
MODIFIZIERTER SPRITZBETON – GROSSMASSSTÄBLICHE VERSUCHE UND ANWENDUNGEN

MODIFIED SHOTCRETE – LARGE SCALE TESTING AND APPLICATION

Univ.-Prof. Dr. mont. Robert **Galler** und Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerhard **Pittino**,
Lehrstuhl Subsurface Engineering, Montanuniversität Leoben, Österreich
Dipl.-Ing.(FH) Klaus **Bonin** und Dr. Jürgen **Bezler**,
Wacker Polymer Systems GmbH & Co.KG, Burghausen, Deutschland

Fliesenklebemörtel wird durch Modifizierung in seinen Eigenschaften signifikant verbessert. Warum sollte Spritzbeton für verschiedenste Einsatzgebiete nicht ebenfalls davon profitieren? Diese Fragestellung wird versucht zu beantworten, durch einen großmaßstäblichen Versuch in einem Tunnelquerschlag, in einem Salzbergwerks-Zugangsstollen und in einem Bergwerks-Sturzschaft. Insitu-Versuche sind deshalb erforderlich, da die Spritzbetonrezeptur und die Verfahrenstechnik einen wesentlichen Einfluss auf die Spritzbetonqualität haben. Die Frischbetoneigenschaften und die Eigenschaften des applizierten Spritzbetons hinsichtlich Frühfestigkeitsentwicklung, Kriechvermögen, Haftung, Dichtigkeit und Abrasivitätsbeständigkeit sind Gegenstand der Untersuchungen.

Tiling mortar is improved by modification significantly. Why should sprayed concrete not also profit from it for various fields of application? This question is tried to answer by large scale tests in a tunnel cross passage, in an access gallery of a salt mine and in a mining gravity shaft. In situ tests are necessary because the sprayed concrete formula and the process engineering have a significantly influence on the sprayed concrete quality. The fresh concrete properties and the properties of the sprayed concrete like early strength development, the ability to creep, adhesion, density and abrasiveness resistance are object of the examination.

1. Einleitung

Die Spritzbetontechnologie ist für eine erfolgreiche Applikation des Spritzbetons verantwortlich. Teilbereiche wie z.B. die Spritzbetonrezeptur des Nass-Mischgutes können im Labor formuliert werden, das komplexe Zusammenspiel von Dosier-, Misch-, Förder- und Düsensystemen zusammen mit der Applikationstechnik kann aber nur in einem großmaßstäblichen Versuch beurteilt werden.

Drei großmaßstäbliche Insitu-Versuche bzw. Anwendungen mit zum Teil unterschiedlichen Anforderungen an den Spritzbeton werden vorgestellt.

Der Insitu-Versuch in einem Tunnelquerschlag (Kapitel 2) soll klären, ob die Anforderungen an das Nass-Mischgut und die Frühfestigkeitsentwicklung eines modifizierten Spritzbetons entsprechend einem J_2 eingehalten werden können. Für die Beurteilung des Kriechverhaltens werden die Anforderungen an das Prüfverfahren im Zusammenhang mit der Problematik der Probengewinnung definiert und eine mobile Druckprüfanlage vorgestellt. Ein Langzeitversuch wird mittels Fließratenmethode – ein Ansatz für die Beschreibung des Langzeitverhaltens auf Basis von Verschiebungs- bzw. Dehnungsmessungen – ausgewertet.

Der Zugangsstollen eines Salzbergwerks (Kapitel 3) wurde mit modifiziertem Spritzbeton gesichert, wobei hier besondere Anforderungen an die Haftung und Dichtigkeit gestellt wurden. Das Projekt und die Eigenschaften des Spritzbetons werden beschrieben.

Ein weiterer, durch Laborversuche begleiteter, Insitu-Versuch (Kapitel 4) soll die Wirksamkeit der Modifikation von Stahlfaserspritzbeton zum Zweck der Erhöhung der Abrasivitätsbeständigkeit von Seitenwänden eines Abwurfschachtes im Bergbau beurteilen.

2. In situ Versuch in einem Tunnelquerschlag

Im Wesentlichen werden vom Spritzbeton in den Richtlinien eine gute Verarbeitbarkeit und eine rasche Frühfestigkeitsentwicklung gefordert. Die Besonderheit im Tunnelbau mit Spritzbeton besteht darin, dass bereits dem jungen, noch im Erhärtungsprozess befindlichen Spritzbeton große Verformungen aufgezwungen werden. Damit Verformungen bruchfrei aufgenommen werden können sind auch Anforderungen an die Duktilität und an das Kriechvermögen von Spritzbeton zu stellen. Für die Beurteilung der Tragreserve von Spritzbeton über den Beanspruchungsgrad ist die Kenntnis seiner im Allgemeinen mit der Zeit veränderlichen Spannungen und Festigkeiten erforderlich [1]. Die Spannungsberechnung erfolgt heute durch Verschiebungs- bzw. Dehnungsmessungen und eine Spannungs-Dehnungsbeziehung, die aus Langzeitdruckversuchen ermittelt wird.

Mit dem Ziel, Verarbeitbarkeit (Bild 1), Frühfestigkeitsentwicklung (Bild 2,3) und Kriechverhalten (Bild 4 bis 9) eines modifizierten Spritzbetons zu beurteilen, erfolgten im Zuge des Vollausbaus des Nordabschnittes der S 35 Brucker Schnellstraße zwischen Stausee Zlaten und Mautstatt in einem Querschlag des Tunnels Kirchdorf die Spritzbetonapplikation und begleitende Versuche.

Das Nass-Spritzverfahren mit Dichtstromförderung unter Einbeziehung der Liefer- bzw. Wartezeit auf der Tunnelbaustelle von ca. einer Stunde erfordert eine Konsistenz entsprechend einem Ausbreitmaß zwischen 55 cm und 60 cm. Durch Vorversuche im Labor und im Transportbetonwerk (Tabelle 1) konnte die gewünschte Konsistenz erreicht werden. In Tabelle 1 sind auch die Ergebnisse der Nass-Mischung unmittelbar vor dem Applizieren angegeben.

Tab. 1: Frischbetoneigenschaften – Ausbreitmaß, Luftporengehalt und Frischbetonrohddichte

		Vorversuch	Mischung vor Applikation
Ausbreitmaß, sofort	(cm)	58	-
Ausbreitmaß nach 1h	(cm)	55	57
Luftporengehalt	(%)	3,0	5,7
Frischbetonrohddichte	kg/m ³	2335	-



Bild 1: a) Ausbreittisch,

b) Luftporentopf und

c) zylindrische Stahlschalungen



Bild 2: Frühfestigkeitsbestimmung mittels a) Bolzensetzgerät und b) Auszugsgerät

Entsprechend der Richtlinie Spritzbeton [2] wurde die Frühfestigkeitsentwicklung des applizierten, modifizierten Spritzbetons mittels Penetrationsnadelverfahren (PNV) und Bolzensetzverfahren (BSV) bestimmt, wobei beim BSV das Bolzensetzgerät Hilti DX 450 L (Bild 2a) und das Auszugsgerät Hilti Mark-V (Bild 2b) eingesetzt wurden. Die Ergebnisse, entsprechend J_2 , sind im doppeltlogarithmischen Diagramm (Bild 3b) dargestellt.

