

---

# AKTUELLE ENTWICKLUNGEN DER SPRITZBETONTECHNOLOGIE UND SPRITZBETONBAUWEISE AM BRENNER BASISTUNNEL

---

## CURRENT DEVELOPMENTS IN SHOTCRETE TECHNOLOGY AT THE BRENNER BASE TUNNEL

Tobias **Cordes**, Matthias **Hofmann**, Roland **Murr**, Konrad **Bergmeister**  
Brenner Basistunnel BBT SE, Innsbruck, Österreich

Die Anforderungen an den Spritzbeton beim Bau des Brenner Basistunnels sind vielfältig und umfangreich. Verlängerte Dauerhaftigkeit, ökologische Betonrezepturen, ressourcenschonender Materialeinsatz und konsequentes Qualitätsmanagement sind Aspekte die kontinuierlich angepasst und optimiert werden. Der Beitrag gibt einen Überblick über aktuelle Entwicklungen beim Einsatz von Spritzbeton beim BBT.

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Spritzbetonschalen werden neben der Druckfestigkeit und der Wassereindringtiefe Untersuchungen zur Porosität und Gaspermeabilität einbezogen. Durch flächendeckende 3D Laser Tunnelscans, die eine umfassende Kenntnis der Schalenstärke liefern, werden die Dauerhaftigkeitsüberlegungen ergänzt. Die Beanspruchungen der Spritzbetontunnelschalen wurden mit neuen Materialmodellen durch Rückrechnungen ermittelt. Die mechanischen Eigenschaften des sehr jungen Spritzbetons, wie zum Beispiel E-Modul, Hydratationsschwinden und Kriechen wurden hierfür an Versuchskörpern aus dem Vortrieb bestimmt.

*The requirements for shotcrete used for the construction of the Brenner base tunnel are manifold and extensive. Extended durability, ecological concrete formulations, resource-conserving use of materials and consistent quality management are aspects that are continuously adapted and optimized. The article provides an overview of current developments in the use of shotcrete at BBT.*

*In order to assess the durability of shotcrete linings, porosity and gas permeability studies are included in addition to compressive strength and water penetration depth. Durability considerations are supplemented by comprehensive 3D laser tunnel scans, which provide detailed knowledge of the shell thickness. The loading capacities of shotcrete linings are determined with new material models. The parameters for the very young sprayed concrete e.g. Young modulus, hydration shrinkage and creep are gained in laboratory experiments.*

### 1. Brenner Basistunnel

Der Brenner Basistunnel (BBT) ist ein prioritäres europäisches Infrastrukturprojekt des Nord-Süd-TEN Korridors Helsinki (Finnland) - La Valletta (Malta). Der Korridor verbindet die Wirtschaftszentren und Häfen in Italien mit denen in Deutschland und Skandinavien. Die zwei 55 km langen, parallel verlaufenden, einspurigen Eisenbahntunnel des BBTs ermöglichen die Alpenquerung für Güter- und Personenzüge zwischen Innsbruck (Österreich) und Franzensfeste (Italien) ohne die Überwindung des 1371 m hohen Brennerpasses. Entsprechend Bild 1 wird mittig, 12 m tiefer, zwischen den einspurigen

Eisenbahntunnels liegend, zurzeit vorrauseilend der Erkundungstunnel für die geologische und hydrogeologische Erkundung vorgetrieben.

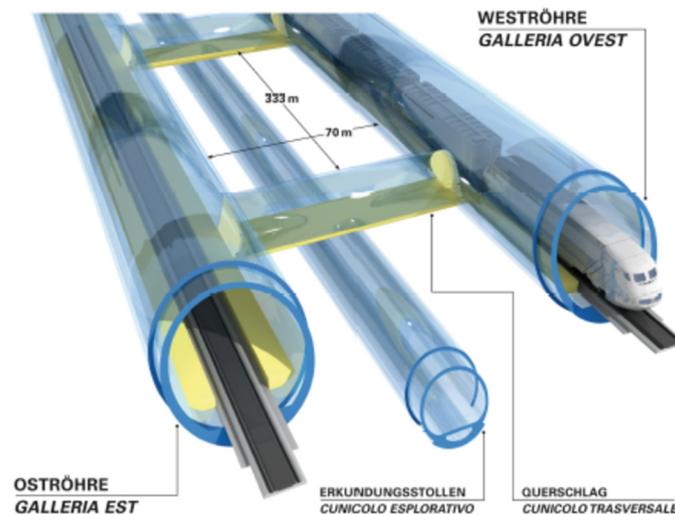


Bild 1: Querschnitt des Brenner Basistunnels

Das insgesamt 230 km lange Tunnelsystem des BBTs wird zu ca. 60% mit Tunnelbohrmaschinen und zu ca. 40% im Sprengvortrieb vorgetrieben. Bis Oktober 2017 wurden ca. 1/3 der gesamten Länge des Tunnelsystems bereits ausgebrochen.

Die erforderliche Betonkubatur zum Bau des BBTs auf österreichischem Projektgebiet beträgt rund 3 Mio. m<sup>3</sup>. Optimierungen und innovative Entwicklungen in der Betontechnologie stellen bei solch großen Betonmengen für die Realisierung des BBTs einen zentralen Punkt dar. Das Betonvolumen teilt sich entsprechend Bild 2 in den Bedarf von Spritzbeton, Ortbeton und Beton für Tübbinge (Fertigteile) auf. Das bis Oktober 2017 bereits benötigte Betonvolumen ist in Blau und das zukünftig erforderliche Betonvolumen in Rot dargestellt.

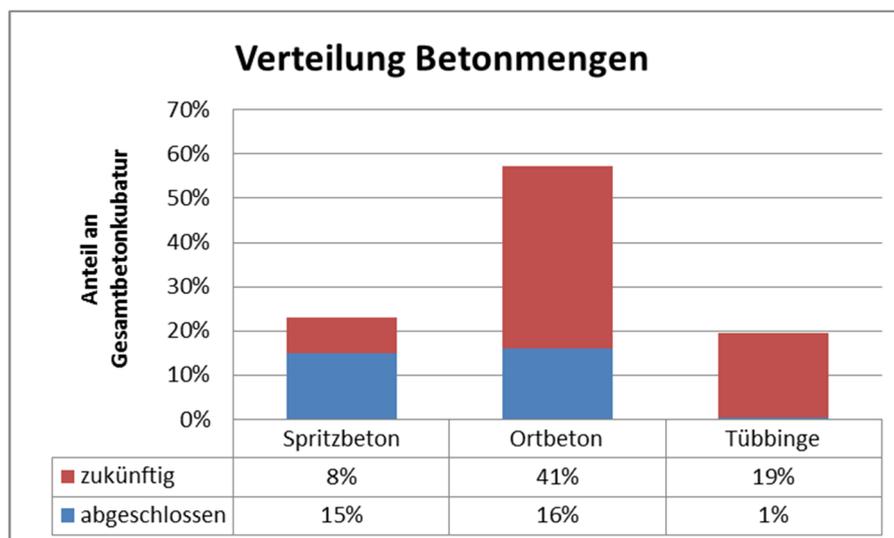


Bild 2: Verteilung der Betonkubatur für Tunnelschalen im österreichischen Projektgebiet des BBTs

Insgesamt werden ca. 60% des Betonvolumens mit Ortbeton, ca. 20% mit Spritzbeton und ca. 20% mit Beton für Tübbinge hergestellt. 2/3 der gesamt erforderlichen Spritzbetonmenge wurden bereits verbaut und hierbei Spritzbetonentwicklungen umgesetzt.

Zwei Hauptaugenmerke dieser Optimierungen und begleitenden Entwicklungen beim Bau des BBTs sind die Maximierung der Verfügbarkeit des Eisenbahntunnels und die erhöhte Nutzungsdauer der Tunnelschalen. Die verlängerte Nutzungsdauer von 200 Jahren hat ihren Niederschlag sowohl in der Bemessung der Tragsicherheit durch erhöhte Teilsicherheitsfaktoren, als auch in Anforderungen bezüglich der Dauerhaftigkeit (siehe auch [1, 2]).

In diesem Beitrag werden Beispiele von Spritzbetontwicklungen beim BBT und ein Ausblick in zukünftige betontechnologische Vorhaben gegeben. Im Abschnitt 2 wird die Ausführung von permanenten Spritzbetonschalen im BBT vorgestellt, im Abschnitt 3 neue Erkenntnisse, die sich aus der Volldokumentation mit Tunnelscannern ergeben, erläutert und im Abschnitt 4 das baubegleitende experimentelle Programm zur Qualitätsüberwachung des Spritzbetons für permanente Außenschalen mit Gaspermeabilitätsuntersuchungen zusammengefasst. Im Abschnitt 5 folgt die Beschreibung der experimentellen Bestimmung von sehr jungen Spritzbetoneigenschaften für Berechnungen mit Berücksichtigung des zeitabhängigen Verhaltens des Spritzbetons.

