
Auslaugverhalten von Spritzbeton

LEACHING BEHAVIOUR OF SPRAYED CONCRETE

FRANK TALLAREK, BERND SCHOCKEMÖHLE, BERNHARD MAIDL

Kalkablagerungen in den Entwässerungssystemen haben sich in den letzten Jahren als das wesentliche Problem beim Betrieb dränkter Verkehrstunnelbauwerke herausgestellt. Der Aufwand für die Unterhaltung der Bergwasserdränagen kann so groß werden, daß er einen erheblichen Anteil der laufenden Kosten ausmacht. Es liegt deshalb nahe, bei zukünftigen Bauwerken vorbeugende Maßnahmen zur Reduzierung dieser Versinterungen zu ergreifen.

Neben den geologischen und hydrologischen Randbedingungen wird meist die Auslaugbarkeit des Spritzbetons für die Entstehung dieser Ablagerungen verantwortlich gemacht, weshalb bei laufenden und zukünftigen Projekten der Einsatz auslaugarmer Spritzbetonkonzepte als einer der wesentlichen Ansatzpunkte zur Reduzierung der Versinterungen angesehen wird.

Basierend auf Untersuchungen, die an unter genau definierten Bedingungen hergestellten Spritzbetonen durchgeführt wurden, sollen Einflüsse auf das Auslaugverhalten dargestellt und Empfehlungen zur Herstellung eines hinsichtlich der Versinterungsproblematik optimierten Spritzbetons gegeben werden.

Lime deposits in drainage systems have turned out the most serious problem affecting the operation of drained traffic tunnels in recent years. The maintenance cost for underground water drainage systems may become very high and account for a large share of the current expenditure. It therefore stands to reason to take preventive measures when planning new tunnels.

Apart from the geological and hydrological conditions, the leaching of sprayed concrete has proved primarily responsible for such deposits. The application of a shotcrete with low leachability for current and future projects is therefore seen as the most promising way of how to reduce sintering.

Based on tests carried out on shotcrete produced under strictly defined conditions, the leaching behaviour will be discussed and recommendations be given for the production of an optimal shotcrete in terms of sintering.

1. Einleitung

Die in letzter Zeit immer häufiger werdenden Diskussionen zum Auslaugverhalten von Spritzbeton

sind nicht nur vor dem Hintergrund der Umweltbelastung von evtl. mit Schadstoffen angereichertem Bergwasser zu sehen, die im Endzustand mit geeigneten Systemen neutralisiert werden können, son-

den auch vor allem im Zusammenhang mit den Versinterungen der Dränagesysteme unserer Tunnelbauwerke.

Über Problematiken der Umweltbeeinträchtigungen wird mit unterschiedlichen Argumenten berichtet und diskutiert. Dies soll auch nicht das Thema der Betrachtung sein, obwohl Maßnahmen zur Verbesserung des Auslaugverhaltens von Spritzbeton gleichzeitig zu positiven Einflüssen auf die Umweltverträglichkeit und zu Verbesserungen der Versinterungsneigung der Tunneldrägen führen.

Vielmehr soll hier auf die hohen Folgekosten der Versinterungen an Verkehrstunnelbauten eingegangen werden, um deutlich zu machen, welches Potential zur Verfügung stünde, wenn man bereits in der Bauphase die Investitionen tätigen würde, um das Auslaugverhalten des Spritzbetons zu verbessern.

Anschließend werden Ergebnisse von laufenden Auslauguntersuchungen vorgestellt. Dabei werden auch einige Anmerkungen und Vergleiche der verschiedenen Untersuchungsverfahren zum Auslaugverhalten aufgezeigt. Da zur Zeit viele Tunnel im Naßspritzverfahren aufgeföhren werden, wird hier auch nur über Ergebnisse von Naßspritzuntersuchungen berichtet.

2. Wartungs- und Instandhaltungskosten

Die Versinterungsmechanismen sind bei allen Tunneln, unabhängig von der Nutzung für den Eisen-

bahn- oder Straßenverkehr, dieselben. Bei den aufgrund der Versinterungen der Entwässerungsleitungen entstehenden Folgekosten ergeben sich jedoch in Abhängigkeit vom Baulastenträger deutliche Unterschiede [3].

Bei Eisenbahntunneln sind neben den Sachkosten für die meist an Fremdfirmen vergebenen Spül- und Instandsetzungsarbeiten zusätzliche Eigenleistungen wie z.B. die Bereitstellung von Arbeitszügen, Sicherungsposten und Bauwarten anzusetzen. Weiterhin müssen die aus den Wartungsarbeiten resultierenden Behinderungen des Bahnverkehrs, sogenannte Betriebserschwerniskosten, berücksichtigt werden. Die reinen Wartungskosten machen hierbei ca. 60 % der Gesamtkosten der Versinterung aus. Dabei ist in den ersten 5 Jahren der Nutzung, aufgrund einer verstärkten Versinterungsneigung, mit höheren Kosten zu rechnen als im restlichen Nutzungszeitraum. Während die Kosten aus den Betriebsbehinderungen schon bei mäßig belasteten Strecken als erheblich bezeichnet werden müssen, sind sie bei vollausgelasteten Strecken betriebswirtschaftlich nicht hinnehmbar.

