
EINE KONTROVERS GEFÜHRTE DISKUSSION: SPRITZBARE ABDICHTUNG IM TUNNELBAU

A CONTROVERSIAL DISCUSSION: SPRAY-APPLIED MEMBRANES FOR TUNNELLING

Stefan **Lemke**, Sika Services AG, Zürich, Schweiz

Seit einiger Zeit werden Spritzabdichtungen auch für den Einsatz im Tunnelbau diskutiert und finden bereits projektbezogen Ihre Anwendung, zum Teil mit widersprüchlichen Erfolgsaussagen. Dieser Beitrag versucht daher mögliche Grenzen dieser neuen Anwendungstechnologie objektiv, jedoch kritisch zu erörtern.

For some time now, spray-applied waterproofing membranes have been reviewed and discussed for the use in mined tunnel constructions. Indeed these have already been applied on some projects, but seemingly with rather inconsistent results. The subject of this publication is to present an objective overview and some potentially critical limitations of this new application technology and approach.

1. Einleitung

Spritzabdichtungen, Flüssigkunststoffe oder Dichtbeschichtungen auf Epoxy-, Acrylat-Polyurea- oder Polyurethanbasis finden schon seit langem ihre Anwendung. Einsatzgebiete sind zum Beispiel Industrieböden, Brückenbeschichtungen, Reparaturen im Bereich von Dachabdichtungen, Abdichtungsschichten in der offenen Bauweise oder Spritzschutzsysteme im Tunnelinnenausbau. Charakteristisch für diese Anwendungsfälle ist die Anforderung an einen geeigneten ebenen, fast porenfreien und trockenen Untergrund, an eine geringe Luftfeuchtigkeit und minimalen Staubeinfluss, an materialabhängig definierte Umgebungstemperaturen, an einen mehrschichtigen, meist horizontalen Auftrag mit entsprechender Trocknungsphase und Schichtdicken, an definierte Haftzugwerte und gegebenenfalls zusätzliche Arbeitsschutzmaßnahmen. Daher sind insbesondere großflächige Abdichtungs- oder Schutzsysteme, welche vollständig lokal-gefertigt werden, in ihrer Anwendung als relativ "komplex" einzustufen und nur für ausgewiesene Fachleute erfolgreich anzuwenden.

Seit einiger Zeit werden Spritzabdichtungen auch für den Einsatz im Tunnelbau diskutiert und finden bereits projektbezogen Ihre Anwendung, zum Teil mit widersprüchlichen Erfolgsaussagen. Ebenfalls werden seitens des Marketings Kosten- und Zeiteinsparungen im Gesamtprojekt der Spritzabdichtung zu Gute geschrieben, obwohl diese auf ganzheitlich-geänderte Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel das Ausbleiben von prognostiziertem Wasseranfall während des Vortriebs und damit letztlich auf eine geänderte Konstruktionsbauweise (Value Engineering) zurückzuführen sind (z.B. Hindhead [1], Metro Lausanne [2]). Zudem werden, im Hinblick auf mögliche Zeit- und Kostenersparnisse, Spritzabdichtungen im internationalen Tunnelbau unter immer kritischeren Randbedingungen ausgeschrieben, häufig jedoch ohne eine nötige, gesamtheitliche Betrachtungsweise.

Dabei lag das ursprüngliche Anwendungsgebiet der Spritzabdichtungen vornehmlich in Tunnelbauten mit geringeren Wasserdichtigkeitsanforderungen, wie zum Beispiel Flucht- und Rettungsstollen, als Alternative zum polymervergüteten Spritzbetonen oder Spritzbetonrezepturen mit reduzierter Wasserdurchdringung gemäß DIN 1048/ EN 12390-8.