Die Ausführung von Spritzbetontunnelschalen des BBTs mit Zuschlag nur aus aufbereitetem Tunnelausbruchsmaterial (Bündner Schiefer) wird in einem weiteren Beitrag auf dieser Tagung erläutert [13].

## 2. Permanente Spritzbetonschale

Bei den Spritzbetonschalen des Brenner Basistunnels werden zwei grundsätzliche Konzepte unterschieden:

- **temporäre Spritzbetonaußenschalen**, die für eine Nutzungsdauer von mindestens 10 Jahren für den Bauzustand ausgelegt werden und die für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren mit Teilsicherheitsbeiwerten bemessen werden sowie
- **permanente Spritzbetonaußenschalen**, die dauerhaft ausgeführt werden und für eine Nutzungsdauer von 200 Jahren bemessen werden. Dabei gilt es die Anforderungen, die Beanspruchung und die Tragsicherheit der Schalen möglichst genau zu erfassen. Hierfür werden die realen Spritzbetonstärken, die Spritzbetoneigenschaften und die Verformungen der Schalen genau überwacht und ausgewertet.

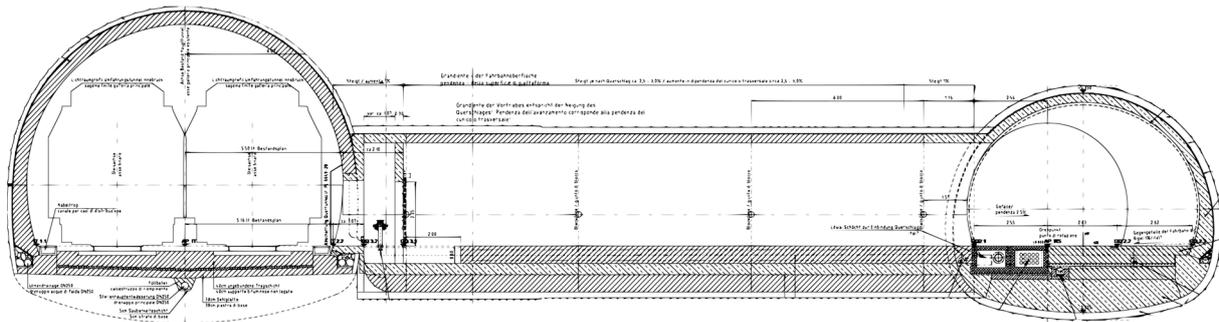
Für die Ausführung einer permanenten Spritzbetonaußenschale beim Brenner Basistunnel müssen folgende Anforderungen erfüllt bzw. Bedingungen eingehalten werden:

- nur Nebenbauwerke mit verringerten Nutzungsanforderungen (z.B. Zugangstunnel, Rettungsstollen),
- stabile geologische Verhältnisse – Verformungen,
- geringer Wasserandrang – lokale Wasserzutritte müssen zuvor abgeschlaucht und abgeleitet werden,
- unkritischer Chemismus des Bergwassers (chemisch nicht bis maximal schwach angreifende Umgebungsbedingungen, z.B. maximal ermittelter Sulfatgehalt im Bergwasser: 200 mg/l),
- keine Eisbildung (Verhinderung von Eisbruchgefahr im Firstbereich),
- zeitlich definierte Kontrollintervalle (Haupt- und Nebenprüfungen) und
- keine Beeinflussung des Eisenbahnbetriebs durch zusätzliche Überwachungen oder durch lokale Sanierungsmaßnahmen.

## 2.1 Beispiel Rettungsstollen Inntaltunnel

Exemplarisch wird in diesem Abschnitt die Ausführung der permanenten Spritzbetonschale des Rettungsstollens des Inntaltunnels der Umfahrung Innsbruck (Baulos H33) erläutert.

Um den bestehenden Inntaltunnel auf das Sicherheitsniveau des Brenner Basistunnels zu ertüchtigen wurde, 30 m parallel verlaufend, ein Rettungsstollen mit einer Länge von 9,1 km errichtet. Dieser Tunnel mit einem Ausbruchsquerschnitt von 47 m<sup>2</sup> ist alle 333 m über einen Querschlag entsprechend Bild 3 mit dem Inntaltunnel der Umfahrung Innsbruck verbunden.



**Bild 3: Schnitt quer zur Achse des Inntaltunnels (links) und entlang eines Querschlags mit Aufweitung im Bereich des Rettungstunnels (rechts)**

Der Rettungsstollen steht im Ereignisfall für die Selbstrettung und für die Zufahrt von Einsatzfahrzeugen zur Verfügung. Diese Nutzung ermöglicht eine einfache Zugänglichkeit für z.B. verkürzte Inspektionsintervalle oder lokale Sanierungsarbeiten. Die Anforderungen an den Ausbau wie z.B. Dichtigkeit und Verfügbarkeit sind gegenüber den Anforderungen für einen Tunnel mit Eisenbahnbetrieb untergeordnet. Der Nachweis der Tragsicherheit hingegen wird in beiden Fällen, für einen Tunnel mit Eisenbahnbetrieb und für einen Rettungsstollen, mit dem erhöhten Teilsicherheitskonzept der BBT Regelplanung geführt.

Der Rettungsstollen wird im Innsbrucker Quarzphyllit mit Einschaltungen von Kalk- / Dolomitmarmor und Grünschiefer aufgeföhren. Der östliche Abschnitt (bis TM 4600) liegt in der silurischen Karbonat-Serizitphyllit Serie und der westliche Abschnitt in der ordovizischen Quarzphyllit-Grünschiefer Serie. Die Serien sind getrennt durch die steil einfallende Hasentalstörung. Spröde tektonische Störungen sind häufig und das Hauptstörungssystem ist die annähernd achsparallel auftretende "Lavierentalstörung". Im Portalbereich Tulfes stehen quartäre Lockersedimente an sowie im gesamten Vortriebsverlauf wurden drei Abschnitte mit insgesamt 200 m Grundmoräne durchföhrt.

Beim Bau des 30 m entfernten Inntaltunnels (1989-1993) erfolgte über die gesamte Länge eine Wasserschüttung von insgesamt 10 l/s. In den letzten 4 Jahren wurden beim Inntaltunnel eine durchschnittliche Schüttung von 5,1 l/s (min. 3,0 l/s bis max. 10,2 l/s) gemessen. Für die Herstellung des parallel verlaufenden Rettungstunnels wurde davon ausgegangen, dass die Gesamtwassermenge aufgrund der Drainage des bestehenden Inntaltunnels geringer ausfällt und keine großen Wasserzutritte zu erwarten sind.

In diesem Bereich wurden bei der chemischen Analyse der Bergwasserproben nur äußerst geringe Sulfationenkonzentrationen (z.B. Sulfat: 41,0 mg/l) ermittelt. Zuzolge der Bestimmung einer vorhandenen Calcitsättigung im Bergwasser konnte in diesem Bereich auch ein lösender Betonangriff ausgeschlossen werden.

Aufgrund von erhöhten Einwirkungen oder möglichen Lastumlagerungen zu späteren Zeitpunkten sind Portalbereiche, Vortriebsbereiche mit Rohrschirmen oder Stauchelementen,

Kreuzungsbereiche sowie Über- und Unterquerungen stets zweischalig mit Ortbetoninnenschale auszuführen. Zusätzlich wurden für diesen Tunnel erhöhte Anforderungen bezüglich Dichtigkeit für technische Anlagen im Bereich aller Querschläge und den anschließenden Kreuzungsbereichen gefordert, die nicht mit einer permanenten Spritzbetonschale erfüllt werden konnten und folglich zweischalig ausgebaut wurden.

Für die bautechnischen Anforderungen und Nachweise der permanenten Spritzbetonschale wurde die Richtlinie Spritzbeton [4] und die Anforderungen der BBT Regelplanung für Innenschalen berücksichtigt, woraus sich folgende Anforderungen ableiten:

- Mindestdicke 25 cm, 2-lagig bewehrt
- Festigkeitsklasse C25/30
- Spritzbeton-, bzw. Überwachungskategorie ÜK3
- erhöhte Betondeckung von 5,5 cm
- Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit nach abgeklungenen Konvergenzen

Lokale Unterschreitungen der Mindestdicke, bis zu einer Ausbreitung von in etwa 2 m, wurden toleriert. Aus diesen lokal beschränkten Bereichen geringerer Schalendicke oder auch aus kleineren Öffnungen in Schalentragerwerken ergeben sich keine nennenswerten Spannungsumlagerungen in der Schale. Demgegenüber können längsgestreckte Bereiche (längs zur Tunnelachse) oder sich gegenseitig beeinflussende Bereiche geringerer Schalendicke nicht toleriert werden.

