

---

# HERAUSFORDERUNG DER SPRITZBETONANWENDUNG BEI ÜBERDRUCKBAUSTELLEN AM BEISPIEL DES DRUCKLUFT-VORTRIEBES „TUNNEL KARL-FRIEDRICH-STRASSE“ IN KARLSRUHE

---

## CHALLENGES OF WET MIX SHOTCRETE APPLICATION IN AN HYPERBARIC ATMOSPHERE, USING THE EXAMPLE OF THE TUNNEL KARL-FRIEDRICH-STRASSE IN KARLSRUHE

Thomas **Wechner**, BeMo-Tunnelling GmbH, Innsbruck, Österreich

Der Tunnelvortrieb unter der Karl-Friedrich-Straße muss, um das anstehende Grundwasser zu verdrängen, in einer Überdruckatmosphäre ausgeführt werden. Der ständig herrschende Überdruck im Vortriebsbereich stellt eine besondere Herausforderung an den Spritzbeton dar. Die erhöhten Anforderungen betreffen die Pumpbarkeit, die Luft- und Wasserdichtheit, sowie die hervorragende Verarbeitbarkeit. Um den Spritzbeton auf trockene, kohäsionslose Sande und Kiese der Ortsbrust auftragen zu können, wurde ein spezieller Vorspritzmörtel entwickelt. Dies machte ein schnelles und flächiges Anhaften des Betongemisches an das anstehende Gebirge möglich. Die notwendigen und gewünschten Spritzbetoneigenschaften erforderten die Beimengung von Kunststoffasern, Microsilica sowie eine Beschränkung des Größtkorns. Darüber hinaus mussten von Düsenführern genau definierte Spritzregeln bzw. vorgeschriebene Abläufe eingehalten werden. Die Anwendung und Entwicklung von Spritzbetone für Überdruckvortriebe ist einer der Schwerpunkte dieses Vortrages. Zudem wurden umfangreiche Untersuchungen zur Luftdichtheit der Spritzbetonschale durchgeführt. Der Einsatz effektiver Maßnahmen zur Abdichtung der Spritzbetonaußenschale hinsichtlich Druckluftverlusten wurde erprobt und großflächig umgesetzt.

*The Tunnel Karl Friedrich Strasse is being executed by the means of the New Austrian Tunnelling Method in a hyperbaric atmosphere. The overpressure atmosphere creates special challenges for the wet mix shotcrete application such as pumpability, air- and watertightness as well as an excellent workability. To be able to apply shotcrete onto dry and noncohesive soil a novel shotcrete-mix was designed. This new mix guarantees a quick and plan sealing of the open face with an initial lining. By adding aggregates such as microsilica, synthetic fibers and optimizing the size of the grain, those new shotcrete properties could be achieved. In addition, special application procedures had been developed for the nozzleman. Furthermore, methods to seal the shotcrete lining had been tested and applied in great extent. The development and application of a new shotcrete mix, as well as sealing methods, will be the main content of this paper.*

### 1. Einleitung

Der Tunnel Karl-Friedrich-Straße wurde im Jahr 2016 bis 2017 im konventionellen Tunnelbauverfahren aufgeföhren. Da sich der gesamte Tunnelquerschnitt unterhalb des natürlichen Grundwasserspiegels befindet musste der Vortrieb in einer Überdruckatmosphäre ausgeführt werden. Dieses Verfahren war, aufgrund der vorherrschenden Randbedingungen, die zur Ausführung ausgeschriebene Baumethode. Die Anwendung von Nassspritzbeton in einer Überdruckatmosphäre stellt besondere Anforderungen an den Spritzbeton und deren Verarbeitung dar.

## 2. Geologische Verhältnisse zur Spritzbetonanwendung im Tunnel Karl-Friedrich-Straße

Der Baugrund in Karlsruhe ist in den oberen Schichten geprägt von unterschiedlichsten Auffüllungen. Der gewachsene Boden besteht aus teils mächtigen fluviatilen Kies-, Sand- und Feinsandablagerungen, welche mitteldicht bis dicht gelagert sind. Größere Blöcke sowie Tonschichten sind die absolute Ausnahme. Der Grundwasserspiegel bewegt sich im Bereich des Tunnel Karl-Friedrich-Straße zwischen 3,5 m bis 7,4 m unter Gelände. Die horizontale Wasserdurchlässigkeit der anstehenden Geologie wird mit  $k_f = 3 \cdot 10^{-3}$  m/sec beschrieben. Um die oben beschriebenen Bodeneigenschaften positiv zu modifizieren, wurde im Vorfeld zu den Vortriebsarbeiten eine „Zwei-Phasen-Niederdruckinjektion“ ausgeführt.

