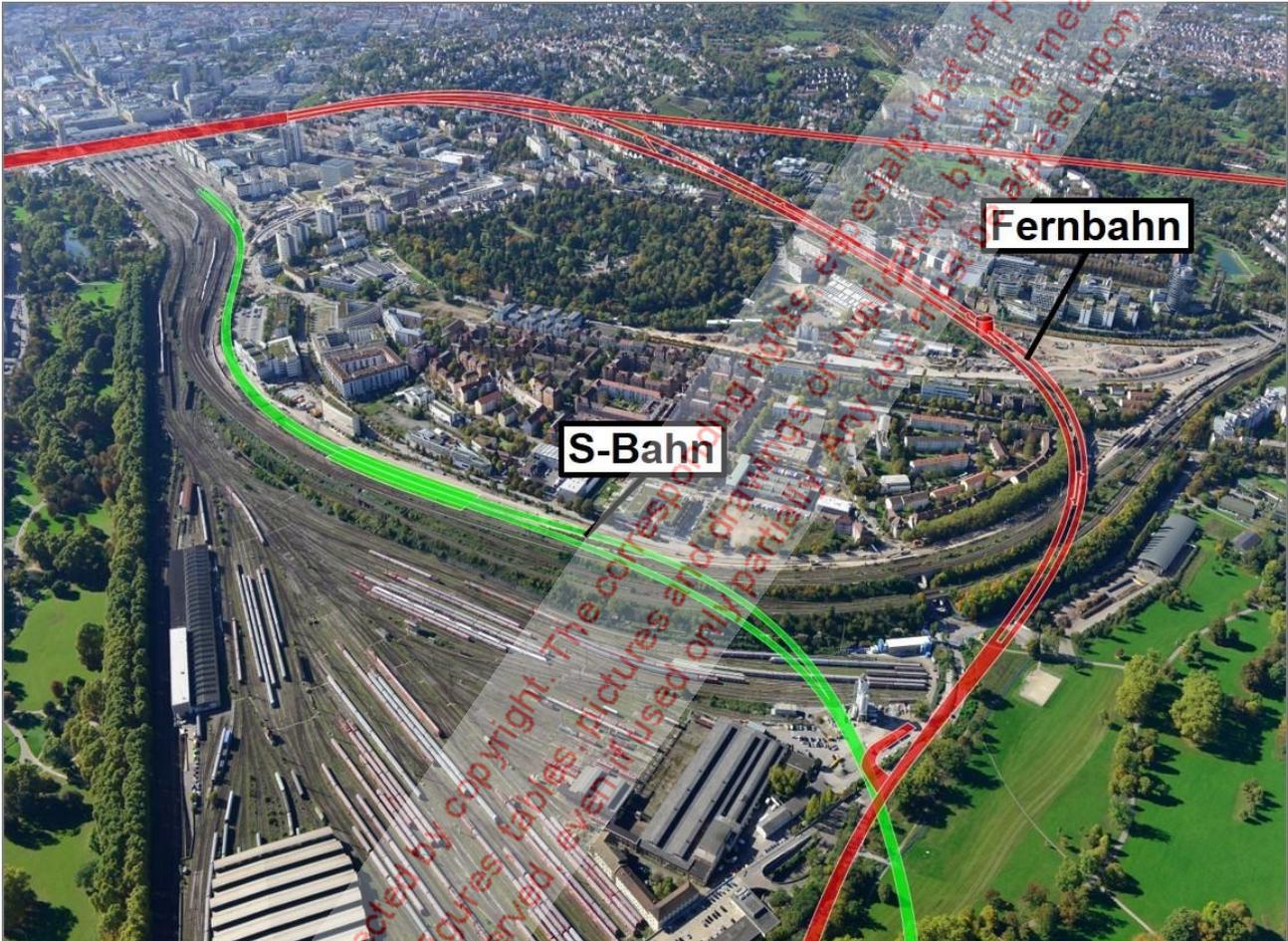


Bild 1: S21 - PFA 1.5, Los 3, Anbindung Bad Cannstatt

Nachfolgend wird auf den Baugrund und auf die baubegleitenden Erkundungen, die statischen Berechnungen und die erforderlichen Bewehrungen für die Innenschale in den Abschnitten des quellfähigen Gipskeupers eingegangen. Weiterhin wird die Herstellung der Innenschale erläutert.

## 2. Untergrund und Grundwasser

Der Gipskeuper tritt im Stuttgarter Baugrund in 3 Erscheinungsformen auf (Wittke 2015, Wittke & Wittke & Wittke-Gattermann & Erichsen 2017).

In den anhydritführenden Schichten des Gipskeupers ist Anhydrit in Lagen und in feinverteilter Form eingelagert. Dieser geht bei Wasserzutritt in Lösung und kristallisiert als Gips

wieder aus. So sind über geologische Zeiträume Schichten entstanden, in denen anstelle von Anhydrit Gips angetroffen wird. An der Oberfläche dieses gering durchlässigen Felses, der so genannten Auslaugungsfront, findet eine Auslaugung des Gesteins statt. Hier geht der Gips bei Wasserzutritt in Lösung und wird vom Grundwasser abtransportiert. Zurück bleibt ein Residualgestein, der sogenannte ausgelaugte Gipskeuper, der die Wasserdurchlässigkeit eines Schluffes aufweist. An der Auslaugungsfront bildet sich aufgrund der mit der Lösung verbundenen Volumenverluste eine stark durchlässige, teilweise kavernöse Schicht aus.

Der Fernbahntunnel nach Bad Cannstatt durchörtert alle drei o. g. Schichtglieder des Gipskeupers, wobei die einzelnen Schichten über die Längserstreckung des Tunnels in unterschiedlichen Höhenlagen zum Tunnelquerschnitt liegen (Wittke & Wittke-Gattermann & Boettcher 2018).

Der Grundwasserspiegel liegt oberhalb des Tunnels. Das Wasser steht im ausgelaugten Gipskeuper und hier insbesondere im Bereich der Auslaugungsfront an. Im unausgelaugten Gipskeuper muss im Bereich des Bochinger Horizontes, einem Leithorizont im Gipskeuper, der die Dunkelroten Mergel von den Grundgipsschichten trennt, aufgrund seiner im Vergleich zu den anderen Schichten größeren Durchlässigkeit ebenfalls mit einer gewissen Wasserführung gerechnet werden (Wittke & Wittke-Gattermann & Boettcher 2018).

