

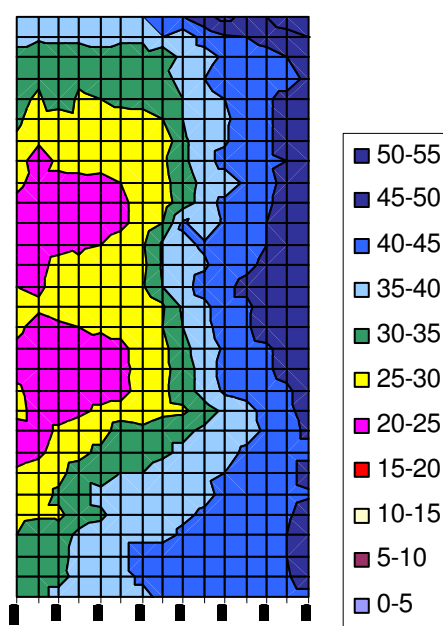
Druckwasserhaltende Tunnel mit dem Sarnafil Waterstop System im Griff

Die konsequente Berücksichtigung der Wissensstände aus den vergangenen 35 Jahren Tunnelabdichtung hat zu einem ausgereiften System für den dichten Tunnel geführt. Die nachfolgende Systembeschreibung wurde unter anderem durch die Erfahrungen der Abdichtungen und Injektionen der Tunnelprojekte der DB Neubaustrecke Köln – Rhein/Main bestätigt.

Abdichtungen dürfen nicht nur einzeln für sich gesehen werden, sondern sind in der Wechselwirkung zu den sie beeinflussenden Bauteilen und unter den auf sie einwirkenden Belastungen zu betrachten.

Obwohl dieser Grundgedanke bei allen bautechnischen Bemessungen beherzigt werden sollte, wurde dies bei Abdichtungen nicht immer in letzter Konsequenz berücksichtigt. Es treten in der Realität immer noch unbekannte oder unberücksichtigte Faktoren auf, die dann zu Fehlern führen. Die bisherigen Überlegungen der Fachgremien und Normierungsausschüsse haben dazu geführt, dass das Augenmerk auf den Abdichtungsträger und den Firstbereich der Innenschale gerichtet wird. Dies ist auch weiterhin richtig und wichtig, doch ein entscheidender Belastungsfall wurde unterschätzt:

Im Gebrauchszustand presst das Wasser die Abdichtung bei den uns bekannten Projekten mit bis zu 9 Bar Druck auf die Außenseite der Innenbetonschale. Dieser Lastfall wurde zwar erkannt, dennoch ging die Fachwelt von einer weitgehend glatten, bergseitigen Betonoberfläche des Innenbetons aus. Es war klar, dass der Beton im Firstbereich aus bautechnischen Gründen nur erschwert eingebracht werden kann und durch die Firstspaltverpressung ertüchtigt werden muss. Dieser Umstand ist in der bisherigen Normierung ausreichend berücksichtigt. Bei den 11 näher untersuchten Tunnel konnte festgestellt werden, dass die ausgeführten Maßnahmen zur Firstspaltinjektion nur zu einem teilweisen Erfolg geführt hatten. Bereits beim Tunnel Gernsbach wurden im Jahr 1996 die Dicken der Innenschale mit dem Echo-Impuls-Verfahren überprüft und festgestellt, dass in Teilbereichen der Tunnelröhre die Außenseite der Betonschale mit größeren Kratern und Lunkern durchzogen war. Bei diesem bewehrten Tunnel lagen demnach Teile der Bewehrung frei und die Abdichtung wurde durch den Wasserdruck auf die Eisen gepresst.



Grafik: Gerhard Maier, Dr. Karl Kuhnhehn, Ausführung und Erkenntnisse mit der doppelagigen Abdichtung im Tunnel Gernsbach, Tunnel 6/96

Aufbau und Nutzen des Sarnafil Waterstop Systems

- hochwertige Kunststoffdichtungsbahnen aus flexiblen Polyolefinen inkl. Zubehör
- Injektionskonzept und -zubehör für das Nachbetonieren der Innenbetonschale inkl. Firstspalt (Ringspaltverpressung)
- ebene Außenseite des Innenbetons als Abdichtungsträger für die Dichtungsbahn im Gebrauchszustand bei Druckwasserbelastung
- vollständig im Beton eingebundene Sperranker der Fugenbänder
- Fugenbänder mit integrierten Injektionsschläuchen
- gezielte Nachdichtungsmöglichkeit bei Undichtigkeiten
- überbreite Fugenbänder zur einfacheren und sicheren Positionierung der Stirnschalung
- Fugenbänder mit überbreitem Mittelteil für einen genügend großen Abstand von der Stirnschalung zum ersten Fugenband-Sperranker, was ein richtiges Einbetonieren ermöglicht

Belastungszustände

In der nachfolgenden Betrachtung werden zuerst die Belastungsarten beschrieben, die bei der Entwicklung des Waterstop Systems zu berücksichtigen waren.