In der ersten Phase wurde der gesamte Tunnelquerschnitt inklusive eines zwei Meter dicken Ringes herum, mit einer Suspension, bestehend aus dem Bindemittel DiWa-mix ® zur Stabilisierung der Ortsbrust, also auch Verbesserung der Bodenkennwerte, vergütet. Um die Durchlässigkeit des Bodengefüges zu verringern wurde in einer zweiten Phase eine Weichgellösung in einem 2 Meter starken Ring um den Tunnelquerschnitt injiziert. Hierdurch konnte ein mittlerer  $k_f$ -Wert von  $10^{-7}$  m/sec erreicht werden.

## 3. Herausforderungen Spritzbetonanwendung im Überdruckbereich

Im Vergleich zu einem atmosphärischen konventionellen Tunnelvortrieb hat der Spritzbeton unter Druckluftbedingungen eine Vielzahl von zusätzlichen Anforderungen zu meistern.

Der Überdruck in der Arbeitskammer, sprich im Vortriebsbereich, betrug abhängig vom aufzufahrenden Querschnitt zwischen 0,85 barÜ und 1,20 barÜ. Analog zu den unterschiedlichen Arbeitsdrücken und Tunnellängen entwickelte sich der Druckluftverbrauch.

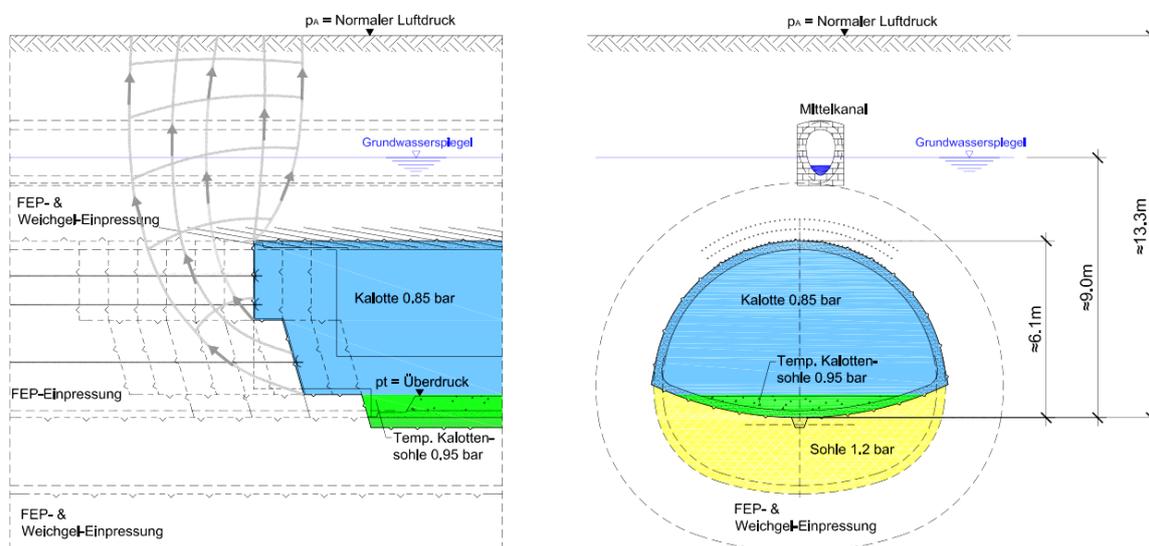


Bild 1: Druckluftausbildung im Überdruckbereich TKF (Bild: BeMo-Tunnelling) [1]

Der Luftüberdruck erzeugt eine Strömungsumkehr im Boden, indem die Druckluft entgegen der natürlichen Zustromrichtung des Grundwassers zur Ortsbrust den Boden durchströmt und somit die Wasserpartikel vom Vortrieb weg befördert. Durch diesen Effekt konnten die Vortriebsarbeiten unter trockenen Arbeitsbedingungen ausgeübt werden. Es bildet sich infolge dessen eine Strömungszwiebel.

Die folgenden Anforderungen wurden in diesem Kontext an die Spritzbetonanwendung gestellt:

- a) **Hohe Frühfestigkeit:**  
Bei einem Druckluftvortrieb ist die Gefahr eines Ausblägers stets zu berücksichtigen. Zur Verringerung dieser Gefahr ist es unerlässlich, dass der Spritzbeton ausnahmslos funktioniert und sehr hohe Frühfestigkeit entwickeln kann.
- b) **Dichtigkeit gegen Druckluftverluste:**  
Eine besondere Anforderung war es die Druckluftverluste über die Spritzbetonaußenschale technisch weitgehendst zu minimieren. Hierzu ist es wichtig, dass der Spritzbeton so luftundurchlässig wie möglich ausgeführt wird. Ein hoher Penetrationswiderstand ist hier maßgeblich. Zu diesem Zweck wurde eine umfangreiche Versuchsreihe durchgeführt, welche zeigte, dass der Spritzbeton nahezu luftdicht hergestellt werden kann, jedoch die systembedingten Arbeitsfugen, als auch die eingespritzten Gitterbögen als Schwachpunkt zu identifizieren sind.
- c) **Pumpbarkeit:**  
Aufgrund der unterschiedlichen Druckverhältnisse, als auch aus logistischen Gründen, musste die Spritzbetonversorgung über relativ lange Pumpleitungen bewerkstelligt werden. Dieser Umstand, im Vergleich zur Direktversorgung über Fahrmischer, beherbergt einige Zusatzanforderungen für den Spritzbeton.
- d) **Klebrigkeit:**  
Die Druckluft hat die kontraproduktive Eigenschaft, dass sie durch das stetige Abströmen der Luft durch die Ortsbrust den anstehenden Boden austrocknet. Dies hat wiederum zur Folge, dass die Sande und Kiese, welche sich im ungestörten Zustand als sehr kohäsiv und nass darstellen, nun aber in eine kohäsionslos und trockene Beschaffenheit übergehen. Dieser Effekt ist mit einer Sandburg am Strand zu vergleichen, welche nach mehrstündiger Sonneneinstrahlung und Austrocknung sukzessive zusammenrieselt. Die Herausforderung für die Spritzbetonanwendung ist hierbei das Aufbringen des Spritzgefüges auf dem trockenen Untergrund, welcher zudem noch höchst sensibel auf mechanische Beanspruchungen reagiert. Des Weiteren mussten Spritzbetonablösungen kategorisch ausgeschlossen werden.
- e) **Verarbeitungszeit**  
Bedingt durch die langen Anfahrtswege und die Vortriebsabläufe musste der Beton auf Verarbeitungszeiten von bis zu 10 Stunden ausgelegt werden.

#### **4. Spritzbetonmörtel und modifizierter Spritzbeton**

##### **4.1 Spritzbetonmörtel (Vorspritzmörtel)**

Ein spezieller Spritzbetonmörtel wurde eigens zum Vorspritzen der Ortsbrust und Laibungen im Vortriebsbereich entwickelt. Damit ein zielführendes Auftragen des Spritzbetons erst möglich wurde, musste die Ortsbrust in bis zu 7 Teilflächen unterteilt, sowie systematisch Bewehrungsmatten, welche mit Ortsbrustanker rückgesichert wurden, eingebaut werden. Durch diese Maßnahmen konnten, einerseits die Größe der unversiegelten Flächen auf unter 10 m<sup>2</sup> reduziert werden und andererseits die Menge an Anhaftungspunkte für den Spritzbeton maximiert werden. Bedarfsweise wurde unter anderem Hasengitter verwendet, um die Anhaftflächen ein weiteres Mal zu erhöhen.

Für diesen Vorspritzvorgang wurde eine spezielle Spritzbetonmischung entwickelt.

SPC C30/37 XC4 GK2 F5 FAB

Das Größtkorn wurde auf 2 mm begrenzt, um die mechanische Beanspruchung für den Baugrund zu minimieren. Erfahrungen zeigten, dass eine mächtigere Korngröße im Spritzbeton den Baugrund beim Aufbringen des Spritzbetons sprichwörtlich zerschießt und konsequent schwächt, beziehungsweise abträgt. Durch die Beschränkung des Größtkorns erhöhte sich auch entsprechend der Wasseranspruch des Betongemisches, was wiederum zur Folge hatte, dass der Zementanteil auf  $650 \text{ kg/m}^3$  erhöht werden musste. Des Weiteren wurden  $15 \text{ kg/m}^3$  Microsilica dem Gemisch beigemischt. So konnte die Klebrigkeit und Haftungsneigung des Spritzbetons signifikant erhöht werden. Daraus resultierte eine reduzierte Beschleunigerzugabe die sich positiv auf die „Verschmierbarkeit“ des Spritzbetons auswirkte.

Um eine schnelle flächige Vernetzung des Vorspritzmörtels auf der Ortsbrust zu erreichen, wurde der Spritzbeton mit Kunststofffasern versetzt. Somit war es möglich den inneren Zusammenhalt, sprich die Spaltzugfestigkeit zu erhöhen.

Tab. 1: Zusammensetzung Spritzmörtel Vortrieb

NfGK 0/2	$1248 \text{ kg/m}^3$
Schwenk CEM I 52,2 R bs	$650 \text{ kg/m}^3$
Frischwasser	$240 \text{ kg/m}^3$
BT3 Premtard VZLong Time	$2,60 \text{ kg/m}^3$
Sika Concirix ES	$2,00 \text{ kg/m}^3$
BT3 Premment L120SP	$6,50 \text{ kg/m}^3$
BT3 Microsilica (SF) Staub	$15,0 \text{ kg/m}^3$

Bezüglich der Spritzbetonmischung für den Drucklufttunnel Karl-Friedrich-Straße muss grundsätzlich folgendes hervorgehoben werden: Aufgrund der langen sowie unsicheren Anfahrtszeiten der Fahrmischer zur Baustelle (circa 1 Stunde bei Normalverkehr und bis zu 3 Stunden während der Rushhour), als auch einer sehr langen Herstellzeit eines einzigen Abschlages, sowie der ständigen Spritzbereitschaft, aufgrund des erarbeiteten Havariekonzeptes, musste der Spritzbeton bis zu 10 Stunden verzögert werden.