### **3. Statik und erforderliche Bewehrungen**

Die Tunnel wurden mit der Spritzbetonbauweise aufgeföhren. Während des Vortriebs wurde das Grundwasser bis unter die Tunnelsohlen abgesenkt. Nach dem Einbau der Innenschalen und dem Verschließen der temporären Baudränagen wird der Grundwasserspiegel wieder auf die ursprünglich vorhandene Höhe ansteigen. Dem unausgelaugten, anhydritführenden Gipskeuper wird dann über Zonen mit vortriebsbedingten Gebirgsauflockerungen Wasser zugeführt, und es werden Quelldrücke auf die Innenschalen entstehen. Gegen diese Quelldrücke müssen die Innenschalen bemessen werden.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Größe der Beanspruchungen der Innenschalen und damit auf die Menge der Bewehrungen haben der Anhydritgehalt des Untergrundes und die Möglichkeiten des Zutritts von Grundwasser.

Zur Erkundung der Untergrundverhältnisse in der Umgebung der Tunnelröhren, die die Grundlage für die Festlegung der Annahmen für die Standsicherheitsberechnungen für die Innenschalen bildet, wurden während der Tunnelvortriebe nach nahezu jedem Abschlag aus der Ortsbrust (Bild 2) und aus Bohrungen, mit denen der Untergrund oberhalb der Tunnelfirste und unterhalb der Tunnelsohle erkundet wurde (Bild 3), Proben entnommen und auf ihre Anhydritgehalte untersucht. Bild 2 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der mineralogischen Untersuchungen an Proben aus der Ortsbrust in der Tunnelröhre V3A bei TM ~ 1176. In der Kalotte und im linken Teil der Strosse besteht der Sulfatanteil im Gestein zu 27 bis 99 % aus Anhydrit. In den anderen Bereichen der Ortsbrust wurden keine nennenswerten Anhydritgehalte bestimmt (Bild 2).

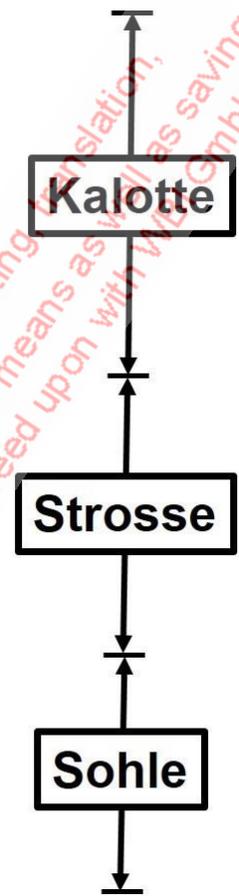
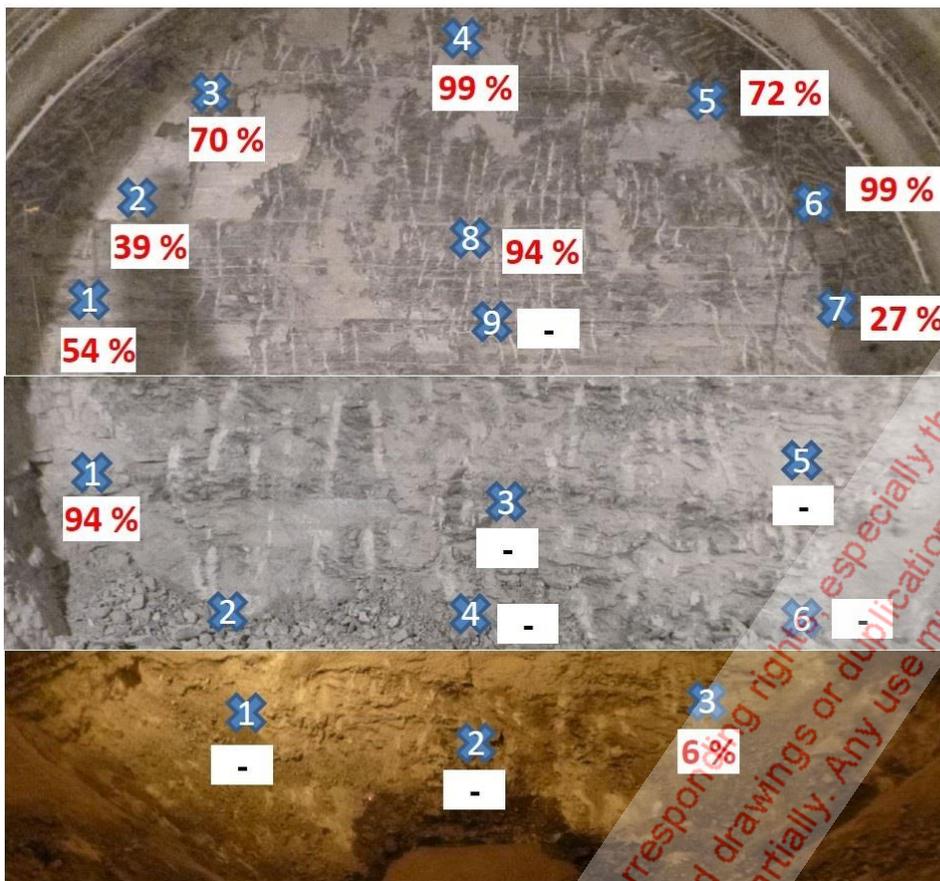


Bild 2: Vortrieb V3A, TM ~ 1176, Probenahmestellen in der Ortsbrust und Anhydritgehalte am Sulfatanteil

Bild 4 zeigt den geologischen Längsschnitt für einen ca. 80 m langen Abschnitt der Tunnelröhre V3A, wie er aus den vortriebsbegleiteten Erkundungen abgeleitet wurde. Oberhalb der Tunnelrinne wurde der Untergrund mit 3 Bohrungen erkundet. In allen Bohrungen wurde unausgelaugter anhydritführender Gipskeuper erkundet. Die Anhydritgehalte am Sulfatanteil betragen 0 bis 95 %. Im Tunnelquerschnitt wurde unausgelaugter anhydritführender Gipskeuper erkundet. Die Anhydritgehalte betragen 0 bis 99 % (Bild 2). Unterhalb der Tunnelsohle und zum Teil auch in Höhe der Tunnelsohle wurde ausgelaugter Gipskeuper angetroffen.