Die Qualitätskontrolle der permanenten Schale erfolgte mit einem erhöhten Monitoring, mit 5 Messpunkten pro Messquerschnitt für die Konvergenzmessungen und mit flächendeckender Ermittlung der Schalendicke und der Betondeckung.

## 2.2 Nachweiskonzept für permanente Spritzbetonaußenschalen

Der Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der permanenten Spritzbetonschale muss zum Zeitpunkt der abgeklungenen Verformungen unter Berücksichtigung der tatsächlichen geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Verhältnisse geführt werden.

Der Nachweis der Tragsicherheit erfolgte im Regelprofil an 2D FE-Modellen in zwei Schritten:

- a) Die **Ermittlung der Gebirgslast** erfolgte im geomechanischen 2D Modell unter Berücksichtigung der räumlichen Vorentspannung. Im Modell wurden die geotechnischen Kennwerte der Prognose hierbei modifiziert bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen der Tunnelschalenschiebung im Modell und in der Realität erzielt wurde. Dabei wurde die reale Schalendicke, ermittelt aus Tunnel-Scan Aufnahmen und die experimentell bestimmten Spritzbetoneigenschaften berücksichtigt. Der Spritzbeton wurde mit einem nichtlinearen zeitabhängigen Materialmodell [3] modelliert.
- b) Der **Nachweis der Tragsicherheit** erfolgte am 2D Modell eines gebetteten Balkens unter Berücksichtigung der zuvor ermittelten Gebirgslast und der weiteren Bemessungslastfälle.

Der Nachweis der Tragsicherheit konnte mit diesem Konzept für die abgeklungenen Konvergenzen der aufgefahrenen geologischen Homogenbereiche erbracht werden. In

Bereichen höherer Verformungen (>8 cm im Regelprofil) sowie stark unsymmetrischer Beanspruchungen konnte kein einschaliger Ausbau mit einer permanenten Spritzbetonschale erfolgen. Für die Einhaltung der Tragsicherheit nach der BBT Regelplanung wird in diesen Bereichen eine Innenschale erforderlich.

Für den Nachweis der Dauerhaftigkeit der permanenten Spritzbetonschale wurde entschieden, die Dauerhaftigkeit in-situ anhand von Permeabilitätsmessungen am Spritzbeton zu führen (siehe Abschnitt 4). Dadurch werden die tatsächlichen physikalisch relevanten Gegebenheiten vor Ort für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit beurteilt.

### 2.3 Erfahrungen der Ausführung von permanenten Spritzbetonaußenschalen

Permanente Spritzbetonschalen stellen eine erhöhte Anforderung an alle Projektbeteiligten. Wichtig ist, dass während des Vortriebs und der Herstellung der permanenten Spritzbetonschale auf die erhöhten Anforderungen gegenüber dem temporären Ausbau Rücksicht genommen wird und zusätzliche Qualitätsüberwachungen durchgeführt werden. Besonders für Anforderungen an die Dauerhaftigkeit sind geeignete Maßnahmen zur Qualitätsüberwachung frühzeitig zu definieren.

### 3. Tunnelscan - Volldokumentation

Laser-Tunnelscanner ermöglichen eine schnelle und einfache (Rasterweite 1 cm x 1 cm) Aufnahme des Ausbruchsprofils oder der (Spritz-) Betonoberflächen. Die Reichweite eines Tunnelscanners beträgt ca. 1 – 200 m. Die erzielbaren absoluten Genauigkeiten liegen bei ca. 1 cm. In Kombination mit einer Digitalkamera können zusätzlich die Farbinformationen aufgenommen werden, wodurch eindrucksvolle Visualisierungen möglich sind. Ein weiterer Vorteil ist die kurze Aufnahmezeit von ca. 5 Minuten pro 10 Tunnelmeter, wodurch der Bauablauf nur minimal gestört wird. Tunnelscan-Aufnahmen dienen somit zur Qualitätskontrolle und Qualitätssteigerung durch systematische Kontrolle der einzuhaltenden Übermaße, Erfassung des geologisch bedingten Mehrausbruches, Bestandsdokumentation (Geometrie, Bauteilstärken). Systematische Tunnelscan-Aufnahmen von jedem Abschlag ermöglichen Vortrieboptimierungen des Sprengschemas [5] und die durchgehende Ermittlung der Dicke der Spritzbetonschale und deren Geometrie.

Die Geometrie der Spritzbetonschale mit den Konvergenzmessungen ermöglicht statische Rückrechnungen der maßgebenden Bereiche zur Bestimmung der in-situ Auslastung und der Tragsicherheit der Spritzbetonschale. Bei den kommenden Baulosen des Brenner Basistunnels wird der vortriebsbegleitende Einsatz von Tunnelscannern („Volldokumentation“) systematisch eingesetzt.

Eine bereits abgeschlossene Volldokumentation erfolgte beim Schutterstollen Wolf. Der ca. 1 km lange Schutterstollen wurde im Zuge des Bauloses Wolf II für den Transport des Ausbruchsmaterials auf die Deponie Padastertal errichtet.

Die statistische Auswertung dieser Scandaten wird nachfolgend erläutert. Für die Auswertung wurden entsprechend Bild 4 die Punktwolken der Scanaufnahmen der Ausbruchsgometrie und der Spritzbetonoberflächen in ein 3D-CAD Modell importiert.

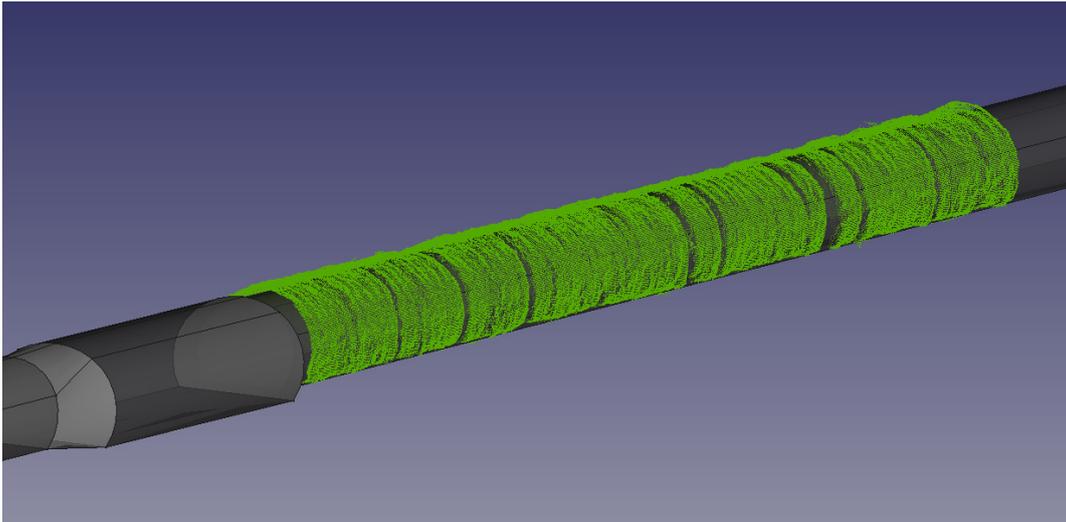


Bild 4: 3D-CAD Modell im Bereich der Lüfterkaverne mit Ausschnitt der Scanpunkte (grün)

Durch Vergleich mit der Soll-Geometrie kann das Überprofil und die Spritzbetondicke ermittelt werden. Die hohe Messpunktdichte ermöglicht eine statistische Auswertungen des Überprofils und der Spritzbetondicke.

### 3.1 Spritzbetondicke

In einem Pilotprojekt wurde die statistische Auswertung von Tunnelscandaten untersucht. Bild 5 zeigt exemplarisch den Verlauf der mittleren Spritzbetondicke sowie des 5% bzw. 95%-Quantilwerts über die Laibung.