Bei Straßentunneln ist der Ansatz von Aufwendungen, die den Betriebserschwerniskosten der DB AG entsprechen, nicht sinnvoll, da den Betreibern selbst keine Erschwernisse entstehen. Es könnte hier höchstens der volkswirtschaftliche Schaden aus einer Verkehrsbehinderung errechnet werden. Außerdem werden bei Straßentunneln die Dränagenspülungen

Aufwendungen		Anteil an Gesamtkosten
• Wartung	Fremdleistungen: z.B.: Kamerauntersuchung, Hochdruckspülung, Entsorgung der Spülreste, Neutralisation des Dränagewassers, Abwassergebühren	ca. 60 %
	Eigenleistungen: z.B. Bereitstellung Arbeitszug, Arbeitszugführer, Bauwarte, bzw. Straßensperrungen und -umleitungen	
• Instandsetzung	Folgeschäden des Hochdruckspülens	ca. 15 %
• Betriebsbehinderung	Eisenbahntunnel: bereits bei mäßig ausgelasteten Strecken: erheblich	ca. 25 %
	bei vollausgelasteten Strecken: betriebswirtschaftlich nicht hinnehmbar	
	Straßentunnel: keine Auswirkungen	

Bild 1: Folgekosten der Versinterung von Tunneldrägen

Verfahren	Durchführung	Eluent			Dauer	Ursprung, Anwender
		Aus-tausch	destil-liert	CO ₂ -haltig		
Schütteltests						
DEV-S4-Verfahren	Probe zerkleinert, Probe schütteln; Eluat filtrieren/ zentrifugieren	nein	ja	nein	24 h	DIN 38414-S4
Standtests						
Trogverfahren	vollständige Umströmung mit bewegtem Wasser	nein	ja	nein	24 h	ÖN S 2072
Spezielle Verfahren						
Auslaugzelle	Prüfplatte 50 x 70 cm ² ; kontinuierliche Zufuhr	ja	ja	nein	3,5 h	Philipp Holzmann AG
Durchströmungszelle	10mm dicke Scheiben werden mäanderförmig durchströmt	ja	ja	nein	3,5 h	TU München
Umströmungsanlage	6 Probekörper in Umströmungsanlage; Wassertemperatur 4 °C	nein	nein	ja	28 d	Ruhr-Universität Bochum, Umwelt- und Tunnel-Technologie

Bild 2: Übersicht Elutionsverfahren

in Zeiten mit nur geringem Verkehrsaufkommen durchgeführt, so daß die daraus resultierenden Behinderungen nur wenige Fahrzeuge betreffen und dementsprechend nur einen sehr geringen Wert ergeben.

Die Reinigungskosten der Entwässerungssysteme von Straßentunneln lassen sich anhand der Aufwendungen für verschiedene Bauwerke ermitteln. Nach den vorliegenden Erfahrungen liegen die Gesamtaufwendungen für Wartung und Instandsetzung je lfm Strassentunnel bei ca. 40% der Kosten für Bahntunnel.

Da die Herstellungskosten eines Tunnelbauwerks und die eben erwähnten Betriebskosten zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, muß für einen Vergleich eine Zeitanpassung der Werte stattfinden. Für Eisenbahntunnel einer mäßig belasteten Strecke ergibt sich nach dem Diskontierungsverfahren bei einer Nutzungsdauer von 75 Jahren ein Barwert von ca. 1.300 DM je lfm Tunnel, für Straßentunnel ein entsprechend niedrigerer Barwert von ca. 500 DM je lfm Tunnel.

Es liegt also nahe, daß die Auftraggeber bei zukünftigen Bauwerken bereit sind, zum einen über verbesserte Dränagesysteme nachzudenken, aber auch einen Teil dieses Geldes in einen verbesserten Spritzbeton zu investieren, der zu einer Verringerung des Auslaugverhaltens führt, damit der hohe Spülaufwand mit den angesprochenen Folgekosten deutlich reduziert werden kann.

3. Verfahren zur Beurteilung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton

Die Problematik besteht zur Zeit noch darin, daß es in Deutschland bislang keine genormten und einheitlichen Verfahren und keine Grenzwerte gibt, die eine Aussage über einen auslaugarmen Spritzbeton erlauben.

Es gibt inzwischen allerdings verschiedene Ansätze und Verfahren zur Messung und Bewertung des Auslaugverhaltens von Spritzbeton, von denen die gängigsten in *Bild 2* dargestellt sind. Die Verfahren unterscheiden sich in wesentlichen Punkten deutlich voneinander. Die unterschiedlichen Randbedingungen der Verfahren werden nachfolgend kurz erläutert.

Das insgesamt wohl bekannteste Verfahren ist das Elutionsverfahren nach DIN 38414 - S4 [1], also ein genormtes Untersuchungsverfahren zur Elution, allerdings für Deponiematerial. Nach diesem Verfahren wurden in Deutschland die ersten Elutionsuntersuchungen am Spritzbeton durchgeführt. Dieses Verfahren ist nur für Probestücke < 10 mm geeignet, so daß z.B. Bohrkerns erst zerkleinert werden müssen, bevor sie in den Behälter gefüllt werden können, wo das Probematerial mit deionisiertem Wasser versetzt wird. Das Verhältnis Probematerial : Wasser beträgt 1 : 10. Anschließend wird die Probe 24 h lang geschüttelt. Danach wird das Eluat filtriert und analysiert.

Ein abgewandeltes, in *Bild 2* nicht dargestelltes Verfahren ist das pH-stat.-Verfahren. Es unterscheidet sich vom erstgenannten Verfahren dadurch, daß während der Versuchsdauer der pH-Wert des Eluenten konstant gehalten wird, um damit das Löslichkeitsprodukt zu erhöhen.

Ein gravierender Nachteil beider Verfahren ist das Zerstören des Spritzbetons auf Bruchstücke < 10 mm. Dadurch entstehen nicht definierte Betonoberflächen, die vergleichende und reproduzierbare Untersuchungen sehr schwierig machen. Außerdem entspricht die stark vergrößerte Betonoberfläche nicht mehr den realen Bedingungen einer vom Bergwasser umströmten Spritzbetonschale, so daß z.B. der Einfluß der Dichtigkeit des Spritzbetons fast keine Rolle mehr spielen würde.