Bild 5 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt eines für diesen Abschnitt betrachteten felsmechanischen und numerischen Modells. Unterhalb der Tunnelsohle wird ausgelaugter Gipskeuper angenommen. Im Bereich der Strosse, der Kalotte und oberhalb des Tunnelquerschnitts wird quellfähiger Gipskeuper nachgebildet. Der Anhydritgehalt am Sulfatanteil wird i. M. mit 60 % zugrunde gelegt. Zwischen dem ausgelaugten Gipskeuper und dem anhydritführenden Gebirge und oberhalb des anhydritführenden Gebirges wird unausgelaugter, anhydritfreier und damit nicht quellfähiger Gipskeuper angenommen.

© WBI GmbH: This publication is protected by copyright. The corresponding rights, especially that of printing, translation, presentation and drawings or duplication by other means as well as saving the documents in electronic form, are reserved and may be used only partially.



Bild 3: Vortriebsbegleitende Erkundungen

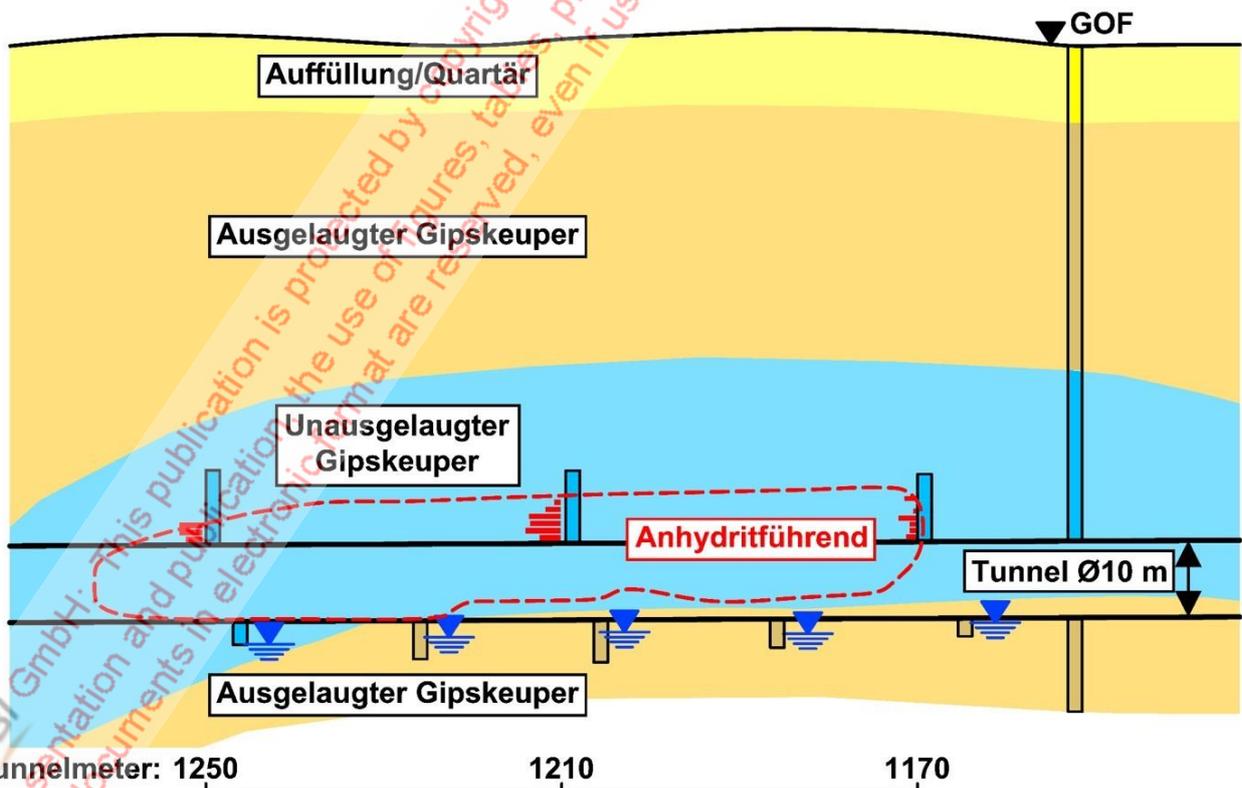


Bild 4: Vortrieb V3A, TM ~ 1250 bis 1170, Untergrund und Grundwasser

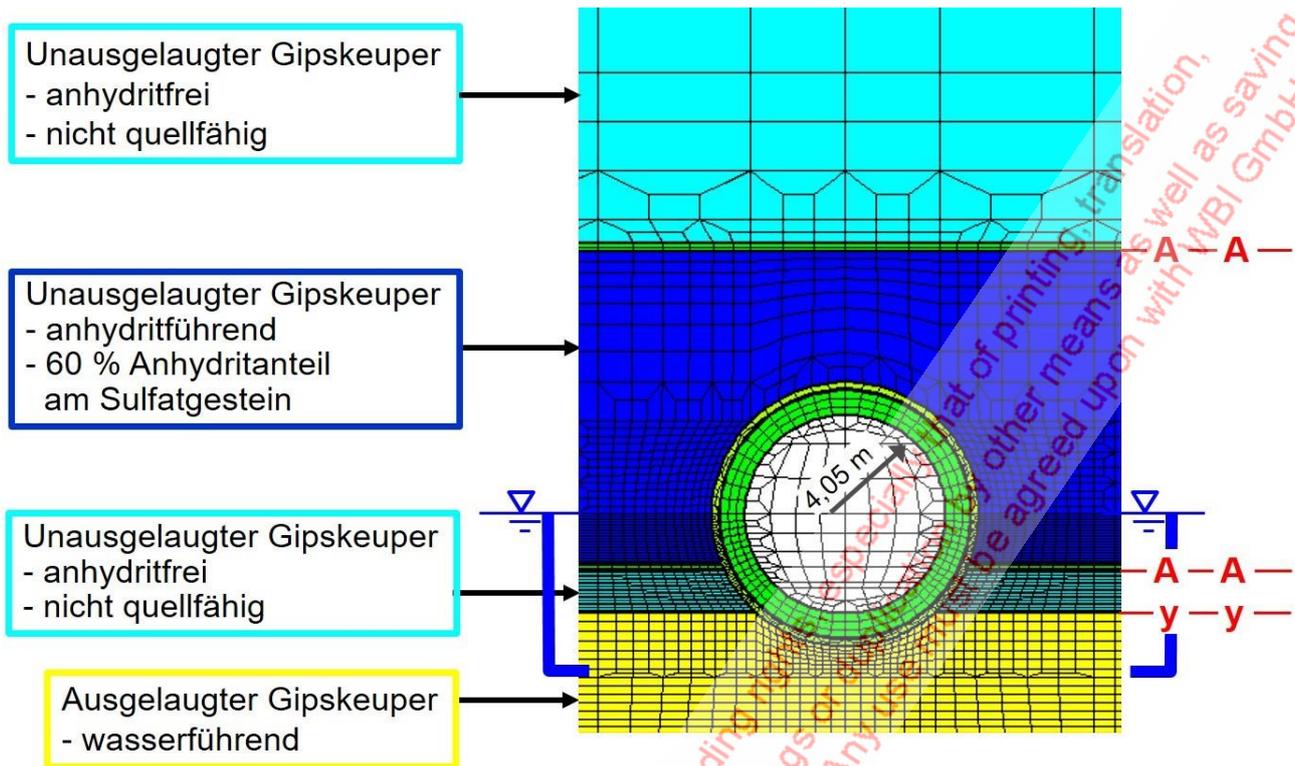


Bild 5: Statisches System

Die Wasserdurchlässigkeit des unausgelaugten Gipskeuper ist sehr gering. Auflockerungszonen im unausgelaugten Gipskeuper, die durch den Tunnelvortrieb entstehen, werden mit "Injektionen Anhydrit" abgedichtet (Wittke 2019). Grundwasser kann daher in nennenswerten Mengen nur über den ausgelaugten Gipskeuper in Höhe der Tunnelsohle an den unausgelaugten Gipskeuper gelangen und Quellvorgänge erzeugen.

