

# **Fragestellungen der Felsmechanik und des Tunnelbaus**

**Vorträge anlässlich des  
8. Felsmechanik- und  
Tunnelbautages 2023  
im WBI-Center**

**22.06.2023**

**Weinheim**

**WBI**

Herausgeber:  
WBI PROFESSOR DR.-ING. W. WITTKÉ  
Beratende Ingenieure für GRUNDBAU UND  
FELSBAU GmbH, Weinheim

© 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 duplicating by other means as well as saving the documents in electronic format are reserved, even in part, partially. Any use must be agreed upon with WBI GmbH.

# Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Kosten mit einschaliger konventioneller Tunnelbauweise

Prof. Dr.-Ing. Walter Wittke, Dr.-Ing. Martin Wittke

## Zusammenfassung

Bei maschinellen Vortrieben ist ein einschaliger Ausbau mit Fertigteilen inzwischen gängige Praxis. Bei der konventionellen Bauweise werden die Tunnel in unserem Land generell zweischalig mit Außenschale aus Spritzbeton und einer Innenschale aus Stahlbeton ausgeführt.

Nachdem im Ausland in einer Reihe von Fällen auch Verkehrstunnel einschalig nur mit Spritzbeton ausgekleidet erfolgreich hergestellt wurden, ist es an der Zeit, auch in Deutschland über diese Lösung nachzudenken, zumal damit große Einsparungen an CO<sub>2</sub> und auch Kostensenkungen verbunden sind. Der Beitrag setzt sich mit den mit solchen Lösungen verbundenen Fragen auseinander.

Im Bereich der Bewehrung kommt es häufig zu Spritzschatten und Hohlstellen im Spritzbeton sowie zu mangelhafter Verdichtung. Es ist deshalb anzustreben, durch geeignete Formgebung der Spritzbetonschalen Biegemomente zu vermeiden oder zumindest zu reduzieren, damit man auf Bewehrung verzichten bzw. diese minimieren kann. An Beispielen wird gezeigt, dass man insbesondere, wenn man Tunnel im Vollausbuch auffährt, in vielen Fällen einen Membranspannungszustand erreichen und damit auf konstruktive Bewehrung verzichten kann. Es reicht dann eine Bewehrung mit Stahlfasern aus, mit der sich eine sehr gute Qualität und Dauerhaftigkeit des Spritzbetons erreichen lässt.

Interessant sind in diesem Zusammenhang auch Spritzmembranabdichtungen für den Einsatz bei Tunneln, die unterhalb des Grundwasserspiegels liegen.

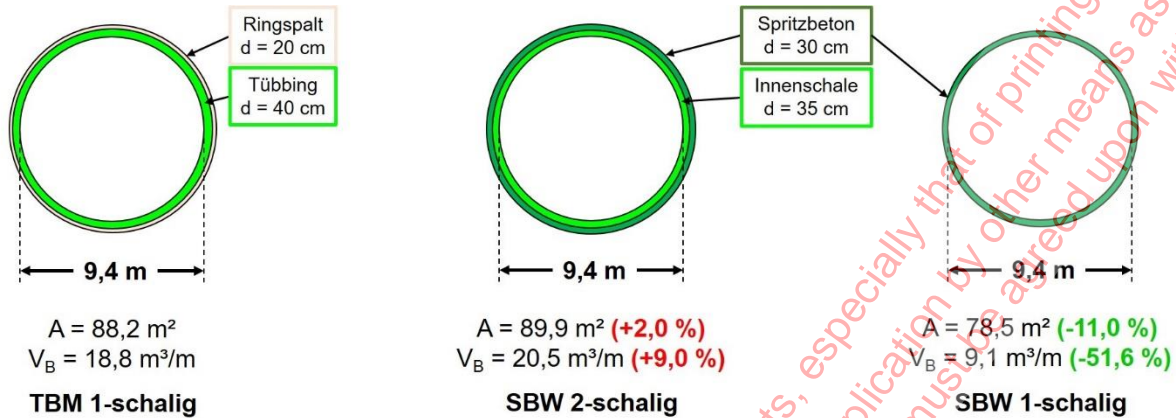
Beispiele in einschaliger Spritzbetonbauweise ausgeführter Tunnel schließen den Beitrag ab.

## 1. Einleitung

Bei maschinellen Vortrieben ist ein einschaliger Ausbau mit Fertigteilen inzwischen gängige Praxis. Bei der konventionellen Bauweise werden die Tunnel in unserem Land generell zweischalig mit einer Außenschale aus Spritzbeton und einer Innenschale aus Stahlbeton ausgeführt.

Bild 1 zeigt dazu im linken Bild einen eingleisigen, maschinell aufgefahrenen Tunnel, der mit einer von Ringspaltmörtel umgebenden Tübbingschale ausgekleidet ist. Das hierfür erforderliche Betonvolumen einschließlich des Ringspaltmörtels beläuft sich auf 18,8 m<sup>3</sup>/m. Im Vergleich dazu benötigt man bei einer 30 cm dicken Spritzbetonsicherung und einer 35 cm dicken Stahlbetoninnenschale für den gleichen Tunnel 20,5 m<sup>3</sup>/m Beton und damit 9,0 % mehr als beim TBM Tunnel.

Ganz rechts im Bild 1 ist derselbe Tunnel nur mit einer 35 cm dicken Spritzbetonschale ausgekleidet dargestellt. Eine solche Lösung würde im Vergleich zum maschinell vorgetriebenen Tunnel eine Einsparung an Beton von 51,6 % und damit erhebliche Mindermengen an CO<sub>2</sub> und Kosteneinsparungen bedeuten.



- **1-schalige Bauweise vorteilhaft, wenn technisch machbar und genehmigungsfähig!**
- **Voraussetzung: Spritzbetonschale dauerhaft tragfähig und (sofern erforderlich) wasserundurchlässig!**
- **ZTV-ING und Ril 853: SBW 1-schalig nur bei Rettungsstollen/Querschlägen bzw. Nebenanlagen zulässig!**

A: theoretischer Ausbruchsquerschnitt ohne Konvergenzen und Mehrausbruch  
V<sub>B</sub>: Volumen Beton, Mörtel und Spritzbeton je m Tunnel

Bild 1: Einschalige vs. Zweischalige Bauweise, Prinzipdarstellung eingleisiger DB-Tunnel

Nachdem im Ausland in einer Reihe von Fällen auch Verkehrstunnel einschalig nur mit Spritzbeton ausgekleidet erfolgreich hergestellt wurden, ist es an der Zeit, auch in Deutschland über solche Lösungen nachzudenken.

Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Spritzbetonschale dauerhaft tragfähig und sofern erforderlich auch wasserundurchlässig ist. Außerdem muss die Genehmigungslage, nach der eine einschalige Bauweise mit Spritzbeton nur bei Rettungsstollen, Querschlägen bzw. Nebenanlagen zulässig ist, an eine solche Entwicklung angepasst werden.

Der folgende Beitrag setzt sich mit den entsprechenden Fragestellungen auseinander.

## 2. Vermeidung von Zugspannungen

Die Erfahrung beim Entwurf zahlreicher konventionell vorgetriebener Tunnel hat gezeigt, dass es bei den unterschiedlichsten Baugrundverhältnissen mit entsprechender Formgebung des Tunnelquerschnitts möglich ist, Biegebeanspruchungen der Spritzbetonschale so gering zu halten, dass die aus der Biegung resultierenden Zugspannungen durch Normalkräfte überdrückt werden und somit statisch keine Bewehrung erforderlich ist.

Voraussetzung dafür sind allerdings eine zutreffende Kenntnis und Beschreibung des Spannungsdehnungsverhaltens des Baugrunds und ein Berechnungsverfahren, das die Wechselwirkung von Baugrund und Spritzbetonschale zuverlässig erfasst (Wittke 2014).

Durch solche Lösungen lässt sich eine wesentlich bessere Qualität des Spritzbetons erreichen, und sie bieten auch die Chance, auf die Stahlbetoninnenschale zu verzichten.

Mit dem in Bild 2 dargestellten Beispiel soll der Einfluss der Formgebung auf die Bemessung gezeigt werden. Es handelt sich um einen der beiden Tunnel des Anfahrbereichs Süd des Neuen Hauptbahnhofs Stuttgart, der im ausgelaugten Gipskeuper liegt und mit dem ganz rechts im Bild dargestellten Querschnitt geplant war (Wittke, W. & Wittke, M. & Druffel & Rath & Osthoff 2019 und Rath & Osthoff & Wittke-Gattermann & Druffel 2021). Eine Optimierung des Querschnitts führte zu der in Bildmitte dargestellten Querschnittsform mit stärker ausgerundeter Sohle.