Die Vorteile solcher Dichtsysteme gegenüber der lose-verlegten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) werden einerseits in der direkten Applikation von Spritzbetonschichten auf den Dichtungskörper gesehen. Damit verbunden ist der Wegfall kostspieliger Schalungsarbeiten und, bei Verwendung eines faserbewehrten Spritzbetons, Einsparungen für Bewehrungsarbeiten. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass Verbundkonstruktionen, bestehend aus mehrschichtigen Spritzbetonschichten in denen eine Spritzabdichtung eingebettet ist, eine monolithische Tragwirkung entwickeln. Dabei wird die vorläufige Hohlraumsicherung in die Tragwirkung der Schalenkonstruktion mit eingebunden. Auch werden eine mögliche Vermeidung der Wasserhinterläufigkeit zwischen der Spritzabdichtung und den angrenzenden Schichten, eine örtlich-begrenzte Sanierungsmöglichkeit, Zeiteinsparungen sowie eine nahtlose Applikation bei komplexen Tunnelgeometrien als Vorteil gesehen. Theoretisch kann der Einsatz einer gespritzten Abdichtung daher ökonomische Vorteile gegenüber KDB-Abdichtungssystemen und den damit verbundenen Konstruktionsprinzipien liefern. Voraussetzung hierzu ist allerdings die fehlerfreie Applikation des Spritzabdichtungssystems und der Spritzschalen, sowie die Sicherstellung einer dauerhaften Dichtwirkung über den veranschlagten Lebenszyklus des Bauwerks hinweg.

2. Materialien und Qualität

Derzeit existieren verschiedene Varianten der Abdichtung, die verfahrenstechnisch entweder analog zum Spritzbeton an die Tunnellaubung appliziert werden oder in Form eines pastösen Anstrichs auf den jeweiligen Untergrund aufzubringen sind. Die hierbei am häufigsten vorkommenden Materialien bestehen zur Zeit aus nicht-reaktiven (redispersierbaren) latexähnlichen Systemen oder Pasten (z.B. zementösen Pulvermischungen) auf Basis von Ethylvinylacetaten (EVA) oder Acrylaten oder in Form von Reaktivharzen wie Methylmethacrylat (MMA) oder Polyurea.

Hierbei ist festzuhalten, dass sich die Materialeigenschaften der jeweiligen Produktgruppen signifikant voneinander unterscheiden, wie zum Beispiel in der Reaktions-/Aushärtungsgeschwindigkeit, in der Sensibilität gegenüber Untergrundfeuchtigkeit, der chemischen Beständigkeit oder dem Quellverhalten. Auch werden bei manchen Abdichtungssystemen sogenannte Primer benötigt, um die Haftzugeigenschaften mit den angrenzenden Schichten zu verbessern bzw. erst zu ermöglichen.

Aber auch die Materialeigenschaften der einzelnen Produkte variieren mit deren individuellen Stoffzusammensetzungen und deren Schichtdicken [3]. So ist zum Beispiel der Polymer/Zement Anteil bzw. das Wasser/Pulver Verhältnis bei nicht-reaktiven Systemen unter anderem ausschlaggebend für das Wasseraufnahmevermögen [4, 5, 6], was wiederum zu einer signifikanten Reduktion (bis zu 60 % nach 7 Tagen [4, 5]) der mechanischen Kennwerte und Haftzugfestigkeiten mit den angrenzenden Betonschichten führen kann. Zudem erschwert diese Erkenntnis den Transfer von Laborwerten auf die lokal-gefertigte Abdichtungsmembrane unter Baustellenbedingungen und damit auf die Beurteilung zur Anwendungseignung bzw. Dauerhaftigkeit. Folglich erfordert dies eine Verlagerung der Qualitätssicherung des Herstellungsprozesses mit Materialidentifizierung auf den Einbauort bzw. erhöhte Sicherheitsbeiwerte, die mögliche Toleranzschwankungen abfedern. Vor allem im Hinblick auf die klimatischen Bedingungen vor Ort, also Temperatur, Luftfeuchtigkeit etc., die den Erhärtungsprozess des gespritzten Produkts und damit auch seine Dauerhaftigkeit

entscheidend beeinflussen (siehe Bild 2), müssen diese a priori exakt definiert und im Zuge des Herstellungsprozesses kontinuierlich erfasst und dokumentiert werden.