Grundsätzlich sind für Tunnelabdichtungen zwei Belastungszustände zu betrachten:

- 1. Der Einbauzustand**
- 2. Der Gebrauchszustand**

Belastungen im Einbauzustand:

- Oberflächenstruktur des Primärtunnelringes (*Tübbing, Spritzbeton*)
- Betondruck
- Bewehrungseisen
- Abstandshalter der Bewehrung
- Korrekturen an der Bewehrung
- Aufschwimmen der Bewehrung
- Standfläche der Schalung
- Korrekturen an der Schalung
- Reibung, Vibration beim Rütteln
- auf der Abdichtung stehende Baugeräte
- Betreten der Abdichtung
- auf der Abdichtung befindliches Material (Stahl, Kanthölzer)
- Abfälle beim Einbau der Bewehrung, Schalung (Bindedraht, Reste von Baustahl, usw.)

Belastungen im Gebrauchszustand:

- Wasserdruck - presst die Dichtungsbahn auf die Außenseite der Innenbetonschale
- Hebungen, Senkungen der Sekundärschale
- Hebungen, Senkungen der Primärschale
- Überspannung von Schlitzfenstern, Löchern und Lunkern
- Thermische Belastungen
- Chemische Belastungen durch das Bergwasser
- Chemische Belastungen durch die Abwässer
- Havariefälle (auslaufende Chemikalien, Löschwasser etc.)
- Physikalische Belastungen durch fließendes Wasser
- Eintragung von dynamischen Belastungen durch den Verkehrsbetrieb

Systemaufbau und Beschreibung

Das Sarnafil Waterstop System ist prinzipiell sehr einfach aufgebaut. Es besteht aus einer Lage Kunststoffdichtungsbahn mit aufgeschweißten Schottfugenbändern, verlegt auf einer Lage Schutzvlies. Die Möglichkeit zum Injizieren von zementösen Verpressmaterialien sowie Gelen und Harzen in der Fläche wie auch an den Fugenbändern ist durch Injektionsstutzen mit Leitungen gegeben. Die Kunststoffdichtungsbahn wird in der Sohle und an kritischen Stellen durch eine Schutzbahn abgedeckt. Weitere Bestandteile können je nach individuellem Objektanspruch ergänzt werden.

Die Abdichtungsbahn wird nach den Vorschriften der Auftraggeber dimensioniert. Es kommen bei Druckwasser beanspruchten Tunnels in der Regel 3 mm dicke Dichtungsbahnen zum Einsatz.

Systemaufbau

- (Felssicherung / Abdichtungsträger)
- Vlies als Ausgleichs- und Schutzschicht
- Sarnafil Kunststoffdichtungsbahn aus FPO (flexiblen Polyolefinen)
- Fugenbänder / Abschottungen
- Schutzschicht für die Kunststoffdichtungsbahn (Schutzbahn als Estrich-Ersatz)
- Verpress- und Injektionsleitungen
- Optionale Ringspaltverpressung der inneren Betonkonstruktion

Ausgleichs- und Schutzschicht

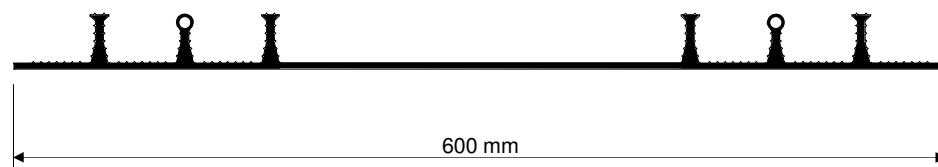
Die Ausgleichs- und Schutzschicht hat sicherzustellen, dass die Abdichtung keine Beschädigung durch die Oberflächenstruktur des Abdichtungsträgers erleidet. In der Regel wird ein PP-Geotextil mit einem Flächengewicht von 500 bis 1200 g/m² eingesetzt. Etwaige länderspezifische Vorschriften und Normen können davon abweichen. Die Ausgleichs- und Schutzschicht wird punktweise befestigt.