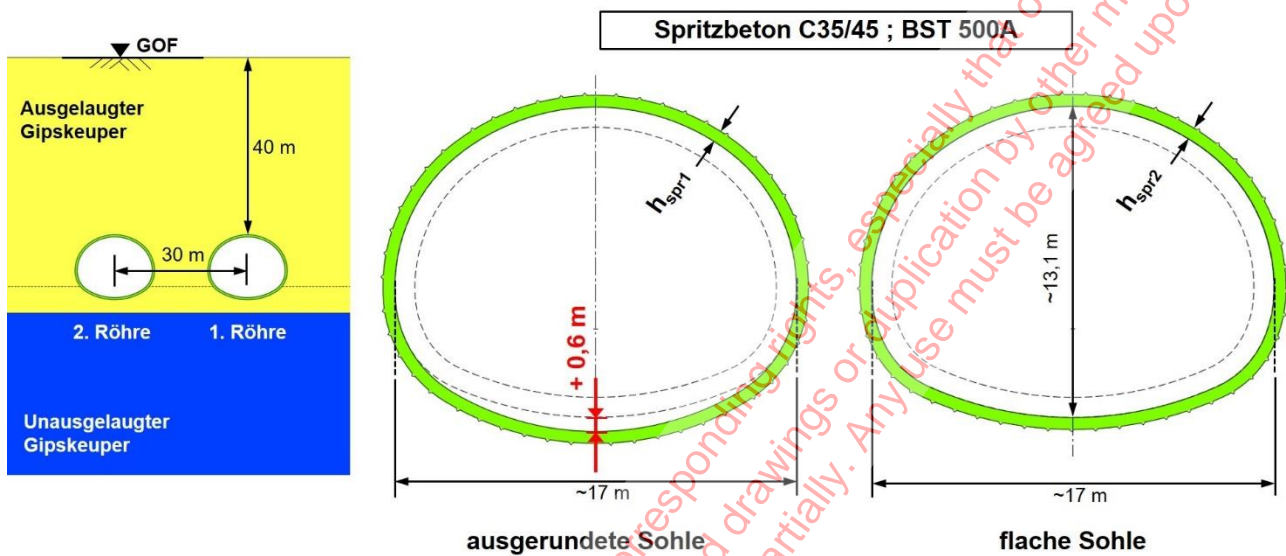


Bild 2: Beispiel zweigleisiger Tunnel - Einfluss Formgebung auf Bemessung

Für beide Querschnitte wurden räumliche FE-Berechnungen für einen Vollaussbruch mit frühem Sohlschluss durchgeführt. Dabei wurde die Dicke der Spritzbetonschale variiert.

Es zeigte sich, dass der Querschnitt mit stärker ausgerundeter Sohle eine 45 cm dicke Spritzbetonschale benötigt, um zugspannungsfrei und ohne statische Bewehrung aufgefahren werden zu können. Dagegen ist für den Querschnitt mit flacher Sohle eine 70 cm dicke Schale notwendig, um das gleiche Ziel zu erreichen. Bild 3 zeigt die entsprechenden Verläufe der Schnittgrößen.

Vergleicht man die Betonvolumina für beide Querschnitte, so ergibt sich ein deutlicher Vorteil für den Querschnitt mit stärkerer Sohlausrundung (Bild 4). Dabei wurde die Verfüllung des aus dem Mehrausbruch resultierenden Zwickels mit Beton berücksichtigt.

Der Tunnel wurde mit stärker ausgerundeter Sohle und einer stahlfaserarmierten Spritzbetonschale erfolgreich aufgefahren.

Bei der Unterfahrung des Kriegsbergs am gegenüberliegenden Ende des Neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs wurden die entsprechenden Querschnitte im gleichen Baugrund im Ulmenstollenvortrieb aufgefahren. Vergleicht man den hierfür erforderlichen Spritzbetonverbrauch mit dem eines Vollaussbruchs mit ausgerundeter Sohle, so ergibt sich eine Mehrmenge von 52 %. Auch im Falle eines Auffahrens im Kalottenvortrieb mit geschlossener Sohle liegt der

Mehrverbrauch an Spritzbeton noch bei 47 % (Wittke, W. & Wittke-Schmitt & Wittke, M. & Wittke-Gattermann & Druffel 2022).

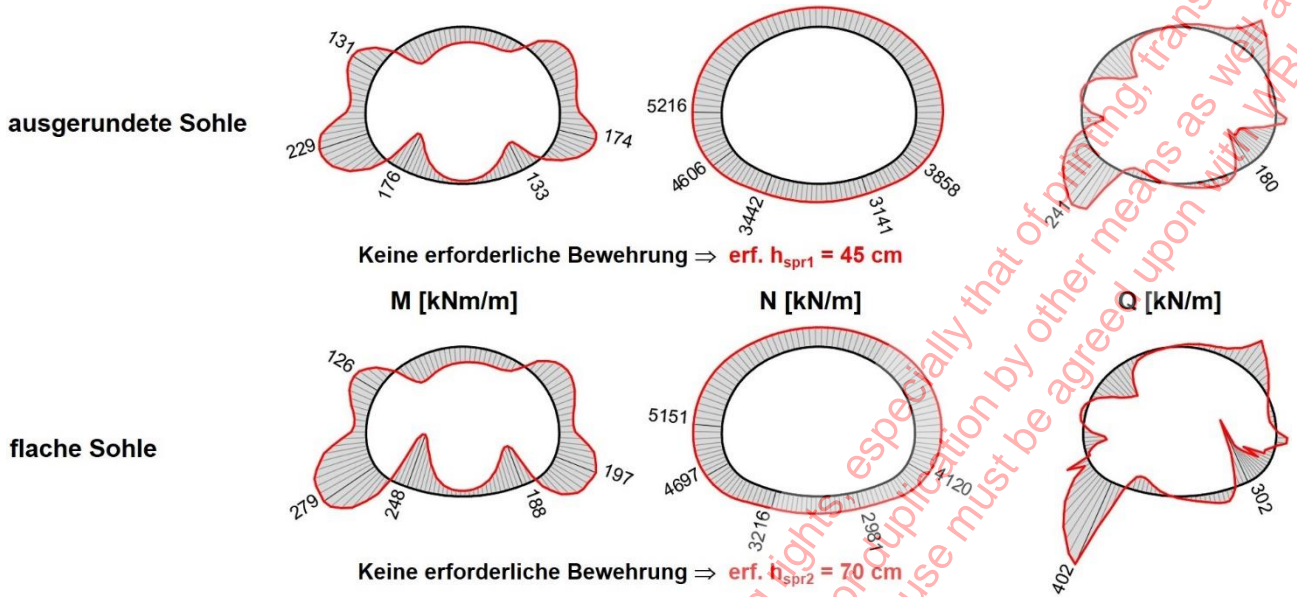


Bild 3: Schnittgrößen und erforderliche Schalendicke bei Ausführung ohne Bewehrung

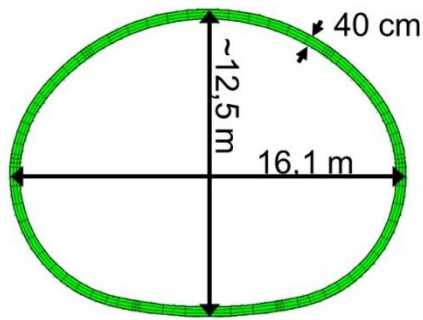


Spritzbeton: ca. 400 kg/m<sup>3</sup> Zement; Füllbeton ca. 260 kg/m<sup>3</sup> Zement

Bild 4: Auswirkungen auf den Materialverbrauch

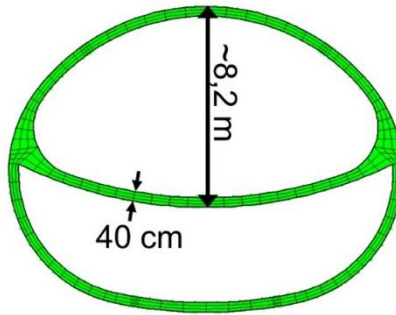
Abgesehen von den Kosteneinsparungen führt ein Vollausbuch mit guter Ausrundung des Querschnitts und frühem Sohlschluss auch zu einer deutlichen Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks und ist auch aus ökologischen Gründen anzustreben.

Wie wir oben gesehen haben, lässt sich die Spritzbetonschale beim Vollausbuch aufgrund der möglichen großen Ausrundungsradien zudem noch zugspannungsfrei ausbilden, sodass aufgrund der damit verbundenen guten Qualität der Verzicht auf eine Stahlbetoninnenschale möglich erscheint.