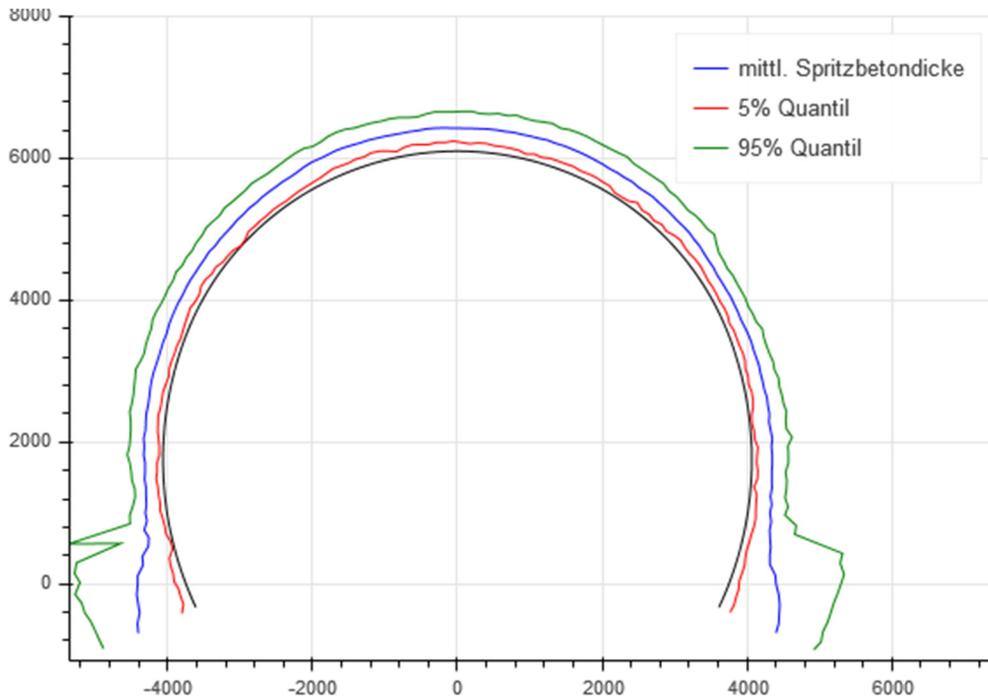


Bild 5: Spritzbetondicke

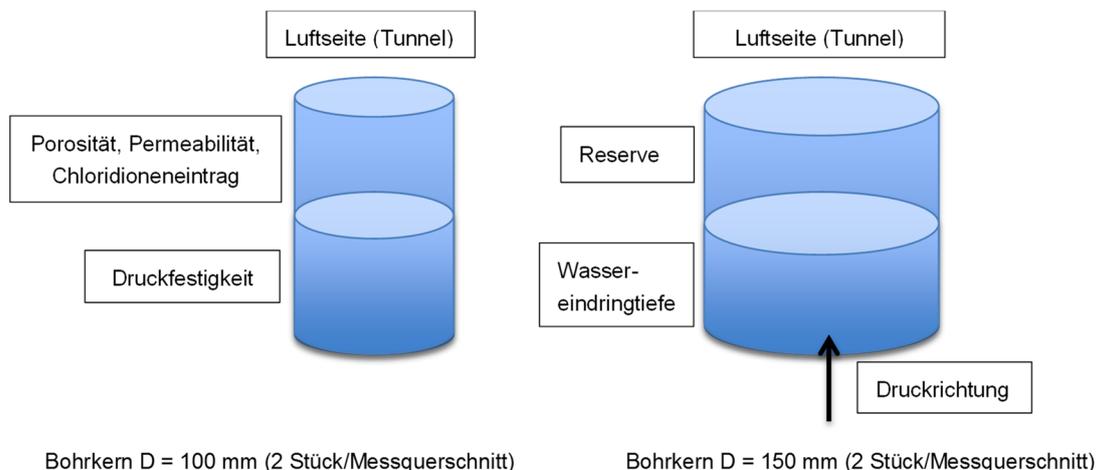
Zukünftig sollen Tunnelscandaten systematisch ausgewertet und z.B. Rückrechnungen auf Basis realistischer Geometrien durchgeführt werden.

#### 4. Experimentelles Prüfprogramm

Für eine Verifizierung der erforderlichen materialtechnologischen Ziele (Qualität des permanenten Spritzbetonausbaus) wurde ein Prüfprogramm für den Rettungsstollen aufgestellt. Zudem wurden die Ergebnisse der Konformitäts- und Identitätsprüfungen herangezogen.

Es wurden 3 Messquerschnitte innerhalb jedes Vortriebsabschnittes beprobt. Im Messquerschnitt wurden jeweils 2 Bohrkern mit Durchmesser 100 mm und 2 Bohrkern mit Durchmesser 150 mm aus dem Kämpferbereich entnommen. Aus den entnommenen Bohrkernen wurden folgende Untersuchungen entsprechend Bild 6 durchgeführt:

- Prüfungen der Druckfestigkeit und Rohdichte an Bohrkernstücken aus dem bergseitig zugewandten Bereich,
- Prüfung der Gefügedichte über die Wassereindringtiefe an Bohrkernstücken aus dem bergseitig zugewandten Bereich (die Richtung der Druckaufbringung erfolgt von der Bergseite zur Luftseite),
- Prüfung der offenen Porosität an Bohrkernstücken aus dem luftseitig zugewandten Bereich, diese Probe wurde in drei Bohrkernscheiben geschnitten, und in drei Tiefenstufen beginnend von der Oberfläche untersucht,
- Prüfung der Gas-Permeabilität an Bohrkernstücken aus dem luftseitig zugewandten Bereich (1. und 3. Tiefenstufe) und
- Prüfung der Chloridioneneindringung an Bohrkernscheiben aus dem luftseitig zugewandten Bereich (1. Tiefenstufe).



*Bild 6: Anordnung der Prüfkörper aus den entnommenen Bohrkernen*

Aus den ermittelten Parametern erfolgte unter Bezugnahme auf den Stand der Technik ([4], [7], [8]) die Verifizierung der erforderlichen Dauerhaftigkeit und Spritzbetongüte.

##### 4.1 Rezeptur Spritzbeton

Für die Herstellung der Spritzbetonschale wurden die folgenden Betonsorten SpC 25/30(56)/II/J2/XC4/XF3 bzw. SpC 25/30(56)/III/J2/XC4/XF3 mit Größtkorn 8 bzw. 11 mm verwendet, wobei unabhängig von der Spritzbetonklasse die gleiche Rezeptur (Tabelle 1) eingesetzt wurde:

Tab. 1: Spritzbetonrezeptur

Zement: CEM I 52,5 N sb Eiberg	380 kg/m <sup>3</sup>
AHWZ: Fluasit	40 kg/m <sup>3</sup>
Wasser gesamt	208 kg/m <sup>3</sup>
Wasser anrechenbar	199 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung trocken	1706 kg/m <sup>3</sup>
Sand 0/4: Ahrenberg (60%)	1024 kg/m <sup>3</sup>
Kies 4/8: Ahrenberg (40%)	682 kg/m <sup>3</sup>
Luftgehalt	4 %
Rohdichte	2334 kg/m <sup>3</sup>
Zusatzmittel nach Bedarf	

## 4.2 Prüfkennwerte aus den Identitäts-Prüfungen

Die Prüfergebnisse sind in den Tabellen 2 bis 4 zusammengefasst.

Tab. 2: Frischbetonkennwerte

	Gesamt- Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Temp. [°C]	Ausbreit- maß [cm]	Luftgehalt [%]
Anzahl der Prüfungen	25	25	25	25	25
Mittelwert ±Standardabw.	204 ±8	2326 ±29	22 ±3	58 ±3	3,6 ±0,9
Max - Min	222 - 188	2400 - 2283	27 - 16	65 - 54	5,2 - 1,5

Tab. 3: Festbetonkennwerte

	7 Tage	28 Tage	56 Tage	Festigkeits- abfall	Eindringtiefe
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[mm]
Anzahl der Prüfergebnisse	16	16	10	5	7
Mittelwert ±Standardabw.	33 ±3,9	41,3 ±3,8	43,4 ±3,6	28 ±3	19,7 ±6
Max - Min -	40,9 - 24,7	49,5 - 35,8	50,2- 36,2	31 - 25	29 - 13

Tab. 4: Übereinstimmungskriterium für die Prüfergebnisse der Druckfestigkeit aus dem Tragwerk oder aus Spritzkisten

Erreichte charakteristische Druckfestigkeit	Mittelwertkriterium	Einzelwertkriterium
f <sub>ck</sub> nach 28d [N/mm <sup>2</sup> ]	35,7	39,8
f <sub>ck</sub> nach 56d [N/mm <sup>2</sup> ]	37,3	40,2

Im Zuge der Identitätsprüfungen wurden die Festigkeitsklasse SpC 25/30 nach 28 Tagen und SpC 30/37(56) im Alter von 56 Tagen positiv nachgewiesen.