Weitere Verfahren, sog. Stand- oder Säulentests, oder das in der Schweiz bekannte TVA-Verfahren, die auf einem Ansatz beruhen, daß das Umströmungsmedium das Probematerial umfließt oder be regnet, werden hier nicht weiter besprochen, da auch bei diesen Verfahren vorwiegend zerkleinerte bzw. haufwerksporige Materialien mit nicht definierten Oberflächen eingesetzt werden.

Mit der neuen Spritzbetonrichtlinie in Österreich [7] wurde erstmals ein Verfahren zur Ermittlung der Elution von Spritzbeton eingeführt. Es ist das Trogverfahren in Anlehnung an die ÖNORM S 2072 [8]. Dabei erfolgt die Elution an einem 28 Tage alten Bohrkern mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 100 mm. Die Durchführung geschieht in einem Auslaugbehälter über 24 Stunden mit ständig durch einen Magnetrührer in Bewegung gehaltenem Auslaugmittel. Als Elutionsmittel dient deionisiertes Wasser. Anschließend wird das Auslaugmittel Analysen zugeführt und darf die Grenzwerte gem. Tabelle 3/1 der Richtlinie Spritzbeton nicht überschreiten, um als umweltverträglich eingestuft zu werden.

Zu einer möglichst realitätsnahen Untersuchung des Elutionsverhaltens von Betonbauteilen unter Tunnelbedingungen und zur Erfassung des Langzeitverhaltens von Spritzbetonschalen wurden spezielle Verfahren entwickelt. Drei solcher Verfahren kommen mittlerweile zur Anwendung.

Bei der Auslaugzelle wird auf einen Prüfrahmen mit den Abmessungen 50 x 70 cm Beton gespritzt oder eingebracht. Die Prüfpalette ist an der Rückseite wasserdicht abgeschlossen und dort befindet sich ein 3mm breiter Spalt, der durch das Herausziehen einer teflonbeschichteten PE-Platte bei Erstarrungsbeginn des Probekörpers ausgebildet wird.

Dieser Spalt wird vollständig mit destilliertem Wasser gefüllt. Anschließend wird eine kontinuierliche Wasserzufuhr eingestellt. Durch einen Schlauch, der über ein Ablaßventil angeschlossen ist, wird das

Eluat aufgefangen. Die durchschnittliche Verweildauer des destillierten Wassers an der Betonoberfläche beträgt etwa 3,5 Stunden.

In festgelegten Zeitabständen (1h, 6h, 1d, 7d und 28d) werden aus dem aufgefangenen Eluat die Massenkonzentrationen der umweltrelevanten Elemente analysiert.

Durch die Messung der Konzentrationen über einen Zeitraum von 28 Tagen können Aussagen über die zeitliche Entwicklung durch den Abbindeprozeß des Spritzbetons getroffen werden. Aussagen zur Anreicherung des Wassers durch längere Kontaktzeiten mit dem Spritzbeton sind bei diesem Verfahren nicht möglich.

Nachteilig ist bei diesem Verfahren die Herstellung des Probekörpers und sofortige Hinterfüllung mit destilliertem Wasser. Die Prüfung von Bauwerksproben zur Kontrolle der im Labor ermittelten Werte ist somit nicht möglich.

Die Durchströmungszelle ist ein weiteres Verfahren, bei dem ein Bohrkern von 100 mm Durchmesser eingesetzt wird. Der Bohrkern wird in 10 Scheiben à 10 mm Dicke zerschnitten. Die Scheiben werden in einem PVC-Rohr gestapelt, wobei jede zweite Scheibe ein zentrisches Bohrloch erhält, damit das deionisierte Wasser mäanderförmig an den Probeflächen vorbeiströmen muß. Das Eluat wird nach einmaligem Durchlauf aufgefangen und analysiert. Auch bei diesem Verfahren beträgt die durchschnittliche Verweildauer des Wassers an der Betonoberfläche ca. 3,5 Stunden. Durch die ständige Erneuerung des Wassers in Verbindung mit der kurzen Verweildauer ist eine Erfassung des Langzeitverhaltens auch bei diesem Verfahren nicht gegeben. Nachteilig ist auch die aufwendige Herstellung der Probekörper.

Auf Grund einer konkreten Problemstellung bei der Deutschen Bahn AG entstand bereits Ende der 80-er Jahre die Idee, eine Umströmungsanlage zu entwickeln. Mit dieser Anlage sollten auf einfachem Wege Laboruntersuchungen durchgeführt werden, um später diese mit Werten aus Bauwerksprobekörpern zu vergleichen.

Bei diesem Verfahren werden 6 Bohrkern (d/h = 100/100 mm) mit einem Betonalter von 28 Tagen in die Umströmungsanlage eingebaut. Die Bohrkern werden in der Umströmungsanlage weitere 28 Tage lang mit dem gleichen Wasser ohne Austausch kontinuierlich umströmt. Die Umströmung erfolgt durch eine Umwälzpumpe mit einer Durchflußrate von 40 l/min, die dafür sorgt, daß das Wasser aus der Umströmungsanlage abgezogen und über ein Rohr- und Düsensystem wieder zugeführt wird. Dadurch werden die Bohrkern kontinuierlich angeströmt.