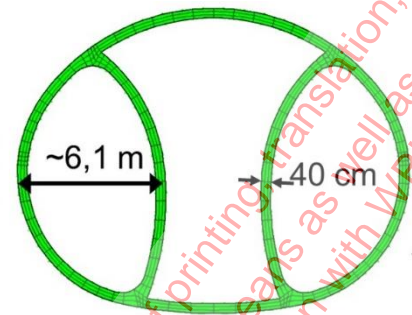
$$A_{\text{Spritzbeton}} = 17,7 \text{ m}^3/\text{m}$$

Zementgehalt: 7,1 t/m



$$17,7 + 8,3 \text{ m}^3/\text{m}$$

**+ 47 %**  
10,4 t/m



$$17,7 + 2 \cdot 4,66 \text{ m}^3/\text{m}$$

**+ 52 %**  
10,8 t/m

Spritzbeton: ca. 400 kg/m<sup>3</sup> Zement

Bild 5: Vollaushub vs. Kalottenvortrieb vs. Ulmenstollenvortrieb - Betonverbrauch

### 3. Stahlfaserspritzbeton

Neben den oben beschriebenen Anforderungen stellt eine einschalige Bauweise hohe Anforderungen an die Qualität der Spritzbetonschale.

Es ist bekannt, dass hoch qualifiziertes Personal eingesetzt werden muss, um eine qualitativ hochwertige Spritzbetonschale herzustellen. Allerdings lässt es sich auch bei noch so sorgfältiger Arbeit oftmals nicht vermeiden, dass es zu gewissen Spritzschatten kommt (Bild 6).



Bild 6: Risiko von Spritzschatten im Bereich von Bewehrungsstößen und Bögen

Das gilt insbesondere für den Bereich von Bewehrungsstößen und Bögen. Es ist offensichtlich, dass die Spritzbetonschale hier örtliche Fehlstellen besitzt, die zwar im Hinblick auf die Vortriebssicherung nicht relevant sind, die sich jedoch negativ auf die Dauerhaftigkeit und die Dichtigkeit der Schale auswirken.

Diese qualitative Aussage kann auch quantitativ bestätigt werden. Im Zusammenhang mit den Injektionen Anhydrit, über die bei dieser Veranstaltung in der Vergangenheit berichtet wurde (Wittke & Schmitt & Osthoff 2019 und Wittke & Schmitt & Reinhardt 2021), wurden in bestimmten Vortriebsabschnitten des Tunnels Feuerbach an den Streckenbögen Nachinjektionsschläuche angebracht, die nach Abschluss des Vortriebs mit PU verpresst wurden. In vielen Fällen zeigte sich dabei eine sehr hohe Aufnahme. Bild 7 zeigt die Verpressgutaufnahme im Bereich von 106 Bögen eines Streckenabschnitts. Im Mittel wurden hier 44 l PU je Bogen verpresst. Diese Ergebnisse belegen, dass sich zumindest kleinere Fehlstellen nicht vermeiden ließen.

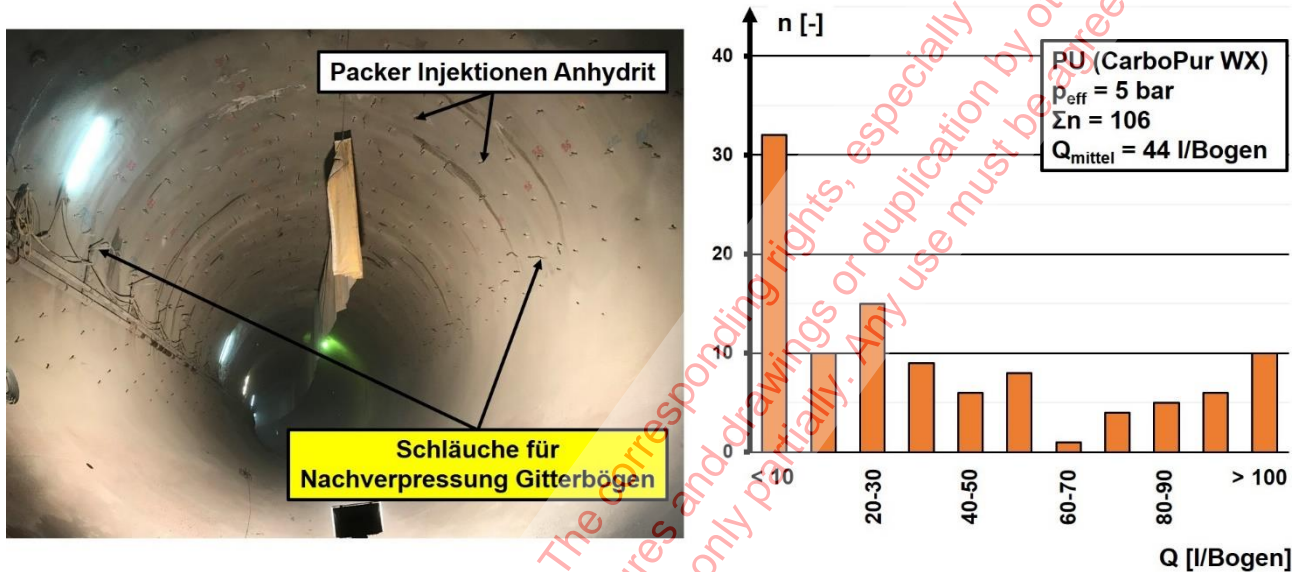
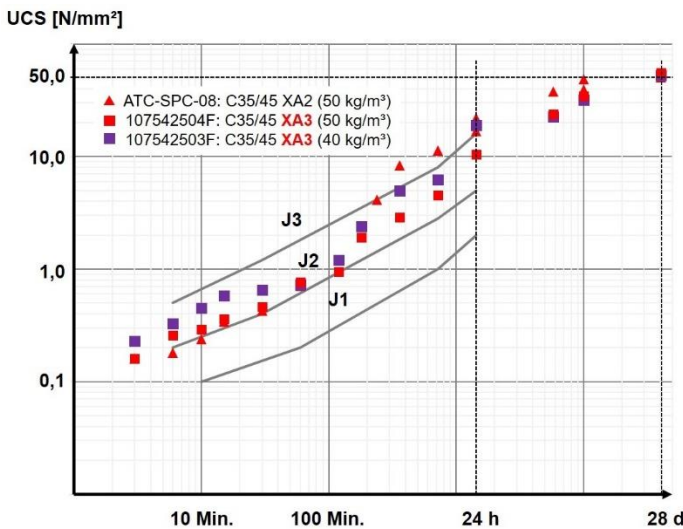


Bild 7: Ergebnisse von Nachinjektionen im Bereich von Bögen, Beispiel Tunnel Feuerbach

Es ist vor diesem Hintergrund für eine einschalige Bauweise wichtig, die Ursachen für die Fehlstellen zu beseitigen, d. h. man muss möglichst auf Mattenbewehrung und auf Streckenbögen verzichten. Das hat überdies auch den Vorteil, dass diese korrosionsanfälligen Bauteile dann entfallen. Ein entsprechender Verzicht ist aus unserer Sicht möglich, wenn man den Spritzbeton mit Stahlfasern bewehrt. Beim Projekt Stuttgart 21 wurde außer bei den Vortrieben Hauptbahnhof Süd (vgl. Abschnitt 2) Stahlfaserspritzbeton von allen Argon der Tunnel im Talkessel für die Dammringe verwendet (Müller & Schaab 2016). Im Fildertunnel wurde auch die Vortriebssicherung in einigen Abschnitten so ausgeführt.

Die verwendeten Mischungen wurden mit 40 bzw. 50 kg Stahlfasern je  $\text{m}^3$  versetzt. Die Fasern wiesen ein Verhältnis von der Länge zum Durchmesser (L/D) von 65 auf. Alle eingesetzten Mischungen erfüllten Anforderungen an die Frühfestigkeitsentwicklung an den Spritzbeton (J2, Bild 8, DIN EN 14487-1 2006) und erbringen nach 28 Tagen eine Festigkeit von  $50 \text{ N/mm}^2$ . Die Mischungen, deren Versuchsergebnisse in Bild 8 mit roten Markierungen gekennzeichnet sind, sind auch bei einem starken Sulfatangriff (XA3) geeignet.



