
ABDICHTUNG MIT SPRITZBETON IN EINSCHALIGER BAUWEISE

WATERPROOFING WITH SPRAYED CONCRETE IN SINGLE SHELL CONSTRUCTION

Dipl.-Ing.(FH) Klaus **Bonin**, Wacker Chemie AG, Burghausen, Deutschland

Spritzbeton wird bei Tunnelbauwerken zur Erstsicherung angewendet, eine darüber hinausgehende Funktion ist in der Regel nicht gefordert. An zwei Beispielen wird die erfolgreiche Abdichtung von Tunnelbauwerken mit polymer modifiziertem Spritzbeton beschrieben. Im ersten Beispiel handelt es sich um einen Minenzugangstollen mit Wasserandrang im Gebirge. Die Fläche wurde nach zweijähriger Standzeit besichtigt und zeigt die abdichtende Eigenschaft. Im zweiten Beispiel wird die Sanierung eines Druckwasserstollens beschrieben, dabei wurde der Wasserverlust in den Berg reduziert. Eine Begehung nach zweijährigem Betrieb zeigte eine intakte Spritzbetonschale. In den beiden betrachteten Tunnelabschnitten wurde durch Polymermodifizierung eine Abdichtung erzielt.

Shotcrete is used in tunnels for the initial rock support, a function beyond this is usually not required. Two examples of the successful waterproofing of tunnel construction works will be described. In one case, there is a mine access tunnel with water pressure from the rock mass and in the second example, the sealing of a pressurized water tunnel is described. Due to polymer modification, a waterproofing was achieved. The areas sprayed on were inspected after two years of use and show in many parts the original sealing properties. The second example is the renovation of a pressurized water tunnel described, where the water loss was reduced into the mountain. An inspection after two years of operation showed an intact shotcrete shell.

1. Einleitung: Anforderungen an Spritzbeton

Beton schwindet, das ist eine der Grundeigenschaften, die auch bei der Errichtung von Spritzbetonschalen beachtet werden muss. Unter anderem beeinflussen der Wasserzement-Wert und die durch die Luftfeuchtigkeit beeinflusste Austrocknung das freie Schwinden [1]. Weitgehend unberücksichtigt bleiben bei der klassischen Betrachtung des Schwindens von Spritzbeton die Haftung auf dem Untergrund und der Verbund des Spritzbetons mit dem Fels [2]. Beton für sich gesehen ist bereits ein Verbundbaustoff aus Zuschlag, Zementstein und Bewehrungsstahl. Verbundprüfungen, die diese Eigenschaften berücksichtigen, sind eher die Ausnahme. Eine Ausnahme sind beispielsweise die Festlegungen in EN 1504, in der die Instandsetzung von Betontragwerken geregelt wird. In Teil 3 werden mehrlagige Betonverbundstoffe beschrieben und geregelt. Im Gegensatz zu einem gegossenen Betonkörper der frei schwinden kann, ist in der beschriebenen Norm das Schwinden durch den Scherverbund behindert. In der Betoninstandsetzung spielt das behinderte Schwinden eine entscheidende Rolle. Zur praxisgerechteren Abbildung des Widerstands gegen Schwindspannungen hat man in der Norm die Scherprüfung durch eine Haftzugprüfung ersetzt. Eine Reprofillierungsmasse, die auf einen Altbeton aufgebracht wird, muss auch eine ausreichende Haftzugfestigkeit aufweisen [3]. Diese Erkenntnisse zur Betrachtung des Baustoffverbundes können wir teilweise in die Spritzbetonanwendung übertragen. Fels und Spritzbeton, sowie gegebenenfalls aufgebrachte Spritzmembranen oder Schalbeton, bilden bei der einschaligen Tunnelbauweise einen Verbund [4]. Die spritzraue Oberfläche der Erstsicher-

ung genügt, um einen guten Verbund von Spritzbetonschichten zu ermöglichen [5], so dass das Betonsystem als monolithisch betrachtet werden kann. Die Frage die sich stellt ist, ob diese für jedes Bauwerk erforderlich ist oder ob in manchen Fällen eine einschalige Abdichtung genügt. Wirtschaftliche Erfordernisse machen die einschalige Tunnelbauweise immer interessanter.