Sarnafil Kunststoffdichtungsbahnen

Die Kunststoffdichtungsbahnen werden lose verlegt und auf die bereits applizierten Tunnelscheiben geschweißt. Im Ulmenbereich werden ca. 1 bis 2 Tunnelscheiben pro m² und im Kalottenbereich ca. 2 bis 3 Tunnelscheiben pro m² angeordnet. Die Sarnafil Tunnelscheiben verfügen über eine Sollbruchstelle. Die Überlappungen der Dichtungsbahnen werden thermisch verschweißt. Die Verbindungsnahte werden, wo immer möglich mit Doppelheizkeilschweißgeräten erstellt. Diese Nahte müssen nachträglich mittels Druckluftprüfung auf ihre Dichtigkeit hin geprüft werden.

Abschottungen / Fugenbänder

Die Fugenbänder bestehen aus denselben Rohstoffen wie die Kunststoffdichtungsbahnen. Die größte Effektivität wird mit 6-stegigen Fugenbändern erreicht, da hier auch bei größeren Toleranzen eine Betonüberdeckung des ersten Sperrankers von 5 cm erzielt werden kann. Grundsätzlich empfiehlt sich die Anordnung der Fugenbänder in den Betonierfugen. Damit die Fugenbänder sauber einbetoniert werden können und für das Ausrichten der Stirnschalung ausreichend Spielraum bleibt, sind 600 mm breite Bänder einzusetzen.



Sarnafil Fugenband AFI 600/35 MP mit integriertem Injektionsschlauch

Zum Erreichen der Sperrfunktion werden beim Sarnafil Waterstop System nachdichtbare Fugenbänder eingesetzt. Mögliche Lufteinschlüsse oder kleinere Fehlstellen im Beton können somit nach der Ringspaltverpressung ausgebessert werden. Es ist jedoch nicht möglich, mit dieser Massnahme grössere Hohlstellen infolge mangelnden oder ungenügenden Betonierarbeiten zu verfüllen!

Im Firstbereich werden zusätzliche Nachbetonierrohre angeordnet, damit eine genügende Entlüftung und Verfüllung der Räume zwischen den Sperrankern erreicht wird.



Foto: Entlüftungsleitungen eingebaut, NBS Köln – Rhein/Main

Schutzschicht

In den Bereichen mit hoher Beanspruchung durch Nachfolgearbeiten, muss eine geeignete Schutzschicht über die Dichtungsbahn verlegt werden. Am besten eignet sich eine materialkompatible, 3 mm starke Schutzbahn. Diese wird punktuell auf die Kunststoffdichtungsbahn fixiert, im Überlappungsbereich verschweißt und in den Randbereichen auf die Kunststoffdichtungsbahn resp. die Anschweißblaschen der Fugenbänder geschweißt. Damit wird das Eindringen von Fremdstoffen verhindert.

Injektionskonzept

Bei den Projekten der NBS Köln – Rhein/Main kam unter anderem das Sarnafil Waterstop System zum Einsatz. Hier wurden Injektionsstutzen mit $\frac{3}{4}$ "-Leitungen auf die Abdichtung bzw. Schutzbahn aufgesetzt und diese Leitungen zur Innenseite des Tunnels geführt. Hierdurch wird ein Zugang zum Ringspaltbereich zwischen Kunststoffdichtungsbahn und Innenbeton hergestellt.



Foto: Injektionsleitungen im Sarnafil Waterstop System bei einem Querschlag mit Übergang zum Schacht, NBS Köln – Rhein/Main

Ist ein Tunnelblock nach der Ringspaltverpressung undicht, kann mit Hilfe der in ausreichender Stückzahl vorhandenen Injektionsstutzen das Injektionsgut in den betroffenen Sektor eingebracht werden. Diese Vorsorgemaßnahme minimiert den Aufwand an Kernbohrungen und lässt gleichzeitig das Lokalisieren des eingedrungenen Wassers zu.

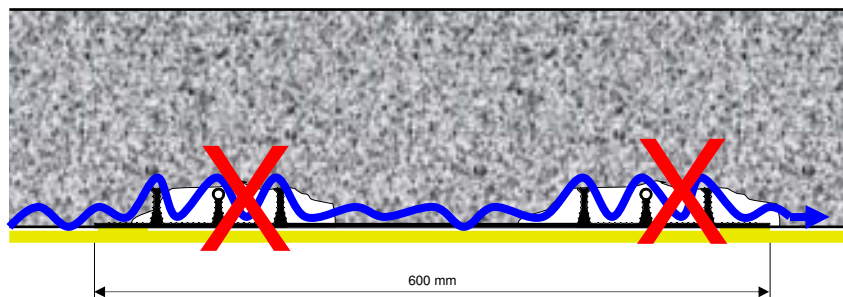
Das Injektionsleitungssystem hat somit zwei Aufgaben:

- 1. Ringspaltverpressung vor dem Aufstau des Wassers**
- 2. Gezielte Injektion bei Fehlstellen nach dem Wasseraufstau**

Nach dem Einstellen der Wasserhaltung können undichte Sektoren erkannt und gezielt nachgedichtet werden. Voraussetzung ist das Fertigbetonieren der Innenschale vor dem Aufbau des Wasserdruckes mittels der Ringspaltverpressung.

