
SANIERUNG SELZTHALTUNNEL MITTELS SPRITZABDICHTUNG

REFURBISHMENT SELZTHALTUNNEL

Stefan **Zimmermann**, Master Builders Solution GmbH, Krieglach, Österreich
Roland **Mayr**, Master Builders Solution GmbH, Krieglach, Österreich
René **Bolliger**, Master Builders Solution bei PCI Bauprodukte AG, Holderbank, Schweiz

Der Selzthaltunnel befindet sich auf der A9, der Pyhrn Autobahn, in Österreich. Bei dem Ende der 1970er-Jahre errichteten Tunnel wurde bei beiden Röhren eine Sanierung dringend notwendig. Dabei wird hier nur auf die Weströhre Bezug genommen. Die Ausführung erfolgte 2017. Dabei wurden neben den Adaptierungen an das „Straßentunnel-Sicherheitsgesetz (STSG)“ unter anderem auch die Wasserzutritte in der Tunnelinnenschale beseitigt. Diese Undichtheiten konnten mittels einer spritzbaren Abdichtung und einer 10 cm starken Innenschale erfolgreich saniert werden.

Der Einsatz von spritzbaren Abdichtungen im Tunnelbau ist weltweit schon sehr etabliert. Auch bei unseren Nachbarn in der Schweiz hat sich diese Art der Tunnelabdichtung seit rund 20 Jahren, insbesondere bei Sanierungen sowie Neubauten, bewährt. Im europäischen Raum wird diese Abdichtungsvariante trotz der offensichtlichen Vorteile noch eher zurückhaltend eingesetzt.

The Selzthaltunnel is located on the Pyhrn Motorway (A9) in Austria. The tunnel was constructed end of the 1970's and a refurbishment was urgently necessary for both tubes. In this article only the refurbishment of the western tube, which was executed in 2017 is considered. Apart from adaptations due to the "Road Tunnel Safety Law" local water ingresses were eliminated by means of a sprayed waterproofing membrane and a newly constructed 10 cm thick inner lining.

The usage of sprayed membranes for waterproofing in tunneling gets worldwide more and more established. It is well proven in tunnel construction and refurbishment in neighboring Switzerland in the last 20 years. The usage of sprayed waterproofing is still limited on an European level despite evident benefits.

1. Einleitung

Dieser Artikel behandelt die Sanierung der Tunnelabdichtung in der Weströhre des Selzthaltunnels. Im Rahmen der erfolgten Sanierung wurden neben den Adaptierungen an das „Straßentunnel-Sicherheitsgesetzes (STSG)“ auch die festgestellten Wasserzutritte in der Tunnelinnenschale beseitigt. Über das Ausmaß und die Verteilung der Wasserzutritte vor der Sanierung liegen den Autoren leider keine Detaildaten vor.

Bei der Sanierung der Tunnelschale, inklusive der entsprechenden Abdichtung, musste auf eine kostensparende und schnelle Bauausführung geachtet werden, um die Freigabe des Verkehrs schnellstmöglich wieder zu gewährleisten.

2. Planung

Die Planungsleistungen wurden durch das Ingenieurbüro ILF ausgeführt und begannen im Jahr 2015. Bei der Sanierung der Tunnelschale sollte die bestehende Innenschale möglichst erhalten bleiben, um Kosten und Bauzeit zu minimieren.

Diese Anforderung schloss eine Abdichtungsebene auf der alten Innenschale aufgrund des notwendigen Lichtraumprofils aus. Letztendlich hat sich der Planer für eine Vorsatzschale als Verbundschale entschieden. In der Firste wurde die Innenschale mittels Spritzbeton aufgebracht (Bild 1). Der große Vorteil dabei liegt auf der Hand: die Innenschale des Tunnels konnte erhalten bleiben und die Bauzeit daher minimiert werden.

Die Fragestellung für die Planer stellte sich wie folgt dar: Wie kann man die zusätzliche Abdichtung und die Innenschale als Verbundbauwerk ausführen, da ja bisher die Abdichtung als „Trennlage“ fungierte?

Die Antwort: Es wurde eine beidseitig haftende Spritzabdichtungsmembran verwendet, die vor Ort auf die alte Tunnelschale aufgespritzt wurde. So konnte die Dicke der Innenschale minimiert und gleichzeitig die Wassereintritte verhindert werden. Die Innenschale musste so nur bei den schadhaften Bereichen abgetragen werden.