In Laborspritzversuchen wurde der Beton so modifiziert, dass die Druckfestigkeit der geforderten Frühfestigkeitsklasse J_2 entsprach. Da im Insitu-Versuch vorerst nicht der Festigkeitsabfall durch die Verwendung des Erstarrungsbeschleunigers (EB) untersucht werden sollte, wurde auf das Spritzen des Nullbetons, also auf die Herstellung von beschleunigerfreien Spritzbeton verzichtet.

Die Richtlinie Spritzbeton gibt für übliche Spritzbetone Kalibrierkurven für das PNV und BSV an, empfiehlt aber bei Abweichungen, z.B. in der Härte der Gesteinskörnungen, eine Kalibrierung durchzuführen. Um den Zusammenhang zwischen „Würfel-Druckfestigkeit“ und einaxialer Druckfestigkeit (UCS) abschätzen zu können, wurde die Nass-Mischung in zylindrische Stahlschalungen (Bild 1c) und Mörtelkisten gefüllt und zu bestimmten Zeiten beprobt. In Bild 3a ist dieser Zusammenhang für den Nullbeton dargestellt. Da die UCS an zylindrischen Proben bzw. Bohrkernen mit einem Längen-Durchmesser-Verhältnis von ca. 2 bestimmt wurden, sind die entsprechenden Werte in Bild 3 um 12,5% zu erhöhen. Trotzdem wäre, falls von Interesse, eine eigene Kalibrierung erforderlich.

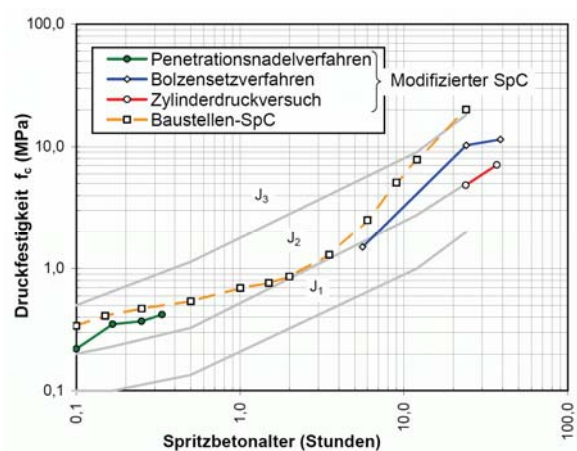
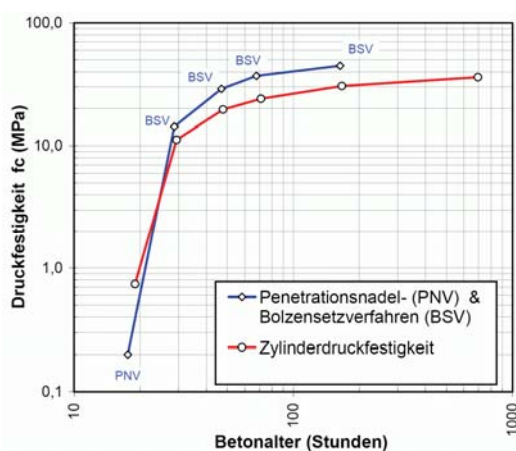


Bild 3: Frühfestigkeitsentwicklung mittels PNV, BSV und Zylinderdruckversuche bestimmt. a) Nass-Mischung in Schalungen gegossenen, b) Spritzbeton an der Tunnellaibung

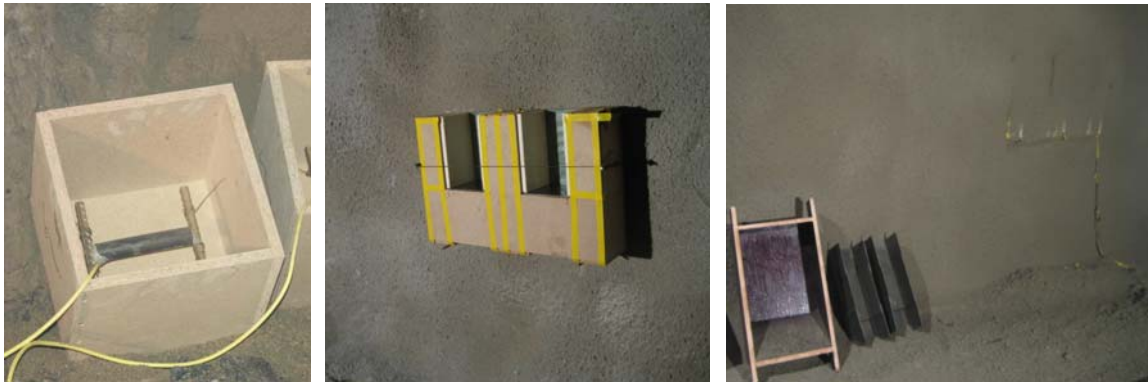


Bild 4: a) SSM-1 bestückte Probenkiste für Schwindversuch, b) Einbauschalung, c) Stahlschalungen und eingespritzte Einbauschalung

Im Spritzbeton kommt es durch das Relaxieren zu einem nicht unbeträchtlichen Spannungsabbau. Die Spannungsberechnung erfordert eine Beschreibung des zeitabhängigen Materialverhaltens, ein zeitabhängiges Materialgesetz. Die Bestimmung der vom Materialgesetz vorgesehenen Materialkennwerte erfolgt anhand von Langzeitversuchen, wobei die Anforderungen an das Prüfverfahren hauptsächlich die Gewinnung der Probekörper betreffen und die Prüfkörperbeschaffenheit wiederum die Anforderungen an die Versuchseinrichtung vorgeben. Probekörper können durch Kernbohrung erst nach ca. acht Stunden bzw. nach einer entsprechenden Festigkeitsentwicklung, 10 MPa lt. [2], entnommen werden. Spritzen in spezielle Stahlschalungen und Einbau der Proben im Labor bzw. in Insitu-Pressen haben ebenfalls Nachteile. Erst durch die mobile Druckprüfanlage (Bild. 5) konnte man nahe an den Idealzustand kommen:

- Probekörper wird zeitgleich mit Tunnelschale hergestellt (Bild 4b)
- Probekörper geometrisch definiert und entspricht in Qualität der Tunnelschale
- Belastungsrichtung des Probekörpers entspricht jener der Tunnelschale
- Belastung kann sofort nach Herstellung des Probekörpers erfolgen
- Klimatische Bedingungen entsprechen jenen im Tunnel

Derzeit kommen auf Basis von Verschiebungs- und Dehnungsmessungen zwei Ansätze für die Beschreibung des zeitabhängigen Materialverhaltens von Spritzbeton zur Anwendung:

- die Fließratenmethode und
- der Zeitverfestigungsansatz.