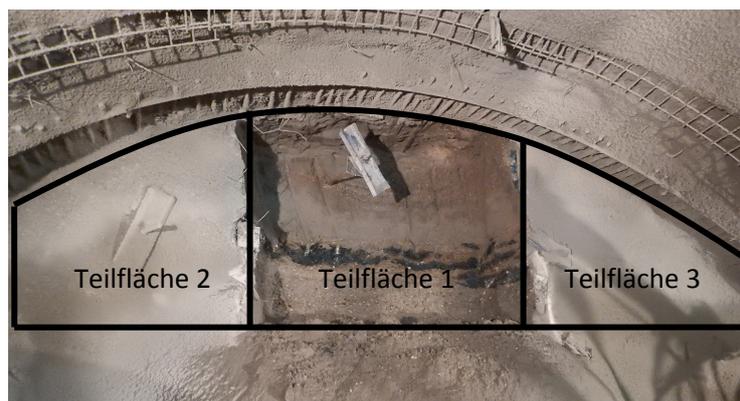


Bild 2: Öffnen der Ortsbrust in Teilflächen (Bild: BeMo-Tunneling)

Diese lange Verzögerungszeit erforderte bei extremen Wetterbedingungen Maßnahmen um den Beton in einem brauchbaren Temperaturfenster zu halten. So wurde bei warmen Temperaturen die Fahrmischertrommel beschattet und mit kaltem Wasser berieselt, im Winter warteten die Fahrmischer im beheizten Umfeld. Die Festigkeitsentwicklung musste genauestens auf die lange Verzögerungszeit abgestimmt werden. In den Vorversuchen hat sich ein CEM I 52,5 R als optimal für diese Randbedingungen herauskristallisiert.

#### 4.2 Verarbeitungsrichtlinie zur Anwendung des Spritzmörtels

Damit es gelang, den Spritzmörtel effektiv und sicher auf den anstehenden Baugrund aufzubringen, wurde eine detaillierte Verarbeitungsrichtlinie entwickelt.

Folgender Ablauf musste vom Düsenführer zwingend eingehalten werden:

- a) Anfeuchten der offenen Teilfläche mit BE-Mittel
- b) Behutsames Aufspritzen des Vorspritzmörtels mit folgenden Spritzeinstellungen:
  - Maximaler Spritzbetondurchfluss 6 m<sup>3</sup>/h, geringe Förderleistung
  - Maximaler Spritzdruck 4,5 bar
- c) Abwarten der Befestigung von Bewehrungsmatten, sowie gegebenenfalls Hasengitter durch die Vortriebsmannschaft
- d) Aufbringen des Spritzmörtels in dünnen Lagen, maximal 3 cm
- e) Aufbau von unten nach oben, bzw. von den Laibungsrändern
- f) Mindestens 5 Minuten Wartezeit zwischen den einzelnen Spritzvorgängen

Mit den o. g. Maßnahmen ist es gelungen, die Ortsbrust inklusive der Tunnellaibungen sicher und effizient zu versiegeln und somit die Gefahr von Nachbrüchen bzw. Ausbläser zu beherrschen. In dieser Abfolge wurde die gesamte Ortsbrust, Schritt für Schritt hergestellt, bis die gesamte Ortsbrust vollflächig versiegelt war.

#### 4.3 Modifizierte Spritzbetonrezeptur (Spritzbetonaußenschale)

Bei der Spritzbetonaußenschale lag der Fokus im speziellen auf der Herstellung einer möglichst wasserdichten, als auch luftundurchlässigen Spritzbetonaußenschale. Zudem musste rasch eine hohe Frühfestigkeit erreicht werden um frühzeitig eine entsprechende Sicherheit gegen Ausbläser bzw. Wassereinträge erreichen zu können.

Bezüglich der Frühfestigkeit war die Anforderung, die obere Hälfte der J2- beziehungsweise der J3-Kurve konsequent zu erreichen. Die untenstehende Auswertung des „jungen Spritzbetons“ des Tunnel Karl-Friedrich-Straße zeigt, dass dieses Ziel erreicht werden konnte.