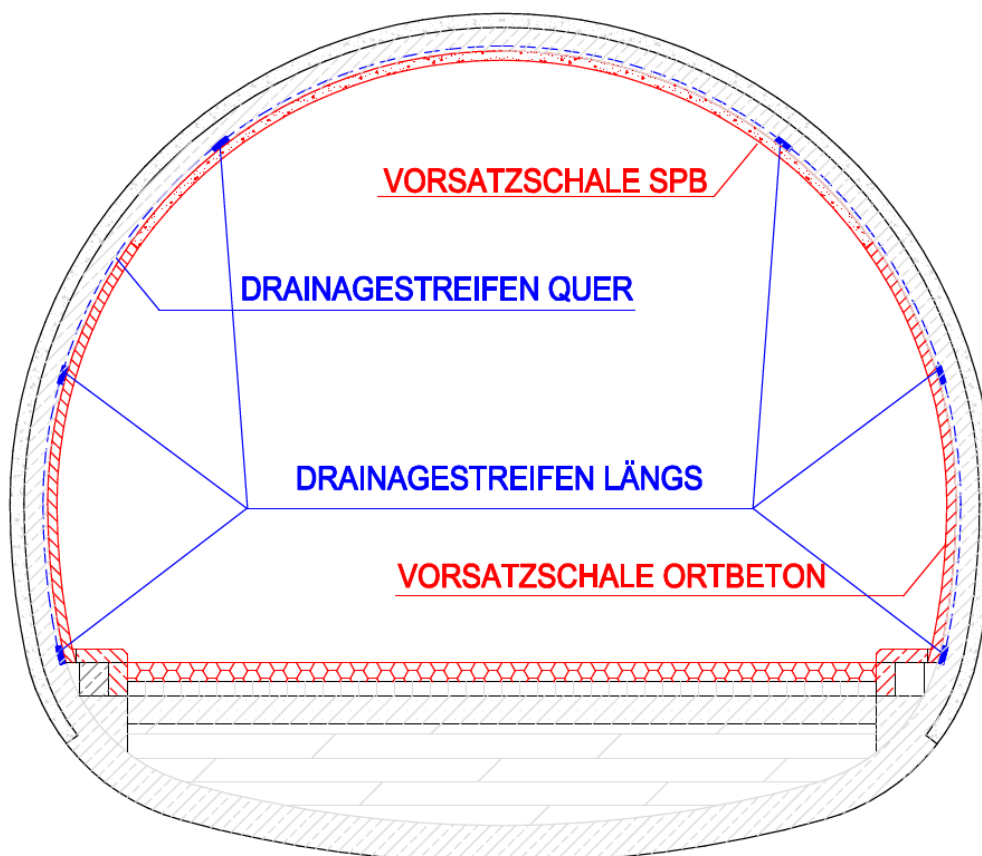


Bild 1: Regelquerschnitt mit Vorsatzschale und Drainageschlitzern

Da die Innenschale nun vollflächig abgedichtet wurde, musste besonderes Augenmerk auf die Drainagierung des Bergwassers gelegt werden, um einen eventuellen Wasserdruck auf die Innenschale zu vermeiden.