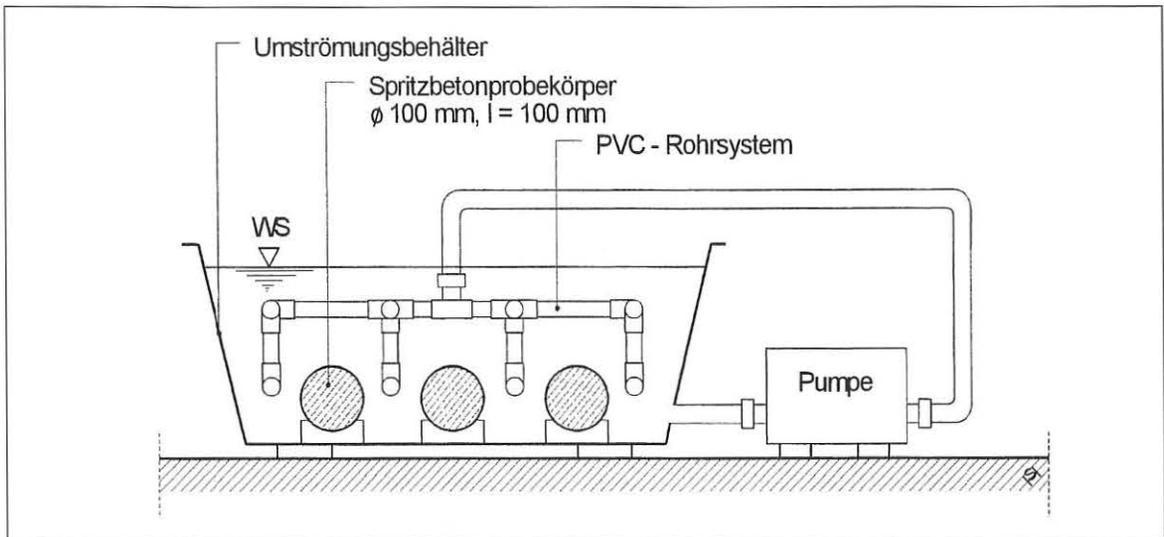


Bild 3: Schematische Darstellung der Umströmungsanlage für Spritzbetonkörper

Die Zusammensetzung des verwendeten Wassers entspricht dem Bergwasser eines damals als problematisch angesehenen Tunnelprojekts und wird bis heute als Referenzwasser für alle Untersuchungen eingesetzt. Dabei handelt es sich um stark angreifendes Wasser entsprechend DIN 4030 [2], in dem Anteile aus unterschiedlichen Ionen und Salzen enthalten sind. Wichtig ist hier ein stark kohlenstoffreiches Wasser mit 40 mg/l mit einer konstanten Wasser- und Umgebungstemperatur von 4 °C, damit auch ohne Austausch des Umströmungsmediums keine vorzeitige Sättigung mit Löslichkeitsprodukten eintritt. Der CO₂-Gehalt von 40 mg/l und die Temperatur von 4 °C werden ständig kontrolliert und über den gesamten Versuchszeitraum von 28 Tagen konstant gehalten, um die Löslichkeit hoch und vor allem vergleichbar zu halten [4].

Gegenüber destilliertem Wasser können mit diesem Verfahren über einen längeren Zeitraum mehr Stoffe

gelöst werden. Die Aggressivität des Wassers in Verbindung mit der Wassertemperatur führt zu einer stärkeren Auslaugungsneigung und hat sich für vergleichende Beurteilungen als günstig herausgestellt, da Veränderungen deutlicher erkennbar sind.

Durch die ständige Umströmung über 28 Tage wird bei diesem Verfahren das Umströmen und Hinterwandern einer Spritzbetonschale von großen Querschnitten simuliert. Damit sollen Aussagen über das Langzeitverhalten der Auslaugungen angestrebt werden.

Der Ursprung dieser Versuchseinrichtung liegt nun schon mehr als 8 Jahre zurück. Im Laufe der Zeit sind Erfahrungen aus zahlreichen Untersuchungsreihen eingeflossen und dabei haben sich Verbesserungen gegenüber der ursprünglichen Anlage ergeben. Bei großen Untersuchungsreihen werden bis zu 9 Anlagen gleichzeitig betrieben.

- | | |
|-----------------------------|---|
| • Probekörper | • 6 Bohrkern, d/h = 100/100 mm, Einbaualter 28 Tage |
| • Umströmungsmedium | • 30 l, stark angreifend entsprechend DIN 4030 |
| • Umströmungsdauer | • 28 Tage ohne Wasseraustausch |
| • Verfahren | • Kontinuierliche Anströmung der Probekörper |
| • Besondere Randbedingungen | • Konstanter CO ₂ -Gehalt von 40 mg/l |
| • Meßwerterfassung | • Konstante Wasser- und Umgebungstemperatur von 4°C |
| | • Ca, Na, Ka, Mg, pH-Wert, el. Leitfähigkeit kontinuierlich über die Dauer von 28 Tagen |

Bild 4: Parameter der Umströmungsanlage

Es ist zu erkennen, daß wegen der unterschiedlichen Verfahren, Meßzeiten und Ausgangsbedingungen die Ergebnisse aus den Verfahren untereinander nicht direkt vergleichbar sind [5]. Daher ist es bei einer zahlenmäßigen Bewertung von Elutionsdaten ganz wesentlich, das verwendete Verfahren zu berücksichtigen.

4. Versuchsprogramm zum Auslaugverhalten

Für vergleichende Untersuchungen am Spritzbeton ist es unerlässlich, über die gesamte Dauer des Herstellungsvorgangs konstante und gleichbleibende Bedingungen zu schaffen [6].