Material	Einwaage [kg/m³]	
	107542503F	107542504F
Sand 0/2	774	804
Kies 2/8	832	736
CEM IIIA 52,5 N HS	400	400
Flugasche Kreament H7	40	90
Gesamtwassergehalt	193	197
Fließmittel SKY 614	2,8	2,8
Verzögerer Master Set R 436	0,8	0,8
Stahlfasern Dramix 65/35-BG	40	50



Bild 8: Einsatz von stahlfaserbewehrtem Spritzbeton beim Projekt Stuttgart 21, Druckfestigkeiten

Auch wenn bei der Planung Zugspannungen und Biegung vermieden werden, ist die Biegezugfestigkeit des Spritzbetons eine wichtige Größe. Diese wurde in Biegezugversuchen untersucht (Bild 9). Bei den o. g. Mischungen mit 40 bzw. 50 kg/m<sup>3</sup> Stahlfasern wurde bereits im jungen Alter Festigkeiten bei Erstrissbildung in der Größenordnung von 8 bis 9 N/mm<sup>2</sup> erreicht. Im gerissenen Zustand nahmen die Werte auf ca. 2 bis 3 N/mm<sup>2</sup> ab.

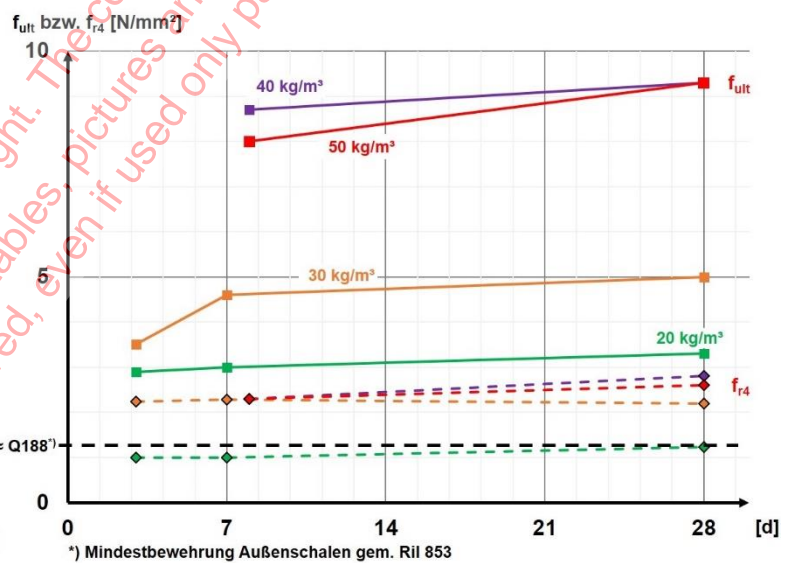
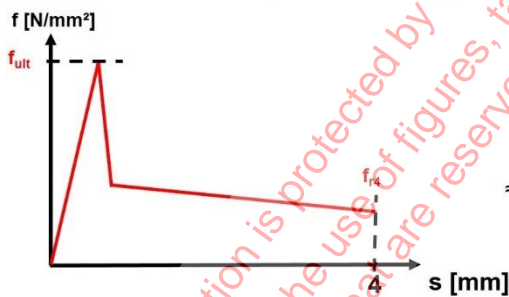


Bild 9: Biegezugfestigkeit (f) der beim Projekt Stuttgart 21 untersuchten Stahlfaserspritzbetone

In Eignungsversuchen wurden auch Mischungen mit kleineren Stahlfasergehalten untersucht. Während die 30 kg/m<sup>3</sup>-Mischung die Entwurfsanforderungen ebenfalls erfüllt hätte, musste die 20 kg/m<sup>3</sup>-Mischung aufgrund der deutlich kleineren Restfestigkeit als nicht geeignet angesehen werden.

Die Vortriebsarbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen. Der Einsatz von Stahlfasern führte wie im Jahr 2021 bei dieser Tagung ausgeführt (Rath & Osthoff & Wittke-Gattermann &



Druffel 2021) - zwar zu einem etwas erhöhten Verschleiß in den Förderleitungen, war jedoch im Übrigen ohne nennenswerte Einschränkungen möglich.

Insbesondere, da im ungesicherten Bereich keine Bewehrungsarbeiten notwendig sind, trägt der Einsatz von faserbewehrtem Spritzbeton auch zur Arbeitssicherheit bei, auch wenn herausstehende Fasern und der faserversetzte Rückprall eine gewisse Verletzungsgefahr bergen.

#### 4. WU-Beton

Im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit und den Einsatz der einschaligen Spritzbetonbauweise unterhalb des Grundwasserspiegels sind natürlich auch die Anforderungen hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit zu beachten.

Anforderungen an WU-Beton sind in verschiedenen Vorschriften enthalten (Bild 10, DIN EN 206-1/DIN 1045-2 2022, Bundesanstalt für Straßenwesen ZTV-ING 2022/01, DB Netz AG RIL 853 2018, DAfStb-Richtlinie 2017-12). Die darin enthaltenen Anforderungen hinsichtlich der Betontechnologie (Festigkeitsklasse, w/z-Wert, Größtkorn und Zementgehalt) sind mit einem Spritzbeton leicht zu erfüllen. Auch ein hoher Wassereindringwiderstand konnte für die im Projekt Stuttgart 21 eingesetzten Mischungen nachgewiesen werden. Theoretisch wäre darüber hinaus auch eine Nachbehandlung der Spritzbetonschale im Anschluss an die Vortriebsarbeiten umsetzbar.

##### Betontechnologie

- min. C25/30, w/z < 0,5, min. Zementgehalt: 280 kg/m<sup>3</sup>
- Kleines Größtkorn (max. 16 mm)  
(bei dünnen Bauteilen 8 mm)
- Hoher Wassereindringwiderstand:  
Wassereindringtiefe: ≤ 30 mm
- Nachbehandlung

##### Schlussfolgerungen für 1-schalige Bauweise:

- ✓ alle Anforderungen erfüllbar
- ✓ Versuchsergebnisse Wassereindringtiefe nach 28 d für  
Stahlfaserspritzbetone im Projekt Stuttgart 21:
  - ✓ 107542503F: C35/45 (40 kg/m<sup>3</sup>): 4 mm
  - ✓ 107542503F20: C35/45 (20 kg/m<sup>3</sup>): 18 mm



Foto: ATC, Felsmechanik-Tag 2016

Bild 10: Übersicht wesentlicher Anforderungen an wasserundurchlässige Betonkonstruktionen (WUBK) - in Anlehnung an DIN 1045-2/EN 206/DAfStb/ZTV-ING/Ril 853

Die Anforderungen an die Bewehrung von WU-Konstruktionen sind u. E. ebenfalls erfüllbar (Bild 11, DIN EN 206-1/DIN 1045-2 2022, Bundesanstalt für Straßenwesen ZTV-ING 2022/01, DB Netz AG RIL 853 2018, DAfStb-Richtlinie 2017-12). Die in der Ril 853 geforderte konstruktive Mindestbewehrung ließe sich zumindest im Hinblick auf den Stahlanteil - durch den Einsatz von 50 kg/m<sup>3</sup>-Stahlfasern erfüllen. Rissbreitennachweise können ebenfalls geführt werden. Hier ist es günstig, wenn, wie in Abschnitt 2 ausgeführt, Zugspannung-

gen vermieden werden. Außerdem ist es hilfreich, dass der Nachweis für den Lastfall Eigengewicht der Schale + Temperatur (EG+TEMP), das heißt ohne Gebirgsdruck, der bei den Nachweisen für die Stahlbetoninnenschale oftmals maßgebend wird, bei einer Spritzbetonschale nicht geführt werden muss, da eine parallel zum Ausbruch eingebaute Schale immer auch mit Gebirgsdruck beansprucht wird. Im Hinblick auf Schwindrisse wirken sich die Stahlfasern ebenfalls günstig aus.