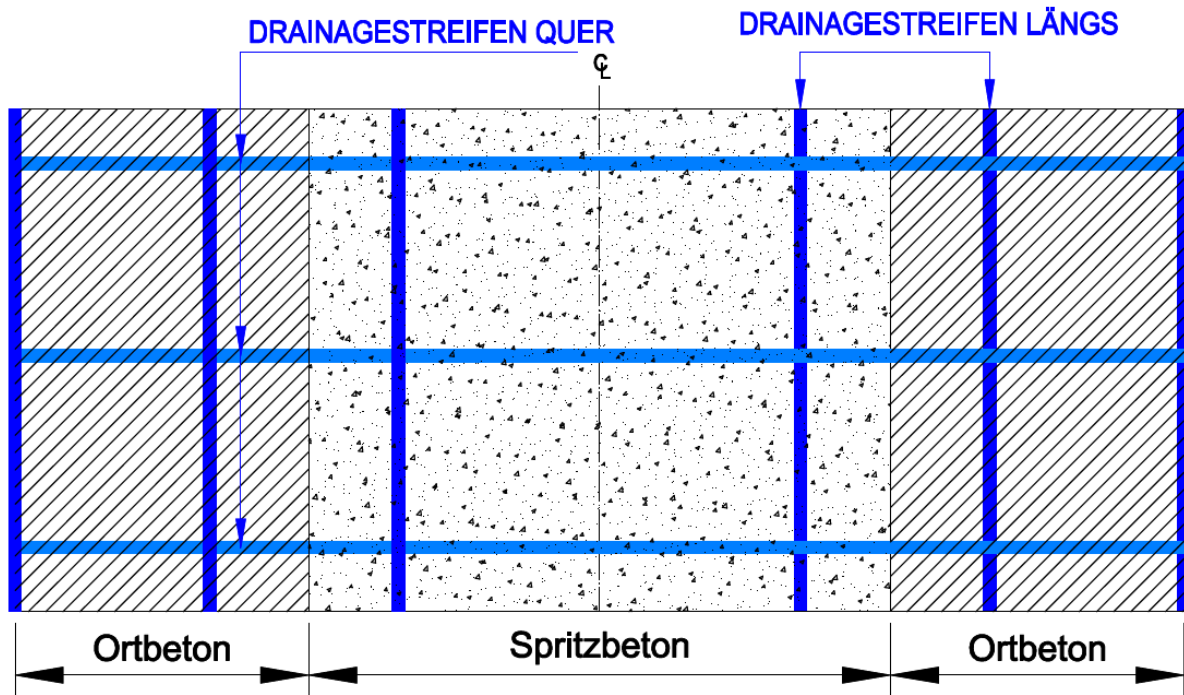


Bild 2: Darstellung der Innenschale mit Drainageschlitzten in Abwicklung

Hierfür wurde eine systematische Anordnung von Drainageschlitzten im Raster von 3 x 3 m gewählt, um so das Wasser in die bestehenden Bergwasserdrainagen abzuleiten (Bild 2). Dieses Raster wurde aus Erfahrungswerten gewählt und von schon ausgeführten Projekten in der Schweiz abgeleitet.