2. Wasserundurchlässigkeit von Tunnelbauwerken

Tunnelbauwerke sollen entsprechend ihrer Nutzung dicht sein. Die Betrachtung der Dichtigkeit erfolgt länderspezifisch in Leckwasserraten [6]. In allen Festlegungen versucht man Klassen abzubilden und Einteilungen zu schaffen, die es ermöglichen, das entsprechende Abdichtungsverfahren vorzuschlagen bzw. auszuführen. Bei der Entwicklung von Baustoffen bleibt eine grundsätzliche Fragestellung: Bewertet man eine Probe oder ein Bauteil. Proben haben den Vorteil, dass sie unter maximal kontrollierbaren und reproduzierbaren Bedingungen erstellt werden können. Bei erfolgreicher Prüfung wird die Probe des Spritzbetons als dicht bezeichnet [4]. Letztendlich ist es dann aber doch das Bauwerk, welches die geforderte Dichtigkeitsanforderung erfüllen muss.

Große Bauteile wie einen Tunnel zu prüfen ist weit schwieriger, da sehr viele Randbedingungen Einfluss nehmen. Insbesondere unterliegt ein eingebauter Spritzbeton nicht nur rein stofflichen Schwankungen. In erster Linie sind Maschinenteknik, Spritzverfahren, klimatische Bedingungen und der Düsenführer selbst zu berücksichtigen. Diese Faktoren sind mitverantwortlich für die ausgeführte Spritzbetonqualität. Eine Möglichkeit, um die Qualität der Applikation zu verbessern, ist die Schulung der Düsenführer. Der sogenannten Düsenführerschein oder die "Nozzelman Certification" ist ein mögliche Qualifizierungsmaßnahme, denn der Faktor Mensch beeinflusst die Qualität gleichermaßen wie die verwendeten Materialien [7,8].

3. Haftzugfestigkeit und Rissverhalten im Baustoffverbund

Die Haftzugfestigkeit ist ein Parameter, der den Baustoffverbund beschreibt. In Tabelle 1 sind die typischen Werte der Haftzugfestigkeit nach EFNARC [7] im Vergleich zur EN 1504-3 aufgeführt. Interessant ist die EN 1504-3 insbesondere dadurch, dass Schwinden nicht als einzelne Eigenschaft gesehen wird, sondern der Verbund geprüft wird, das Verkleben und Verzahnen von Untergrund mit einer Beschichtung.

Tab. 1: Haftzugfestigkeit Spritzbetone im Vergleich zu Anforderungen bei der Instandsetzung von Betontragwerken [3,7]

Art der Haftung	Minimale Haftzugfestigkeit auf Beton [MPa]	Minimale Haftzugfestigkeit auf Fels [MPa]
EFNARC Tab. 9.5.1		
nicht tragend	0,5	0,1
tragend	1,0	0,5
EN 1504-3 Tab. 3		
statisch nicht relevant	0,8	-
statisch relevant	2,0 - 1,5	-

Bei der Spritzbetonanwendung müssen bezüglich der auftretenden Spannungen auch Faktoren wie Beton- und Umgebungstemperatur berücksichtigt werden [9]. Die fortschreitende Festigkeitsentwicklung aber auch die Abkühlung rufen in Abhängigkeit von Umgebungs- und Untergrundtemperatur Schubspannungen hervor. Bei Auftragsstärken deutlich größer 10 cm erhöht der Spritzbetonbeschleuniger die Temperatur des wenige Minuten alten Betons.