3. Untergrundbedingungen

Der Erfolg derartiger Abdichtungssysteme ist ebenfalls eng mit den Untergrundbedingungen, Applikations- bzw. Umgebungsbedingungen sowie ihrem Anwender (Düsenführer) verbunden, wobei der Untergrund systemrelevant ist. Nichtbeachtung einzelner Parameter kann zu einem signifikanten Materialmehrverbrauch bzw. zu Qualitätseinbußen und letztendlich zum Versagen des Abdichtungssystems führen. Für eine ganzheitliche Betrachtung, mit den dazugehörigen Kosten und Zeitaufwendungen, gehören daher ebenfalls Punkte, wie zum Beispiel, Vorabdichtungsmaßnahmen, Dränagemaßnahmen, Wassermanagement, Spritzbetonrauigkeit und –Güte und ggf. notwendige Ausgleichschichten dazu.

So kann zum Beispiel während der Aushärtungszeit der Abdichtungsschicht bzw. vor Einbau der Innenschale jegliche Art von Wasserzufluss zu einem örtlichen (Bild 1), ggf. flächigen, Ablösen führen. Als Konsequenz entstehen Wasserwegigkeiten zwischen dem Untergrund und der Spritzabdichtung, welche nur bedingt im Nachhinein aufgespürt werden können. Diese Wegigkeiten ggf. in Kombination mit einem möglichen Schrumpfverhaltens der Betoninnenschale können im Weiteren zur vollflächigen Ablösung des auf Verbund basierenden Systems führen und damit dessen Wirksamkeit entscheidend herabsetzen.



Bild 1: Blasenbildung/Örtliches Ablösen der Spritzabdichtung



Bild 2: Spannungsrisse innerhalb der Spritzabdichtung

Andererseits können Vorabdichtungsmaßnahmen, wie zum Beispiel wasserstoppende Spritzmörtel eingesetzt werden, wobei sich hier die Frage eröffnet, wozu es dann überhaupt noch eine zusätzliche Abdichtungsschicht benötigt. Bezüglich der Kosten gäbe es hier kaum Unterschiede [7]: Abdichtungsspritzmörtel mit einer Dicke von 2-3 cm, einem Verbrauch von 70-100 kg/m², kosten ca. 55-80 EUR/m², hingegen Spritzabdichtungen von 3 mm Dicke, einem Materialverbrauch von ca. 7 kg/m² liegen bei etwa 80 EUR/m².

4. Verbundkonstruktion

Eine wesentliche Aufgabe des Abdichtungssystems im Tunnelbau ist der dauerhafte Schutz der statisch relevanten Betonkonstruktion vor dem Kontakt mit dem Bergwasser und seinen gegebenenfalls betonaggressiven Bestandteilen. Dies gilt gleichwohl für monolithische bzw. einschalige Spritzbetoninnenschalen, wobei der Abdichtungsträger bzw. die Hohlraum-sicherung bei in geschlossener Bauweise errichteten Konstruktionen dem Wasserangriff vollumfänglich ausgesetzt sind [8].

Hieraus ergeben sich weitere kontrovers diskutierte Punkte bezüglich eines Verbundsystems und dessen Untergrundanforderungen im Zusammenhang mit einer permanenten, außenliegenden Spritzbetonschale als Hohlraumsicherung [5, 10, 11, 12, 13]:

- Mögliche Qualität und dessen Gewährleistung
- Verantwortungsbereiche und Qualitätssicherung unter Vortriebsbedingungen
- Mögliche wasserführende Risse
- Wassersättigung der außenliegenden Spritzbetonschale, chemische Beständigkeit und Dauerhaftigkeit
- Mögliche Opferschichten bzw. Ausführungstoleranzen.

Weiterhin besitzt die Spritzbetonschale, die während des Vortriebs hergestellt wird, zahlreiche „Fugen“. Sie wird noch während des Erhärtens durch das Gebirge belastet, wodurch örtlich zwangsläufig Risse entstehen. Aus diesem Grund wird die vorläufige Spritzbetonschale im Allgemeinen und insbesondere bei Anfall von Gebirgswasser und im Grundwasser nicht als endgültige Tunnelauskleidung angesehen [14], auch wenn der Werkstoff selbst in einer wasserundurchlässigen Qualität hergestellt werden kann.

Zudem sind wegen der vorhandenen großen Schwindneigung, der Gefahr von Spritzschatten und der Problematik der wasserundurchlässigen Ausbildung von Dehnungsfugen (Einspritzen von Fugenbändern) Spritzbetonschalen in der Regel als wasserdruckhaltende Konstruktionen nicht zu empfehlen [11, 14, 20, 21, 23].