Der hinsichtlich dieser Anforderungen konzipierte Spritzbetonversuchsstand (Bild 5) an der Ruhr-Uni Bochum ist hinlänglich bekannt und wurde bereits bei der 1. Spritzbetontagung im Jahr 1985 in Igls vorgestellt. Im weiteren soll daher auf den genau definierten und jederzeit reproduzierbaren Herstellungsprozeß nicht weiter eingegangen und nur noch ergänzt werden, daß durch den Einsatz moderner EDV-Anlagen die Möglichkeiten der Messung aller relevanten Parameter im Laufe der letzten Jahre immer weiter verbessert wurden. Durch die Installation eines Spritzbetonroboters, der nach fest vorgegebenen, idealen Bewegungsabläufen und Düsenführungen den Spritzbeton vollautomatisch auf dem Spritzfeld aufträgt, können verfahrenstechnische Einflüsse aus unterschiedlichen Düsenführungen ausgeschlossen werden. Damit ist der gesamte Pro-

zeßablauf des Spritzbetons von der Herstellung der Ausgangsmischung bis zum Auftrag des Spritzfeldes kontinuierlich erfaßbar und wird in Echtzeit ausgewertet, so daß bereits während der Spritzbetonherstellung eine Kontrolle und Beurteilung aller relevanten Parameter möglich ist.

Die Probekörper für eine Auslauguntersuchung werden wie für die übrigen Qualitätsuntersuchungen auch aus einem Spritzversuch, d.h. aus einer Prüfkörperfläche von 2,0 x 1,2 m entnommen, um so eine direkte Vergleichbarkeit zu allen anderen Parametern wie Früh- und Endfestigkeit, Rückprallentwicklung und Ergebnissen der WD-Untersuchungen zu ermöglichen (Bild 6).

Durch die Konzeption des Spritzbetonversuchsstands ist es möglich, Unterschiede in den Ergebnissen ausschließlich auf einen variablen Parameter zurückzuführen, da alle übrigen Parameter konstant gehalten werden können. Die Unterschiede in den Ergebnissen sind also ausschließlich auf die Wirkung der verschiedenen Beschleuniger bzw. eingesetzten Zusatzmittel zurückzuführen.

Bei der Versuchsserie im Naßspritzverfahren handelt es sich um einen Vergleich von alkalifreien (Serie AF) mit alkaliarmen (Serie AM) Erstarrungsbeschleunigern. Als weiterer Parameter wurde durch die Zugabe eines Zusatzstoffs der Einfluß von amorphem Silicium, sog. SiO_2 -Stoffen, auf das Auslaugverhalten untersucht (Serie AM-Z). Die Ausgangsdaten sind in Bild 7 dargestellt.