Aufgabe der Betonentwicklung ist es, die Festigkeitsentwicklung, Schubspannungen, thermische Spannungen, Haftzugfestigkeit und Schwinden so in Einklang zu bringen, dass es nicht zum Riss kommt. Die in der ÖVBB-Richtlinie „Spritzbeton“ vorgegebenen Festigkeitskurven J1 bis J3 werden vielfach angewendet [10]. Rezepturen mit hoher Frühfestigkeit des J3 Bereichs sollten nur in speziellen Fällen zur Anwendung kommen [11], denn durch die hohe Reaktivität der Bindemittel treten zwangsläufig auch höhere Spannungen auf. Zusätzlich ist mit der Alterung noch das physikalische Schwinden des Zementsteins zu beachten. Die Summe der Kräfte führt zu Formänderungen und, bei Überschreitung der Haftkräfte, zum Riss. Das Schwinden und die damit verbundene Rissneigung kann auf viele Faktoren zurückgeführt werden, im Wesentlichen sind es der Wasser-Zement-Faktor bzw. Wassergehalt, die Festigkeitsentwicklung sowie Verbundeigenschaften (Kohäsions- und Adhäsionskräfte) und die Ebenheit des Untergrundes.

4. Polymermodifizierter Spritzbeton

Die aufgeführten Beispiele wurden unter gleichen Bedingungen, d.h. gleiche Untergründe, Untergrundvorbehandlungen, Maschinen, Betonrezepturen hergestellt und sind somit innerhalb des Beispiels vergleichbar.

Spritzbeton, der polymermodifiziert ist, hat abdichtende Eigenschaften, wie die folgenden Anwendungsbeispiele zeigen. Durch diesen Zusatz wird die Rissneigung herabgesetzt und dadurch die Dichtigkeit erhöht. Bei dem in den Beispielen verwendeten Polymer handelt es sich um ein Copolymer bestehend aus Vinylacetat und Ethylen / VaE. VaE Copolymere werden seit vielen Jahrzehnten in der Bauchemie eingesetzt, insbesondere zur Verbesserung der Haftung und Beständigkeit.

Betrachtungen bezüglich der Absenkung des E-Moduls sind nicht Bestandteil der Untersuchungen, da sich die betrachteten Ergebnisse auf Erfahrungen aus Baustellen beruhen [13].

Das Errichten eines Bauwerkes ohne Riss das somit wasserundurchlässig ist, ist die eigentliche Herausforderung für den wasserdichten Spritzbeton. Bauteilprüfungen können nur einen Teil der Anforderungen abbilden, da ein Tunnel, insbesondere innerhalb der ersten Wochen, zusätzlichen Belastungen ausgesetzt ist. Die Vermeidung von Rissen jeglicher Art bringt das Bauwerk dem Ziel: der dichten, einschaligen- oder monolithischen Bauweise näher. Der Einsatz von polymeren Bindemitteln reduziert die Auswirkungen des Schwindens durch verbesserten Haftverbund und kohäsive Kräfte im Beton selbst. Man erhält eine schubfeste Verbindung. Auf Bild 1 ist ein Riss mit einer Rissbreite von 0,6 mm im Referenzbeton, der ohne Polymer gefertigt wurde, zu erkennen. Appliziert wurde auf eine bruchrauen angefeuchtete Kalksteinplatte von 0,5 x 0,5 m². Die Vergleichsproben mit Polymer hatten keine oder maximal 0,2 mm breite Risse.

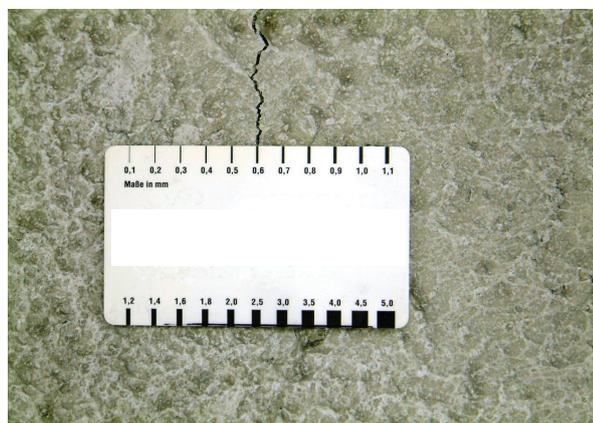


Bild 1: Rissbild einer erhärteten Spritzbetonprobe ohne Polymer (Foto: Wacker Chemie AG)