Auch die Versuche von Holter [5] untermauern die getroffenen Annahmen der ÖBV [8] dass die außenliegende Spritzbetonschale als „wassergesättigt“ angenommen werden muss, d.h. dass der Abdichtungsträger dem Wasserangriff vollumfänglich ausgesetzt ist, zumindest auf längere Sicht. Holter [5] sieht einen zusätzlichen möglichen Grund hierfür in der Kapillarität des Spritzbetongefüges.

Für die Spritzabdichtung folgt hieraus:

- Die Spritzabdichtung kommt über die gesamte Fläche in Kontakt mit dem Bergwasser bzw. mit dessen Chemismus.
- Während der Nutzungsphase unterliegt die Spritzabdichtung denselben chemischen und physikalischen Umwelteinflüssen wie eine lose-verlegte Kunststoffdichtungsbahn. Hinzu kommt bei der Verbundbauweise eine statische Relevanz. Entsprechende materialspezifische und systemrelevante Eigenschaften sind daher über die Nutzungsdauer aufrechtzuerhalten und durch geeignete Laborprüfungen nachzuweisen.
- Der systemrelevante Haftverbund der Spritzabdichtung mit den angrenzenden Schichten unter Bergwassereinfluss muss ebenfalls dauerhaft sein, zumindest für eine Verbundkonstruktion.
- Wenn der Abdichtungsträger nicht als endgültige Tunnelauskleidung eingestuft werden kann, so kann der Haftverbund zwischen Abdichtungsträger und Spritzabdichtung ebenfalls nicht dauerhaft sein.

Die Forderung nach einer bestimmten Haftzugfestigkeit der Spritzabdichtung auf den angrenzenden Schichten rührt einerseits aus den Anforderungen gegenüber der Vermeidung von Wasserumläufigkeiten, andererseits aus den Anforderungen der Verbundkonstruktion und lässt sich zahlenmäßig nicht eindeutig festlegen [6]. Beide Anforderungen lassen hohe Haftwerte als wünschenswert erscheinen, auch im Hinblick auf die Qualitätssicherung unter Einbaubedingungen bzw. erhöhte Sicherheitsbeiwerte. Andererseits wird aber die an sich große Materialbruchdehnung der Dichtungsschicht in ihrer Wirksamkeit durch ein vollflächiges Verkleben stark eingeschränkt. Das führt bei Entstehen größerer Risse örtlich begrenzt zu sehr hohen Zugspannungen in der Dichtungsebene und ggf. zur Zerstörung der Dichtungshaut. Um dies zu verhindern, dürfte die Haftung also nur so groß sein, dass ein rechtzeitiges Ablösen der Dichtschicht beiderseits des Risses zur Verteilung der Dehnbeanspruchung möglich ist – eine Forderung, die jedoch derjenigen zur Verhinderung von Wasserumläufigkeiten widerspricht [15].

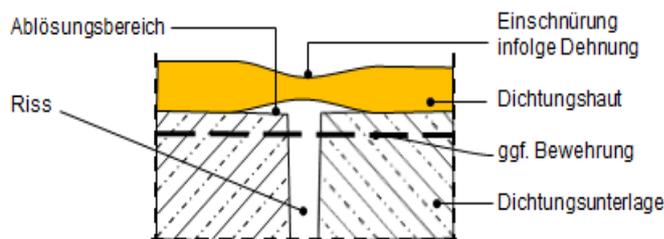


Bild 3: Anzustrebendes Verhalten einer vollflächig aufgeklebten Kunststoffolie [15]



Bild 4: Mehrachsiges Materialdehnverhalten einer KDB

Für das Abdichtungssystem folgt hieraus:

- Möglicher Ablösebereich (Delamination) führt zu beidseitiger Wasserwegigkeit, wobei sich diese Problematik bei höheren Wasserdrücken verschärft (Bild 3)
- Die Spritzabdichtung muss kontinuierlich-homogen sein, damit zumindest die innenliegende Betonstruktur permanent geschützt bzw. gedichtet ist
- Mindestschichtdicke im Verhältnis zur Untergrundeinheit (Korngröße) und mehrschichtiger Spritzauftrag zur Vermeidung von Spritzschatten, Luftporen, etc. zur Erzielung einer kontinuierlich-homogenen Dichtungsschicht (Qualitätssicherung)
- Vorgabe von Mindest- und Maximal-Haftzugwerte
- Rissbreitenbegrenzung.