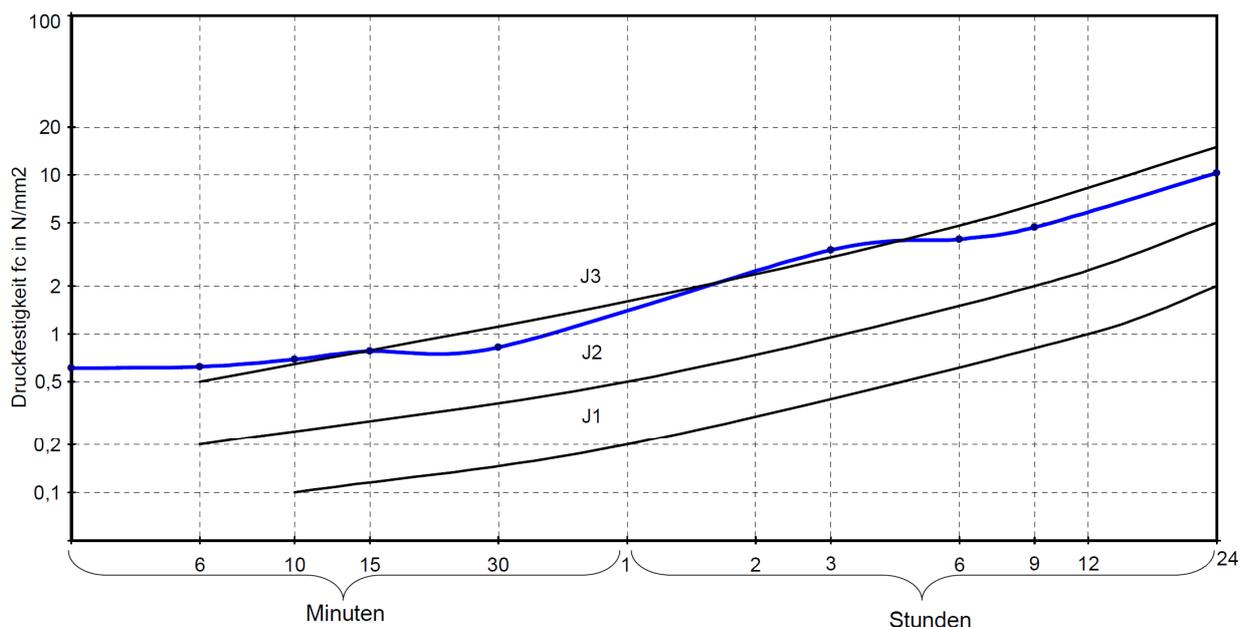


Bild 3: Frühfestigkeitsentwicklung „junger Spritzbeton“ (Bild: Schwenk-Technologiezentrum)

Die Spritzbetonrezeptur für die Tunnelaußenschale wurde entsprechend den vorherrschenden Gegebenheiten im Laufe der Vortriebsarbeiten angepasst und modifiziert. Somit wurde ab TM 161,85 begonnen Microsilica beizumengen um eine erhöhte Luftdichtheit zu erreichen.

Hierzu wurde folgende Spritzbetonmischung verwendet:

SPC C30/37 XC3 GK8 F5

Folgende Mischungsberechnungen fanden ihre Anwendung:

Tab. 2: Zusammensetzung Spritzbeton Außenschale

	SpB. ohne Microsilica	SpB. mit Microsilica
NfGK 0/2	810 kg/m <sup>3</sup>	803 kg/m <sup>3</sup>
NfGK 2/8	871 kg/m <sup>3</sup>	864 kg/m <sup>3</sup>
Schwenk CEM I 52,2 R bs	380 kg/m <sup>3</sup>	380 kg/m <sup>3</sup>
Powerment (Flugasche)	40 kg/m <sup>3</sup>	40 kg/m <sup>3</sup>
Frischwasser	184 kg/m <sup>3</sup>	188 kg/m <sup>3</sup>
BT3 Premtard VZLong Time	3,8 kg/m <sup>3</sup>	1,9 kg/m <sup>3</sup>
BT3 Premment L120SP	3,8 kg/m <sup>3</sup>	3,42 kg/m <sup>3</sup>
BT3 Microsilica (SF) Staub	---	15 kg/m <sup>3</sup>

Durch die Zugabe von 15 kg/m<sup>3</sup> Microsilica, versuchte man einen sehr dichten Spritzbeton herzustellen. In einer umfangreichen Spritzbetontestserie wurde die Luftdurchlässigkeit des Spritzbetons anhand mehrerer Testreihen eruiert. (siehe Kapitel 5).

Gegenüberstellung Festigkeitsentwicklung der beiden Spritzbetone:

Tab. 3: Festigkeitsentwicklung Spritzbetonrezepte Außenschale

	SpB. ohne Microsilica	SpB. mit Microsilica
3 Minuten	0,14 N/mm <sup>2</sup>	0,13 N/mm <sup>2</sup>
6 Minuten	0,27 N/mm <sup>2</sup>	0,29 N/mm <sup>2</sup>
10 Minuten	0,39 N/mm <sup>2</sup>	0,41 N/mm <sup>2</sup>
15 Minuten	0,64 N/mm <sup>2</sup>	0,60 N/mm <sup>2</sup>
30 Minuten	0,72 N/mm <sup>2</sup>	0,65 N/mm <sup>2</sup>
1 Stunde	0,85 N/mm <sup>2</sup>	0,80 N/mm <sup>2</sup>
3 Stunden	2,42 N/mm <sup>2</sup>	2,36 N/mm <sup>2</sup>
6 Stunden	3,15 N/mm <sup>2</sup>	3,41 N/mm <sup>2</sup>
12 Stunden	4,01 N/mm <sup>2</sup>	4,89 N/mm <sup>2</sup>
1 Tag	10,09 N/mm <sup>2</sup>	12,18 N/mm <sup>2</sup>
2 Tage	22,60 N/mm <sup>2</sup>	24,00 N/mm <sup>2</sup>
7 Tage	35,90 N/mm <sup>2</sup>	38,30 N/mm <sup>2</sup>
28 Tage	50,50 N/mm <sup>2</sup>	51,70 N/mm <sup>2</sup>