Bei Spritzbetonen ist die klassische Betrachtung von Schwinden um die Prüfung der Haftung bzw. des Haftverbundes zu erweitern. Schwindkräfte, die im behinderten Schwinden zu Zugkräften führen, werden bei gutem Haftverbund durch die Adhäsionskraft in den Untergrund abgeleitet. Die Summe der Kräfte bleibt erhalten, denn nur bei guter Haftung kann man einen Verbund auch als Werkstoffverbund bezeichnen. Die Verbesserung der Haftzugfestigkeit kann zur Reduzierung der Rissneigung beitragen. Die Verwendung von polymeren Bindemitteln ist bei Polymer Cement Concrete (PCC's) etabliert und die Reduzierung des E-Moduls und die Erhöhung der Rissöffnungsenergie werden im Versuch beschrieben [13].

5. Anwendungsbeispiel 1: Anwendung im Minenzugang / Clara-Stollen

Die erfolgreiche Anwendung zur Abdichtung mit polymermodifiziertem Spritzbeton im Clara-Stollen des Salzbergwerks Stetten (Deutschland) wurde 2009 während der Spritzbeton-Tagung 2009 vorgestellt [14]. In der Spritzbetonrezeptur wurden 7,5 % flüssiges Polymer (3,8 % fest) eingesetzt. Der Neubau des Stollens wurde im Sprengvortrieb errichtet und Spritzbeton zur Erstsicherung ausgeführt.

Die Spritzbetonschichtdicke betrug im Mittel 20-30 cm. Ursprünglich wurden die Versuche zur Untersuchung der Rückprallreduzierung durchgeführt. Im Laufe der Arbeiten wurde die abdichtende Eigenschaft bemerkt und diese wird fortlaufend dokumentiert.

Tab. 2: Frischbetoneigenschaften und Zylinderdruckfestigkeiten gemessen an Bohrkernen (bxh) 100 mm x 200 mm

	Referenzbeton (0/8)	Modifizierter Beton (0/8)
Polymer	ohne	wässrig
Polymer auf Zement	0	5 % (Feststoff)
W/Z Wert	0,47	0,47
Temp. Frischbeton	12	20
AM sofort	58 cm	55 cm
AM 1h	58 cm	55 cm
1d DF N/mm ²	16,6	10,5
7d DF N/mm ²	17,0	22,1
28d DF N/mm ²	36,9	39,8

An der Oberfläche kommt es zur charakteristischen Ablagerung von Kalk und das ist ein guter Dichtigkeits-Indikator. Wendet man die Klassifizierung (nach SIA 272) an, liegt im Bereich des polymermodifizierten Betons die Klasse wenig undicht - gilt als dicht und für den Standard-Beton die Klasse stark undicht vor [6].

Nach 2,5-jähriger Standzeit fand zur Untersuchung der Dichtigkeit erneut eine Begehung der Strecke im Bereich von Tunnelmeter 400 - 500 m statt. Der unmodifizierte Beton zeigte bei 430 m, in Bild 2 aus dem Jahr 2008, die typischen Kalkausblühungen. Diese werden von Wasseraustritt [15] durch kleinere Haarrisse und größere Fehlstellen hervorgerufen. Die Fotodokumentation zeigt, dass die Abdichtung durch polymermodifiziertem Spritzbeton erhalten geblieben ist (Bild 3 aus dem Jahr 2008, Bild 4 aus dem Jahr 2011).