Die Standsicherheitsberechnungen für die 1 m dicke Innenschale wurde mit dem von WBI entwickelten dreidimensionalen FE-Programm durchgeführt. Dieses Modell berücksichtigt die horizontale Schichtung und die vertikalen Klüfte im Untergrund, die quellbedingten Beanspruchungen, die Wasserzufuhr durch Sickerströmung in den Trennflächen, die spannungsabhängige Wasserdurchlässigkeit der Trennflächen und die Diffusion des Wassers in das Gestein (Wittke 2014, Wittke 2003, Wittke & Wittke & Wittke-Gattermann & Erichsen 2017, Wittke & Wittke-Gattermann & Boettcher 2018).

Die mit dem Modell ermittelten Quelldrücke auf die Innenschale sind in Bild 6 dargestellt. Das Grundwasser gelangt über den ausgelaugten Gipskeuper von unten an den unausgelaugten, anhydritführenden Gipskeuper (Anhydritspiegel A-A, Bild 6) und bewirkt dort die Umwandlung von Anhydrit in Gips. Dadurch entstehen im Bereich des Anhydritspiegels Quelldrücke bis max. 3,3 MPa.

Bild 7 zeigt die zugehörigen erforderlichen Bewehrungen. Aufgrund des vergleichsweise hohen und örtlich begrenzten Quelldrucks im Bereich des Anhydritspiegels sind in den Ulmen an der Innenseite als Umfangsbewehrung 4 Lagen  $\varnothing$  25 mm in Abständen von 15 cm erforderlich.