Bild 5: Mobile Druckprüfanlage, Insitu-Pressen und Probekörper mit Belastungs- und Messeinrichtung in der Tunnellaibung



Bild 6: a) Bohrkernentnahme und b) Langzeitversuchsstände

Die erweiterte Fließratenmethode nach Aldrian [3] zerlegt die Verformungen einer belasteten Spritzbetonprobe in Sofort- und Langzeitverformungen (Bild 8). Die Sofortverformung setzt sich zusammen aus einem sich nach Entlastung sofort zurückverformenden elastischen Anteil, einem bleibenden plastischen Anteil und einem Verdichtungsanteil, der bei der Erstbelastung einer Probe feststellbar ist. Die Langzeitverformung wird unterteilt in lastabhängige Kriechverformung mit bleibenden viskosen und umkehrbaren viscoelastischen Dehnungen sowie in lastunabhängige Verformungen, den Schwind- und Temperaturdehnungen (1).

$$\epsilon_3 = \epsilon_2 + \underbrace{\frac{\Delta\sigma}{E_{28} \cdot V^*(t_2, \alpha)} \cdot f}_{\text{Sofortdehnungsinkrement}} + \underbrace{\sigma_2 \cdot \Delta C \cdot (e^{8\alpha_2 - 6} + 1)}_{\text{viskoses Dehnungsinkrement}} + \underbrace{(\sigma_2 \cdot C_{d\infty} - \epsilon_{d_2}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{-\Delta C}{Q}}\right)}_{\text{viskoelastisches Dehnungsinkrement}} + \Delta\epsilon_{sh} + \Delta\epsilon_t \quad (1)$$

Der Zeitverfestigungsansatz nach Borese-Deere (2) bzw. der ABAQUS-Potenzansatz stellt mit dem Materialparameter a bzw. A, Spannungsexponenten n und Zeitexponenten m ein einfaches Kriechmodell dar. Ein Beispiel für die Parameteridentifikation ist in [3] gegeben.

$$\epsilon_{cr}(t) = a \cdot \sigma^n \cdot t^m \quad (2)$$

Für vier Kriechversuche sind für einen Auslastungsgrad von 61% zu Belastungsbeginn die konstanten Spannungen mit 4,0 MPa und 9,5 MPa und die zugehörige Längsstauchung in Bild 7a als Mittelwert-Kurven dargestellt. Bild 7b zeigt die Schwindstauchung.

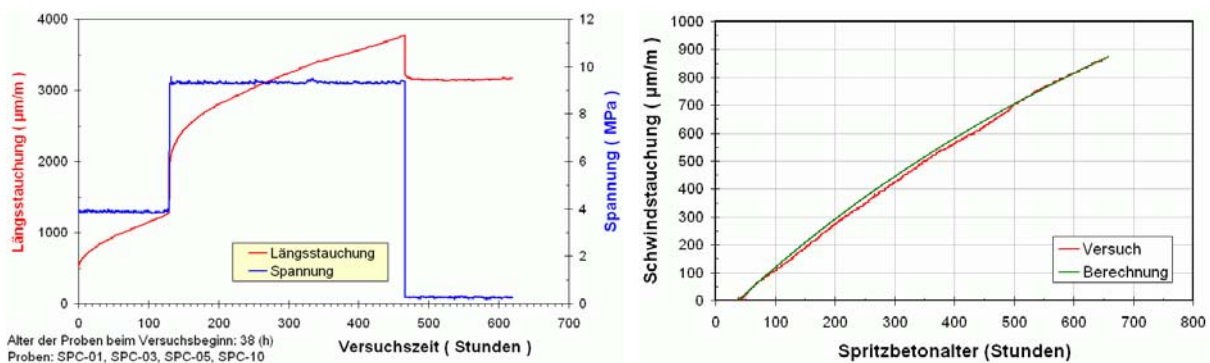
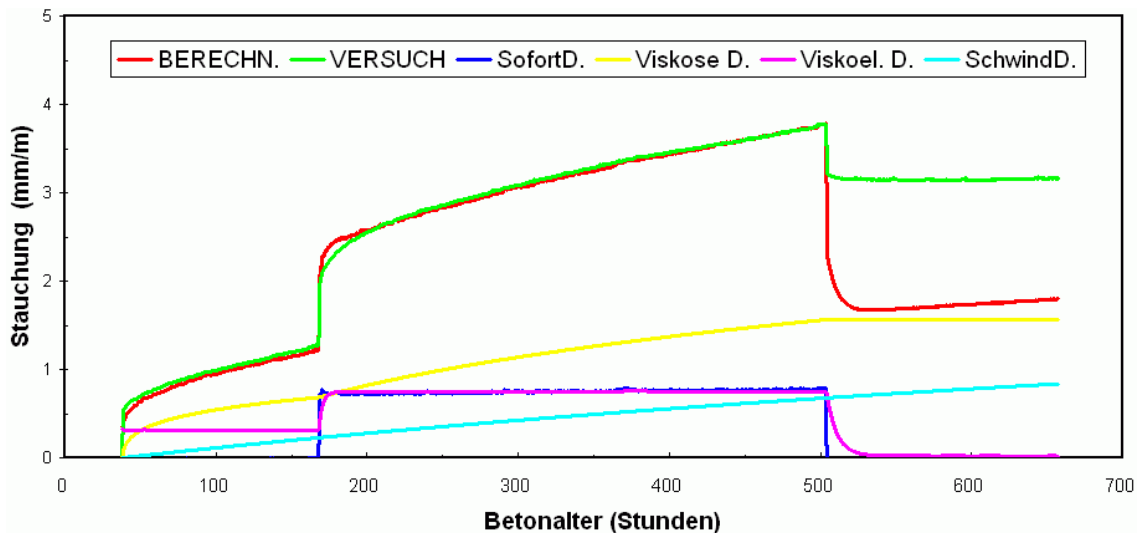


Bild 7: Mittelwertkurven der a) Längsstauchung und Spannung sowie b) Schwindstauchung



Fließratenparameter: Alter zu Versuchsbeginn = 38 h, 28-Tage-Druckfestigkeit = 23 MPa, 28-Tage-Elastizitätsmodul = 14000 MPa, $A = 4,927E-05$, $C_d = 6,332E-05$, $Q = 0,081E-05$
 Endschwindmaß = 2990 $\mu\text{m/m}$, Krümmung der Schwindkurve = 1500, Entlastungsfaktor = 0,982

Bild 8: Fließraten-Parameteridentifikation für die Mittelwertkurve der Längsstauchung

Die Ermittlung der Fließratenparameter (Bild 8) erfolgt iterativ, d.h. die Parameter werden solange variiert, bis sich eine optimale Anpassung des errechneten Dehnungsverlaufes an die Versuchskurve zufolge der gegebenen Belastungsgeschichte ergibt. In Bild 8 sind auch die Dehnungsanteile für die Sofortdehnung, viskose und viskoelastische Dehnung sowie die Schwinddehnung dargestellt. Im Wesentlichen beschreiben der Fließratenparameter A und das Maß für die umkehrbare Kriechverformung C_d die Kriechverformung.