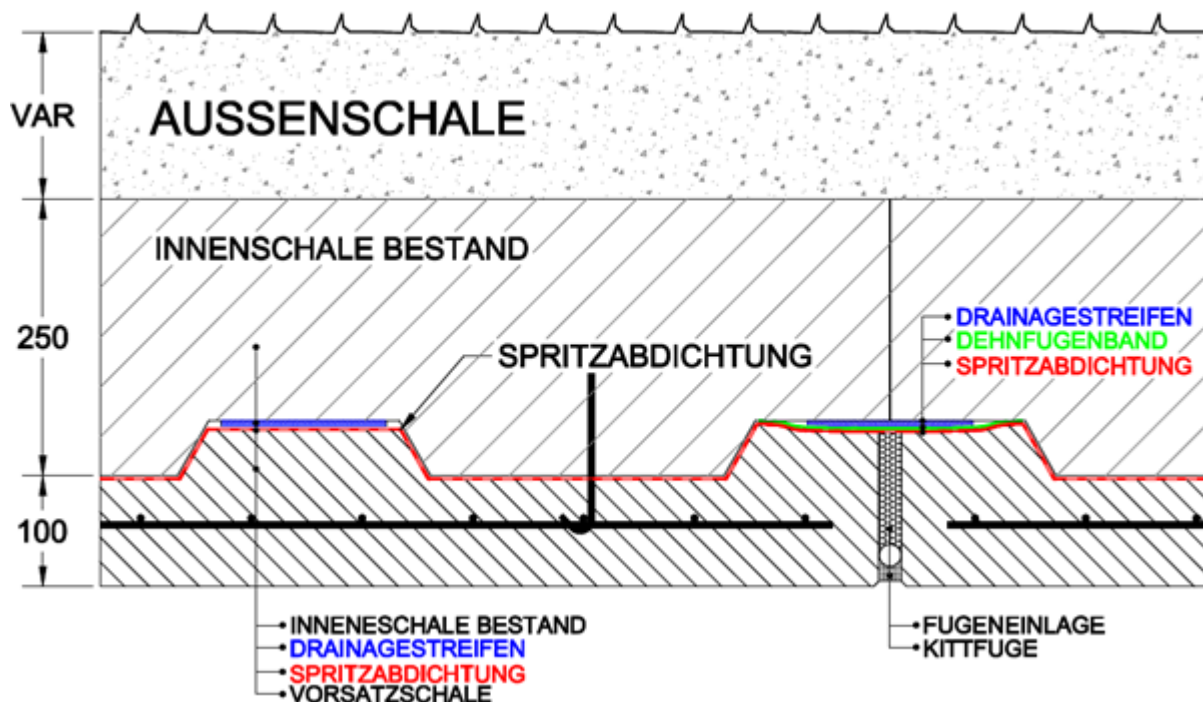


Bild 3: Detail der Drainageschlitzte und die neue Vorsatzschale

Die bestehenden Blockfugen wurden als Dehnfugen ausgeführt. (Bild 3) Dabei ist ein Drainagestreifen eingelegt und zusätzlich ein Fugenband eingespachtelt worden, um allfällige Bewegungen auf die Spritzabdichtung zu vermeiden. Die Drainageschlitze im Blockbereich versah man nur mit einem Drainagestreifen und sie konnten dann mit der Spritzabdichtung überspritzt werden.

Aufgrund der beschriebenen Anforderungen entschied sich das Projektteam für eine gespritzte Vollabdichtung, da mit dieser Abdichtungsart die Anforderungen aus der Problemstellung erfüllt werden konnten:

- Möglichst keine Verschleppung des Wassers in die trockenen Zonen
- Verbundwirkung zwischen Innen- und Vorsatzschale, um die Innenschale möglichst dünn ausführen zu können
- Schnelle und einfache Applikation
- Beseitigung von Undichtigkeiten in der Tunnelschale

3. Die einschalige Bauweise als Verbundschale

3.1 Einleitung

Im gegenständlichen Fall ist die sanierte Innenschale als Verbundschale mit Ortbeton in den Ulmen und Spritzbeton in der Firste ausgeführt. Ein spezieller Nachweis der Verbundwirkung war in diesem Fall aufgrund folgender Kenntnisse nicht gefordert. Das statische Zusammenwirken zweier, durch eine Spritzabdichtung verbundener Spritzbeton-/Ortbeton-schalen, wird von den mechanischen Eigenschaften der Spritzabdichtung, der potentiellen Untergrundwelligkeit und eventueller Hilfsmaßnahmen (etwa Schubdübel) definiert.

Um den Einfluss der Spritzabdichtung nachzuweisen, wurden anderenorts umfangreiche Untersuchungen der Materialparameter durchgeführt und ein Rechenmodell, basierend auf der Verbundglas-Theorie („laminated glass theory“), entwickelt (siehe auch [1]). Bei der Verbundglasberechnung werden steifere Lagen mit einem dazwischenliegenden weicheren „Kleber“ als monolithische Schicht modelliert. Der von Bennison (siehe auch [2]) vorgeschlagene Ansatz wurde für Verbundschalen untersucht. Die Eingangsparameter für die Berechnung sind im Wesentlichen die Eigenschaften der unterschiedlichen Schichten (Dicke, E-Modul) sowie der Schubmodul der Spritzabdichtung.

3.2 Ermittlung der Eigenschaften von Verbundschalen

Zur Beurteilung der mechanischen Eigenschaften wie Reibungswinkel, Kohäsion oder Schubmodul der Verbundschalen wurden Platten (Bild 4) mit unterschiedlichem Schichtaufbau hergestellt:

- Aussenschale: Spritzbeton
- Optional: Isolierträger Spritzbeton
- Spritzabdichtung
- Innenschale: Spritzbeton oder Ortbeton

Aus diesen Platten wurden Bohrkerne mit unterschiedlicher Orientierung (Winkel) der Spritzabdichtung entnommen sowie Biegebalken für Versuche nach EN 14651 [3] herausgesägt. (Bild 5)



Bild 4: Gespritzte Probepplatten



Bild 5: Bohrkerne mit unterschiedlicher Orientierung der Spritzabdichtung

Die Bohrkerne wurden mit langsamerer Belastungsgeschwindigkeit als im Druckversuch (nach EN 12390, [4]) vorgesehen abgedrückt, um näher am Belastungsverlauf im Tunnel zu sein. Die Prüfung erfolgte mit einer Verformungsrate von 0,005 mm/Minute über einen Zeitraum von 18 Stunden. Kraft und Verformung wurden über diesen Zeitraum kontinuierlich aufgezeichnet. Das Verhalten der Spritzabdichtung wurde mit Hilfe eines FE-Programms (LS-DYNA) und einem modifizierten Mohr-Coulomb Bruchkriterium (Berücksichtigung von „Strain softening“) modelliert (siehe dazu auch [5]).

