
Zusatzmittel für die moderne Spritzbetontechnologie

ADMIXTURES IN MODERN SHOTCRETE TECHNOLOGY

DIPL.-ING. DIETER MAI, SIKA AG, ZÜRICH

Der moderne Tunnelbau für die notwendige Erschließung neuer und bestehender Verkehrswege gewinnt weltweit immer stärkere Bedeutung.

Der Anteil beider Spritzbetonverfahren (Trocken- und Naßspritzverfahren) nimmt ständig weiter zu, dies vor allem auch in der Schweiz, einem Land mit großen Tunnelprojekten mit extrem hohen Überlagerungen. Der Schwerpunkt liegt heute hier immer deutlicher bei der Anwendung des Naßspritzverfahrens. Dabei sind hohe Anforderungen nicht nur an die Spritzbetonqualität und Wirtschaftlichkeit gestellt, sondern in zunehmendem Maße gewinnen auch ökologische Gesichtspunkte an Wichtigkeit.

Sowohl im Trocken- wie auch Naßspritzverfahren werden zur Zeit stark alkalische Abbindebeschleuniger eingesetzt, die z. T. erhebliche Festigkeitsreduktionen verursachen.

Besonders beim Trockenspritzverfahren sind der hohe Rückprall (25 - 40 %) und starke Staubbela- stungen bekannt.

Zur Zeit ist besonders aus der BRD eine Entwicklung zu berichten, die Spritzbeton im Trockenspritz- verfahren ohne jeglichen Zusatz von alkalischen Abbindebeschleunigern fordert, damit z. B. Trink- oder Heilwassereinzugsgebiete vor eventueller Kontaminierung geschützt werden können.

Die moderne Spritzbetontechnologie beinhaltet daher zwingend die Neuentwicklung entsprechend umweltfreundlicher Zusatzmittel sowohl für das Trocken- wie auch für das Naßspritzverfahren. Dies muß in enger Zusammenarbeit der Maschinen- und Zusatzmittelhersteller erfolgen.

Neben der Bereitstellung von herkömmlichen Abbindebeschleunigern und Zusatzmitteln, wie Hochleistungsverflüssiger, Stabilisatoren und Silicafume- bzw. Silicaslurry-Produkte, hat die Sika AG Zürich Anfang 1992 zwei neuartige Zusatzmittel auf Basis einer wäßrigen kolloidalen Lösung von amorpher Kieselsäure der Öffentlichkeit vorgestellt.

Diese Produkte, ökologisch als absolut unbedenklich eingestuft, erlauben je nach Anwendungsfall eine Verringerung oder gar den Verzicht auf herkömmliche Beschleuniger, bei gleichzeitiger maximaler Rückprall- und Staubreduktion.

In diesem Bericht werden neue Praxisbeispiele für beide Spritzverfahren vorgestellt.

Die Forschungsabteilung der Sika Finanz AG hat einen neuen alkalifreien, als umweltfreundlich ein- zustufenden Spritzbetonbeschleuniger entwickelt und patentiert, der sich zur Zeit in der Erprobungs- phase befindet. Erste Praxiserfahrungen werden hier ebenfalls berichtet.

Modern tunneling designed to construct new and to improve existing traffic routes is gaining in importance world-wide.

Both the dry-mix and the wet-mix shotcrete method are increasingly being used, especially in Switzerland, a country with outstanding tunnel projects with extremely large overburden. The main focus has clearly shifted to the wet-mix method. Besides the major requirements with regard to the shotcrete's quality and the economic viability, ecological aspects have become more and more important.

With both the dry-mix and the wet-mix method, strongly alkaline accelerators are currently being used, which partly lead to a substantial loss in strength.

Especially the dry process is characterized by massive rebound (25 to 40 %) and considerable dust formation.

Among recent developments, a trend in Germany must be mentioned which calls for dry-mix shotcrete without alkaline accelerators in order to protect catchment areas for drinking and curative water from contamination.

Modern shotcrete technology therefore necessarily involves the development of new environment-friendly admixtures for both dry-mix and wet-mix shotcrete. These efforts must be pursued in close cooperation with the manufacturers of equipment and the suppliers of admixtures.

In addition to traditional accelerators and admixtures, such as superplasticizers, stabilizers, silicafume and silicaslurry products, at the beginning of 1992 SIKA AG Zurich presented to the public two new admixtures on the basis of an aqueous colloidal solution of amorphous silicic acid.

With these products, classified as absolutely harmless from the ecological viewpoint, it is possible to reduce the amount of accelerator or even to proceed without any accelerator, while at the same time a maximum reduction of rebound and dust can be achieved.

The paper presents new practical examples for both methods.

The research department of Sika Finanz AG has developed and patented a new alkali-free accelerator classified as environment-friendly, which is currently being tested. The author will also report on the first practical experience with this product.

1. Einleitung

Der moderne Tunnelbau für die notwendige Erschließung neuer und bestehender Verkehrswege gewinnt weltweit immer stärkere Bedeutung. Dabei sind hohe Anforderungen nicht nur an die Spritzbetonqualität und Wirtschaftlichkeit gestellt, sondern in zunehmendem Masse gewinnen auch ökologische Gesichtspunkte an Wichtigkeit.

Neben den beiden grundsätzlichen Spritzbetonverfahren, wie dem Trocken- und Naßspritzverfahren, erfordern natürlich auch die unterschiedlichen Ausbauverfahren spezifische Anpassungen des Spritzbetons.