Unter Berücksichtigung des zuvor genannten Punktes eines örtlichen Ablösens der Spritzabdichtung bei Wasserzufluss während des Einbaus bzw. infolge von Schwindprozessen, lässt sich damit schlussfolgern, dass die Spritzabdichtung nicht völlig hinterlaufsicher auszubilden ist. Damit folgt aber auch, dass eine mögliche Sanierung, zum Beispiel durch eine Rissinjektion der Innenschale, nicht örtlich beschränkt werden kann. Hinzu kommt, dass die Innenschale, zum Beispiel mögliche (Mikro-) Risse durch Schwindprozesse aufweist, welche sich durch eine nachträgliche Wasserdruckbelastung erst öffnen. Belege hierfür lassen sich bei Greensted [16] finden, welcher erhebliche Sanierungsprobleme bei einem Tunnel mit Spritzabdichtung und Spritzbetoninnenschale bei einem Wasserdruck von bis zu 10 m dokumentiert. Die Verpresskosten belaufen sich hierbei auf 580 US\$/m², bei zahlreichen wasserführenden Rissen, 12 monatigem Bauverzögerung und anhaltenden Wartungsarbeiten.

Systembedingt ist die gespritzte Abdichtung generell nicht ohne Zusatzmaßnahmen für dränierter Tunnel geeignet, da ein vollflächiger Verbund mit dem Abdichtungsträger keine ausreichende Wasserwegigkeit zulässt. Als Konsequenz ist der lokale Aufbau von Wasserdruckspitzen zu erwarten bzw. das Gesamtsystem „wasserdruckhaltend“ auszulegen [17], welches einerseits ein erhöhtes Abdichtungsrisiko darstellt, andererseits ggf. statisch einen „runderen“ Tunnelquerschnitt [12], einen erhöhten Bewehrungsgrad und/oder eine dickere Innenschale erfordert.

Im Falle eines druckwasserhaltend, abgedichteten Tunnels wird nach der klassischen Spritzbetonbauweise zwischen dem Spritzbeton und der Betoninnenschale ein lose-verlegtes Abdichtungssystem, bestehend aus einem Geotextil und einer Kunststoffabdichtung, eingebaut. Einerseits wird hierdurch die Übertragung von Schubspannungen vermieden, andererseits werden durch diese Maßnahme mögliche Schwindrisse in der Innenschale minimiert, was zu einer Verbesserung der Systemdichtigkeit führt (Redundanz). Da sowohl der Spritzbeton als auch das Vlies wasserdurchlässig anzunehmen sind und der verbleibende Ringspalt ebenfalls wasserführend ist, bildet sich im Vlies/Ringspalt der Wasserdruck aus. Dieser ist radial auf die Tunnelinnenschale anzusetzen, d.h. die Resultierende steht senkrecht auf die Tunnelauskleidung.

Bezüglich der Verbundbauweise mit einer Spritzabdichtung wird teilweise der Ansatz verfolgt, dass der Wasserdruck vollständig auf die Außenschale anzusetzen ist und dies somit zu einer Reduzierung der Innenschalenstärke bzw. Dickenreduktion der Gesamtkonstruktion führt [19, 23]. Als Grund wird hierfür die Hinterlaufsicherheit der Spritzabdichtung mit der äußeren Spritzbetonschale aufgeführt. Voraussetzung ist für diesen Ansatz allerdings, dass a) die äußere Spritzbetonschale als permanente Tunnelauskleidung gebaut und eingestuft wird, b) dass der Haftverbund dauerhaft ist, c) dass die Betonmatrix dicht ist und d) dass die Dichtschicht die Risse über den Haftverbund mit der Außenschale begrenzt bzw. verschließt. Die Dichtschicht sollte das System folglich nicht nur abdichten können, sondern auch in der Lage sein, eventuelle Risse kraftschlüssig zu verschließen und Schubkräfte zu übertragen [9]. Somit kann die Wasserausbreitung innerhalb der Trennfläche verhindert bzw. zumindest minimiert werden, was den o.g. Ansatz rechtfertigen würde.