Für die verwendete Spritzabdichtung MasterSeal 345 wurde an den gespritzten Proben ein Reibungswinkel φ von $12,1^\circ$ und eine Kohäsion c von 1,56 MPa ermittelt. Als Mittelwert über alle Rauigkeiten und Innenschalenvarianten (gespritzt oder Ortbeton) ergab sich ein Reibungswinkel von φ von $11,6^\circ$ und eine Kohäsion c von 1,41 MPa. Als Schubmodul vor Versagen wurde ein Wert von $G = 7,0$ MPa ermittelt.

Die Eigenschaften der mit dem FE Program (LS-DYNA) modellierte Biegebalken wurden zusätzlich an gespritzten Biegebalken mit Spritzabdichtung in der Mitte, getestet nach EN 14651 [3], verifiziert. (Bild 6)



Bild 6: Ausschnitt Biegebalken bei einer Rissweite von 4,0 mm

3.3 Nachhaltigkeit von Verbundschalen

Auf Basis der ermittelten Parameter wurde mit Hilfe der Verbundglas-Theorie ein Tunnel mit Durchmesser 6 m exemplarisch berechnet (siehe auch [1]).

Dabei ergab ein Aufbau von 225 mm Aussenschale, Spritzabdichtung und 160 mm Innenschale denselben Steifigkeitswert wie eine monolithische Schale mit 325 mm. Das heißt 385 mm Gesamtdicke der Verbundschale zu 550 mm (225 mm + 325 mm) Dicke einer konventionellen zweischaligen Bauweise.

Es ist zu berücksichtigen, dass bautechnisch die Dicke einer Innenschale meist bei über 300 mm liegt. Je nach Wahl der Rechenparameter kann von einer Einsparung von zumindest 20% der Schalendicke ausgegangen werden.

Daraus ergibt sich:

- Reduzierter Ausbruchsquerschnitt (weniger Ausbruchsmaterial zu transportieren und deponieren)
- Einsparungen in der Beton-/Spritzbetonmenge

Die Auswirkungen auf Bauzeit und Kosten müssten bei einer Detailplanung evaluiert werden.

Für die Betrachtung der Nachhaltigkeit von Verbundschalen wurde das CO₂ - Equivalent für die Bauausführung unter Berücksichtigung von Betriebs- und Wartungsphase berücksichtigt. Der Vergleich eines Tunnels (hier mit Durchmesser 10 m) in konventioneller zweischaliger Bauweise und in Verbundbauweise mit Spritzabdichtung ergab eine CO₂ Einsparung von 9 %.

4. Ausführung

Die Ausführung der Arbeiten erfolgte durch die ARGE Junger – Gebr. Haider. Nachdem die gesamte Innenschale HD-gestrahlt wurde (Bild 7), um alle losen sowie lockeren Betonteile zu entfernen, fräste man die geplanten Drainageschlitz horizontal und vertikal in die vorhandene Tunnelschale (Bild 9). Zu diesem Zweck wurde eine Bagger-Anbaufräse (Bild 8) verwendet.

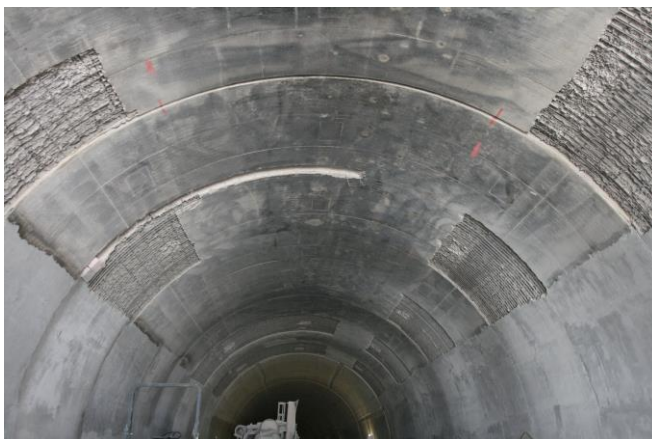


Bild 7: Gestrahlte Betonoberfläche



Bild 8: Fräsen der Drainageschlitz

Bei den Drainageschlitzten wurde dann ein Drainage- und Abdichtungstreifen angebracht. (Bild 10)



Bild 9: Drainageschlitz längs und quer



Bild 10: Drainageschlitz mit Abdichtungstreifen

Nach den genannten Vorarbeiten wurde die Tunnelschale nochmals mit Wasser heruntergewaschen. Abgesehen von der Entfernung des Staubes kann die Betonoberfläche dadurch auch Feuchtigkeit aufnehmen, um die entsprechend gute Haftung der Spritzabdichtung zu gewährleisten.