### Bewehrung

- Konstruktive Mindestbewehrung  
ZTV-ING: 3,9 cm<sup>2</sup>/m (innen und außen)  
Ril 853: 0,15 % A<sub>c</sub> (WUBK) (innen und außen)
- Rissbreitennachweise (0,15 / 0,2 mm)
- maßgebend insbesondere:  
Schwinden und  
Temperatur (meistens LF EG + TEMP)

### Schlussfolgerungen für 1-schalige Bauweise:

- ✓ Zugspannungen im Entwurf vermeiden
- ✓ keine Mattenbewehrung/Bögen etc.
- ✓ Konstruktive Mindestbewehrung sofern erforderlich über Stahlfasern
- ✓ Rissbreitennachweise: EG + **GD** + TEMP

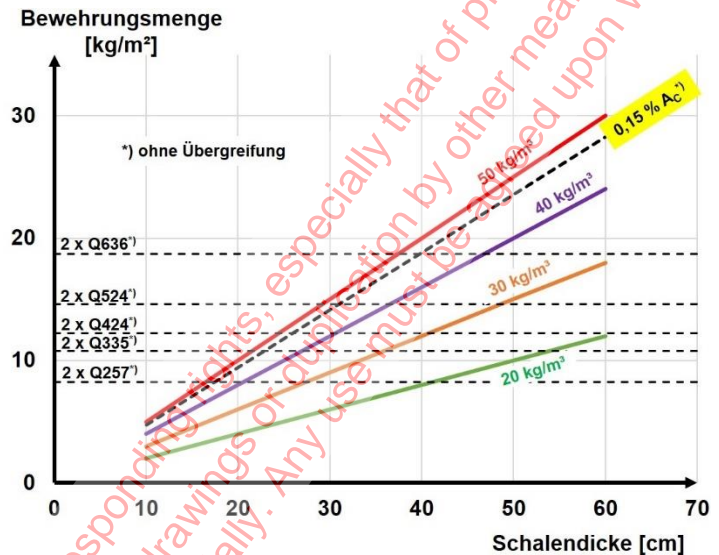


Bild 11: Übersicht wesentlicher Anforderungen an wasserundurchlässige Betonkonstruktionen (WUBK) - in Anlehnung an DIN 1045-2/EN 206/DAfStb/ZTV-ING/Ril 853

Lediglich die Anforderungen, die in den Vorschriften im Hinblick auf die Fugenausbildung von WU-Konstruktionen enthalten sind (Bild 12, DIN EN 206-1/DIN 1045-2 2022, Bundesanstalt für Straßenwesen ZTV-ING 2022/01, DB Netz AG RIL 853 2018, DAfStb-Richtlinie 2017-12), lassen sich bei einer einschaligen Spritzbetonbauweise nicht ohne weiteres umsetzen.

### Konstruktion / Fugenausbildung

- Mindestbauteildicke: 40 cm
- Innenliegendes Fugenband
- Nachverpressschläuche
- Fugenblech bei Arbeitsfugen

### Schlussfolgerungen für 1-schalige Bauweise:

- ✓ möglichst keine / wenige Fugen
- ✓ ggf. Nachverpressschläuche
- ✓ gezieltes Nachverpressen
- ✓ ggf. Membranabdichtungen (beachte Lastabtragung Wasserdruck)



Foto: Bergmännische Bauweise Ehmannstr.

Bild 12: Übersicht wesentlicher Anforderungen an wasserundurchlässige Betonkonstruktionen (WUBK) - in Anlehnung an DIN 1045-2/EN 206/DAfStb/ZTV-ING/Ril 853

Hier muss aufgrund des Vollausschlags und aus Gründen der Standsicherheit gefordert werden, dass möglichst wenige Fugen ausgeführt werden. Es können jedoch in den Arbeitsfugen gezielt Nachverpressschläuche eingelegt werden. Alternativ kann auch beim Auftreten von Feuchtstellen gezielt verpresst werden.

Als letzte Möglichkeit ist natürlich auch die Anordnung einer Membranabdichtung eine Option. In diesem Falle handelt es sich jedoch - wenn diese nicht gleich beim Vortrieb eingebaut wird - streng genommen nicht mehr um eine einschalige Bauweise.

## 5. Profilgerechter Ausbruch

Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit sollte aus unserer Sicht generell ein höheres Augenmerk auf einen profilgerechten Ausbruch gelegt werden. Das gilt aber umso mehr bei einer einschaligen Bauweise.

Im Fels lässt sich ein profilgerechter Ausbruch beispielsweise durch Fräsen erreichen. Auch durch schonendes Sprengen kann durch einen etwas größeren Aufwand - z. B. geringer Abstand der Kranzlöcher - eine bessere Profilgenauigkeit erreicht werden (Bild 13).



Bild 13: Schonender und profilgerechter Ausbruch

## 6. Erfahrungen

Im folgenden Kapitel wird über Erfahrungen berichtet, die die Autoren im Zusammenhang mit zwei in einschaliger Spritzbetonbauweise errichteten Tunnelbauwerken gewonnen haben.

### 6.1 Carmel Tunnel in Haifa, Israel

Die Carmel Tunnel befinden sich in Haifa, Israel (Bild 14, Wittke, W. & Wittke, M. 2007 und Wittke & Gattermann & Grosz 2011). Die insgesamt vier Röhren dieses zweisepurigen Stra-

ßentunnels liegen in Dolomiten, Kalkstein und Kreide sowie in Tuff und lockergesteinsähnlichen Konglomeraten (Bild 14). Der Grundwasserspiegel steht unterhalb der Tunnelsohlen an.

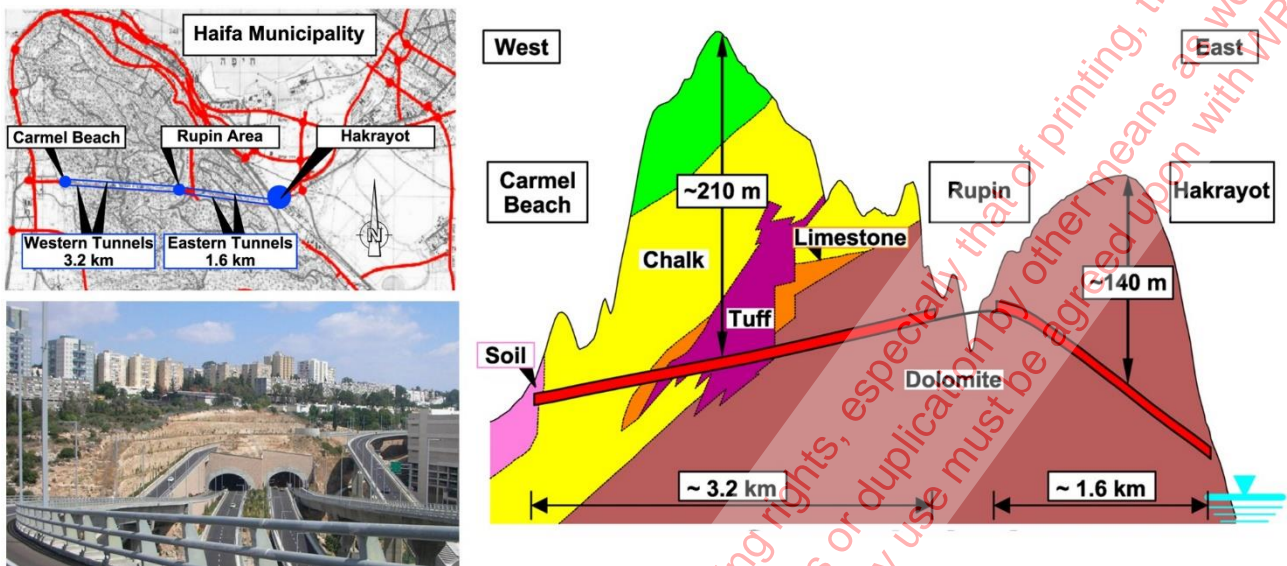


Bild 14: Carmel Tunnels, Haifa, Israel

Über den größten Teil der Länge besitzt der Querschnitt eine horizontale ungesicherte Sohle. Die temporäre und dauerhafte Sicherung des Gewölbes besteht aus 10 bis 35 cm stahlfaserbewehrtem Spritzbeton (Bild 15).

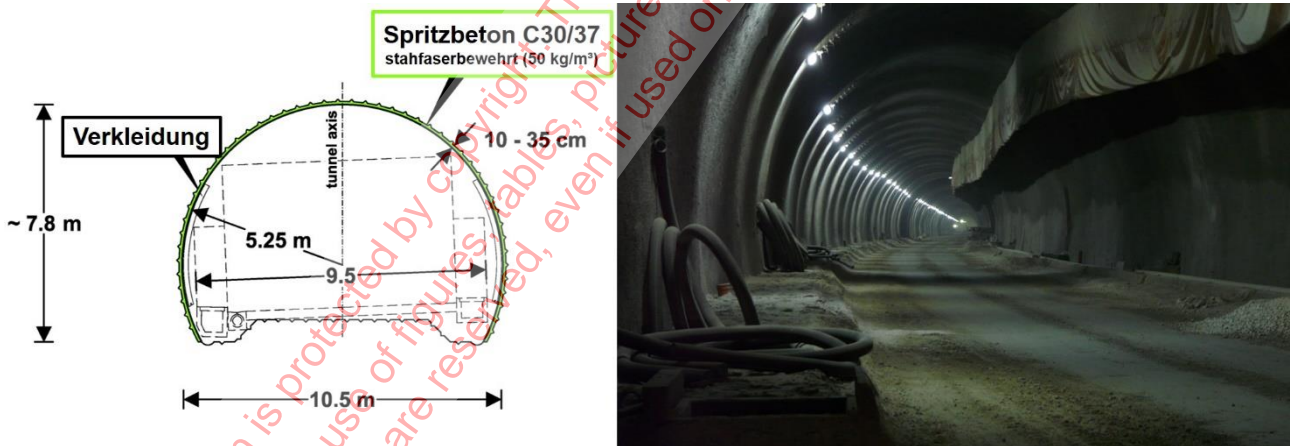


Bild 15: Carmel Tunnels, Haifa, Israel, Regelquerschnitt zweispurig, offene Sohle

Auch in den Portalbereichen und in den Abschnitten im Tuff besteht die dauerhafte Sicherung aus einschaligem Spritzbeton. Hier ist die Schale mit 30 bis 60 cm jedoch dicker und aus Standsicherheitsgründen besitzt der Tunnel hier eine geschlossene ausgerundete Sohle.