#### 4.3 Ergebnisse der Bohrkernprüfung

Nachfolgend werden die Ergebnisse Druckfestigkeit, Wassereindringtiefe / Gefügedichte und Porosität / Permeabilität der Bohrkernprüfung erläutert:

##### Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten der entnommenen Bohrkern lagen im Mittel bei ca. 50 N/mm<sup>2</sup>. Einzelne deutliche Unterschreitungen gingen mit einer verringerten Rohdichte entsprechend Bild 7 einher, so dass eine verringerte Verdichtung, bzw. Spritzschatten als Ursache erkannt werden konnten.

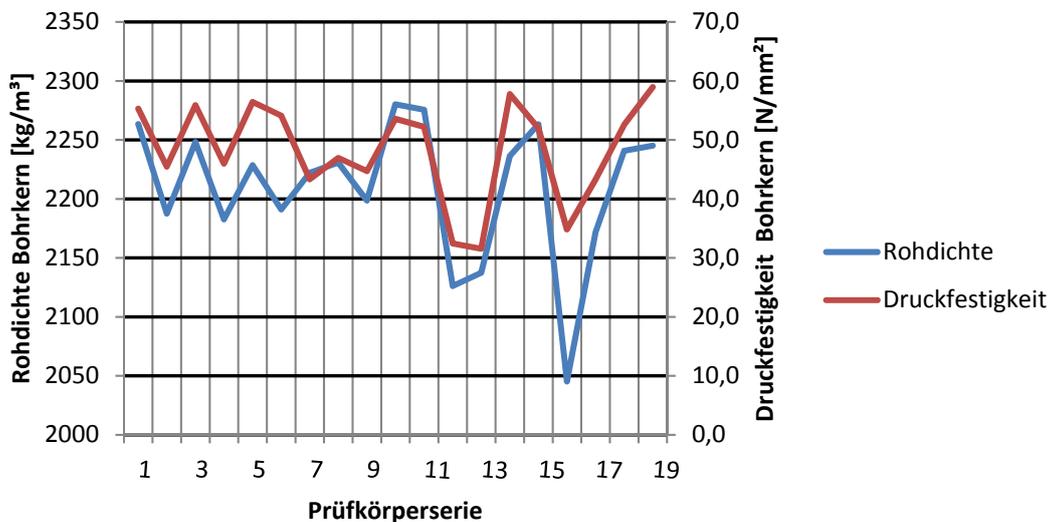


Bild 7: Rohdichten und zugehörige Druckfestigkeiten der Bohrkernproben aus dem Vortrieb Rettungsstollen

Tab. 5: Auswertung – Übereinstimmungskriterien der Prüfergebnisse der Druckfestigkeit aus dem Tragwerk

Rettungsstollen Abschnitt	Mittelwertkriterium $f_{ck} = f_{cm} - 1,48 \sigma$	erfüllt Festigkeits- klasse SpC	Einzelwert- kriterium $f_{ck} = f_{c,niedrigst} + 4$	erfüllt Festigkeits- klasse SpC
<b>Erster Abschnitt</b>				
Kein Streichresultat	45,4	35/45	41,5	35/45
<b>Zweiter Abschnitt</b>				
Ohne Berücksichtigung des Streichresultats	31,5	25/30	35,6	35/45
Mit Berücksichtigung des Streichresultats	42,1	35/45	47,3	40/50
<b>Dritter Abschnitt</b>				
Ohne Berücksichtigung des Streichresultats	37,5	30/37	38,8	30/37
Mit Berücksichtigung des Streichresultats	45,2	35/45	47,3	40/50

Dementsprechend wurde auch eine Wertung der Spritzbetonfestigkeit mit Eliminierung der Probekörper mit offensichtlich verringerter Verdichtung, beziehungsweise mit Fehlstellen, vorgenommen. Die geforderte Spritzbetonfestigkeitsklasse SpC25/30 wurde mit den ermittelten Werten entsprechend Tabelle 5 deutlich nachgewiesen.

### Wassereindringtiefe / Gefügedichte

Die an Bohrkernen ermittelten Wassereindringtiefen lagen entsprechend Bild 8 zwischen 15 mm und 31 mm, im Gesamtmittel bei 23 mm. Es konnte festgestellt werden, dass bergseitig bei mehreren Kernen Haarrisse von wenigen Zentimeter Länge in die Schale hineinreichen. Grund dafür könnten die höheren Verformungen des Gebirges kurz hinter der Ortsbrust sein, die zu einer Schädigung des Gefüges der zuerst aufgetragenen Spritzbetonlage des Vorspritzens führten. Die Bohrkern mit einer Höhe von ca. 15 cm wurden auch von der gegenüberliegenden Seite geprüft und es konnte so bestätigt werden, dass kein durchgängiger Riss bei den entnommenen Kernen vorliegt und die Wassereindringtiefen deutlich geringer sind.

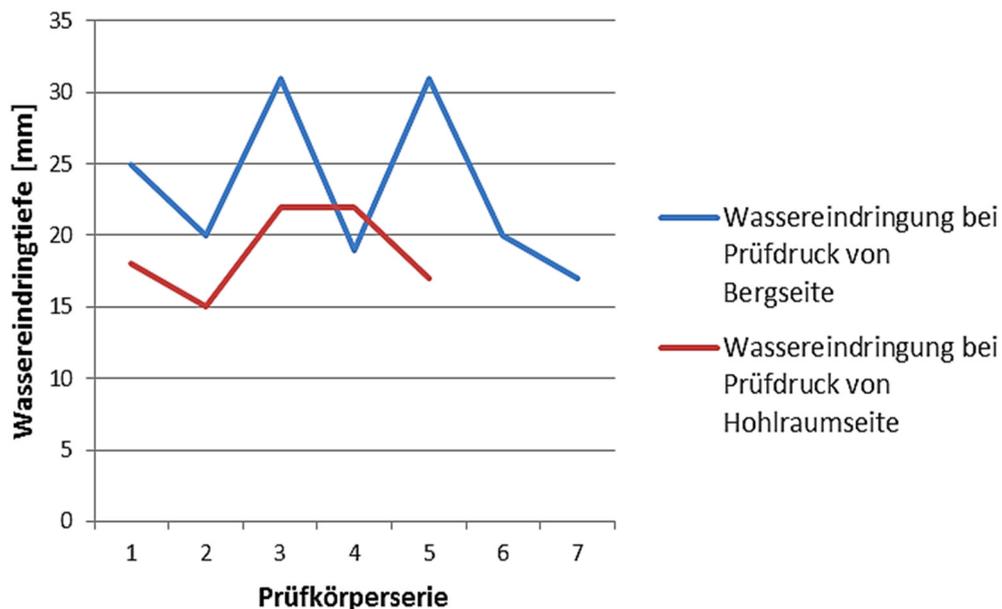


Bild 8: Wassereindringtiefe ermittelt an den Bohrkernen

### Porosität / Permeabilität

Die Ermittlung der Porositäten erfolgte an Bohrkernscheiben in Anlehnung an die ÖNORM EN 1936 [8]. Die offenen Porositäten lagen im Bereich um 20%, eine Probenserie wies eine höhere Porosität auf (um 25%).

Die Permeabilität der Spritzbetonproben wurde an ofengetrockneten Bohrkernscheiben ermittelt. Die Prüfungen wiesen Werte von  $6 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  bis  $6,5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$  auf. Lediglich eine Einzelprobe einer Probenserie zeigte eine höhere Porosität von  $1,3 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ . Gemäß [6] können aus den Permeabilitätswerten folgende Zuordnungen hinsichtlich eines Dauerhaftigkeits-Potentials für den Spritzbeton gemacht werden (Tabelle 6):

Tab. 6: Dauerhaftigkeits-Potential für den Spritzbeton

Probe	Dauerhaftigkeit	Permeabilität
1.1.I.2	hoch	3 bis 10 x10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup>
1.1.II.4	mittel	1 bis 3 x10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>
1.1.III.2	hoch	3 bis 10 x10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup>
1.2.I.5	gering - mittel	3 bis 10 x10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>
1.2.II.2	gering – mittel	3 bis 10 x10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>
1.2.III.3	sehr gering– gering	> 1x10 <sup>-15</sup> m <sup>2</sup>
1.3.I.4	hoch	3 bis 10 x10 <sup>-17</sup> m <sup>2</sup>
1.3.III.1	mittel	1 bis 3 x10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>

Untersuchungen gemäß [7] stellen einen Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe und Permeabilität dar. In den Untersuchungen wurde an Betonproben nach 1 jähriger Lagerung die Karbonatisierungstiefe unter Laborbedingungen bestimmt und der gemessenen Permeabilität gegenübergestellt. Aus den gemessenen Permeabilitäten und Karbonatisierungstiefen ergab sich über eine logarithmische Regressionsgerade folgender Zusammenhang:

$$\log(y) = k_1 \cdot x \cdot \log(x) + c \quad (1)$$

mit:

- y ... Karbonatisierungstiefe in mm
- x ... Permeabilität in m<sup>2</sup>
- k<sub>1</sub> ...Steigung = 0,57041
- c ...Konstante = 0,31971

Das erreichte Bestimmtheitsmaß (Korrelationsfaktor) ergibt sich in Bild 9 zu 0,979.