Die Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung der beiden Spritzbetone zeigt nur minimale Abweichungen. Der „Junge Spritzbeton“, der beiden Rezepturen entwickelt sich mit gleicher Beschleunigerzugabe von 6,2 % nahezu ident. Bei der langfristigen Festigkeitsentwicklung sind bei dem Spritzbeton mit Microsilica gering höhere Festigkeiten zu erkennen.



## 5. Testergebnisse Spritzbeton auf Luftundurchlässigkeit

Eine weitere Herausforderung bei der Bewerkstelligung des Vortriebs unter Überdruckbedingungen ist es die auftretenden Luftverluste zu minimieren. Es gibt zwar relativ viel Literatur über wasserdichten beziehungsweise wasserundurchlässigen Beton, jedoch sehr wenig neuzeitige Schriftwerke bezüglich luftdichten Beton beziehungsweise Spritzbeton. Das Faktum, dass die Luftdurchlässigkeit rund 70 Mal größer ist, als die Durchlässigkeit des Wassers, zeigt die Schwierigkeit dieser Herausforderung. Mit der Länge des aufgefahrenen Tunnels, stieg auch der Druckluftverbrauch sukzessive an. Die Mengen entsprachen nicht der vorausgerechneten Größenordnung, vielmehr überstiegen die Mengen des Druckluftverlustes ein Vielfaches die erwarteten Mengen. Um ein weiteres Ansteigen der Druckluftverbräuche zielführend abzuschwächen bzw. zu stoppen wurde eine umfangreiche Versuchsreihe in situ durchgeführt.

Maßgebend für die Größe der Druckluftverluste über die Spritzbetonaußenschale sind:

- a) Die Qualität des Spritzbetons
- b) Die Dicke und der Aufbau der Spritzbetonaußenschale
- c) Die Anzahl und Größe von Rissen
- d) Systembedingte Arbeitsfugen
- e) Luftverluste über Einbauteile

Um die Ursachen der Luftverluste gezielt analysieren zu können, wurden Messung der Durchlässigkeit von Gasen mittels eines TORRENT Permeabilität Testes durchgeführt. Mit der Messung der Betonpermeabilität bezüglich Luft und Wasser wird ein ausgezeichnetes Maß, zur Beschreibung des Penetrationswiderstandes gegenüber aggressiven Medien in gasförmigem oder flüssigem Zustand, gegeben. Somit können Aussagen über die Dauerhaftigkeit des Betons gegenüber äußeren Einflüssen getroffen werden [2].

Bezugnehmend auf den Drucklufttunnel Karl-Friedrich-Straße wurde dieses Verfahren zur Bestimmung der Eindringtiefe gasförmiger Medien in den Spritzbeton verwendet. Hieraus konnte im umgekehrten Rückschluss die Schlussfolgerungen über die Luftverluste durch den Spritzbeton getroffen werden. Ziel dieser Untersuchungsergebnisse mit dem TORRENT Permeabilität Test war es, den Permeabilitätskoeffizienten, welche ein Maß der Durchlässigkeit von Flüssigkeiten und Gasen ist, für verschiedene Spritzbetonfelder zu eruieren.



*Bild 5: Testfeld 3 - Vakuumzelle TM 198 linke Ulme (Bild: BeMo-Tunnelling)*

Zuerst wurden völlig intakte, sprich rissfreie Spritzbetonflächen im Tunnel untersucht. Als Referenzfläche wurde auch eine Ortbetonfläche in der ingenieurmäßig hergestellten Anfahrkammer mit in die Untersuchungsreihe aufgenommen.

*Tab. 4: Testfelder Tunnel TKF am unbehandelten Spritzbeton*

Versuchsort	Permeabilitätskoeffizient	Qualitätsklasse
Druckkammer Ortbeton	0,788 x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ]	mittelmäßig
TM 198	0,827 x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ]	mittelmäßig
TM 200	0,093 x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ]	gut
TM 50	0,007 x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ]	sehr gut

Sämtliche Messungen der Spritzbetonoberfläche ergaben zufriedenstellende Ergebnisse. Die maximale Durchströmungstiefe lag bei 41,70 mm. Somit konnte davon ausgegangen werden, dass der Spritzbeton in seiner Anwendung im Tunnel als weitgehendst luftdicht anzusehen werden konnte. Jedoch kann die Spritzbetonschale, welche aus etlichen Arbeitsfugen und vereinzelt Schwundrissen besteht, diese Anforderung nicht erreichen.