Nach Niederschlägen zutretendes Sickerwasser wird über beim Vortrieb auf der Ausbruchsleibung angebrachte Noppenfolien und kurze Dränageschläuche in Höhe der Bankette abgeführt. Dieses einfache Dränagesystem wurde nur örtlich - nach den beim Vortrieb gesammelten Erkenntnissen - eingebaut.

Die Tunnel wurden in den Jahren 2007 bis 2009 gebaut (Bild 17). Die Inbetriebnahme erfolgte nach Fertigstellung der Ausrüstung im Dezember 2010. Grundsätzlich sind die seither gesammelten Erfahrungen sehr positiv. Allerdings ist es örtlich zu Wasserzutritten gekommen, die während des Vortriebs nicht ausreichend gefasst wurden. Außerdem hat sich die hier im Foto zu erkennende seitliche Verkleidung aus Betonelementen örtlich als korrosionsanfällig erwiesen und der Austausch der Elemente nach Unfällen ist teilweise kompliziert und damit aufwendig.

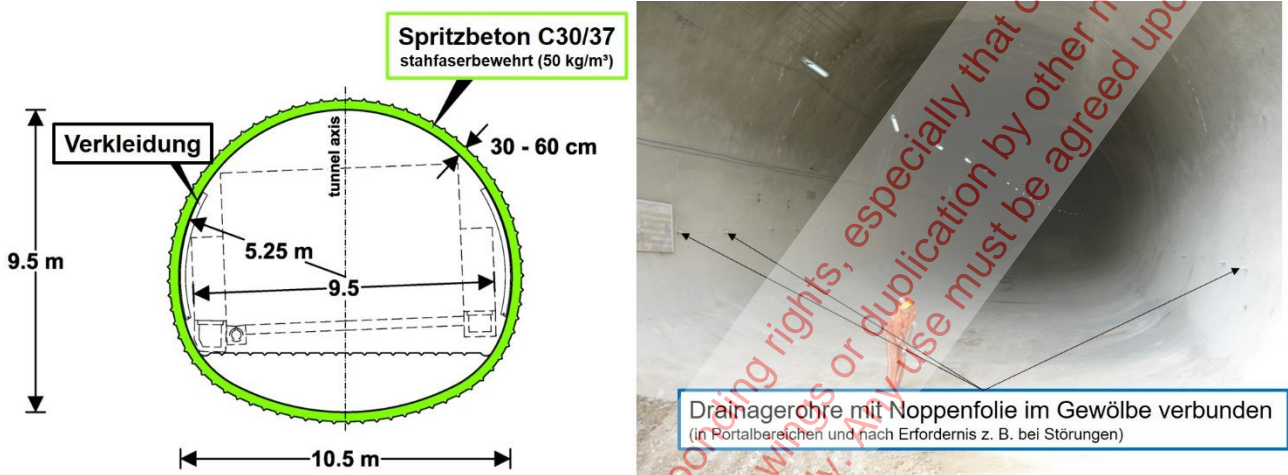


Bild 16: Carmel Tunnels Haifa, Israel, Regelquerschnitt zweispurig, geschlossene Sohle



Tunnelbau: 06.2007 bis 06.2009

Inbetriebnahme: 12.2010

- grundsätzlich positive Erfahrungen
- örtlich Wasserzutritte, die nicht ausreichend gefasst werden
- seitliche Verkleidung:
  - örtlich Korrosion durch Sickerwasser
  - Austausch nach Unfällen kompliziert

Bild 17: Erfahrungen aus dem Betrieb

## 6.2 Hestenberg Tunnel

Das zweite Projektbeispiel liegt in Deutschland. Hier wurde der insgesamt ca. 786 m lange Rettungsstollen des Hestenbergtunnels mit Ausnahme von 35 m in einschaliger Spritzbetonbauweise ausgeführt (Bild 18).

Der in den Jahren 2004 - 2006 erbaute Hestenbergtunnel liegt in devonischen Schichten des Rheinischen Schiefergebirges. Dabei handelt es sich um Sandsteine, Schluffsteine und

Tonsteine, die teilweise auch in Wechsellagerung auftreten (Bild 19). Der Grundwasserspiegel steht deutlich oberhalb des Tunnels an (Bild 19).