Da die Temperatur einen Einfluss auf das Kriechen eines Probenmaterials hat und auch die Sensoren für die Dehnungsmessung trotz Temperaturkompensation einen Temperaturgang aufweisen, werden Langzeitversuche künftig isotherm gefahren bzw. der Einfluss der Temperatur gezielt untersucht. Zu diesem Zweck hat der Lehrstuhl für Subsurface Engineering im Zuge der EFRE-Grundlagenforschung eine begehbare bzw. befahrbare Klima-Simulationszelle (Bild. 9) erworben, mit den Innenmaßen (LxBxH) 6 m x 3 m x 3 m, einem Temperaturbereich von -15°C bis 80°C und einem relativen Luftfeuchtigkeitsbereich von 10 % bis 90 %. Vorerst sind darin zwei Langzeitdruckversuchsstände für maximale Probengrößen von 20 cm x 20 cm x 40 cm installiert, wobei für belastungsgesteuerte Kriechversuche auch die Möglichkeit besteht, zwei kleinere Proben je Versuchsstand zu beproben. Die Hydraulikanlagen sind auf 70 MPa ausgelegt und können mit entsprechenden Hydraulikzylindern 1000 kN Druckkraft erzeugen.



Bild 9: a) Klimasimulations-Zelle mit b) Hydraulikaggregaten und c) Langzeitversuchsständen

3. Anwendung von modifiziertem Spritzbeton im Salzbergwerk Stetten

Das Salzbergwerk Stetten (Baden-Württemberg) der Wacker Chemie AG dient seit über 150 Jahren der Gewinnung von Steinsalz im Untertageabbau. Die Verwendung ist vielfältig: Vorwiegend wird das Salz als Auftausalz für den winterlichen Straßenverkehr oder als Chemiesalz für die Gewinnung von Natronlauge und Chlor verwendet. Die durch den Abbau entstandenen Hohlräume der Lagerstätte können zur Sicherung wieder verfüllt werden. Die vorhandenen zwei Zugänge sind aufgrund der Streckenführung mit Standardfahrzeugen nicht zugänglich. Deshalb wurde im Juni 2007 damit begonnen, einen neuen Zugang zu bauen, der mit regulären Lastkraftwagen befahren werden kann. Der Sprengvortrieb wurde als Vortriebsverfahren für die 905 m lange Zufahrt mit einem Gefälle von 10 Prozent gewählt.

Ziel der Applikation eines modifizierten Spritzbetons im Bergwerk war es, dessen Eigenschaften bzw. deren Verbesserungen zu untersuchen. Als Vorbereitung für die praktische Verwendung dieser Spritzbetontechnologie wurden in Laborversuchen die Grundlagen untersucht. Der neu entwickelte modifizierte Spritzbeton konnte im Oktober 2007 erstmals unter realen Bedingungen für anwendungstechnische Versuche herangezogen werden. Diese Versuche zeigten neben der Reduzierung des Rückpralls weitere interessante Eigenschaften mit zusätzlichem Nutzen (Haftung und Dichtigkeit) und ermöglichten Anfang 2008 eine breitere Anwendung im Tunnel.

Nachdem in den ersten Monaten der Vortrieb im Salzbergwerk Stetten reibungslos verlief, trat nach ca. 450 m Tunnellänge vermehrt, unkontrolliert Wasser ein. Das Wasser bedingte neben der Anwendung von stahlmattenbewehrtem Spritzbeton auch eine umfangreiche Sicherung mit Injektionen (Bild 10).

Diese ungünstigen Bedingungen führten dazu, dass sich die Vortriebsleistung von 140 Meter pro Monat (m/M) auf 50 m/M reduzierte und dass im Januar 2008 mit weniger als 10 m/M nahezu ein Stillstand erreichte wurde. Der für April 2008 geplante Durchschlag verzögerte sich dadurch um ca. drei Monate (Bild 11).



Bild 10: Wasseraustritt aus der mit Spritzbeton gesicherten Ortsbrust

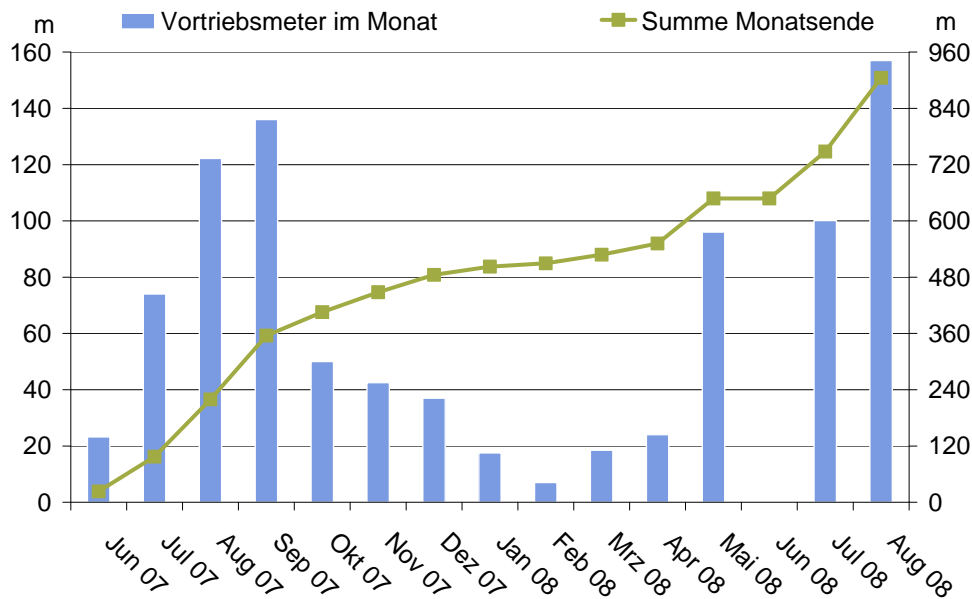


Bild 11: Vortriebsleistung Stetten

Die ursprünglich für das Bauvorhaben vorgesehene Nassspritzbetonrezeptur erfüllte bei trockenen Verhältnissen ihre Funktion der Sicherung, bei nassem Untergrund zeigten sich jedoch Schwächen hinsichtlich der Haftung. Die in Bild 12 dargestellte Ablösung, hervorgerufen durch Durchfeuchtung und Wasserdruck, erschwerte das Auftragen des Spritzbetons und führte zu einer lokalen Schwächung. Deshalb war ein gezieltes Nachspritzen erforderlich.