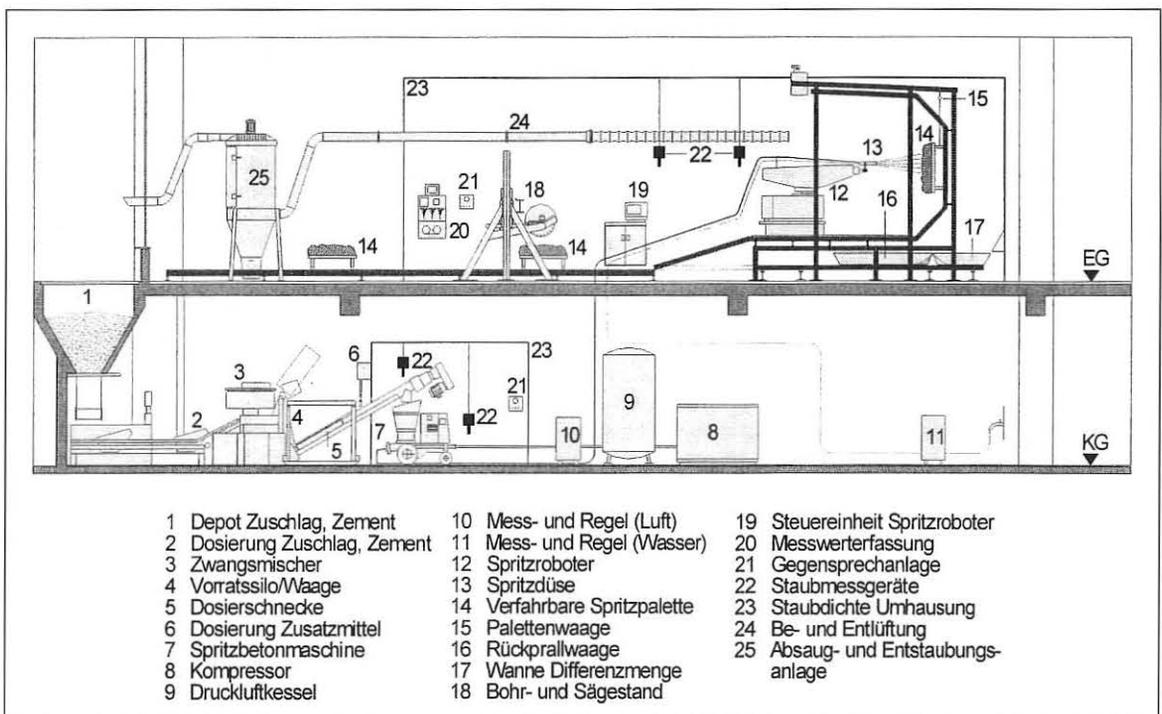


Bild Spritzbetonversuchsstand

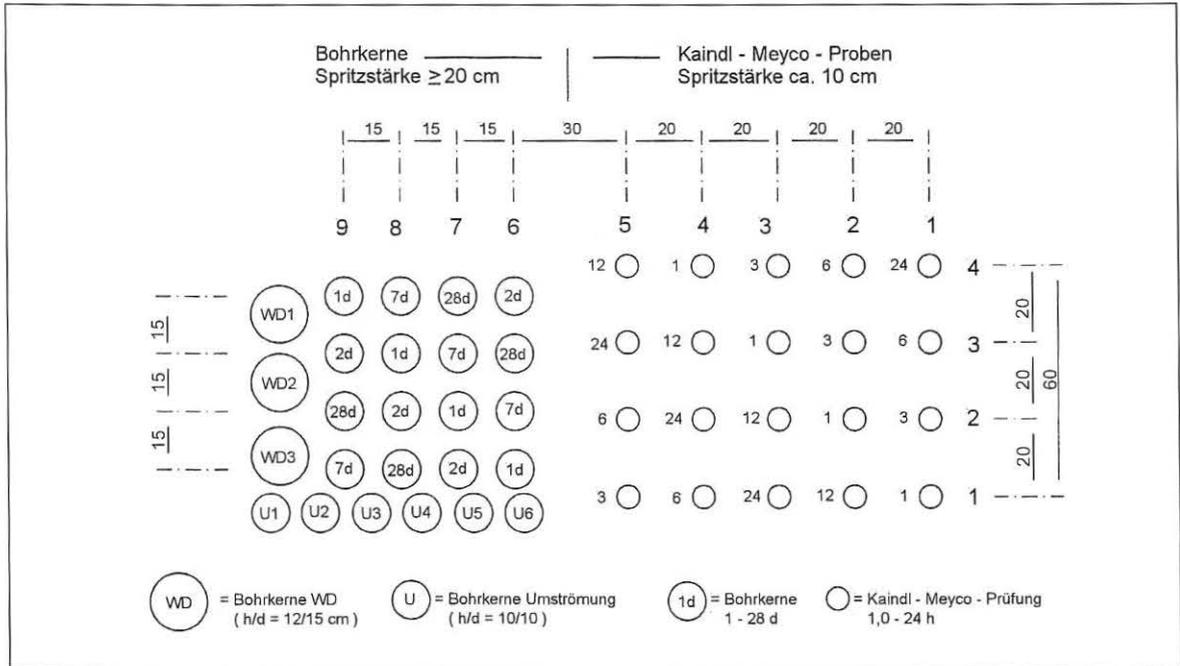


Bild 6: Anordnung der Prüfkörper auf der Versuchspalette

	AF	AM	AM-Z
Zuschlag	quarzitisches Rundkorn, Sieblinie B8		
Zement	CEM I 42,5 R		
Zementgehalt	425 kg/m ³		
w/z-Wert	0,48 (ohne Berücksichtigung FM und VZ)		
Ausbreitmaß	44 cm – 45 cm (durch Zugabe von FM und VZ)		
Zusatzstoffe	--	--	SiO ₂ -Slurry, 20 kg Wirkstoff / m ³
BE-Mittel	alkalifrei	alkaliarm	alkaliarm
BE-Dosierung	jeweils höchstzulässige Dosierung		

Bild 7: Ausgangsdaten für Naßspritzserie

Beim w/z-Wert wurde der Wasseranteil aus dem Fließmittel und dem Verzögerer nicht berücksichtigt. Der Wasseranteil aus der Slurry bei der dritten Mischung wurde allerdings angerechnet.

Der relativ hohe Zementgehalt von 425 kg/m³ wurde gewählt, um auf die Zugabe von Füllern oder Flugaschen zu verzichten.

Dadurch werden die Einflüsse auf das Auslagverhalten aus weiteren Parametern ausgeschaltet.

Für die folgenden Aussagen ist es wichtig zu wissen, daß die dargestellten Daten der Auslagversuche für jeden Parameter jeweils Mittelwerte aus 3 Einzelversuchen sind.

Zur besseren Übersicht wurden die Daten aus den je 3 Versuchen zusammengefaßt und als eine Kurve dargestellt.

4.1 Ergebnisse der Auslaguntersuchungen

Bild 8 stellt die Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit als das Maß für die Summe aller gelösten Ionen und Salze über die Zeitachse dar.

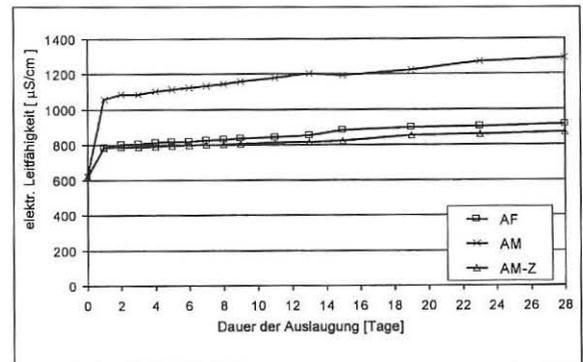


Bild 8: Zeitlicher Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit

Die elektrische Leitfähigkeit verdeutlicht die unterschiedlichen Auslagraten der verschiedenen Beschleuniger. Die Leitfähigkeit des Spritzbetons mit dem alkalifreien Beschleuniger steigt innerhalb des ersten Tages an und bleibt dann nahezu über den Zeitraum von 28 Tagen konstant.