Durchgeführte Versuche den Permeabilitätskoeffizienten an Schwundrissen in der Nähe der Gitterbögen bzw. an verfahrensbedingten Arbeitsfugen zu eruieren, gelangen aufgrund der hohen Luftströmung an diesen Punkten nicht. Folglich mussten Maßnahmen zur Abdichtung der Spritzbetonschale untersucht werden.

#### 5.1 Maßnahmen zur Abdichtung der Spritzbetonschale

Durch die o.g. durchgeführten Versuchsreihen, wurde bestätigt, dass der Spritzbeton nahezu luftdicht hergestellt werden kann, jedoch machten sich erhebliche Luftverluste an systembedingten Schwachstellen bemerkbar. Somit wurde eine erneute Versuchsreihe durchgeführt, in der ein effektiver Weg zur Abdichtung von vorhandenen Rissen gesucht wurde.

Visual sichtbare Risse wurden somit mit folgenden Materialien behandelt:

##### Behandlung mit Kiesol: (Betonnachbehandlungsmittel)

Um Erkenntnisse über die Dichtheit von Rissen, welche mit Kiesol nachbehandelt worden sind, zu erhalten, wurde ebenfalls versucht den Permeabilitätskoeffizienten mittels des TORRENT Permeabilität Tests zu eruieren.

Leider war bei allen zwei Testfeldern die Wirkung des Kiesols zu gering um einen wesentliche Verbesserung der Luftundurchlässigkeit zu erzielen. Vermutlich ist Kiesol aufgrund seiner Diffusionsoffenheit, sowie seiner spröden Eigenschaften als auch seiner hohen Viskosität nicht für diese Anwendung geeignet.

##### Aufsprühen/Aufpinseln von Mapelastic TU (Abdichtungsmembrane)

In einem weiteren Test wurden Rissflächen mehrfach mit der Abdichtungsmembrane Mapelastic TU versiegelt.



*Bild 6: Versuch mit der Vakuumzelle an einem mit Mapelastic TU vorbehandeltem Riss (Bild: BeMo-Tunnelling)*

Nach Einhaltung der vorgeschriebenen Trocknungszeit wurde auch ein Permeabilitätstest durchgeführt. Hierbei konnte das aufgetragene Material die Luftzirkulation unterbinden. Die Ergebnisse des TORRENT Permeabilität-Testes lagen in einem mittleren Qualitätsbereich, was bewies, dass mit dieser Methodik die lokalen Luftverluste effektiv gestoppt werden konnten.

Es wurden wiederum 3 Testfelder im Tunnel vorbereitet. Folgende Ergebnisse konnten erzielt werden.

*Tab. 5: Testfelder Tunnel TKF am behandelten Spritzbeton*

Versuchsort	Permeabilitätskoeffizient	Qualitätsklasse
TM 120	22,22 x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ]	sehr schlecht
TM 120	0,022 x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ]	gut
TM 120	0,19 x 10 <sup>-16</sup> [m <sup>2</sup> ]	mittelmäßig



*Bild 7: Flächige Nachbehandlung der Spritzbetonaußenschale mit Mapelastic TU (Bild: BeMo-Tunnelling)*