Da ein Baustopp vermieden werden sollte, wurde beschlossen, den modifizierten Spritzbeton mit verbesserten Eigenschaften einzusetzen. Insgesamt war der kritische Bereich mehr als 100 m lang, besonders kritisch waren hiervon ca. 50 m.



Bild 12: Typische Ablösung des unmodifizierten Spritzbetons bedingt durch drückendes Gebirgswasser

In den Vorversuchen wurden die Additive in Pulverform oder aber auch als wässriger Bestandteil im Betonmischwerk zugegeben. Für den großflächigen Einsatz wurde die wässrige Variante verwendet, da sich in diesem Fall Vorteile in der Handhabung im Betonmischwerk ergaben.

Insgesamt wurden 15 m³ Additiv mit einer Dosierung von 40 Litern auf einen Kubikmeter Beton verarbeitet. Der so hergestellte modifizierte Spritzbeton konnte ohne jegliche Beeinträchtigung für Herstellung oder Transport zur Baustelle geliefert werden. Bei der Besichtigung der Versuchsflächen im Ulmenbereich zeigte der Standard-Spritzbeton (rechts im Bild 13) viele Durchfeuchtungsstellen, die sich mit den Beobachtungen während der Spritzbetonanwendung erklären lassen. Der modifizierte Spritzbeton (links im Bild 13) hingegen haftet deutlich besser auf feuchtem Untergrund, ist zudem dichter und neigt insgesamt zu geringerer Rissbildung.

Die Überwachung der Frischbetonkennzahlen zeigt die Gleichmäßigkeit der Mischungen auch hinsichtlich der Eignung für den Transport. Hier ist ein stabiles Verhalten im Ausbreitmaß gewünscht (Tabelle 2).

Tab. 2: Frischbetoneigenschaften und Zylinderdruckfestigkeiten (f_{cyl}) gemessen an Bohrkernen mit 100 mm Durchmesser und 200 mm Höhe

Additiv	Referenzbeton	Modifizierter Beton	Modifizierter Beton
	ohne	wässrig	Pulver
Additiv auf Zement (%)	0	5 (Feststoff)	5 (Feststoff)
W/Z Wert	0,47	0,47	0,47
Temp. Frischbeton (°C)	12	20	12
Ausbreitmaß, sofort (cm)	58	55	58
Ausbreitmaß nach 1h (cm)	58	55	58
f_{cyl} nach 1d (N/mm ²)	16,6	10,5	15,3
f_{cyl} nach 7d (N/mm ²)	17,0	22,1	17,1
f_{cyl} nach 28d (N/mm ²)	36,9	39,8	35,6



Bild 13: Ulmenbereich mit kleinflächiger Anwendung: modifizierter Spritzbeton (links) und Referenzspritzbeton (rechts)

4. Großversuche zum Einsatz von modifiziertem Spritzbeton als Auskleidungswerkstoff von Sturzschächten

Der steirische Erzberg ist der größte Erztagebau Mitteleuropas und die größte Sideritlagerstätte der Welt. Das Wertmineral ist ein karbonatisches Eisenerz, Siderit oder auch Eisenspat genannt, das in stark wechselnder Intensität mit einem Eisen-Magnesium-Karbonat, dem Ankerit, verwachsen ist. Die Ritzhärte (Mohshärte) von Siderit und Ankerit ist mit 4 als charakteristisch anzugeben. Da zwischen porphyroider Unterlage und erzführender Formation ein gleitender Übergang (Übergangsporhyroid) besteht, werden gezwungenermaßen auch Teile des Liegenden gewonnen [4]. Die Petrographie betrachtet den Porphyroid als einen metamorphen Ignimbrit, der im Ordovizium durch Ablagerung aus einer Lavaglutwolke entstanden ist [5]. Der Mineralbestand des Porphyroids ist hauptsächlich Quarz, Feldspat, Glimmer und Chlorid. Betrachtet man jetzt die Mohshärte, dann sieht man, dass die Minerale des Nebengesteins wie zum Beispiel der Quarz (Mohshärte 7) oder der Feldspat (Mohshärte 6,5) eine wesentlich höhere Mohshärte als die Erzminerale haben. Daraus folgt, dass die Nebengesteine einen höheren Beitrag zum Verschleiß des Auskleidungswerkstoffes in den Sturzschächten am Erzberg leisten werden.

Neben der Härte sind noch die Festigkeit, Größe, Form, Struktur (harte Phasen innerhalb eines Kornes, Spaltbarkeit), Korngrößenverteilung des Kollektives und Systemeigenschaften wie das Härteverhältnis zwischen Korn und Werkstoff maßgebende Eigenschaften, die die Abrasivität von Gesteinskörnern in Hinblick auf die Verschleißwirkung an Auskleidungsmedien beeinflussen. Tribologisch betrachtet, stellen die Gesteinskörner, die zum Verschleiß am Auskleidungswerkstoff führen, den Abrasivstoff dar. Der Auskleidungswerkstoff wird als Grundkörper bzw. Festkörper betrachtet (Bild 14) [6].

In der Auskleidung der Sturzschächte kommt es zu Mikrozerspannung und Ritzung. Diese Form des Verschleißes wird als abrasiver Verschleiß bezeichnet. Den Widerstand, den ein Werkstoff diesem Verschleiß entgegenbringt, nennt man Abrasivitätsbeständigkeit. Als Werkstoffe für die Auskleidung kommen zum Teil Verschleißplatten aus Stahl und zum Teil Granitsteine zum Einsatz.

Aufgrund des zeitaufwändigen Arbeitsprozesses beim Tausch der Verschleißplatten und der Granitsteine, der für diese Zeit eine Stilllegung des Betriebes bedingt, wurde von der VA Erzberg GmbH nach Alternativen für die Auskleidung der Schächte gesucht. Im Rahmen dieser Suche wurde der Einsatz von modifiziertem Stahlfaserspritzbeton unter Zugrundelegung von Insitu-Versuchen und begleitenden Untersuchungen im Labor studiert.