Der Spritzbeton mit dem alkaliarmen BE zeigt nach dem ersten Auslagtag einen wesentlich höheren Wert und steigt auch mit zunehmender Umströ-

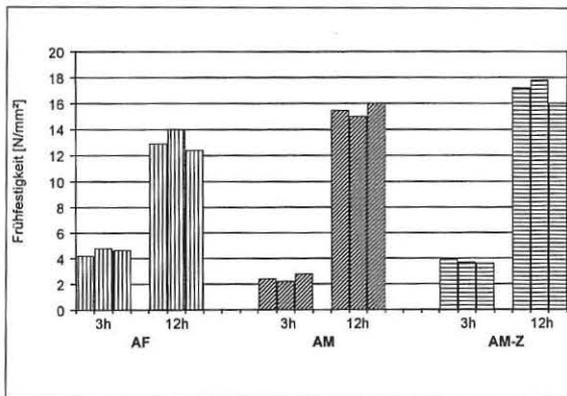


Bild 15: Frühfestigkeiten zum Zeitpunkt 3h und 12h

In Bild 15 sind die Frühfestigkeiten zum Prüfzeitpunkt 3 und 12 Stunden aufgetragen, um die hohe Gleichmäßigkeit der einzelnen Versuche innerhalb einer Serie zu verdeutlichen. Die einzelnen Balken sind die Mittelwerte aus jeweils 4 Auszugversuchen. Wie schon bei den Auslaugdaten erwähnt, sind die einzelnen Kurven Mittelwerte aus je 3 Versuchen. D.h., daß den einzelnen Knickpunkten der Frühfestigkeitskurve jeweils 12 Meßdaten zu Grunde liegen.

Der Verlauf der Druckfestigkeitsentwicklung, gemessen an Bohrkernen $d/h = 100/100$ mm nach 1, 2, 7 und 28 Tagen, setzt sich analog zur Frühfestigkeitsentwicklung fort. Beim alkalifreien Beschleuniger steigt die Endfestigkeit stetig bis zu einem Mittelwert von 48 N/mm^2 an und erreicht problemlos die geforderte Serienfestigkeit von 30 N/mm^2 . Der alkaliarme Beschleuniger hingegen bringt über die Zeitachse nur noch geringe Festigkeitszuwächse und erreicht mit 28 N/mm^2 nicht ganz den geforderten Wert für einen B 25. Die Verwendung des Zusatzstoffs führt zu einer Anhebung der Endfestigkeit und liegt mit 33 N/mm^2 über dem geforderten Mindestwert (Bild 16).

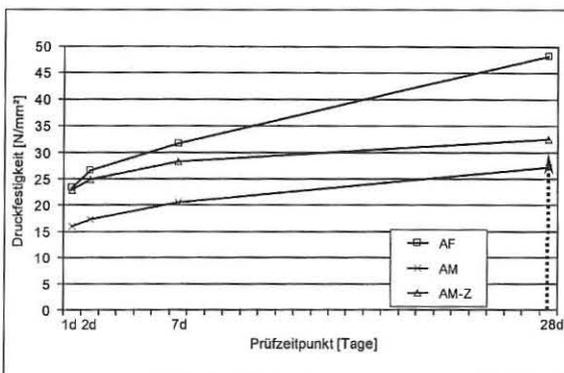


Bild 16: Entwicklung der Druckfestigkeit

Ergänzend ist hier nochmals anzumerken, daß bei allen Versuchen dieser Serie jeweils die höchst zulässige BE-Menge zugegeben wurde. Diese Dosis-

ungen werden i.d. Regel auf der Baustelle nicht benötigt, weshalb das etwas niedrige Niveau der Endfestigkeit auch nicht überzubewerten ist.

Bild 17 zeigt wiederum die Auswertung der Einzelwerte der jeweiligen Versuche nach 7 und nach 28 Tagen. Auch hier steht jeder Balken wieder für den Mittelwert aus 4 Bohrkernen. Die hohe Gleichmäßigkeit der einzelnen Daten bestätigt wieder den exakten und reproduzierbaren Herstellungsprozess.

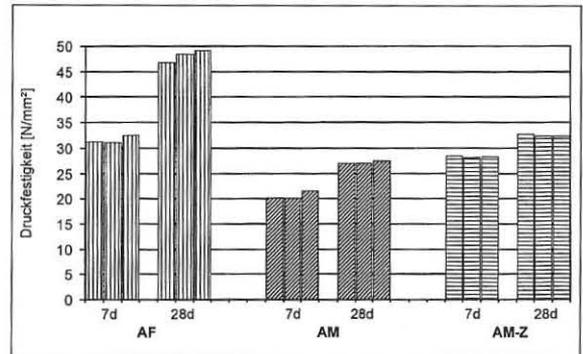


Bild 17: Druckfestigkeit zum Zeitpunkt 7d und 28d

5. Zusammenfassung

Es sind Möglichkeiten aufgezeigt worden, wie allein durch die Verwendung unterschiedlicher Erstarrungsbeschleuniger bzw. durch den Einsatz von geeigneten Betonzusatzstoffen (in diesem Fall amorphes Silicium) das Auslaugverhalten von Spritzbeton beeinflusst werden kann.

Deutlich wurde, daß der alkalifreie Beschleuniger gegenüber dem alkaliarmen in allen Belangen Vorteile bietet. Aber auch beim alkaliarmen Beschleuniger konnte durch den zusätzlichen Einsatz von SiO_2 -Stoffen die Dichtigkeit erhöht und somit das Auslaugverhalten auf ein Maß verringert werden, das in etwa dem alkalifreier Beschleuniger entspricht und teilweise sogar noch günstiger liegt.

Interessant wäre eine nachfolgende Untersuchung mit alkalifreiem Beschleuniger unter Hinzugabe des amorphen Siliciums. Falls dadurch nochmals eine so deutliche Reduzierung des Auslaugverhaltens erreicht werden könnte, wäre diese Rezeptur sicherlich das Optimum, was hinsichtlich der Auslaugbarkeit zur Zeit zu erreichen wäre.