Bild 2: Stollenwand mit Standard Spritzbeton ohne Polymer während der Bauphase im Jahr 2008 vergleichbar zu 2011, mit Wasserflecken, (Foto: Wacker Chemie AG)



Bild 3: Stollenwand mit polymermodifiziertem Spritzbeton während der Bauphase im Jahr 2008, ohne Wasserflecken, (Foto: Wacker Chemie AG)



Bild 4: Stollenwand mit polymermodifiziertem Spritzbeton während der Nutzungsphase im Jahr 2011, (Foto: Wacker Chemie AG)

6. Anwendungsbeispiel 2: Druckwasserstollen Hintermuhr

Druckwasserstollen wie sie in Pumpspeicherkraftwerken genutzt werden, sind inzwischen gängige Bauwerke, die jedoch eine möglichst geringe Beeinflussung im Wasserhaushalt des betroffenen Gebirges bringen sollen. Sie sollen weder Wasser ins Gebirge einleiten noch Grundwasser entnehmen. Der Druckwasserstollen in Hintermuhr (Österreich), der in den Jahren 1988 bis 1992 errichte wurde, ist aufgrund der guten Geologie in weiten Teilen naturbelassen. Problemzonen mit zu erwartendem hohem Wasserverlust wurden mittels Injektionen nachbehandelt.

Im Betrieb ist der Stollen vollständig mit Wasser gefüllt und dementsprechend steht er mit ca. 15 m WS unter Druck. Die Instandsetzung wurde notwendig, um den aufgetretenen Wasserverlust ins Gebirge zu reduzieren. Injektionsmaßnahmen wurden bei vorangegangenen Instandsetzungen durchgeführt, jedoch waren in Summe ca. 50 m weiterhin so undicht, dass an mehreren Stellen Innenringe von 10 cm Trockenspritzbeton eingebaut wurden. Da es sich um sauberen Fels handelte war eine Untergrundvorbehandlung nicht erforderlich. Die Instandsetzung vom April 2009 wurde mit polymermodifiziertem Trockenspritzbeton ausgeführt. Die Anmachflüssigkeit bestand aus einem Polymer/Wassergemisch und die Dosierung erfolgte an der Spritzbetondüse. Die Vorteile waren vorrangig der reduzierte Rückprall in Verbindung mit der Abdichtung. Durch dieses Verfahren konnte die Bauzeit erheblich verkürzt und der Materialaufwand deutlich reduziert werden. Die Sanierung ist erfolgreich durchgeführt worden und der Stollen ist weiterhin dicht im Sinne der Nutzungsaufgaben. Eine Begehung die nach zweijähriger Betriebszeit im Mai 2011 durchgeführt wurde, zeigte eine intakte und rissfreie Spritzbetonschale. Die Oberfläche der gespritzten Betonapplikation aus dem Jahre 2009 (Bild 5), ist auch 2011 (Bild 6), deutlich zu erkennen.



Bild 5: Druckwasserstollen in Hintermuhr: während der Bauzeit 2009; (Foto: Wacker Chemie AG).

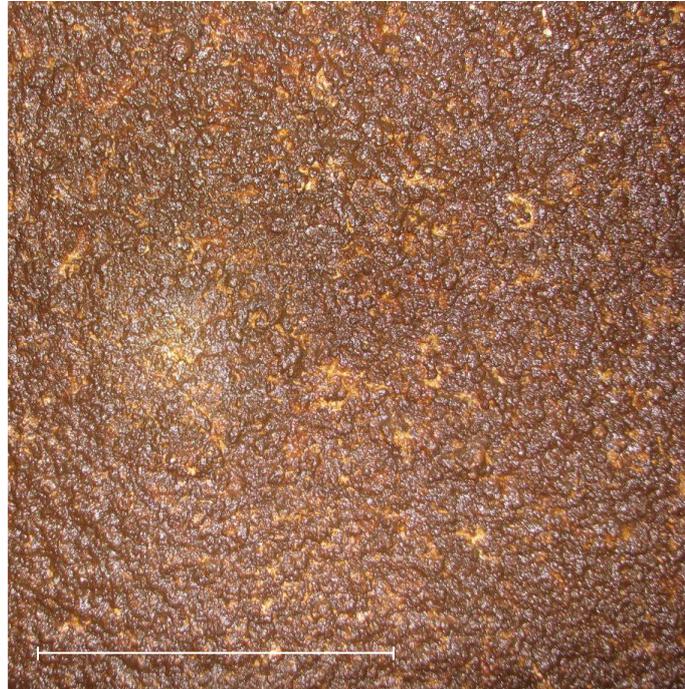


Bild 6: Druckwasserstollen in Hintermuhr: Begehung 2011 (Foto: Wacker Chemie AG)