Bild 14: Beanspruchungsarten des Auskleidungswerkstoffes

Die Beanspruchungsart der Festkörperoberfläche durch den Abrasivstoff, dem primär zerkleinerten Gestein, kann im Sturzschacht des Erzbergs erstens als Stoß- bzw. Prallbeanspruchung bezeichnet werden, da das durch den Primärbrecher zerkleinerte Gestein infolge der Schwerkraft und etwaiger Auslenkung durch den Zerkleinerungsvorgang mit beträchtlicher Geschwindigkeit auf die Auskleidung des Sturzschachtes trifft. Die zweite Beanspruchungsart stellt sich aufgrund der kontinuierlichen Förderung des Materials durch die Abzugspunkte am Fuße des Sturzschachtes dar. Durch das Abziehen des zerkleinerten Gesteins stellt sich ein Gleiten der Gesteinskörner entlang der Auskleidung ein, welches zu einer Druckbeanspruchung führt. Die Stoß- bzw. Prallbeanspruchung führt zu einem Abrasiv-Stoßverschleiß, der auch Prallverschleiß genannt wird. Hingegen tritt aufgrund des Gleitens der Gesteinskörner entlang der Auskleidung der Abrasiv-Gleitverschleiß ein.

Durch die Verwendung von modifiziertem Stahlfaserspritzbeton erwartete man sich eine hohe Verschleißbeständigkeit. Da der Spritzbeton nach zirka 30 Stunden 80 % seiner Endfestigkeit erreicht, kann gewährleistet werden, dass nach nur sehr kurzen Betriebsunterbrechungen das gewonnene Gestein wieder problemlos durch den Sturzschacht gefördert werden kann. Bei Durchführung der Sanierungsarbeiten an Wochenenden, könnten Betriebsunterbrechungen der Vergangenheit angehören. Auch das Problem, dass zerstörte und dadurch gelöste Stahlelemente in nachfolgenden Bereichen der Aufbereitung zu Schäden führen, wäre damit beseitigt.

Der Stahlfasergehalt betrug zu Beginn der Versuche 40 Kilogramm je Tonne Trockenmischgut (TM). Zur Insitu-Kontrolle des Verschleißes wurde schwarz eingefärbter Stahlfaserspritzbeton direkt an den Spritzgrund aufgebracht. Erst darauf wurde ungefärbter Stahlfaserspritzbeton aufgespritzt (Bild 15).

In der Fachliteratur findet man Angaben über das Verschleißverhalten des mit dem Stahlfaserspritzbeton vergleichbaren Stahlfaserbetons und dessen mögliche Einsatzgebiete. Die Internetseite Beton.org – eine Serviceseite der Deutschen Zement- und Betonindustrie – liefert folgende Aussagen:

- „Verringerung der Verschleißtiefe: Abnutzungserscheinungen z.B. bei Fußböden lassen sich bei einer Dosierung von 1,0 Vol.-% Stahlfasern um bis zu 25% verringern.“
- „Höhere Belastbarkeit / Schlagfestigkeit: Die Schlagfestigkeit ist dadurch definiert, wie oft ein definiertes Gewicht auf der Betonoberfläche auftreffen muss, bis es zum Bruch kommt. Bei Stahlfaserbeton ist die Schlagfestigkeit bis zu 20-mal höher als bei vergleichbaren Betonen ohne Stahlfasern.“

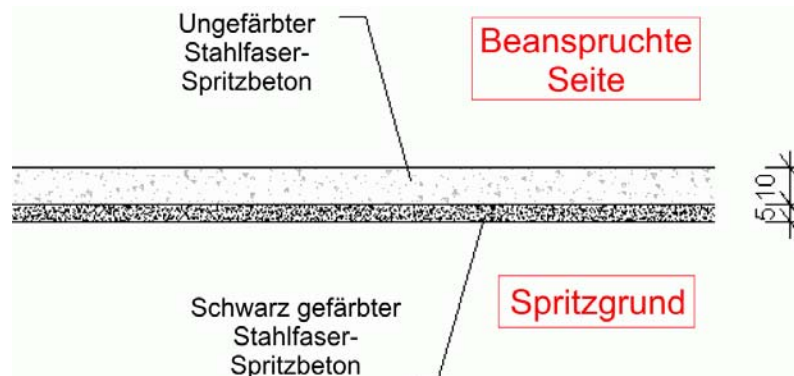


Bild 15: Verschleißkontrolle durch unterschiedlich gefärbte Spritzbetonlagen

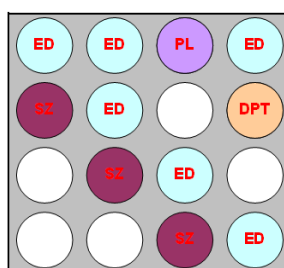
Aufgrund der Ähnlichkeit von Stahlfaserbeton und Stahlfaserspritzbeton wurde versucht diese Erkenntnisse am Erzberg zu nutzen. Begonnen wurde mit dem Auftragen des schwarz eingefärbten Stahlfaserspritzbetons direkt auf die Oberfläche des Spritzgrundes. Die Stärke dieser schwarzen Stahlfaserspritzbetonschicht wurde mit 5 cm festgelegt, wodurch ein zuverlässiger Verschleißindikator aus schwarzem Stahlfaserspritzbeton gewährleistet war.

Zur Überprüfung des Materialverhaltens des am Erzberg verwendeten Stahlfaserspritzbetons wurden begleitende Labor- und Insitu-Versuche durchgeführt. Alle Spritzbetonproben wurden im Werk der Firma Schretter & Cie hergestellt und nach Leoben bzw. zur VA Erzberg GmbH geliefert.

Das Ziel der Insitu-Versuche war, die Erkenntnisse über die Abrasivitätsbeständigkeit und Kompatibilität des Stahlfaserspritzbetons mit den am Erzberg geförderten Gesteinsarten zu überprüfen und quantitative Versuchsergebnisse zu produzieren. Zusätzlich zu den im Sturzschant eingesetzten Stahlfaserspritzbetonsorten wurden im Bereich der Aufbereitungsanlage Insitu-Versuche an weiteren Stahlfaserspritzbetonsorten einerseits durch Verwendung von Quarzsand als Zuschlag und andererseits durch Verwendung von Quarzsand als Zuschlag und ferner der Zugabe von Zusatzmitteln der Firma Wacker Chemie durchgeführt. Zusätzlich wurde bei diesen Stahlfaserspritzbetonsorten der W/Z-Wert im Vergleich zum W/Z-Wert des im Sturzschant eingebrachten Stahlfaserspritzbetons abgeändert, um dadurch die Matriceigenschaften des Spritzbetons zu verbessern.

Durch diese Insitu-Versuche mit diesen alternativen Stahlfaserspritzbetonsorten sollte beurteilt werden, ob sich die Verbesserung der Matriceigenschaften und die Verwendung von abrasivitätsbeständigeren Zuschlagsstoffen (Quarzsand) inklusive der Verwendung von Zusatzmitteln positiv auf das Verschleißverhalten auswirkt.

Als Ziel der Materialprüfungen im Labor sollte ermittelt werden, ob die Erhöhung des Stahlfasergehaltes von 40 kg auf 60 kg Stahlfasern je Tonne TM zu einer Verbesserung der Materialeigenschaften und dadurch zu einer möglichen Erhöhung der Abrasivitätsbeständigkeit von Stahlfaserspritzbeton führt. Bild 16 zeigt die Probenentnahme aus den angelieferten Probekörpern und die Zuteilung der gebohrten Probekörper zu den verschiedenen Laborversuchsarten.