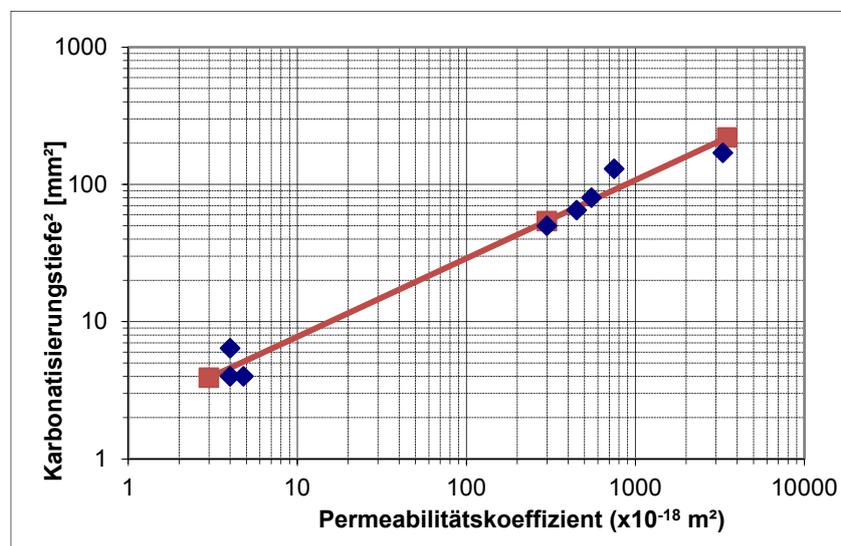


Bild 9: Zusammenhang Karbonatisierungstiefe und Permeabilitätskoeffizient gemäß [7]

Mit den im ofentrockenen Zustand gemessenen Permeabilitäten kann nach Gleichung (1) eine Karbonatisierungstiefe nach einjähriger Lagerung berechnet werden. Daraus kann wiederum der Koeffizient k<sub>2</sub> entsprechend dem Wurzel-Zeit-Gesetz (2) entsprechend der einjährigen Lagerung bestimmt werden (Tabelle 7).

Tab. 7: Karbonatisierungstiefe Koeffizienten  $k$ 

Probe	$k_2$ -Faktor (errechnet)
1.1.I.2a	5,21
1.1.I.2c	4,99
1.1.II.4a	6,83
1.1.II.4c	6,67
1.1.III.2a	5,22
1.1.III.2c	5,32
1.2.I.5a	9,09
1.2.I.5c	6,17
1.2.II.2a	8,66
1.2.II.2c	6,36
1.2.III.3a	9,28
1.2.III.3c	11,17
1.3.I.4a	4,89
1.3.I.4c	4,72
1.3.III.1a	6,41
1.3.III.1c	5,96

Mit dem rechnerisch ermittelten Koeffizienten  $k$  kann über (2) der zeitabhängige Karbonatisierungsfortschritt  $y$  zu beliebigen Zeitpunkten prognostiziert werden.

$$y = k_2 \cdot t^{0,5} \quad (2)$$

mit:

$y$  ... Karbonatisierungstiefe in mm  
 $k_2$  ... Faktor in  $\text{mm}/\text{t}^{0,5}$   
 $t$  ... Zeitdauer in Jahren

Im Bild 10 ist das Fortschreiten der Karbonatisierungsfrent mit dem errechneten minimalen und maximalen  $k$ -Faktor der äußeren Bohrkernscheibe für den Spritzbeton als untere und obere Schranke extrapoliert.

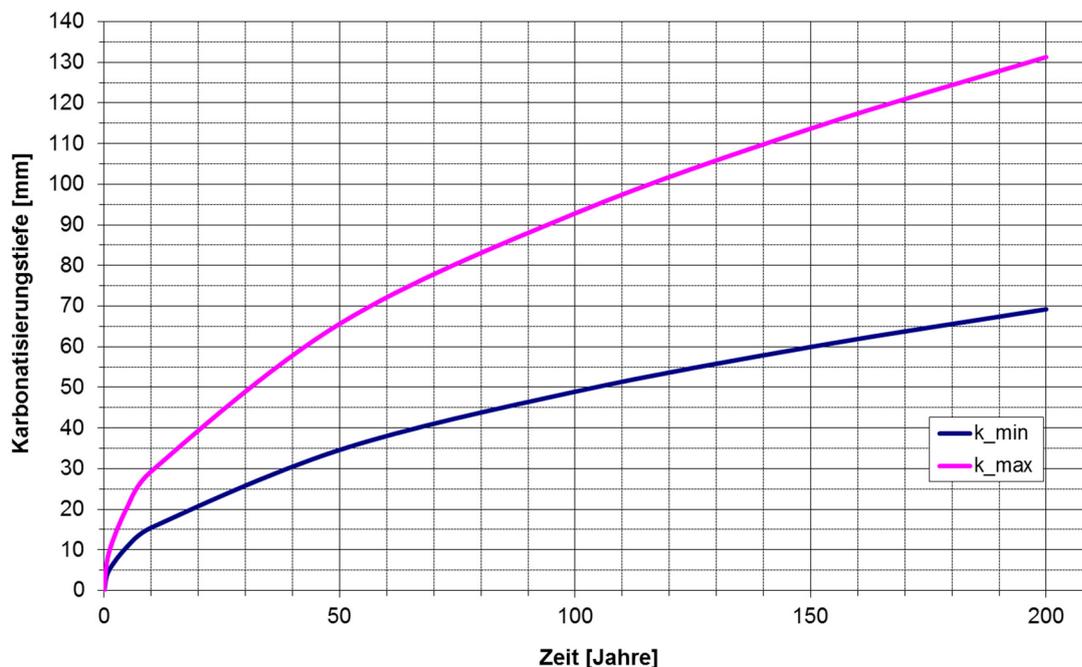


Bild 10: Entwicklung der Karbonatisierungstiefe bis 200 Jahre

#### 4.4 Resümee zu den Prüfergebnissen von Spritzbeton (Festigkeiten, Wassereindringtiefen, Permeabilität und Porosität)

Die ermittelten Festigkeiten übertrafen die Anforderung an die gestellte Spritzbetonklasse 25/30(56) deutlich. Die ermittelten Wassereindringtiefen als Basis für Rückschlüsse über die Gefügedichte zeigten bei den geprüften Bohrkernen erhöhte Gefügedichte mit Werten im Bereich der Klasse XC4. Lokal wurden Überschreitungen, bedingt durch Rissbildungen in Bereich der stärker verformten Vorspritzschicht (bergseitig an der Spritzbetonaußenseite) festgestellt. Die Risstiefen waren im Beobachtungsfall klein und konnten bei weiteren Versuchen in 15 cm Tiefe nicht nachgewiesen werden.

Die offene Porosität wurde mit etwa 20% ermittelt und lag somit im zu erwartenden Bereich für Spritzbeton. Die Permeabilität im ofentrockenen Zustand erreicht Werte im Bereich zwischen  $6 \times 10^{-17} \text{ m}^2$  bis  $6,5 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ . Entsprechend [6] können den Werten eine *hohe* bis *mittlere* Dauerhaftigkeit des Spritzbetons zugeordnet werden.

Die oben erläuterten Ergebnisse der Spritzbetonprüfung bestätigten, unter Berücksichtigung der zugrundegelegten Voraussetzungen, die Dauerhaftigkeit des permanenten Spritzbetonausbau. Diese Untersuchungen schlossen Tunnelabschnitte wie z.B. den Portalbereich, Kreuzungen und Über- bzw. Unterfahrten aufgrund des in diesen Bereich geplanten zweischaligen Ausbaus aus.