Hieraus ergeben sich weitere kontrovers diskutierte Punkte bezüglich eines Verbundsystems im Zusammenhang mit einer Spritzabdichtung:

- Kunststoffe kann im Allgemeinen unter permanenter Last „kriechen“
- Die Materialviskosität bzw. die Kohäsion ist u.a. abhängig von der Schichtdicke, dem Polymeranteil, dem Quellverhalten und der Wasseraufnahme [3, 4, 22]
- Erfolgt der Haftverbund zwischen den Schichten chemisch und/oder mechanisch über die Oberflächenrauigkeit [6, 23]?
- Die Rissüberbrückungsfähigkeit ist eine Funktion aus Materialdehnung, Reißfestigkeit und Material- bzw. Schichtdicke
- Risse und Fugen erfordern ein mehrachsiges Materialdehnverhalten (Bild 4)
- Für ein kraftschlüssiges Verkleben und zur Übertragung von Schubkräften werden jedoch relativ steife Materialien benötigt, d.h. eine Forderung, die sich mit den o.g. Punkten widerspricht
- Bei einer wassergesättigten Außenschale ist der volle Wasserdruck auf die Dichtschicht bzw. auf die Innenschale anzusetzen [23].

Letzterer Punkt wird ebenfalls durch den Belastungsansatz bei schildvorgetriebenen Tunnel in klüftigen Fels unterstützt, welcher Parallelen zur Verbundbauweise mit einer Spritzabdichtung erkennen lässt. Hierbei wird ebenfalls der volle Wasserdruck auf die

Innenschale angesetzt, obwohl der Ringspalt zwischen der Ausbruchslaibung und der Außenwandung des Tübbingringes mit Mörtel verpresst wird und sich hier, zumindest theoretisch, kein Wasserdruck ausbilden kann. Als Grund dafür führt Wittke [18] die Ausbildung von Wasserdruck in den Trennflächen unmittelbar neben der Ausbruchslaibung an. Voraussetzung ist für diesen Ansatz allerdings, dass der Abstand der wassergefüllten Trennflächen klein im Vergleich zum Tunneldurchmesser ist.

Ein anderer Ansatz der teilweise verfolgt wird, ist eine bedingte Lastabtragung des Wasserdrucks durch die Außenschale. Als Grund dafür wird genannt, dass sich langfristig zwar Wasserwegigkeiten zwischen den Schichten bilden und dass diese auch örtlich direkt auf die Innenschale wirken, aber dass es immer noch eine genügend große Fläche von einem Verbundverhalten gebe, d.h. das sich die Innenschale an der Außenschale „aufhängt“ und somit, zumindest theoretisch, es zu einem Teilabtrag der Wasserdruckbelastung kommt.

Im Crossrail Projekt/UK, zum Beispiel, wurde ein konservativer Ansatz gewählt (Doppelschaliger-Ausbau mit einer 75 mm dicken Spritzbetondichtsicht, einer Spritzbetonaußenschale, einer Dichtungshaut und einer Spritzbetoninnenschale) und der volle Wasserdruck auf die Innenschale angesetzt [12, 23], wobei die annähernd runde Tunnelgeometrie und die Geologie (London Clay) sich hier eher günstig auf die Querschnittsberechnungen auswirkten. Auch ermöglicht dieser Ansatz einen Wechsel des Abdichtungssystems, zum Beispiel bei Wasserzutritten oder größeren Feuchtstellen, auf eine herkömmliche lose-verlegte Kunststoffdichtungsbahn bzw. auf die Installation von örtlich-verlegten Drainagematten, die u.U. zu einer Strukturveränderung/Schwächung der Verbundkonstruktion führen.