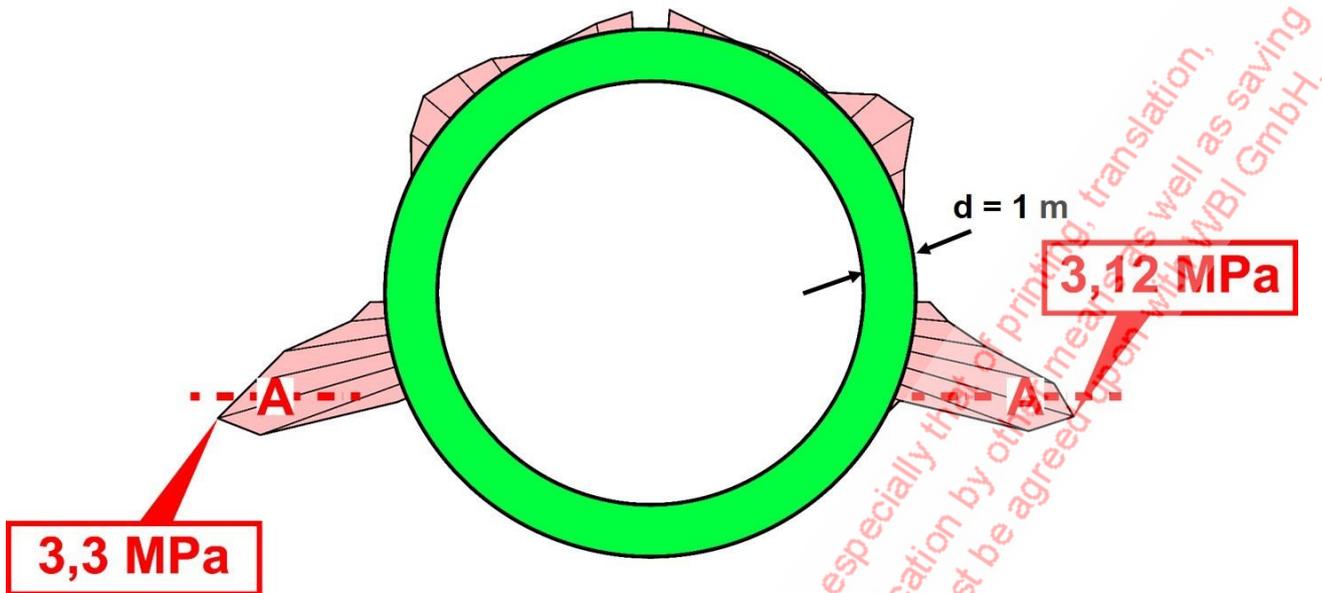


Bild 6: Rechnerischer Quelldruck nach 100 Jahren

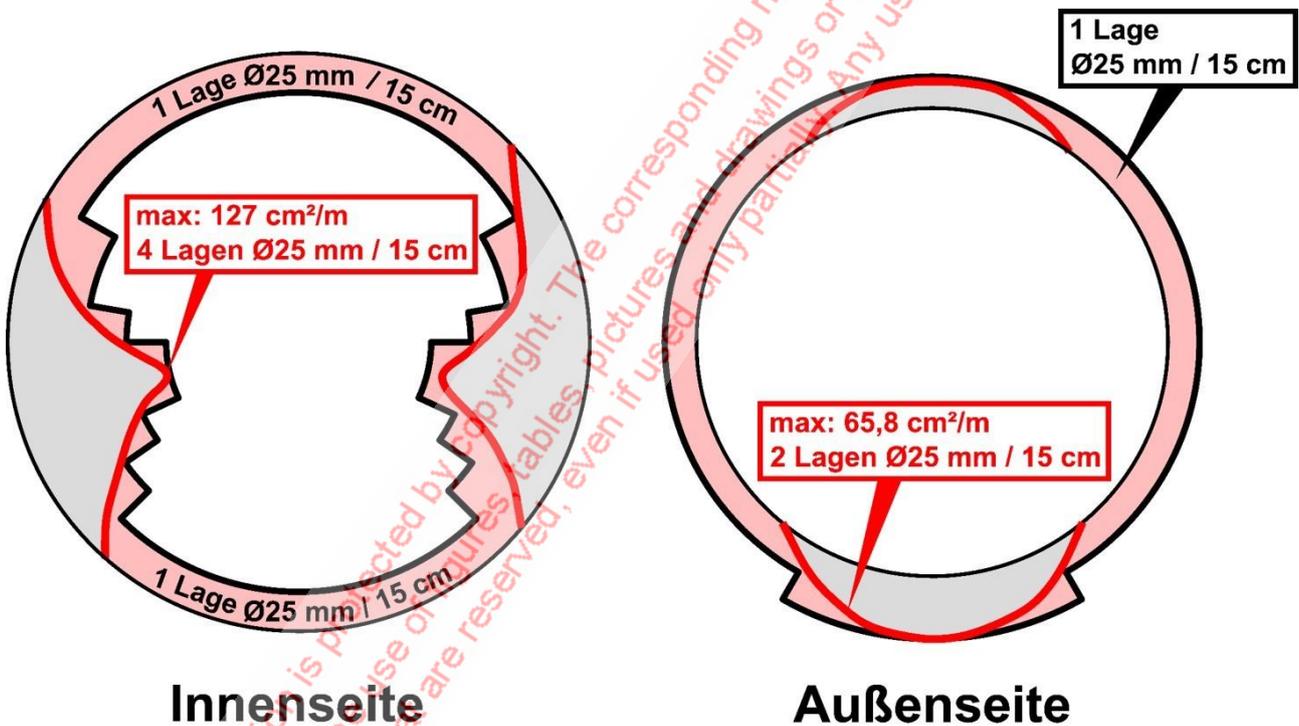


Bild 7: Umfangsbewehrungen

#### 4. Bewehrungsführung und Mengen

Bild 8 zeigt die zugehörige Bewehrungsführung im Sohlgewölbe. Auf der Innenseite werden 4 Lagen Umfangsbewehrung bis oberhalb der Arbeitsfuge geführt. Für die Weiterführung der Bewehrung im Gewölbe werden Muffenstöße vorgesehen. Übergreifungsstöße müssten wegen des großen Stabdurchmessers von 25 mm sehr lang ausgebildet werden. Im Bereich der Arbeitsfuge an der Tunnellaibung wird auch die Abdichtung gestoßen. Lange Überstände der Bewehrung sind daher nicht ausführbar.