Das Sarnafil Waterstop System erlaubt allerdings lediglich eine passive Überprüfung von Fehlstellen, da die Lokalisierung erst durch den Wasseranstieg erfolgt. Die Funktionsfähigkeit des Abdichtungssystems ist im Wesentlichen abhängig von der Qualität des Innenschalenbetons.

Zur Funktionsfähigkeit des Abdichtungssystems gehört die vollständige Einbettung der Fugenbänder im Beton.



Skizze: Fehlstellen an Fugenbändern

Diese Anforderung ist durch das übliche Einbringen des Betons kaum zu erfüllen, da mit Lufteinschlüssen und Schwinden des Betons zu rechnen ist. Wie durch die Umläufigkeiten der untersuchten Tunnel bewiesen wurde, befinden sich Betonester zwischen den Sperrankern der Fugenbänder.

Die Sperrwirkung der Fugenbänder wird aufgrund dieser Kenntnisse beim Sarnafil Waterstop System durch zwei Arbeitsschritte hergestellt:

1. Ringspaltverpressung der Innenschale über die Feldstutzen und somit sattes Einbinden der Sperranker.
2. Injektion der Sperrankerleitungen mit Kunstharz – zum Egalisieren des Schwindmaßes und kleinerer Fehlstellen.

Zur weiteren Fehlerminimierung sind unmittelbar vor jeder Betonieretappe die Lage der Bewehrung sowie die Sauberkeit der Fugenbänder zu kontrollieren. Hier ist das Zusammenwirken der Bauleitung, des Bauunternehmers und des Abdichtungsunternehmers unerlässlich. Die Aufnahme dieser Kontrollen in den QM-Plan sowie die frühzeitige Sensibilisierung der Betonier- und Armierkolonnen hat sich bei der NBS Köln – Rhein/Main als sehr nützlich erwiesen.

Trotz aller Vorsichtsmaßnahmen kann der Beton der Innenschale nicht frei von Fehlstellen eingebaut werden. Befinden sich diese am Abdichtungssystem, entsteht im Gebrauchszustand ein potentielles Risiko, das zu Beschädigungen der Abdichtung führen kann. Sollte die Fehlstelle im Bereich der Fugenbandsperranker vorkommen, kann das Wasser die Sperranker umlaufen und die Abschottung in den Blockfugen ist somit nicht gewährleistet.

Erkenntnisse

Auswertung der Ringspaltverpressung

Die lokalen Minderbetonstärken der Tunnel an der NBS Köln – Rhein/Main waren scheinbar ohne erkennbare Systematik radial und längs verteilt. Es fanden sich Löcher, Lunkern und Grate, es lag sogar die Bewehrung frei. Selbst in der Sohle konnten größere Injektionsmengen verpresst werden. Die extremen Differenzen der Injektionsmengen von benachbarten Blöcken gaben den eindeutigen Hinweis auf die Längsläufigkeit zwischen der Tunnelabdichtung und dem Innenbeton. Die Sperranker der Fugenbänder werden vom Verpressgut übergangen, was bei den dokumentierten Maximaldrücken des Injektionsgutes von 2 Bar auf große Betonester im Fugenbandbereich schließen lässt.



Foto: Betonierfehler im Gewölbe, NBS Köln – Rhein/Main

Gewölbe - Ulme:

Bei den Injektionen der NBS und weiterer Projekte konnte ermittelt werden, dass bei der Ringspaltverpressung nur im Gewölbe- und Ulmenbereich im Mittel 2'485 Liter Verpressgut pro 12.5 m Block verbraucht wurden.

Gesamter Tunnelumfang:

Hingegen bei der Ringspaltverpressung von Sohle und Gewölbe wurden im Mittel 3'423 Liter pro 12.5 m Block benötigt. Diese Feststellung lässt vermuten, dass der gesamte Tunnelumfang mit Fehlstellen durchzogen ist.

Fazit:

Diese Betrachtung ergibt für uns in ihrer Gesamtheit eine Hauptaussage. Pro 12.5 m Blocklänge wurden 2'614 Liter zementöse Injektion zwischen der Abdichtung und dem Innenbeton bei einem maximalen Verpressdruck von 2 Bar eingebracht.