5. Zusammenfassung

Die Vorteile spritzbarer Dichtsysteme gegenüber der lose-verlegten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) sind einerseits in der direkten Applikation von nachfolgenden Spritzbetonschichten direkt auf den Dichtungskörper zu sehen. Damit verbunden ist der Wegfall kostspieliger Schalungsarbeiten und, bei Verwendung eines faserbewehrten Spritzbeton, Einsparungen für Bewehrungsarbeiten. Als Anwendungsbereiche werden vornehmlich kurze Tunnellängen, Verschneidungsbereiche, Aufweitungen sowie Querschläge gesehen oder Bereiche mit geringeren Wasserdichtigkeitsanforderungen, wie zum Beispiel Flucht- und Rettungsstollen, als Alternative zum polymervergüteten Spritzbetonen oder Spritzbetonrezepturen mit reduzierter Wassereindringung gemäß DIN 1048/ EN 12390-8. Dabei sind die Übergänge von einem Dichtsystem zum anderen jedoch häufig „herausfordernd“ bzw. erst gar nicht wasserdicht auszubilden. Hinzu kommt dass die Materialkompatibilität zwischen den Dichtsystemen sowie die unterschiedliche Systemwirkungsweise (z.B. vollflächiger Verbund vs. lose-verlegt) häufig eine Kombination nicht zulassen.

Andererseits ist das vor Ort gefertigte Dichtsystem mit all seinen Systemkomponenten komplexer in der Handhabung als in den meisten Marketingbroschüren beschrieben. Im Allgemeinen kann auch eine wirkliche Kosten- bzw. Zeitersparnis gegenüber einer lose-verlegten KDB unter einer ganzheitlichen Betrachtungsweise bei gleichlautenden Dichtigkeitsanforderungen nicht festgestellt werden, zumal eine Verschiebung des Verantwortungsbereichs vom Anwender/Lieferanten auf den Hauptunternehmer (z.B. für die Untergrundanforderungen oder Luftfeuchtigkeit während der Applikation/ Aushärtungszeit) erheblichen Spielraum für Nachträge und Garantieablehnung generiert. Folglich erfordert diese eine erhöhte Qualitätssicherung mit Materialidentifizierung und erhöhten Sicherheitsbeiwerten.

Generell ist die Verbundkonstruktion mit einer integrierten Spritzabdichtung z.Zt. noch ein idealisierter Ansatz, da es noch zu viele Unbekannte und offene Fragen gibt. Als

Achillessehne ist nicht nur die mittige Lage der Dichtungshaut zu sehen, sondern auch der möglicherweise wassergesättigte Untergrund. Ebenfalls lassen sich mögliche Veränderungen während der Bauphase, zum Beispiel Wasseranfall, mit diesem Ansatz nur bedingt „flexibel“ lösen.

Aufgrund der fehlenden Redundanz des Gesamtsystems, wie sie zum Beispiel in der ZTV-ING/2007 bzw. in der Rili 853/2011 gefordert wird, kann eine spritzbare Abdichtung nur bei geringen Wasserdrücken eingesetzt werden. Praxisbeispiele zeigen, dass mögliche Grenzen bei ca. 5-10 m Wassersäule liegen. Dies scheint auch im Hinblick auf mögliche Untergrundanforderungen plausibel zu sein, da bei Projekten mit hohem Wasseranfall mit vermehrten Wasserzutritten und Feuchtstellen während der Bauausführung zu rechnen ist.