### 5. Experimentelle Ermittlung der Eigenschaften von Jungem Spritzbeton im Vortrieb zur Kalibrierung zeitabhängiger Materialmodelle

Für realitätsnahe numerische Berechnungen von Spritzbetonschalen tiefliegender Tunnel, Tragsicherheitsauslastungen von permanenten Spritzbetonschalen oder von sich gegenseitig beeinflussenden konventionellen Vortrieben der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise, ist die Ermittlung der Eigenschaften von Jungem Spritzbeton von wichtigem Interesse. In Kooperation mit der Universität Innsbruck (M. Neuner und G. Hofstetter) wurden die Eigenschaften von Jungem Spritzbeton E-Modul, Druckfestigkeit, Schwinden und Kriechen an sehr jungen Versuchskörpern (SpC 25/30 (56d) Rezeptur siehe Tabelle 8) aus dem Vortrieb des BBTs bestimmt. Anhand dieser Versuchsdaten wurden die Materialparameter für Spritzbetonmodelle für zeitabhängige numerische Berechnungen von Spritzbetontunnelschalen kalibriert.

Tab. 8: Spritzbetonrezeptur

Wasser	203	kg/m <sup>3</sup>
CEM I 52,5N	380	kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung 0/4	1031	kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung 4/8	694	kg/m <sup>3</sup>
Fluasit	40	kg/m <sup>3</sup>
Mapequick 043 FFG	7,5-8,5	%

#### 5.1 Experimentelle Ermittlung der Eigenschaften von Jungem Spritzbeton im Vortrieb

Um die Eigenschaften des Jungen Spritzbetons (jünger als 24 Stunden) nach seiner Herstellung zu bestimmen, müssen Versuchskörper hergestellt werden, die ein homogenes Betongefüge ohne Kiesnester aus dem Rückprall aufweisen, einfach ausgeschalt und ohne einen Zuschnitt direkt geprüft werden können. Erfolgreich konnten hierfür Versuchskörper mit einer zylinderförmigen Schalung  $\varnothing 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  (für Kriech- und Schwindversuche

Ø100 mm x 300 mm) entsprechend Bild 11 (links) hergestellt werden. Für ein einfaches Ausschalen ist die Schalung geschlitzt und wird durch eine steife Metallschelle oben und eine kreisrunde Bohrung unten in der Schalttafel zueinander fixiert.

Entscheidend für die Herstellung ist eine senkrechte Positionierung der Schalung und eine Spritzrichtung vertikal, entlang der Zylinderachse der Schalung, von einer Höhe von ca. 3m. Ein schräges Anspritzen muss hierbei vermieden werden. Bei der visuellen Kontrolle der Versuchskörper vor der Versuchsdurchführung zeigten 19 Versuchskörper von den insgesamt so gespritzten 26 Versuchskörpern eine gleichmäßige Oberfläche entsprechend Bild 11 (rechts). Diese sieben Versuchskörper mit visuell erkennbaren Unregelmäßigkeiten wurden vor den Versuchen aussortiert.

Für die Versuche an Spritzbeton im Alter von mehr als 24 h wurden sowohl zylindrisch gespritzte Versuchskörper als auch gebohrte Versuchskörpern (Ø100 mm) aus Spritzbetonkisten untersucht. Vergleichende Untersuchungen an Versuchskörpern beider Herstellungsmethoden zeigten keine signifikanten Abweichungen der ermittelten Parameter.



*Bild 11: Schalung zur Herstellung von jungen Spritzbetonversuchskörpern im Vortrieb (links) und ausgeschalteter Spritzbetonversuchskörper (rechts) [Quelle M. Neuner]*

Die Erfahrungen dieser drei Versuchskörperserien zeigten, dass für die Herstellung der Spritzbetonversuchskörper die Spritzrichtung besonders wichtig ist. Bei Einhaltung einer senkrechten Spritzrichtung ohne schräges Anspritzen ergaben sich ein akzeptabler Ausschuss der für weitere Versuche auch noch Reduktionspotential hat. Die geringe Streuung der ermittelten Spritzbetoneigenschaften bestätigte die Versuchskörperherstellung. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Streuung bereits den Einfluss der Betonherstellung, Betonlieferung und Variation der Beschleunigerdosierung (7,5 - 8,5%) berücksichtigt, da die Versuchskörper mit der gleichen Spritzbetonrezeptur zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten (Juni, Oktober und Dezember) im Vortrieb erstellt wurden.

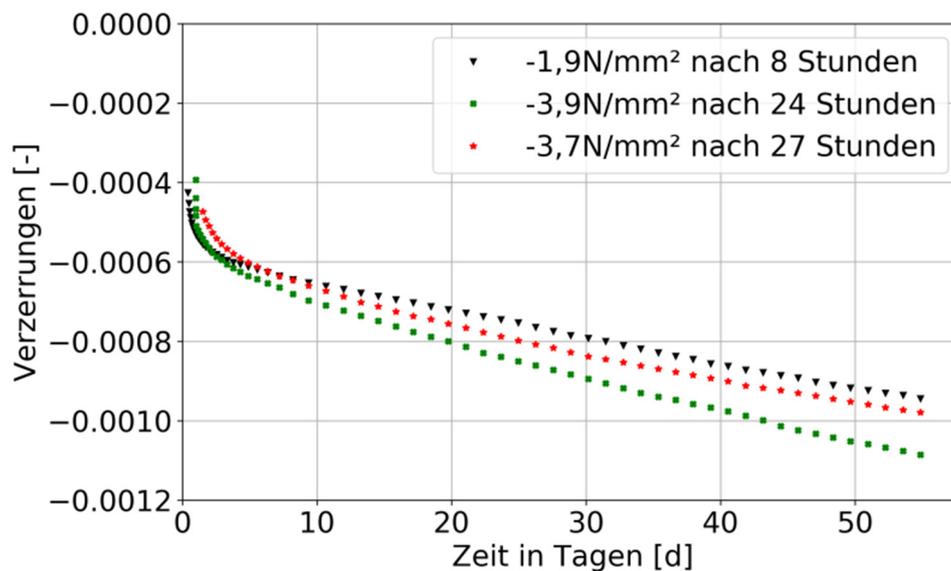
Die Unterseite der Versuchskörper war senkrecht geschalt und für einen Einbau in den Versuchsstand ohne Nachbehandlung geeignet. Die raue gespritzte Oberseite des Versuchskörpers wurde mit einer Ausgleichsschicht aus schnellhärtendem Epoxidharz eben hergestellt.



*Bild 12: Kriechversuch am 8h, 24h und 27h alten Spritzbeton, versiegelt mit Aluminiumfolie und Bitumen gegen Austrocknung (links) und Druckfestigkeit (rechts) [Quelle M. Neuner]*

Das von der Universität Innsbruck durchgeführte Versuchsprogramm umfasste die Ermittlung von Kriechen und Schwinden bei 8 h, 24 h und 27 h alten Versuchskörpern in Bild 12 links mit den Kriechverzerrungen ohne den Einfluss von Hydratations- und Trocknungsschwinden in Bild 13 und die Bestimmung des E-Moduls (1 d, 2 d, 3 d, 7 d, 28 d) und der Druckfestigkeit (6 h, 8 h, 16 h, 1 d, 2 d, 3 d, 7 d, 28 d) in Bild 12 rechts mit den Ergebnissen in Bild 14.

Hierbei wurden alle Versuchskörper versiegelt in der Klimakammer (20°C) bis zum Versuchsbeginn gelagert. Die Kriech- und Schwindversuche wurden 56 Tage lang in der Klimakammer mit versiegelten Versuchskörpern durchgeführt.