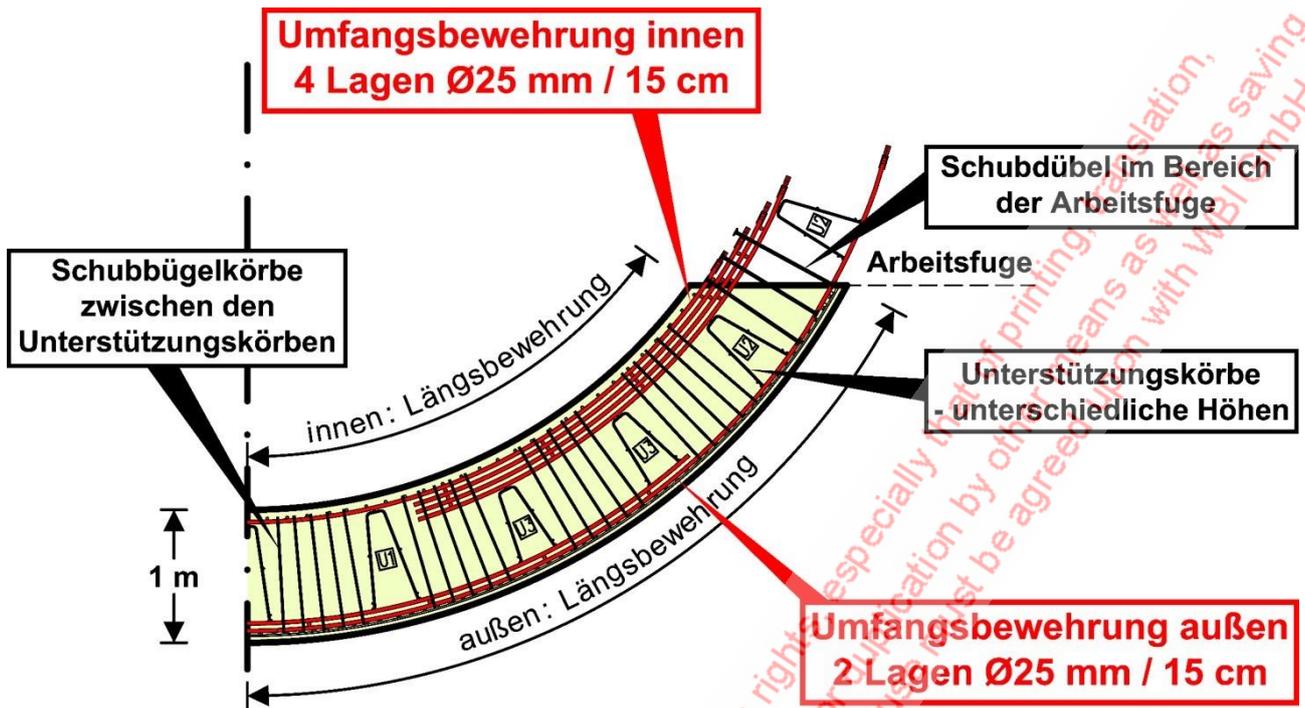


Bild 8: Sohlgewölbe - Bewehrungsführung

Die Muffen werden gestaffelt von innen nach außen jeweils mit größeren Abständen über der Arbeitsfuge angeordnet, damit sie von der Innenseite zugänglich sind und mit Schraubschlüssel verschraubt werden können.

Die Schubbewehrung besteht aus Bügeln, die zu Bügelkörben verbunden werden. Die Bügelkörbe werden zwischen Unterstützungskörben (U1, U2 und U3) verlegt. Im Bereich der Arbeitsfuge werden Schubdübel eingelegt (Bild 8).

Bild 9 zeigt die Bewehrungsführung im Gewölbe. Die innenliegende 4-lagige Umfangsbewehrung wird in das Gewölbe geführt. Der Anschluss an die Bewehrung des Sohlgewölbes erfolgt - wie oben beschrieben - über Muffenverbindungen.

Nach Ril 853 muss die Bewehrung freistehen. Ein Anheben der Bewehrungskörbe mit dem Schalwagen beim Stellen der Schalung ist nicht zulässig. Es sind daher Tragbögen erforderlich. Der Abstand zwischen der innenliegenden und der außenliegenden Bewehrung ist abhängig von der Anzahl der Bewehrungslagen und daher nicht konstant (Bild 10). Als Tragbögen werden Gitterträger geplant, an denen von beiden Seiten U-Stäbe angeschweißt werden (Bild 10). In Abhängigkeit von der Anzahl der Lagen der Umfangsbewehrung werden die U-Eisen unterschiedlich weit über die Gitterträger geschoben und angeschweißt, so dass die Abstände der U-Eisen an die Abstände von innen- und außenliegender Umfangsbewehrung angepasst werden können. In den Ulmen werden die Tragbögen mit Abstandhaltern am Gebirge aufgelagert, damit die für die Standsicherheit der Gitterträger erforderliche Bettung gegeben ist (Bild 10).