6. Literatur

- [1] Dimmrock, R.:
Design and construction of the A3 Hindhead Tunnels. Paper presentation to ICE Northwest Division. Manchester University, April 2010.
- [2] Anagnostou, G.; Ehrbar, H.:
The Lausanne Metro m2. Tunnelling Switzerland, FGU, Swiss Tunneling Society STS & VDF Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2013, pp. 141-149.
- [3] Su, J., Bloodworth, A.:
Experimental and Numerical Investigation of Composite Action in Composite Shell Linings. Proceedings Seventh International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Sandefjord, Norway, 16.- 19. June 2014, pp. 361.
- [4] A Verani, C.:
Composite solution. Tunnels & Tunnelling International, May 2009, pp. 48-49.
- [5] Holter, K.G., Nilsen, B., Langås, C., Tandberg, M.K.:
Testing of Sprayed Waterproofing Membranes for Single Shell Sprayed Concrete Linings in Hard Rock. Proceedings Seventh International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Sandefjord, Norway, 16.- 19. June 2014, pp. 208.
- [6] Lemke, S.:
A Blessing or Pandora's box – Spray applied membranes: An objective review. Proceedings Seventh International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Sandefjord, Norway, 16.- 19. June 2014, pp. 267-281.
- [7] Modetta, F.; Holter, K.G.; Loser, P.:
Cost-effective rehabilitation of masonry lined rail tunnels with sprayed concrete and sprayable waterproofing membrane. Amberg Engineering AG, Regensdorf, Switzerland 2008.
- [8] Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV):
Richtlinie Tunnelabdichtung. Dezember 2012. www.bautechnik.pro.
- [9] Lukas, W.; Niederegger, C.; Tomaseth, D.; Brandenberger, R.:
Praxistauglichkeit zement-gebundener, aufspritzbarer Dichtschichten für Tunnelbauwerke. Zement + Beton 4/2004, Seite 24-26.
- [10] Su, J.:
Design of sprayed concrete lining in soft ground – a UK perspective, WTC 2013.
- [11] Kusterle, W.; Jager, J.; John, M.; Neumann, C.; Rock, R.:
Spritzbeton im Tunnelbau. Beton Kalender 2014, Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7. 2014 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Seite 359-361/ 370-371.
- [12] World Tunnelling:
In the thick of it. June 2014, pp.19-20.
- [13] Kaufmann, J.P.:
Durability performance of fiber reinforced shotcrete in aggressive environment. Proceedings of the World Tunnel Congress 2014 – Tunnels for a better Life. Foz do Iguaçu, Brazil.

- [14] Empfehlung des Arbeitskreises "Betoninnenschalen" des Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen (DAUB):
Betonauskleidung für Tunnel in geschlossener Bauweise. VGE, Taschenbuch für den Tunnelbau 2002, Seite 319-320.
- [15] Girnau, G.; Haack, A.:
Tunnelabdichtungen. Forschung + Praxis (6), STUVA, 1969, Seite 67-72.
- [16] Greensted, S.; Fernandez del Olmo, P.:
Sprayed Polymer Waterproofing Membranes for SCL Tunnels & Shafts: Designing for Dry. Presentation at 7th Andean seminar tunnels and underground works innovations in design, construction and operation of tunnels, Bogota, 28.-29. Nov., 2012.
- [17] Holter, K.-G.; Nermoen, B.:
Permanent Waterproof Tunnel Lining Based on Sprayed Concrete and Spray-Applied Double-Bonded Membrane. ITA-AITES, 37th World Tunnel Congress, 21.-26. May, 2011, Helsinki, Finland.
- [18] Wittke, W.; Erichsen, C.; Wittke-Schmitt, B.:
Ansatz von Gebirgs- und Wasserdruck bei der Bemessung der Auskleidung von Tunneln in klüftigem Fels. VGE, Taschenbuch für den Tunnelbau 2005, Seite 67-88.
- [19] Pickett, A.; Thomas, A.H.: Where are we now with sprayed concrete lining in tunnels? Tunnelling Journal, April/May 2012, pp. 35.
- [20] Pöttler, R.; Klapperich, H.:
Single-shelled shotcrete lining aspects and application in central Europe, 3.5 special load cases - water loads. Shotcrete for underground support VIII, 8th International conference, Sao-Paulo, 1999, pp. 174-191.
- [21] Heimbecher, F.; Decker, W.; Faust, H.-G., Bast:
Einsatzbereich endgültiger Spritzbeton-konstruktionen im Tunnelbau. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Heft B 46, Bergisch-Gladbach, 2004, pp. 9- 20.
- [22] Šima, J; Krcmar, O.; Matzner, R.; Dvorak, J; Chama, L.:
Spray-applied waterproofing membrane Masterseal 345- successful alternative solution. Tunnel magazine of the Czech and Slovak Tunnelling Association ITA-AITES, 20. ročník - c. 2/2011, pp. 10.
- [23] Thomas, Alun, H.; Pickett, Andrew, P.:
Composite Shell Linings. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton- Technologie 2012, Proc. der Spritzbeton-Tagung, 12.1 + 13.1. 2012, Alpbach/ Tirol, Eigenverlag, 2012.

Zum Autor

Dipl.-Ing. Stefan Lemke

Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen, EMBA an der Universität Zürich,
Corporate Market Field Manager Infra-Waterproofing bei der Fa. Sika Services AG, Schweiz.
lemke.stefan@ch.sika.com