Anschließend konnte die spritzbare Abdichtungsmembran MasterSeal 345 appliziert werden. Dabei wurden die eingebohrten Montageeisen für die Bewehrung der Innenschale überspritzt und abgedichtet (Bild 11). Darauf wurden später die Gittermatten befestigt.



Bild 11: Applikation Spritzabdichtung

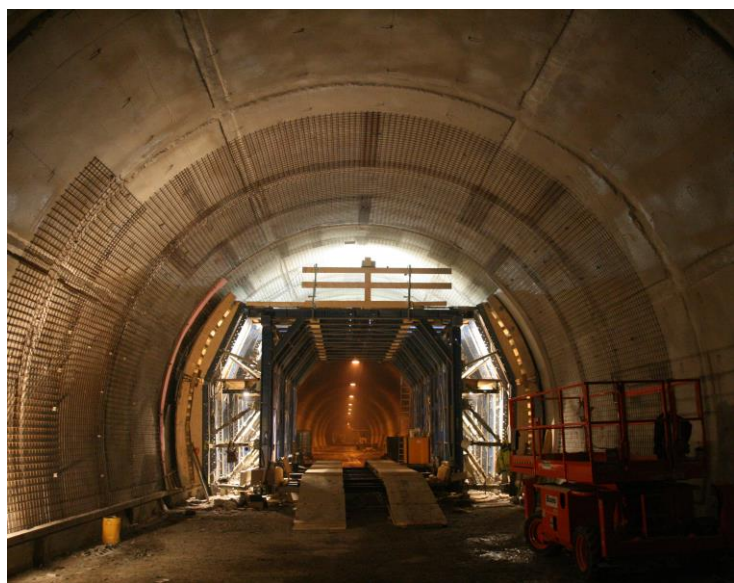


Bild 12: Schalwagen zur Betonage der Innenschale

Mit Hilfe eines Schalwagens wurden die Ulmen in Ortbeton betoniert (Bild 12). In der Firste wurde die Innenschale in Spritzbetonbauweise mittels eines nass gespritzten, unbeschleunigten Fertigmörtels (0-4 mm) ähnlich einer üblichen Tunnelanierung hergestellt (Bild 13) und im Nachgang geglättet. Es erfolgte keine spezielle Fugenausbildung zwischen Ortbeton und Spritzbeton.

Auch der Übergang von Spritzabdichtung auf konventionelle Abdichtungsfolien wurde teilweise notwendig (z.B. Übergang Querschlag zu Tunnel) und entsprechend fachgerecht

ausgeführt. Dabei wird die bestehende Folienabdichtung mittels Verteilerschiene in einem Mörtelbett befestigt und anschließend mit einer Überlappung von etwa 30 cm überspritzt.



Bild 13: Schneckenpumpe zur Verarbeitung des Spritzbetons in der Firste

5. Ausrüstung

Die Spritzabdichtung wird im Trockenspritzverfahren ausschließlich mittels einer per Luftdruck oder elektrisch betriebenen Trockenspritzeinheit aufgetragen. Als typische Spritzeinheiten kommen generell kleine Rotormaschinen wie z.B. Reed „Sova“ (Bild 14) zum Einsatz. Augenmerk ist auf die Düse zu legen, welche über einen Statikmischer eine entsprechende Vermischung von Wasser und Produkt gewährleistet. (Bild 15 und 16)

Die Ausrüstung sollte den folgenden Spezifikationen entsprechen:

- Rotor mit geringem Fördervolumen
- Staubschutz
- Spritzdüse Ø 32 mm (konisch, 18 Loch Wasserring, Statikmischer)
- Spritzschlauch Ø 32 mm

Es empfiehlt sich, dass der Kompressor mit einem Wasserabscheider auf der Druckausgangsseite ausgestattet ist, da sonst Kondenswasser in der Druckluft zu Verklebungen von MasterSeal 345 im Rotor und Förderleitungen führt.

Die Düse ist mit 2 Ventilen ausgerüstet:

- einem Nadelventil für die Feindosierung des Wassers
- einem Kugelventil für das Ein- und Ausschalten (siehe Bild 15).