*Bild 13: Kriechverzerrungen ohne Schwinden für unterschiedliche Belastungen und Belastungszeitpunkte [9]*

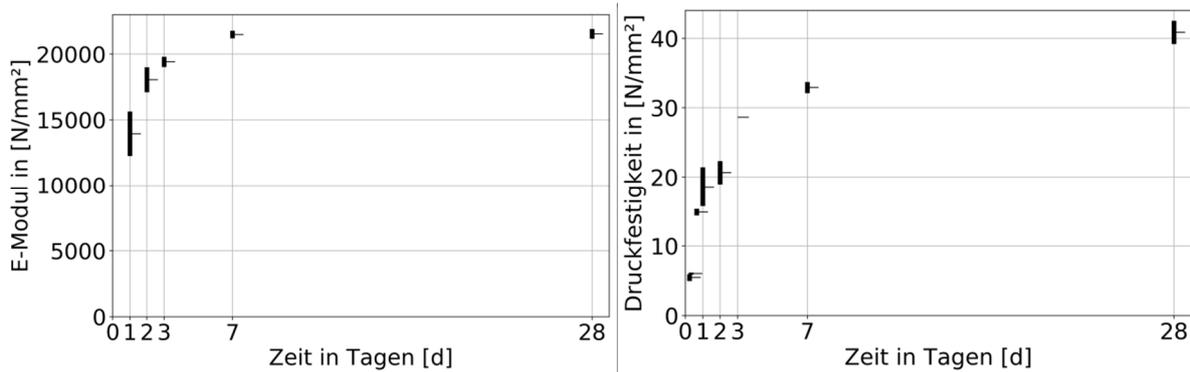


Bild 14: Entwicklung des E-Moduls des Spritzbetons (links) und Entwicklung der Druckfestigkeit (rechts) jeweils Bereich der Standardabweichung mit Mittelwert (Horizontaler Strich) [9]

## 5.2 Zeitabhängige Materialmodelle für Spritzbeton

Bei der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode ist das zeitabhängige Verhalten, besonders des jungen Spritzbetons, von großer Wichtigkeit. Die Entwicklung der Materialeigenschaften wie Steifigkeit, Druck- und Zugfestigkeit und besonders das Schwind- und Kriechverhalten ermöglichen in den meisten einzelnen, unbeeinflussten Vortrieben einen schadlosen Ausbau. Dieses komplexe Spritzbetonverhalten wird bei der Planung anhand eines vom Ingenieur geschätzten, weichen Materialverhaltens (z.B. linear-elastisches Materialverhalten mit Berücksichtigung des hypothetischen E-Modul entsprechend [10]) in den Berechnungen berücksichtigt. Für Berechnungen von Spritzbetonschalen tiefliegender Tunnel, Tragsicherheitsauslastungen von permanenten Spritzbetonschalen oder Spritzbetonschalen von sich gegenseitig beeinflussenden konventionellen Vortrieben ergeben sich Einflüsse, die mit diesem vereinfachten Berechnungsverfahren nicht abgeschätzt werden können. Hierfür wurde von der Universität Innsbruck ein Spritzbetonmaterialmodell entwickelt [11] und die Einflüsse verschiedener Berechnungsansätze im Ausbau untersucht [12].

## 6. Zusammenfassung

Die erläuterten Beispiele dieses Beitrags permanente Spritzbetonaußenschalen, Auswertung der Tunnelscan – Volldokumentation, Verifikation der Spritzbetonqualität im permanenten Ausbau und experimentelle Ermittlung von Eigenschaften Jungen Spritzbetons zeigen exemplarisch die sehr vielfältigen und umfangreichen Anforderungen an den Spritzbeton beim BBT auf. Diese Beispiele haben gemeinsam ein Ziel einer sicheren, effizienten und ökologischen Spritzbetonsicherung im Tunnelbau (siehe [13]). Dieses Ziel gilt in den vielen Einsatzgebieten grundsätzlich bereits als erreicht, dennoch werden mit weiteren Aspekten wie z.B. einer erhöhten Dauerhaftigkeit von 200 Jahren, permanenten Spritzbetonaußenschalen und hohen Spannungszuständen bei tiefliegenden Tunneln diese Ziele höher gesteckt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen hier das Potential des Werkstoffes Spritzbeton auf.

## 7. Literatur

- [1] Bergmeister, K.: Brenner Basistunnel – lebenszyklusorientierte Planung und innovative Bautechnik. Swisstunnel Congress, 2015.
- [2] Bergmeister, K.: Lebenszyklusbasierte Systemoptimierung beim Brenner Basistunnels. 3. Internationaler BBB-Kongress 2015, RWTH Aachen, 2015.

- [3] Schädlich, B.; Schweiger, H.F.; Marcher, T.; Sauer, E.:  
Application of a novel constitutive shotcrete model for tunneling. Eurock 2014, Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses, Taylor & Francis Group, p. 799-804, 2014.
- [4] ÖVBB:  
Richtlinie Spritzbeton, Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik, 2009.
- [5] Voit, K.; Amvrazis, S.; Cordes, T.; Bergmeister, K.:  
Drill and blast excavation forecasting using 3D laser scanning. Geomechanik und Tunnelbau. 10. 298-316. 10.1002/geot.201600057, 2017.
- [6] Baroghel-Bouny V.:  
Durability Indicators: relevant tools for an improved assessment for RC durability. Toutlemonde, F. (Ed.), Proc. the 5<sup>th</sup> International Conference on Concrete under Severe Conditions, Environment and Loading. (2007), Paris, (LCPC), pp. 67-84.
- [7] RILEM TC 116-PCD:  
Concrete durability - An approach towards performance testing. Materials and Structures, Vol. 32, April 1999, pp 163-173.
- [8] ÖNORM EN 1936:  
Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität, ON Österreichisches Normungsinstitut 2007.
- [9] Neuner, M.; Cordes T.; Drexel M.; Hofstetter, G.:  
Time-Dependent Material Properties of Shotcrete: Experimental and Numerical Study. Materials 2017, 10(9), 1067, doi:10.3390/ma10091067, Basel, Switzerland, 2017.
- [10] Pöttler, R.:  
Time-dependent rock-shotcrete interaction - A numerical shortcut. Comput. Geotech. 9, 149–169, 1990.
- [11] Neuner, M.; Gamnitzer, P.; Hofstetter, G.:  
An Extended Damage Plasticity Model for Shotcrete: Formulation and Comparison with other Shotcrete Models. Materials 2017, 10(1), 82; doi:10.3390/ma10010082, Basel, Switzerland, 2017.
- [12] Neuner, M.; Schreter, M.; Unteregger, D.; Hofstetter, G.:  
Influence of the Constitutive Model for Shotcrete on the Predicted Structural Behavior of the Shotcrete Shell of a Deep Tunnel. Materials 2017, 10(6), 577; doi:10.3390/ma10060577, Basel, Switzerland, 2017.
- [13] Murr, R., Hofmann, M., Cordes, T., Bergmeister, K.:  
Spritzbeton mit aufbereitetem Bündner Schiefer im Bauprojekt Brenner Basistunnel, In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton – Tagung 2018, Alpbach, 11.+12.1.2018, Eigenverlag, 2018.

## Zu den Autoren

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dr. Konrad Bergmeister

Neun Jahre war er als technischer Direktor und Chefingenieur der Brennerautobahn. Seit 20 Jahren Professor für konstruktiven Ingenieurbau an der Universität für Bodenkultur Wien. Seit 2010 ist er Präsident der Freien Universität Bozen. Ordentliches Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Berlin, sowie der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina – Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle. Vorstand Brenner Basistunnel BBT SE  
*Konrad.Bergmeister@bbt-se.com*

Dipl.-Ing. Dr. techn. Tobias Cordes

Nach dem konstruktiven Bauingenieurstudium an der TU Darmstadt arbeitet er als Projektingenieur bei der ILF Innsbruck. Im Anschluss verfasste er seine Dissertation an der Universität Innsbruck über das mechanische und bruchmechanische Verhalten von Grenzsichten zwischen zementgebundenen Materialien und schloss dies mit Auszeichnung 2013 ab. Seit knapp 4 Jahren ist er beim Brenner Basistunnel BBT SE für Studien, konstruktive Planung und Ausführung zuständig.  
*Tobias.Cordes@bbt-se.com*

Dipl.-Ing. Dr. techn. Matthias Hofmann

Nach dem Studium und dem Verfassen der Dissertation an der Universität Innsbruck arbeitete er ca. 4 Jahre bei der Beton- und Monierbau im Technischen Büro in Innsbruck. U.a. führte er dort statische Berechnungen für das Crossrail Projekt in London durch. Seit knapp 4 Jahren arbeitet er bei der Brenner Basistunnel BBT SE in der Planungsabteilung. Neben der Bearbeitung von Ausschreibungs- und Ausführungsplanung ist er für die Gebäudebeweissicherung, den Aufbau eines BIM-Systems und als Leiter der Abteilung Ingenieurservice tätig.

*Matthias.Hofmann@bbt-se.com*

Dipl.-Ing. Roland Murr

Nach dem Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck arbeitet er 2 Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe und Baustoffprüfung der Universität Innsbruck, bevor er als Projektingenieur, Laborleiter, später Gesamtleiter der staatlich akkreditierten Materialversuchsanstalt Strass 15 Jahre tätig war. In dieser Zeit betreute er etliche Infrastrukturprojekte aus dem Bereich Kraftwerksbau, Infrastruktur- und Tunnelbau prüftechnisch und beratend. Seit 2 Jahren ist er beim Brenner Basistunnel für beton- und materialtechnische Fragestellungen im Bereich der Qualitätsüberwachung und Planung zuständig.

*Roland.Murr@bbt-se.com*