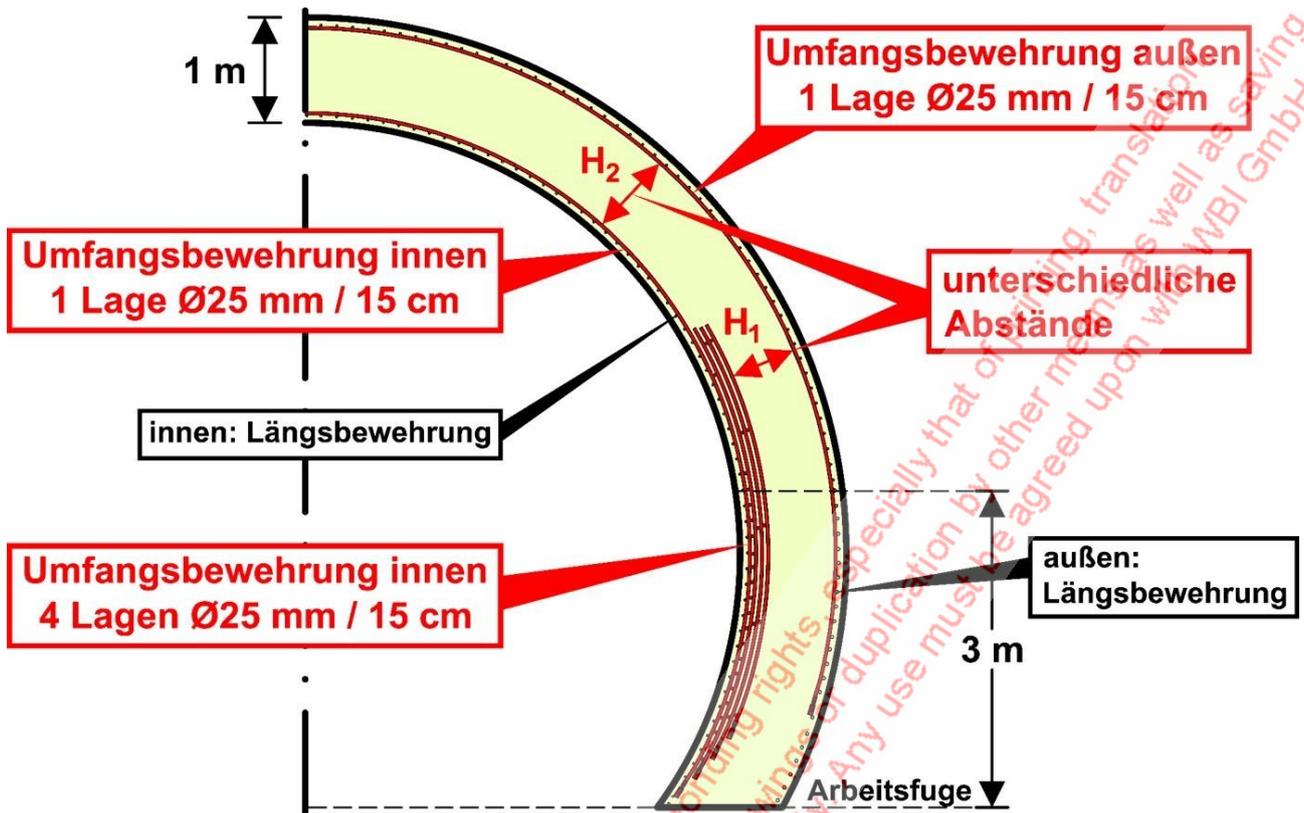


Bild 9: Gewölbe - Bewehrungsführung

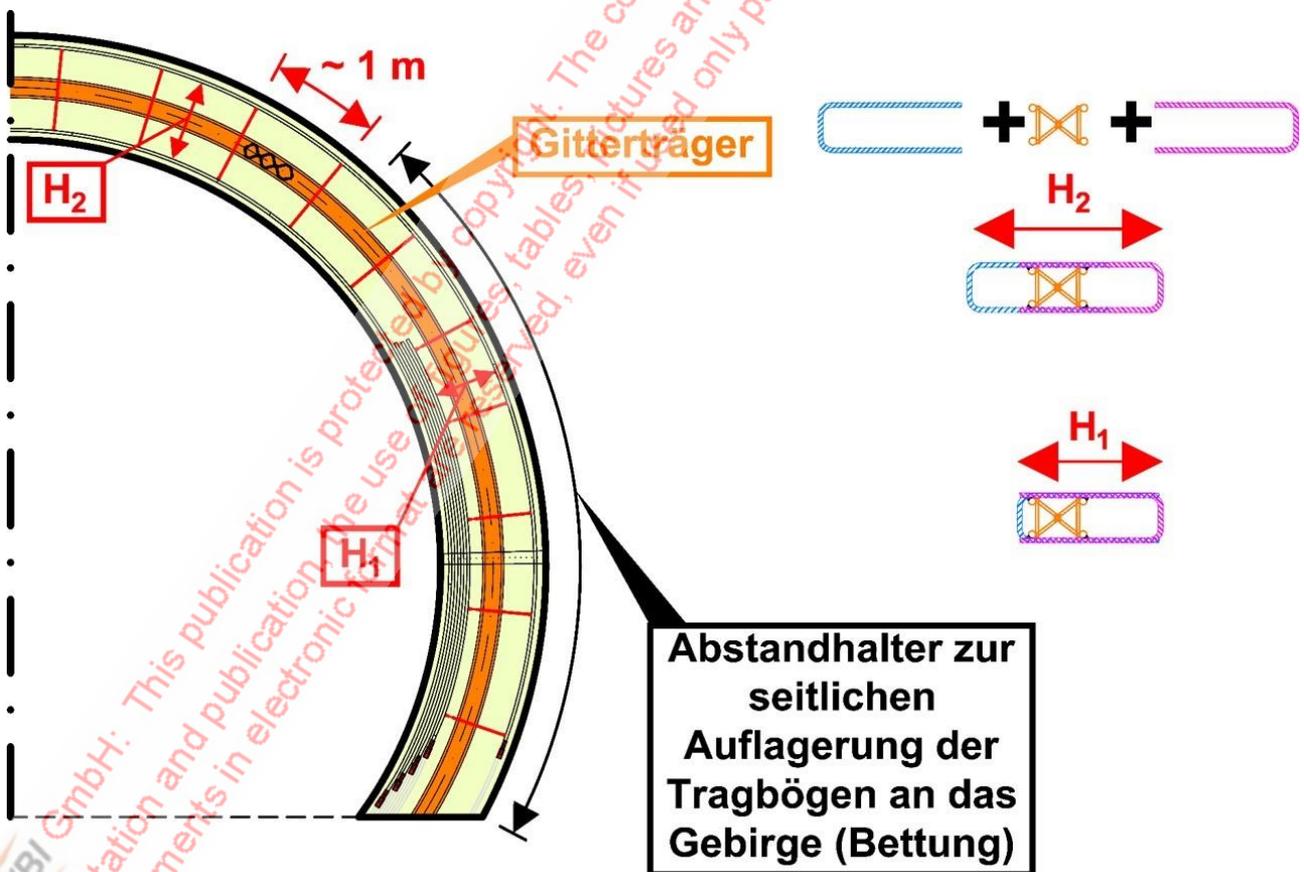


Bild 10: Tragbögen mit variablen Höhen

Auch im Gewölbe werden Bügel zu Bügelkörben verbunden (Bild 11), um den Einbau zu beschleunigen. Zusätzlich werden nach statischer Notwendigkeit Schubdübel vorgesehen.