Bei der hier vorgestellten Versuchsserie wurde besonders deutlich, daß die positiven Einflüsse auf das Auslaugverhalten auch mit wesentlich höheren Druckfestigkeiten und deutlichen Frühfestigkeitssteigerungen im Betonalter bis zu ca. 6 Stunden

einhergehen. Diese Feststellung ist erfreulich, da es durchaus positive Entwicklungen gibt, die sich in anderen Eigenschaften negativ auswirken. So hat z.B. die erste Generation der Erstarrungsbeschleuniger, die hohe Frühfestigkeiten lieferte, die Endfestigkeiten dramatisch verringert.

Der Erstarrungsbeschleuniger selbst ist aber nicht der einzige Parameter, der einen Einfluß auf die Auslaugbarkeit des Spritzbetons ausübt. Einflüsse haben neben dem verwendeten Zement auch die weiteren Zusatzstoffe bis hin zum Zuschlag selbst. Es liegt auf der Hand, daß kalkhaltige Zuschläge beim Angriff von aggressiven Bergwässern zu deutlich höheren Austragsleistungen beim Calcium beitragen können als z. B. Basalt oder quarzitiische Zuschläge. Dies wurde bei Untersuchungsserien im Trockenspritzverfahren auch bestätigt.

Ein weiterer wichtiger Einflußparameter ist die Verarbeitung des Spritzbetons selbst. Baustellenbegleitende Untersuchungen haben gezeigt, daß auch mit den besten Ausgangsstoffen nicht immer ein dichter Spritzbeton mit geringen Auslaugungen hergestellt wird. Denn was nützen sorgfältig abgestimmte Sieblinien, die Zugaben von Betonzusatzstoffen und die besten Beschleuniger, wenn auf der Baustelle ein Spritzbeton hergestellt wird, der auf Grund von völlig unzureichend eingestellten Luftmengen, großen Düsenabständen zur Auftragsfläche, unzureichenden Genauigkeiten der BE-Dosierung oder beim Trockenspritzverfahren mit wesentlich überhöhter Zugabewassermenge eher einem Haufwerk als einem Spritzbeton ähnelt.

Nach wie vor steckt in der Verfahrenstechnik und der Verarbeitungsqualität des Spritzbetons ein nicht zu unterschätzendes Potential zur Verbesserung der Auslaugbarkeit und der Qualität des Spritzbetons.

Der Appell und die Forderung an eine hohe Verarbeitungsqualität des Spritzbetons soll aber nicht dazu verleiten, die Verantwortung allein auf den Düsenführer nach dem Motto abzuwälzen:

"Na, dann soll der's doch richten!!".

Die Grundlage schaffen alle beteiligten Parteien:

Auf der Auftraggeberseite mit den konkreten und unmißverständlichen Vorgaben, um bei der Angebotsbearbeitung für alle Anbieter gleiche Kalkulationsgrundlagen zu schaffen, und auf der Auftragnehmerseite mit der Wahl geeigneter und aufeinander abgestimmter Ausgangsstoffe und Verfahren. Die negativen Auswirkungen einer schlech-

ten Verarbeitungsqualität können durch die Wahl eines optimierten Bereitstellungsgemisches hinsichtlich der Auslaugungen zumindest begrenzt werden.

Wenn dann auch noch eine gute Verarbeitungsqualität erreicht wird, ist das Resultat ein dichter, qualitativ hochwertiger und auslaugarmer Spritzbeton, der einen Beitrag zur Reduzierung der Versinterungen zukünftiger Tunnelbauwerke leisten kann.

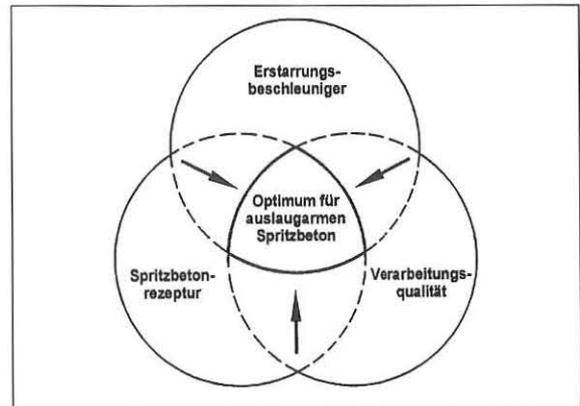


Bild 18: Optimierter Spritzbeton

6. Literatur

- [1] DIN 38414 - S4, Ausgabe 19:
Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung. Ausgabe 04/1995.
- [2] DIN 4030:
Beurteilung betonangreifende Wässer, Böden und Gase. Ausgabe 06/1991.
- [3] Maidl, B.; Kirschke, D.:
Abdichtungs- und Entwässerungssysteme bei Verkehrstunnelbauwerken. Abschlußbericht zum FE-Vorhaben im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und der Deutschen Bahn AG, August 1998.
- [4] Maidl, B.; Tallarek, F.; Rohrbeck, M.:
Prüfverfahren zum Nachweis der Umweltverträglichkeit von Spritzbeton. Bauingenieur 71, Nr. 11, S. 497-503, 1996.
- [5] Maidl, B.; Berger, T.:
Empfehlungen für den Spritzbetoneinsatz im Tunnelbau. Bauingenieur 70, Nr. 1, S. 11-19, 1995.
- [6] Maidl, B.:
Handbuch für Spritzbeton. Verlag Ernst&Sohn, Berlin, 1992.

[7] Richtlinie Spritzbeton:

Anwendung und Prüfung. Ausgabe 12/1998,
Österreichischer Betonverein.

[8] ÖNORM S 2072:

Eluatklassen (Gefährdungspotential) von
Abfällen. Ausgabe 12/1990.