7. Zusammenfassung

Die Rissentstehung und somit die Rissvermeidung sind für die abdichtende, einschalige Tunnelbauweise von entscheidender Bedeutung. Die beiden Praxisbeispiele zeigen, polymermodifizierter Spritzbeton hat bei drückendem Wasser dauerhaft abdichtende Eigenschaften. Polymere Bindemittel erhöhen die Haftung auf dem Untergrund und bewirken einen verbesserten Haftverbund. Das Zusammenspiel von flexiblen polymeren Eigenschaften im ansonsten starren, zementären Betongefüge ist in der Lage, Spannungen besser abzufangen bzw. auszugleichen und reduziert die Rissneigung des Spritzbetons.

8. Literatur

- [1] Barth, F.:
Control of Cracking in Concrete Structures. American Concrete Institute, ACI Report 224, 16. May (2001) Seite 4-8.
- [2] Seidel, W.; Hahn, F.:
Werkstofftechnik. ISBN 978-3-446-42064-9, Carl Hanser Verlag, München 2009, Seite 309.
- [3] EN 1504-3
Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätsüberwachung und Beurteilung der Konformität – Teil 3: Statisch und nicht statisch relevante Instandsetzung. Deutsche Fassung EN 1504-3:2005.
- [4] Lukas, W.; Rauch, C; Deporta, C.:
Einschalige Tunnelbauweise. Zement und Beton, 2 (2003), Seite 32-41.
- [5] Brux, G.:
Einschaliger Tunnelausbau mit Spritzbeton. Tiefbau, 7(1996), Seite 440-447.
- [6] Flüeler, P.:
Langzeitverhalten von Abdichtungssystemen für Tagbautunnel. EMPA-Nr. 201'043 und 201'248, März 2004.
- [7] EFNARC:
Europäische Richtlinie Spritzbeton. ISBN 095224831X, UK, 1997.
- [8] Grimscheid, G.:
Herstellungsbedingte Fehler im Spritzbeton. Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau, ISBN 3-433-01350-0, Seite 208 -211.
- [9] Bauberatung Zement:
Risse im Beton. Zement-Merkblatt Betontechnik B18, 2 (2003).
- [10] Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik (ÖVBB):
Richtlinie Spritzbeton. Ausgabe 12/2009.
- [11] Boss, P; Dietermann, M.:
Nassspritzbeton- Performance- Laborprüfverfahren und Einflussfaktoren in der Praxis. Tunnel 6 (2010), Seite 31-41.
- [12] DIN 1045-3:
Prüfverfahren für Beton, Deutsche Fassung (1991).
- [13] Dimmig-Osburg, A.; Bode, K. A.; Flohr, A.:
Dauerhaftigkeit Kunststoffmodifizierter Mörtel und Betone. Beton 1+2 (2008), Seite 48-50.
- [14] Galler, R.; Pittino, G.; Bonin, K.; Bezler, J.:
Modifizierter Spritzbeton - Großmaßstäbliche Versuche und Anwendungen. Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton – Tagung 2009, Alpbach, 15. und 16. 1. 2009.
- [15] Dietzel, M.; Rinder, T.; Niedermayr, A.; Mittermayr, F.; Leis, A.; Klammer, D.; Köhler S.; Reichl, P.:
Ursachen und Mechanismen der Versinterung von Tunnel drainagen. BHM - Berg- und Hüttenmännische Monatshefte Volume 153, 10 (2008), Seite 369-372.

Zum Autor

Dipl.-Ing. (FH) Klaus Bonin
Studium der Chemischen Technologie an der Fachhochschule Darmstadt, seit 2000 in der Anwendungstechnik „Construction Polymers“ bei der WACKER Chemie AG
klaus.bonin@wacker.com