LEGENDE:





-  Einaxialer Druckversuch
-  Point-Load-Index Test
-  Spaltzugversuch (Brazilian Test)
-  Double Punch Test



Bild 16: Probenentnahme im Labor.

Die arithmetischen Mittel, der im einaxialen Druckversuch bestimmten Materialkennwerte, sind bei den Probekörpern mit 40 Kilogramm Stahlfasern je Tonne TM etwas höher als bei jenen Probekörpern mit 60 Kilogramm Stahlfasern je Tonne. Somit wirkt sich die Erhöhung des Stahlfasergehaltes für die aus dem einaxialen Druckversuch (Bild 17a) ermittelten Materialkennwerte nicht positiv aus (Tabelle 3).

Tab. 3: Vergleich der arithmetischen Mittelwerte der im einaxialen Druckversuch ermittelten Materialkennwerte bei unterschiedlichem Stahlfasergehalt

Mittelwerte	STF 40	STF 60	Differenz (STF60-STF40)
E-Modul (MPa)	29260	28770	-490
V-Modul (MPa)	26000	25320	-680
Querdehnungszahl	0,13	0,12	-0,01
UCS (MPa)	60,2	56,4	-3,8

Auch aus dem arithmetischen Mittelwert der Versuchsergebnisse der Spaltzugversuche (Bild 17b) ist durch die Erhöhung des Stahlfasergehaltes keine Vergrößerung der Spaltzugfestigkeit festzustellen (Tabelle 4).

Tab. 4: Vergleich der Spaltzugfestigkeit in MPa bei unterschiedlichem Stahlfasergehalt

Probe	STF 40	STF 60	Differenz (STF60-STF40)
21-T1	5,57	5,83	0,26
21-T2	4,71	5,78	1,07
21-T3	6,15	5,60	-0,55
32-T1	5,85	4,75	-1,10
32-T2	5,58	4,92	-0,66
32-T3	4,67	5,12	0,45
43-T1	4,85	4,97	0,12
43-T2	5,92	4,99	-0,93
43-T3	7,09	3,90	-3,19
Mittelwert	5,60	5,09	-0,51

Die aus den Point-Load-Tests ermittelten Point-Load-Indizes sind in Tabelle 5 ersichtlich. Die Erhöhung des Stahlfasergehaltes führt auch beim Point-Load-Test (Bild 17c) zu keiner Erhöhung des Point-Load-Index.

Tab. 5: Vergleich des Point-Load-Index bei unterschiedlichem Stahlfasergehalt

Probe	STF 40	STF 60	Differenz (STF60-STF40)
13-T1	4,33	4,51	0,18
13-T2	4,90	4,56	-0,34
13-T3	4,74	4,48	-0,36
Mittelwert	4,66	4,48	-0,18

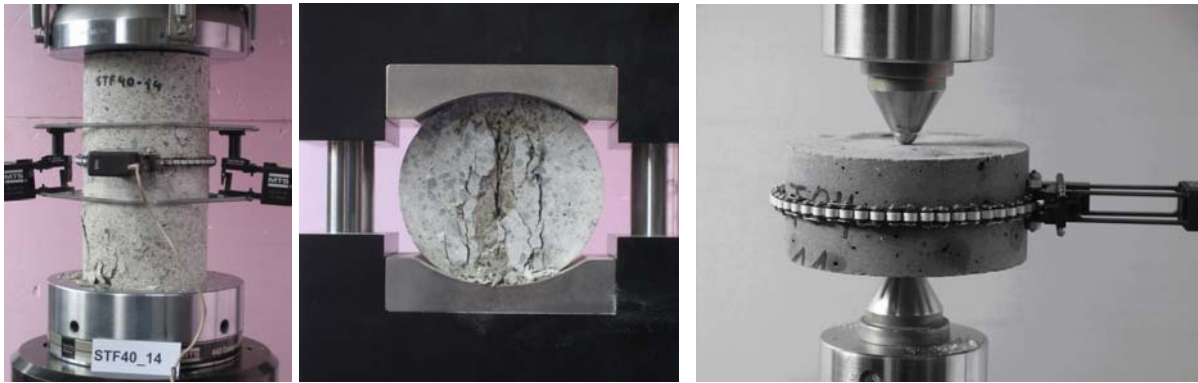


Bild 17: a) Einaxialer Druckversuch, b) Spaltzugversuch, c) Point Load Test

Um einen Zusammenhang zwischen den im Labor ermittelten Versuchsergebnissen und der Aufgabenstellung der VA Erzberg GmbH herzustellen, wurden im Betriebsgelände der VA Erzberg GmbH Insitu-Versuche durchgeführt. Ziel dieser Versuche war es, das Materialverhalten für die am Erzberg typischen Belastungsverhältnisse (Art der Belastung, Gesteinstyp) zu beurteilen. Dazu wurden von der Firma Schretter & Cie Versuchsplatten mit unterschiedlicher Spritzbetonzusammensetzung hergestellt und an einer Materialübergabestelle der Aufbereitungsanlage eingehängt; damit wurden diese Versuchsplatten extremen Verschleißbeanspruchungen ausgesetzt (Bild 18).

Als Versuchsdaten wurden die Zeit, in der die Spritzbetonplatten der Belastung ausgesetzt sind, die Masse an Gestein, die über die Spritzbetonplatten gefördert wurde und die Masse der Spritzbetonplatten vor und nach den Versuchen aufgezeichnet. Durch Bestimmen der Masse einer Platte vor dem Versuch und nach dem Versuch kann der Masseverlust bestimmt werden, der als charakteristischer Kennwert zur Beurteilung der Abrasivitätsbeständigkeit herangezogen werden kann.

Zur Beurteilung der Abrasivitätsbeständigkeit des Stahlfaserspritzbetons wurden von der Firma Schretter & Cie in einer ersten Versuchsserie jeweils zwei Platten mit 40 Kilogramm und 60 Kilogramm Stahlfasern je Tonne TM hergestellt. Nach 110 Stunden hatten zirka 21.000 Tonnen Gestein die Stahlfaserspritzbetonplatten passiert. Der Verschleiß war immens hoch, sodass der erste Versuch nach 110 Stunden abgebrochen wurde.



Bild 18: Insitu-Versuche mit Versuchsplatten an einer Materialübergabestelle der Aufbereitungsanlage zur Untersuchung des Verschleißverhaltens

Der Ausbau der Versuchsplatten erfolgte aus betriebstechnischen Gründen trotzdem erst nach einem Materialfluss von 270.000 Tonnen bzw. einer Versuchszeit von 12 Wochen. Beim Ausbau der Platten stellte sich heraus, dass während des Versuchs zwei Platten vollständig zerstört wurden und es war klar ersichtlich, dass die in der ersten Versuchsserie gewählten Stahlfaserspritzbetonsorten den an der Übergabestelle vorherrschenden Belastungen nicht gewachsen waren.