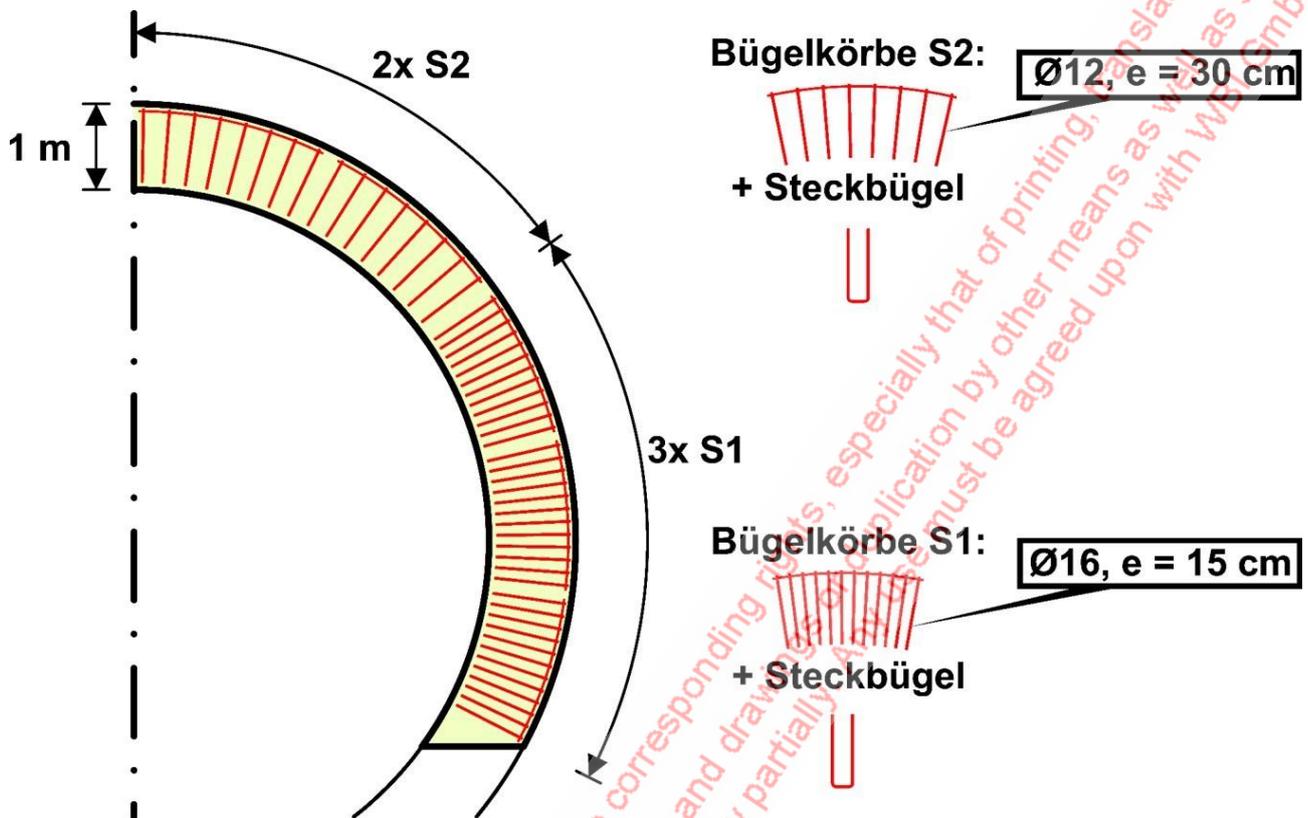


Bild 11: Schubbewehrung: Bügelkörbe und ggf. Dübelleisten

Maßgebend für die Menge der Bewehrungen sind das Untergrundprofil, die Anhydritgehalte im Gipskeuper und die Randbedingungen für den Zutritt von Grundwasser. Die oben beschriebenen vortriebsbegleitenden Erkundungen gaben hierüber Auskunft. Dadurch war es möglich, die Gesamttunnellänge im anhydritführenden Gipskeuper von ca. 1.000 m in 18 Tunnelabschnitte zu unterteilen. Für diese 18 Abschnitte wurden jeweils Berechnungsquerschnitte erarbeitet, und es wurden die erforderlichen statischen Nachweise geführt. Dadurch gelang es, die Bewehrungsgehalte zu optimieren.

Die ermittelten minimalen, maximalen und mittleren Bewehrungsgehalte und Bewehrungsmengen sind in der Tabelle 4.1 zusammengestellt.

		min.	max.	i. M.
Bewehrungsgehalte [kg/m <sup>3</sup> ]		178	403	262
Bewehrungsmengen [t/Block]	Sohlgewölbe	16	54	27
	Gewölbe	40	80	52

Tabelle 4.1: Bewehrungsgehalte und -mengen

© Diese Vorgehensweise führte auch zu einer Optimierung der Arbeiten im Hinblick auf die Bauzeit und die Baukosten.

## 5. Ausführung

### 5.1 Herstellung des Sohlgewölbes

Nach Einbau einer Bentonitmatte zur Vermeidung der Längsläufigkeit des Wassers außerhalb der Abdichtung folgt die Herstellung der KDB mit Schutzlage und Abdichtungsfolie. Danach wird das Prüf- und Injektionssystem in Form radialer Verpressschläuche montiert und mit den Bewehrungsarbeiten begonnen (Bild 12).



Bild 12: Einbau der Sohlgewölbebewehrung

Bei dem Einbau der Bewehrung sind Gassen für die temporären Dränagen in der Radialbewehrung sowie Freiräume für den Einbau des Schalwagens und die Betonierstützen zu berücksichtigen. Weiterhin müssen bei der Verlegung der Bewehrung der Einbau von Hüllrohren und von Verkabelungen der Extensometer und Druckkissen beachtet werden. Darüber hinaus sind bis zu 1000 Stk. Dübelleisten/Block und bis zu 500 Stk. Muffen/Block einzubauen. Abschließend kann die Betonage der runden Sohle erfolgen und nach Einbau des Füllbetons die Vorbereitungen für das nachfolgende Gewölbe beginnen.

## 5.2 Herstellung Gewölbe

Hier wird mit dem Anbringen des Festflansches der temporären Dränage an der Spritzbetonaußenschale (Bild 13) begonnen, danach die Bentonitmatte befestigt und die KDB-Abdichtung aufgebracht. Im Anschluss erfolgt das Anbringen des Prüf- und Injektionssystems, sowie des Losflansches der temporären Dränage. Es folgt der Einbau der Bewehrung mit gleichzeitiger Durchankerung der Stirnschalung, das Einfädeln von über 100 Durchdringungen des Nachinjektionssystems durch die Schalhaut des Gewölbeschalwagens und die Betonage des Gewölbes. Bereichsweise kommt Beton mit PP-Fasern zum Einsatz.



- 8 Stk./Block
- $\varnothing = 100 \text{ mm}$
- L = variabel (Teleskoprohr)
- Festflansch SpB-Außenschale
- Einbindung in KDB
- Durchdringung Beton Innenschale
- Abdeckung auf Tunnelinnenschale

Bild 13: Detail temporäre Dränage

## Literatur

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

Wittke, M.; Schmitt, D.; Osthoff, G.: Einpressungen von Acrylatgel und Polyurethan zur Abdichtung des anhydritführenden Gipskeupers im Bereich der Tunnel nach Ober- und Untertürkheim. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-PRINT 22, Weinheim, 2019.

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, W.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Erichsen, C.: Stoffgesetz, Berechnungsverfahren, felsmechanische Kennwerte und Ausführungsstatik für Tunnel im anhydritführenden Gebirge. Vortrag anlässlich des 3. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 11.05.2017. WBI-PRINT 20, Weinheim, 2017.

Wittke, W.; Wittke-Gattermann, P.; Boettcher, A.: Bemessung und Bewehrung der Stahlbetoninnenschale im anhydritführenden Gebirge. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbau-Tags im WBI-Center am 07.06.2017. WBI-PRINT 21, Weinheim, 2018.