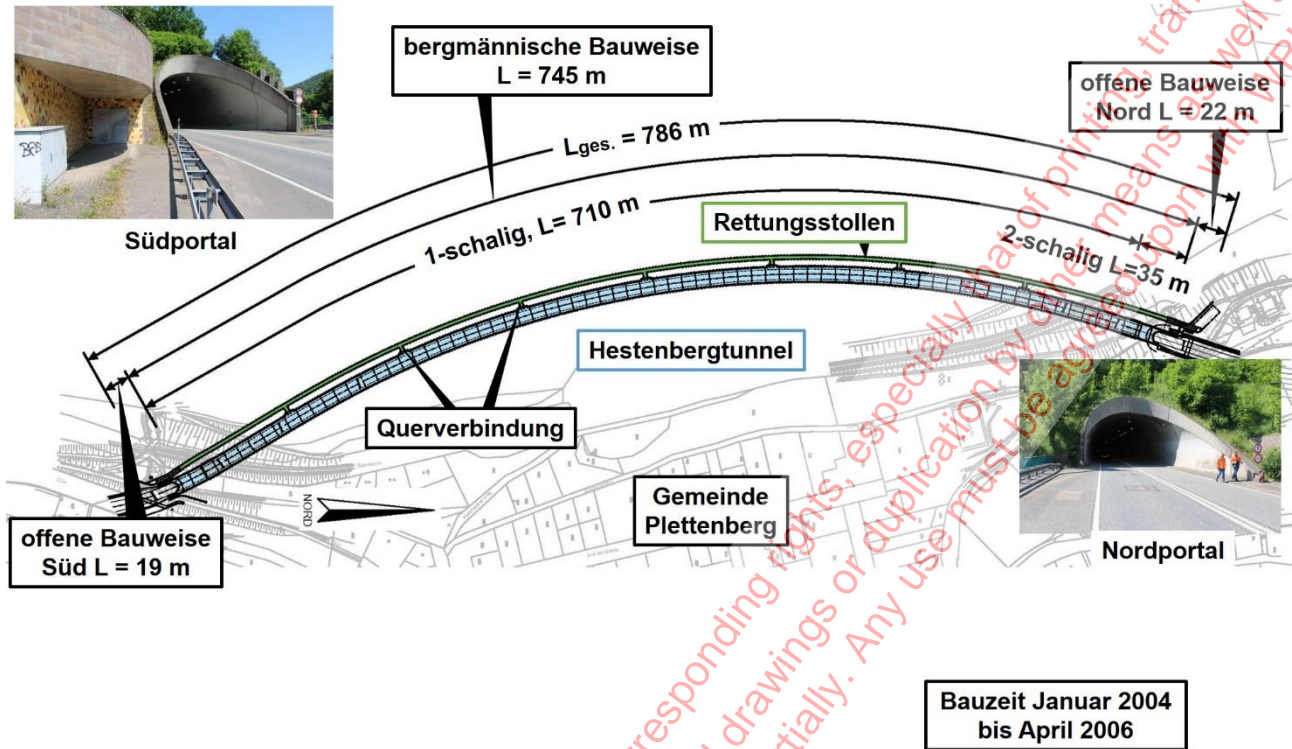


Bild 18: Lageplan Hestenbergtunnel, Plettenberg, Deutschland

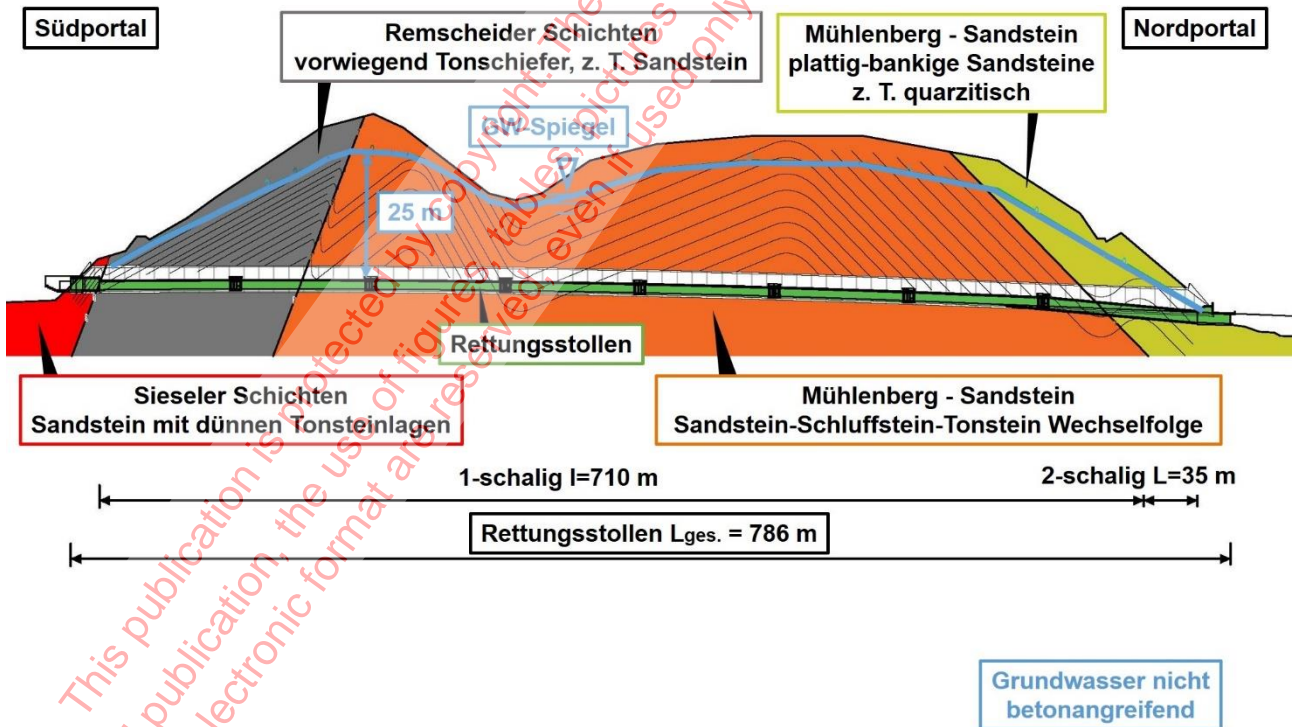


Bild 19: Längsschnitt Hestenbergtunnel, Plettenberg, Deutschland

Einen Eindruck der Baugrundverhältnisse aus der Bauzeit geben die Fotos in Bild 20.

Der Rettungsstollen besitzt einen hufeisenförmigen Querschnitt. Der Spritzbeton ist konventionell bewehrt. Die Ankerung wurde mit GFK-Dauerankern ausgeführt (Bild 21). Auch bei

diesem Projekt wurden bergseitig der Spritzbetonschale Dränagematten angeordnet. Zusätzlich wurden hier einseitig 2 m lange Entwässerungsbohrungen erstellt (Bild 21).



Bild 20: Ortsbrust Rettungsstollen

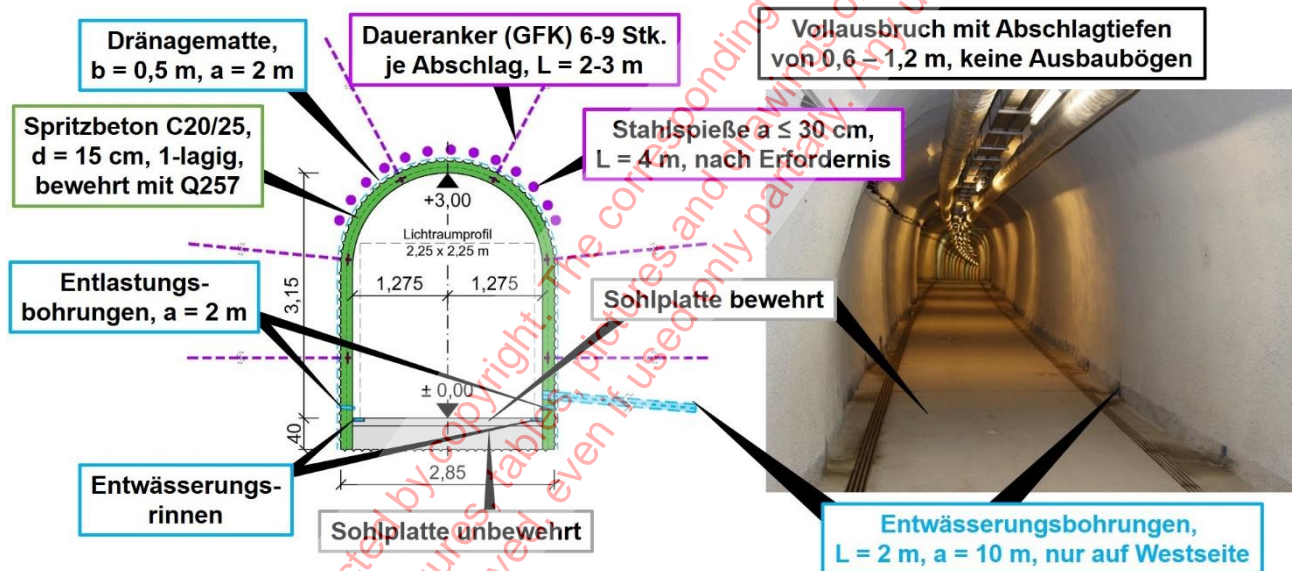


Bild 21: Querschnitt Rettungsstollen, einschalig

In einem 35 m langen Abschnitt des Stollens wurde eine zweischalige Konstruktion gewählt (Bild 18). Hier wurde zwischen der primären Außenschale und der inneren Spritzbetonschale eine sogenannte Regenschirmabdichtung ausgeführt (Bild 22).

Die im Juni 2023 aufgenommenen Fotos auf den Bildern 21 bis 23 zeigen, dass der Tunnel auch ca. 20 Jahre nach dem Bau noch in einem guten Zustand ist. In der Spritzbetonschale sind örtlich verheilte Risse zu erkennen und am Mund der Dränagen können Versinterungen beobachtet werden.

Es sind auch in der Vergangenheit keine nennenswerten Schäden aufgetreten. Vereinzelt gibt es am Fuß der Ulme Feuchtstellen und verheilte Risse. Die beobachteten Versinterungen konnten nach Auskunft der Bauherren bislang durch 1 x jährliches Spülen ohne weitere Maßnahmen beseitigt werden (Bild 24).