Die Insitu-Versuche der nächsten Versuchsserie wurden unter Anwendung eines verringerten W/Z-Wertes, der Verwendung von Quarzsand als Zuschlagstoff und bei zwei Versuchsplatten zusätzlich mit Verwendung von Zusatzmitteln der Firma Wacker Chemie durchgeführt. Makroskopischen Beobachtungen zufolge waren die Verschleißerscheinungen im Vergleich zur ersten Versuchsserie nach 100 Stunden Versuchsdauer bzw. einem Materialfluss von 20.000 Tonnen nicht so stark ausgeprägt und das Verschleißbild wirkte gleichmäßiger. Nach einem Materialfluss von 270.000 Tonnen Gestein wurden die Platten wieder ausgebaut.

Vergleich der Versuchsserien der Insitu-Versuche: Obwohl die Ergebnisse der Gewichtsverlustmethoden keine große Differenz zeigten, spricht einiges für eine höher Abrasivitätsbeständigkeit der Stahlfaserspritzbetonplatten der zweiten Versuchsserie. Wie bereits oben erwähnt, erscheint das Verschleißbild der Platten der zweiten Versuchsserie nach 100 Stunden deutlich gleichmäßiger; ferner waren beim Ausbau der Versuchsplatten nach einem Materialfluss von 270.000 Tonnen gegenüber der ersten Versuchsserie noch alle vier Stahlfaserspritzbetonplatten intakt. Somit hat sich die Zugabe des Quarzsandes als Zuschlag, die Beigabe des Zusatzmittels der Wacker Chemie und die Veränderung des W/Z-Wertes positiv auf das Verschleißverhalten ausgewirkt.

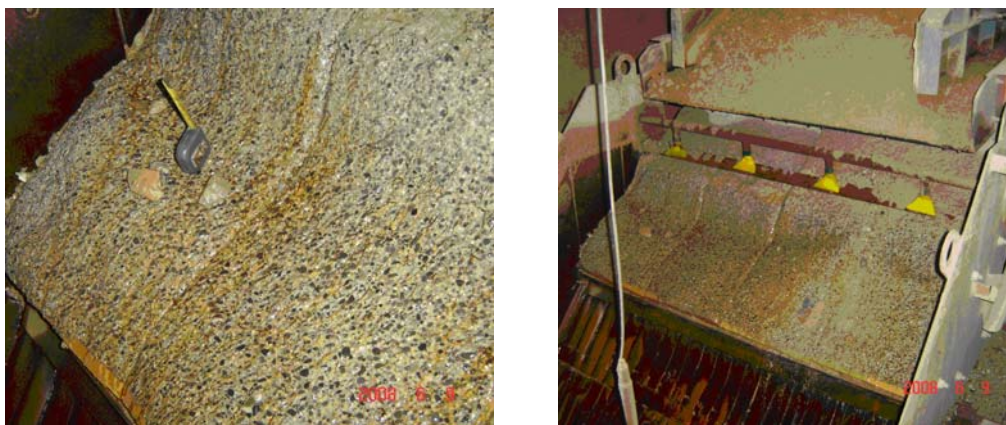


Bild 19: Verschleißbild der Versuchsplatten der zweiten Testserie

5. Zusammenfassung

Der Einsatz von modifiziertem Spritzbeton unter Baustellenbedingungen – im Fall der Anwendung im Tunnelquerschlag bzw. des Zugangstollens – und unter Betriebsbedingungen im Bergbau hat sich bewährt.

Der Insitu-Versuch im Tunnelquerschlag mit seinen Vorversuchen und seinem begleitenden Versuchsprogramm hat gezeigt, dass der modifizierte Spritzbeton die Vorgaben erfüllt. Dies und die Modifikation in Richtung verstärktes Kriechvermögen werden Gegenstand weiterer Versuche sein.

Bei der Herstellung eines Zugangsstollens zeigte der Standard-Spritzbeton Schwächen in der Haftung auf nassem Untergrund bzw. bei drückendem Gebirgswasser. Erst durch die Umstellung auf modifizierten Spritzbeton konnte ein Baustopp vermieden und der Zugangsstollen in akzeptabler Bauzeit fertig gestellt werden.

In einem Insitu-Versuch für den Bergbau konnte bei Verwendung von modifiziertem Stahlfaserspritzbeton eine Erhöhung der Abrasivitätsbeständigkeit festgestellt werden. Der Vergleich der Ergebnisse von verschiedenen Laborversuchen an Stahlfaserspritzbetonen mit unterschiedlichen Fasergehalten ergab auf Grund der Probengröße keine signifikanten Unterschiede.

6. Literatur

- [1] Pittino, G.; Gharekhani, G.; Krenn, F.; Stelzer, G.; Golser, J.:
Spritzbeton – der etwas andere Beton, Untersuchungen zum Materialverhalten und Prüfung. Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004) Heft 2, S.97-102.
- [2] Richtlinie Spritzbeton:
Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB). Wien 2004.
- [3] Pittino, G.:
Tragverhalten des Gesamtsystems „Alpines Salzgebirge – Grubengebäude – Laugungsrückstand“. Dissertation MU-Leoben, 2002.
- [4] <http://www.abenteuer-erzberg.at>, am 18.03.2008.
- [5] <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Porphyroid>, am 18.03.2008.
- [6] Uetz, H.:
Abrasion und Erosion: Grundlagen, betriebliche Erfahrungen, Verminderung. Carl Hanser Verlag. 1986.

Die Autoren

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Robert Galler

Studium des Bergwesens und Dissertation an der Montanuniversität Leoben, von 1997 bis 2006 bei Planungsbüro GEOCONSULT, seit 2006 Leiter des Lehrstuhls für Subsurface Engineering der Montanuniversität Leoben.

robert.galler@unileoben.ac.at

Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerhard Pittino

Studium des Bauingenieurwesens an der TU Graz, Dissertation an der Montanuniversität Leoben, Leiter des Technikums für Materialprüfung des Lehrstuhls für Subsurface Engineering.

Gerhard.Pittino@unileoben.ac.at

Dipl. Ing. (FH) Klaus Bonin

Studium der Chemischen Technologie an der Fachhochschule Darmstadt, seit 2000 in der Anwendungstechnik „Construction Polymers“ bei Wacker Chemie AG

klaus.bonin@wacker.com

Dr. Jürgen Bezler

Studium der Chemie an der Universität Würzburg und Business Administration am Henley Management College (UK), seit 2007 Leiter der Anwendungstechnik Europa/NME „Construction Polymers“ bei Wacker Chemie AG

juergen.bezler@wacker.com