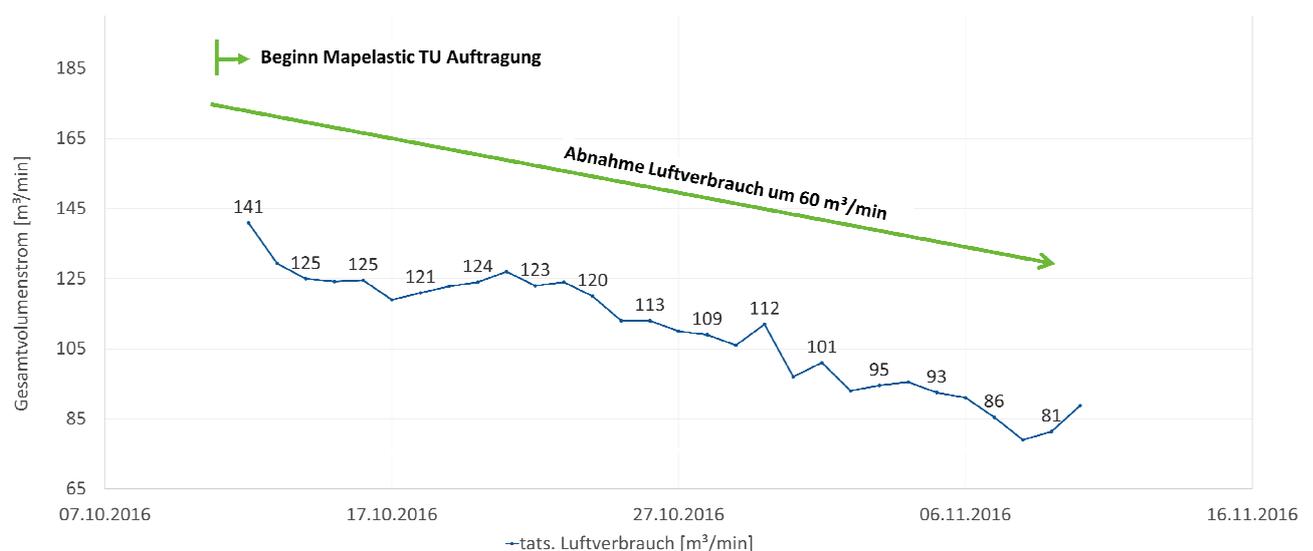


**Bild 8: Gezielte Nachbehandlung der Spritzbetonaußenschale mit Mapelastic TU (Bild: BeMo-Tunnelling)**

Im Zeitraum zwischen 12. Oktober 2016 und 11. November 2016 wurde eine großangelegte Abdichtungsmaßnahme der Spritzbetonaußenschale mit Mapelastic TU umgesetzt.

In Summe wurde eine Fläche von 2000 m<sup>2</sup> Spritzbeton mit drei Lagen Mapelastic TU versiegelt. Dieses Unterfangen führte dazu, dass sich der Druckluftverbrauch um circa 40 % reduzierte. Das untenstehende Diagramm zeigt diesen Effekt eindrucksvoll.

Die Zeitachse ist auf der Abszisse abgebildet. Die Ordinatenachse beschreibt den Druckluftverbrauch in m<sup>3</sup>/min. Der Überdruck während der Spritzmaßnahmen war konstant bei 0,76 BarÜ.



**Bild 9: Diagramm Druckluftverbrauch während Mapelastic TU Anwendung (Bild: BeMo-Tunnelling)**

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden weitere Techniken getestet:

- a) Befeuchten der Spritzbetonschale mit Wasser
- b) Einblasen von Zementstaub
- c) Aufpinseln von Zementschlempen

Alle drei Versuche brachten keine zufriedenstellenden bzw. langfristigen Verbesserungen mit sich. Zusammenfassend haben die Ergebnisse der Permeabilität Tests gezeigt, dass bei Bauteilen aus Ortbeton und Spritzbeton keine Durchlässigkeit von Flüssigkeiten und Gasen bei einem intakten und ungestörten Betongefüge gegeben sind. Die auftretenden Druckluftverluste über die Spritzbetonschale stammen folglich von materialbedingten Schwundrissen, bautechnisch bedingten Arbeitsfugen, sowie Schwachstellen an Einbauteilen.

Zur Reduktion dieser Druckluftverluste sind Maßnahmen wie beispielsweise das flächige Aufsprühen von Abdichtungsmembranen als zielführend anzusehen.

## 6. Zusammenfassung

Die Spritzbetonanwendung unter Überdruckbedingungen setzt sehr hohe Anforderungen an die Betontechnologie, sowie an das ausführende Personal. Nur speziell auf die unter Druckluft vorherrschenden Bedingungen angepasste Betone, können sicher, effektiv und nachhaltig im Überdruckbereich eingesetzt werden. Die Herausforderungen des Aufbringens von Spritzbeton auf sehr trockene Untergründe, konnte mit der Entwicklung eines sehr klebrigen Spritzmörtels in Kombination mit sehr kleinen Teilflächen erfolgreich bewältigt werden.

Um zielgerichtet die Luftdichtheit der Spritzbetonschale des Tunnels Karl-Friedrich-Straße zu erhöhen musste vorab eine umfangreiche Versuchsreihe durchgeführt werden. Diese Untersuchungen zeigten, dass der ungestörte Spritzbeton als nahezu luftdicht angesehen werden kann. Die Luftundichtheiten werden jedoch durch die systembedingten Arbeitsfugen, sowie Schwundrissen hervorgerufen. Eine effektive Methode zur Abdichtung dieser Schwachpunkte wurde mit einer großflächigen Anwendung von einer Spritzmembran gefunden. Durch diese Zusatzmaßnahmen konnten die Luftverluste signifikant gesenkt werden.

## 7. Literatur

- [1] Jodl, H.; Strobl, B.:  
Baupraktische Luftmengenberechnung für den Druckluftvortrieb. Grundbau Baubetrieb, 2/95, April, Seite 100.
- [2] Torrent, R.J.; Frenzer, G.:  
Über die Permeabilität des Überdeckungsbetons. Holderbank Management & Beratung AG, Holderbank, 1995.

## Zum Autor

Dipl.-Ing. Thomas Wechner, B.Sc.  
Bachelorstudium Bauplanung und Bauwirtschaft; Masterstudium Baumanagement; FH- Joanneum, Graz, beschäftigt bei der Firma BeMo-Tunnelling GmbH seit 2010, Auslandseinsätze in den USA und Großbritannien, Projektleiter Tunnel Karl-Friedrich-Straße seit 2015.  
*thomas.wechner@bemo.net*