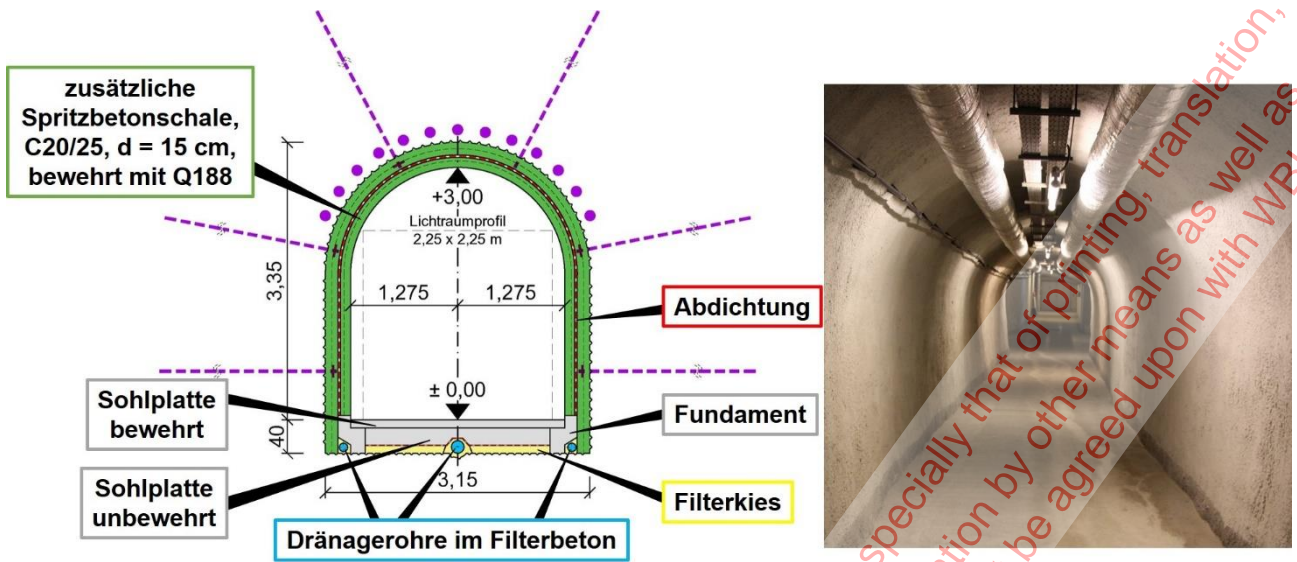
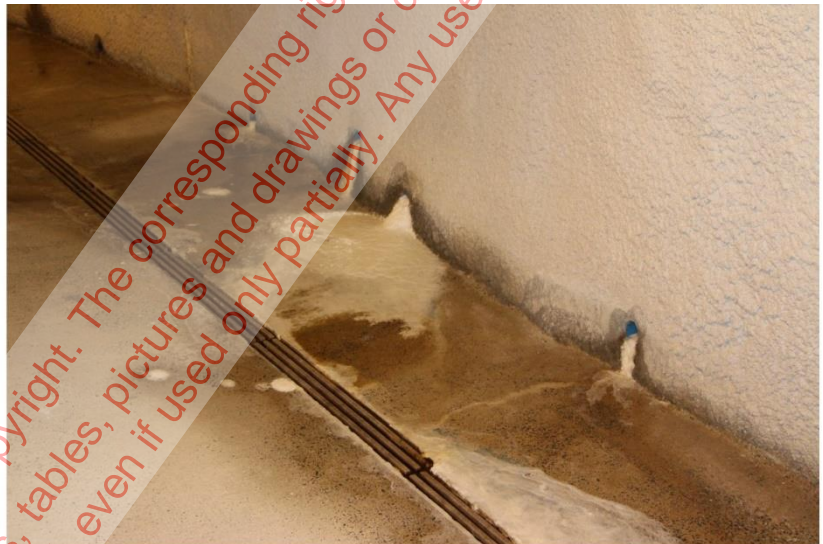


Bild 22: Querschnitt Rettungsstollen, zweischalig



Verheilte Risse in Spritzbetonschale



Versinterung der Dränagen (kurz vor dem Spülen)

Bild 23: Erfahrungen aus dem Betrieb



Bild 24: Erfahrungen aus dem Betrieb

Tunnelbau: 01.2004 bis 04.2006

Inbetriebnahme: 2006

- Grundwasser nicht betonangreifend
- Keine größeren Schäden an der Spritzbetonschale, vereinzelt Feuchtstellen und verheilte Risse
- Wasserzutritte über die Drainagebohrungen
- Versinterung kann durch 1x jährliches Spülen der Dränagen ohne weitere Maßnahmen beseitigt werden.



## 7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In dem Beitrag konnte nach Auffassung der Autoren gezeigt werden, dass die Ausführung von einschaligen Tunnelbauwerken nach der Spritzbetonbauweise sowohl im Hinblick auf den Bau als auch im Hinblick auf den Betrieb möglich ist.

Damit die Anwendung in Deutschland ausgeweitet werden kann, müssen jedoch die Vorschriften und dabei insbesondere die ZTV-ING und die Ril 853 angepasst werden (Bild 25, Bundesanstalt für Straßenwesen ZTV-ING 2022/01 und DB Netz AG RIL 853 2018). Insbesondere die Einschränkungen des Anwendungsbereichs sowie die Forderung einer zweiten Schicht in der ZTV-ING sollten aus unserer Sicht überprüft werden.

Aufgrund der kürzeren Bauzeit, der geringeren Kosten und des deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks sollte diese Bauweise weiterverfolgt werden.

	ZTV-ING	Ril 853
Voraussetzungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rettungsstollen und Querschläge</li> <li>• geeignete Gebirgsverhältnisse</li> <li>• kein drückendes Wasser</li> <li>• Grundwasser <math>\leq</math> XA2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nur Nebenanlagen (Notausgänge, Schächte)</li> <li>• UIG erforderlich</li> </ul>
Druckfestigkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq</math> C25/30</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\geq</math> C25/30</li> </ul>
Dichtigkeitsklasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 (kapillar durchfeuchtet)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 (weitgehend trocken) oder 3 (kapillar durchfeuchtet)</li> </ul>
Konstruktion	 <p>Sicherung <math>c_{nom} = 4,5 \text{ cm}</math></p> <p>2. Schicht (min. 15 cm) Matten oder Stahlfasern</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul>
Sonstige	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Größere Wasserzutritte ableiten</li> <li>• 2. Schicht ohne Fugen und mit Nachbehandlung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risse <math>&gt; 0,3 \text{ mm}</math> verpressen</li> </ul>

Bild 25: Voraussetzungen bzw. Vorgaben gemäß ZTV-ING, Teil 7, Abschnitt 1 (Stand 2022/01) und Ril 853, 9. Aktualisierung (Stand 2018)

Werden dann bei Planung und Bau die spezifischen Anforderungen wie keine Zugspannungen, Vollausbuch, keine Mattenbewehrung, keine Bögen etc. beachtet und technisch gelöst, ist es aus unserer Sicht nur konsequent, die einschalige Bauweise vor allem im Verkehrswegebau auszuweiten und so den konventionellen Tunnelbau nachhaltiger und wirtschaftlicher zu gestalten (Bild 26). Sicherlich ist hierfür noch einiges zu tun. Packen wir es an.

- **Anwendung möglich, ggf. höhere Anforderungen an Ausbruch und Spritzbeton**
- **Querschnittsgestaltung → keine Zugspannungen**
- **Vollausbruch, keine Matten- oder Stabstahlbewehrung, keine Bögen und möglichst keine Radialanker**
- **Sofern Abdichtung notwendig, nach Möglichkeit bereits im Zuge des Vortriebs einbauen (1-schalige Bauweise)**
- **Nachhaltig und wirtschaftlich**
- **Vorschriften müssen angepasst bzw. erweitert werden**

Bild 26: Ausblick einschalige Bauweise

## Literatur

Beton nach Maß, Betontechnische Daten von der Praxis für die Praxis mit DIN EN 206-1/DIN 1045-2, 2022.

Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), 2022/01.

DAfStb-Richtlinie "Wasserundurchlässige Bauwerke aus Beton (WU-Richtlinie)" (2017-12), Beuth Verlag, Berlin.

DB Netz AG: RIL 853: Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten (9. Aktualisierung), 2018.

DIN EN 14487-1: Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität; März 2006.

Müller, T.; Schaab, A.: Entwicklung eines stahlfaserarmierten Spritzbetons für den Bau von Dammringen. Vortrag anlässlich des 2. Felsmechanik-Tags im WBI-Center am 13.04.2016. WBI-PRINT 19, Weinheim, 2016.

Rath, A.; Osthoff, G.; Wittke-Gattermann, P.; Druffel, R.: Auffahren großer Querschnitte im ausgelaugten Gipskeuper unter Gebäuden im Vollausbruch und Vergleich mit Ulmenstollenvortrieb. Vortrag anlässlich des 6. Felsmechanik- und Tunnelbautags im Rosengarten in Mannheim am 10.06.2021. WBI-PRINT 23, Weinheim, 2021.

Wittke, M.; Gattermann, J.; Grosz, T.: Planung und Bau der Carmel Tunnel in Haifa, Israel. Taschenbuch für den Tunnelbau 2011. Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin.

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

Wittke, M.; Schmitt, D.; Reinhardt, A.: 10-7 - 10-10 m/s: Ziel erreicht - Erfolgreicher Abschluss der Injektionen Anhydrit für die Tunnel des Projekts Stuttgart 21. Vortrag anlässlich des 6. Felsmechanik- und Tunnelbautags im Rosengarten in Mannheim am 10.06.2021. WBI-PRINT 23, Weinheim, 2021.

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.; Wittke, M.: Planning and Construction of the Carmel Tunnels in Haifa, Israel. Veröffentlichung anlässlich der STUVA-Tagung 2007 in Köln vom 27.11 - 28.11.2007, Proceedings, Köln, 2007.

Wittke, W.; Wittke, M.; Druffel, R.; Rath, A.; Osthoff, G.: Großquerschnitte im Anfahrbereich Hauptbahnhof Süd, Statische Berechnungen, Senkungsprognosen und Baubetriebliche Aspekte. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-PRINT 22, Weinheim, 2019.

Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Druffel, R.: Einsparung von Energie und Rohstoffen und Verringerung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks durch Innovationen im Tunnelbau. Titelstory Zeitschrift Tunnel 3/2022, Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2022.