Gesamte Injektionsmengen zur Ringsspaltverpressung von 14 Tunnels

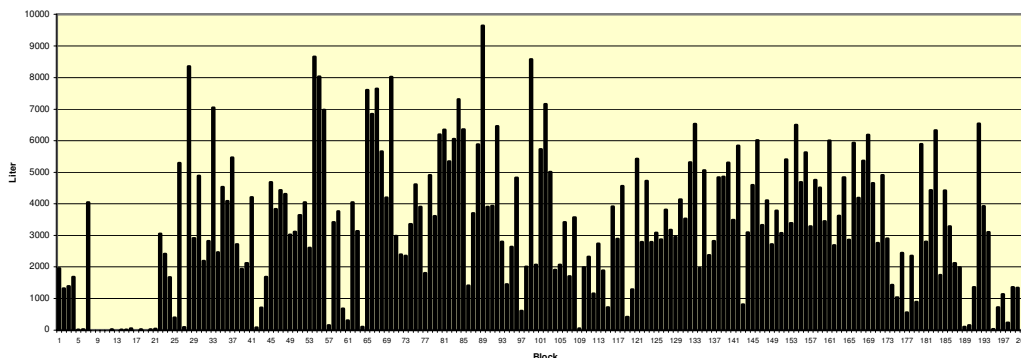
Blockzahl:	973 Stück
Injektionsmenge in Liter:	2'543'719 Liter
Durchschnittliche Injektionsmenge pro Block:	2'614 Liter

Tunnelbeispiel A: Injektionsmengen bei First- und Ulmeninjektion

Tunnellänge abgedichtet:	2'287 m
Blockzahl:	183 Stück
Injektionsmenge:	454'856 Liter
Durchschnittliche Injektionsmenge pro Block:	2'485.5 Liter
Maximum pro Block:	17'783 Liter
Minimum pro Block:	0 Liter

Tunnelbeispiel B: Injektionsmengen bei First- und Sohleninjektion

Tunnellänge abgedichtet:	2'010 m
Blockzahl:	201 Stück
Injektionsmenge:	688'120 Liter
Durchschnittliche Injektionsmenge pro Block:	3'423.5 Liter
Maximum pro Block:	9'635 Liter
Minimum pro Block:	0 Liter



Grafik: Injektionsprotokoll zu Tunnelbeispiel B bei Gesamtinjektion des Ringspaltes

Hieraus ergab sich eine entscheidende neue Betrachtungsweise für die Abdichtungsbestandteile und für die zusätzlichen Maßnahmen im Zusammenhang mit der Dichtigkeit eines druckwasserhaltenden Tunnels:

Das Ausinjizieren des Firstbereichs alleine ist nicht ausreichend und führt nur zu einem Teilerfolg. Der gesamte Tunnel muss vor dem Aufstauen des Wassers über die Ringspaltverpressung fertig betoniert werden. Dann erst ist die gewünschte vollflächige Auflage der Abdichtung auf eine ebene und lunkerfreie Außenseite der Innenbetonschale für den Gebrauchszustand gewährleistet. Die Schottfugenbänder sind dann so mit Beton umhüllt, dass diese ihre gewünschte Segmentierungsfunktion im Fall von Undichtigkeiten der Abdichtung erfüllen können.

Schlussbemerkung

Mit dem Sarnafil Waterstop System haben wir unseren derzeitigen Wissensstand umgesetzt und durch eine Vielzahl von dichten Tunnel in den letzten 4 Jahren die weitgehende Richtigkeit dieser Annahmen bewiesen. Viele weitere Erkenntnisse aus den Erfahrungen können auch von uns nur hypothetisch erklärt werden und es gibt noch genügend Entwicklungsbedarf.

Wir sind uns dessen sehr wohl bewusst und entwickeln uns zusammen mit unseren internationalen Partnern in Bezug auf das Injektionssystem und die Abdichtungstechnik ständig weiter.

Dipl. Ing. Dipl. SV Norbert Komma, Project Manager Sarnafil GmbH

Kontakt: Sarnafil International AG
Tunnel Waterproofing
Industriestrasse
CH-6060 Sarnen

Tel: +41 41 666 99 66
Fax: +41 41 666 97 00
E-Mail: tunnel-waterproofing@sarna.com
www.sarnafil.com

ARGE Abdichtung NBS Köln – Rhein/Main:

- Bauveg Baubetrieb GmbH, Wien
- Gunimperm SA, Castione
- Toro GmbH, Wien
- Sarnafil International AG, Sarnen