Bild 14: Reed „SOVA“, Trockenspritzeinheit mit Staubfilter

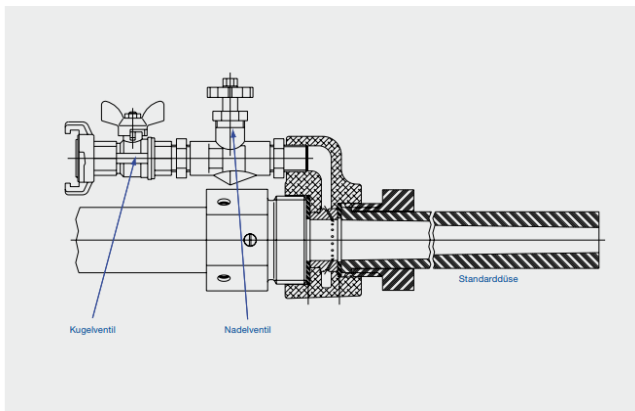


Bild 15: Düse für Spritzabdichtung mit 2 Ventilen, Statikmischer im Düsenrohr nicht dargestellt



Bild 16: Düse mit Kreuz zur Verbesserung des Spritzbildes

Vor Spritzbeginn sollte folgende Checkliste beachtet werden.

Nachfolgende Ausrüstungsanforderungen sind vor Spritzbeginn zu überprüfen:

- Kompressorleistung mindestens 10 m³ pro Minute, bei einem Druck von mindestens 4 bar bei einer luftgetriebenen Spritzmaschine
- Kompressorleistung mindestens 6 m³ pro Minute, bei einem Druck von mindestens 4 bar bei einer elektrisch getriebenen Spritzmaschine
- Leitungswasserdruck (6 bar), keine starken Schwankungen im Wasserdruck
- Angemessene Beleuchtung, um den gesamten Auftragsbereich auszuleuchten (Scheinwerfer)
- Hebebühne für eine sichere Applikation von MasterSeal 345 und Qualitätskontrolle (visuelle Beurteilung und Schichtstärkenmessung) in höheren Bereichen

Die Wasserzugabe wird über das Nadelventil an der Spritzdüse gesteuert und sollte zwischen 30 und 50 % des Pulvergewichtes betragen (siehe auch Bild 17). Es ist auf jeden Fall zu vermeiden, MasterSeal 345 ohne Wasserzugabe an der Düse zu spritzen, um eine Staubentwicklung zu verhindern. Spritztests vor Beginn der Abdichtungsarbeiten sollten zur Überprüfung der Einstellungen durchgeführt werden.

Die Applikation der Spritzabdichtung mit einer geforderten Stärke von 3 mm konnte aufgrund der geringen Untergrundrauigkeit in einer Lage erfolgen. Die Kontrolle der Schichtstärke erfolgt in mehreren Stufen: Nassschichtstärke während der Applikation mittels Prüfnadel, Kontrolle

von Verbrauch an Produkt pro m² (ca. 1,1 kg/m² und mm) sowie Trockenschichtstärke punktuell über herausgeschnittene Muster. Für den nachfolgenden Auftrag von Ortbeton oder Spritzbeton ist eine Shore-A Härte der Spritzabdichtung von mindestens 30 gefordert. Abhängig von Luftfeuchtigkeit und Bewetterung dauert dies zwischen einem und mehreren Tagen.

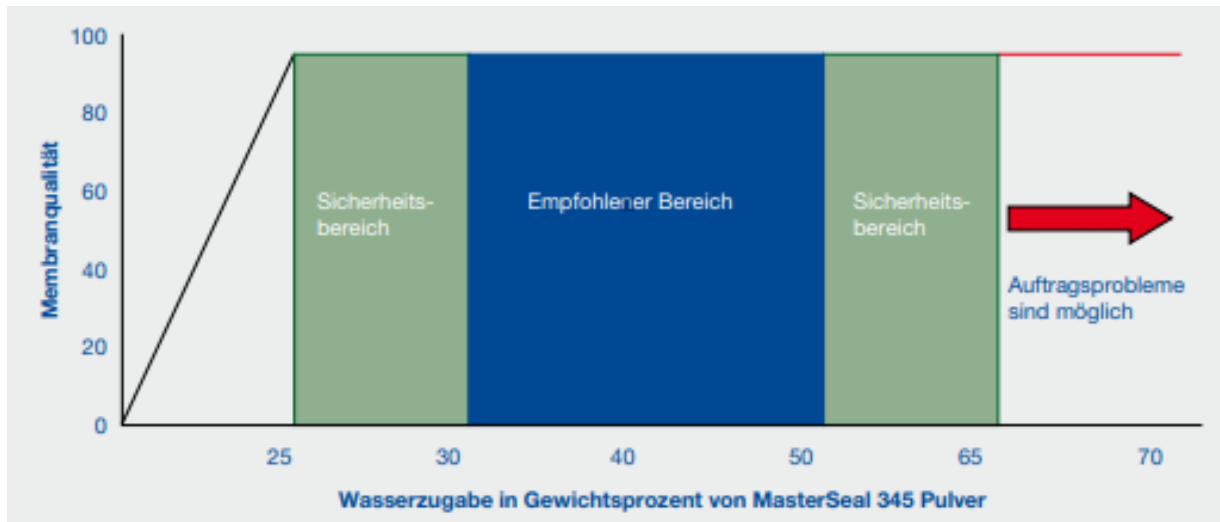


Bild 17: Wasserzugabe und Membranqualität

Außer punktuellen Undichtigkeiten sind keine wesentlichen Wasserzutritte nach der Sanierung aufgetreten. Diese werden beobachtet und können im Bedarfsfall einfach durch eine lokale Injektion behoben werden.

6. Zusammenfassung

Gute Erfahrungen aus der Schweiz konnten auch erfolgreich bei der Sanierung des Selzthaltunnels umgesetzt werden. Bei dem beschriebenen Projekt wurden die Vorteile der spritzbaren Tunnelabdichtung aufgezeigt:

- Durch die beidseitige Haftung kann eine Verbundbauweise gewährleistet werden, wodurch die Gesamtstärke der Innen- und Außenschale minimiert wird.
- In der Gesamtbetrachtung können Tunnelbauwerke deutlich kostengünstiger und auch nachhaltiger ausgeführt werden. Dies ist gerade in Zeiten von vermehrten Anforderungen bezüglich ressourcenschonender Bauweise und CO₂-Einsparungen sowohl für Bauherren als auch für Unternehmer interessant.
- Bei fachgerechter Ausführung der spritzbaren Tunnelabdichtung kann eine dauerhafte Dichtheit des Tunnels gewährleistet werden.

Der zunehmende Fokus auf nachhaltige Lösungen im Untertagebau lässt den Schluss zu, dass diese Art der Tunnelabdichtung in Zukunft bei der Systemwahl vermehrte eine Rolle spielen und sich auch in Österreich stärker etablieren wird. Dies gilt sowohl für die Tunnelinstandsetzung als auch für die Verwendung von Verbundschalen im Neubau.

7. Literatur

- [1] Jung,H.; Clement, F.; Pillai, A.; Wilson, C.; Traldi, D.:
Composite tunnel linings, allowing a more cost efficient and sustainable tunnel design. In: Proceedings of the WTC 2017, Bergen.
- [2] Bennison S.J., Qin M.HX, Davies P.S:
Highperformance laminated glass for structurally efficient glazing. Innovative light-weight structures and sustainable facades. Conference Paper, Hong Kong 2008.
- [3] DIN EN 14651:2007-12:
Prüfverfahren für Beton mit metallischen Fasern - Bestimmung der Biegezugfestigkeit (Proportionalitätsgrenze, residuelle Biegezugfestigkeit).
- [4] DIN EN 12390-3:2009-07:
Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.
- [5] Pillai, A.; Jung,H.; Clement, F.; Wilson, C.; Traldi, D.:
Sprayed concrete composite tunnel lining – load sharing between the primary and secondary lining, and its benefit in reducing the structural thickness of the lining. In: Proceedings of the WTC 2017, Bergen.

Zu den Autoren

BM Dipl.-Ing. Stefan Zimmermann

Studium des Bauingenieurwesens an der HTW Dresden, Bau- und Projektleitung Goldbeck Rhomberg Salzburg, Seit 2016 Leitung Projektmanagement Österreich / Ungarn bei der Master Builders Solutions GmbH

stefan.zimmermann@mbcc-group.com

Dipl.-Ing. Roland Mayr

Studium des Bergwesens/Tunnelbaus an der MU Leoben, 1992 – 2001 Fa. Geoconsult, 2002 - 2016 Verkaufsleiter Tunnelbau Österreich, seit 2016 Global Technical Manager Spritzbeton bei Master Builders Solutions GmbH

roland.mayr@mbcc-group.com

René Bolliger

Chemiker HTL, 1994 – 2001 Jura-Cement-Fabriken, 2002 – 2003 Geistlich Ligamenta AG, seit 2003 in diversen Funktionen bei Master Builders Solutions und seit 2015 Leiter Tunnelbau DACH

rene.bolliger@mbcc-group.com