So geht die Entwicklung in der Schweiz, einem Land mit großen Tunnelprojekten mit extrem hohen Überlagerungen, "fast zwangsläufig in Richtung einschalige Bauweise" /1/. Dies bedeutet in der Regel eine Verminderung der Gesamtausbaustärke um 20 bis 30 cm, setzt daher aber von Beginn an eine hohe Spritzbetonqualität

voraus. Hierbei wird vornehmlich eine hohe Qualität bezüglich Wasserundurchlässigkeiten und Festigkeiten, hohe Spritzleistungen bei minimalem Rückprall und minimaler Staubentwicklung angestrebt.

In der Schweiz nimmt daher bei größeren Tunnelprojekten der Anteil des Naßspritzverfahrens ständig weiter zu, nicht zuletzt aus der Erkenntnis heraus, daß bei einem 1991 durchgeführten Forschungsprojekt mit der Schweizerischen Unfall-Versicherungsanstalt (SUVA) /2/, bisher nur beim Naßspritzverfahren Feinstaubkonzentrationen im Bereich der MAK-Werte gemessen werden konnten.

Die moderne Spritzbetontechnologie beinhaltet daher zwingend die Bereitstellung und Neuentwicklung entsprechend wirksamer Zusatzmittel, die vermehrt auch ökologischen Gesichtspunkten gerecht werden.

Nachfolgend wird versucht einen Überblick über die Zusatzmittel für Spritzbeton zu geben,

Neuentwicklungen und den praktischen Nutzen anhand von Einsatzbeispielen aufzuzeigen.

2. Zusatzmittel

Unter Betonzusatzmitteln versteht man allgemein Stoffe die dem Beton in flüssiger oder pulveriger Form zugegeben werden. Sie beeinflussen durch chemische und/oder physikalische Wirkung die Frisch- und Festbetoneigenschaften. Sie werden in geringen Prozentsätzen (bis 5% bez. a. d. Zementgewicht) im Betonmischwerk oder, speziell bei Spritzbeton, meist an der Düse zugegeben.

Wie nicht nur in Deutschland üblich, können die folgenden für Spritzbeton wichtigen Wirkungsgruppen unterschieden werden :

- Betonverflüssiger und Fließmittel
- Beschleuniger und Verzögerer
- Stabilisierer - Luftporenbildner
- Dichtmittel

Hierbei vermindern Betonverflüssiger und Fließmittel den Wasseranspruch des Betons und Verbessern seine Verarbeitbarkeit.

Beschleuniger wirken primär auf das Erstarrungsverhalten kurz nach Kontakt des Zementes mit dem Anmachwasser ein und Verzögerer gewährleisten die Verarbeitbarkeit von Beton durch geringes Ansteifen über lange Zeit ohne Qualitätsverluste.

Stabilisierer dienen einerseits dazu Bluten und Entmischen des Betons zu verhindern, andererseits können sie durch Erhöhung der Klebwirkung bei den Spritzbetonverfahren dazu beitragen, wirksame Rückprall- und Staubemissionsreduktionen zu bewirken.

Luftporenbildner sorgen für die gezielte Einführung gleichmäßig verteilter feiner Poren, die die Frost/Tau- und Tausalzbeständigkeit sicherstellen.

Dichtungsmittel sollen Betone gegen aufsteigende Feuchtigkeit und Fließwasser zusätzlich schützen, indem sie dem Beton hydrophobe Eigenschaften verleihen und die kapillare Wasseraufnahme vermindern.

In den weiteren Ausführungen kann näher nur auf die für die moderne Spritzbetontechnologie besonders wichtigen Wirkungsgruppen, nämlich die Stabilisierer und Abbindebeschleuniger eingegangen werden.

2.1 Stabilisierer

Anlässlich der Europäischen Tunnelbautagung 1992, im Februar 92 in Olten/Schweiz, konnten erstmals zwei neuartige Produkte auf Basis kolloidaler Kieselsäure der Öffentlichkeit vorgestellt werden.

2.1.1 Wirkungsweise der Stabilisierer auf Basis kolloidaler Kieselsäure

Es handelt sich um eine wässrige, kolloidale Dispersion von amorpher Kieselsäure¹ (SiO₂). Das Siliciumdioxid liegt in Form von untereinander nicht vernetzten, kugelförmigen Einzelpartikeln vor, die an der Oberfläche Hydroxylgruppen tragen. Die Partikel bilden spezifische Oberflächen (nach BET) von > 200 m²/g und liegen somit im Vergleich mit Silicafume (10 - 20 m²/g) um etwa das Zehnfache höher, bei entsprechend geringerem Partikeldurchmesser.

Es ist bekannt, daß solche Kieselsäuresole chemisch relativ instabile Systeme sind, die durch Zugabe von Elektrolyten oder durch Veränderung des pH - Wertes in ein Gel umgewandelt werden können.

Das flüssige Zusatzmittel bewirkt daher, hauptsächlich durch schnelles Gelieren bei Zugabe zu Spritzbeton an der Düse, daß vermehrt Feinanteile gebunden werden und auch die Klebrigkeit der einzelnen Teilchen erhöht wird.

Dadurch gelingt es, auch bei vergleichsweise geringen Dosierungen (2 - 3 %, bez. a.d. Zementgewicht), Rückprall- und Staubreduktionen von erheblichem Ausmaß zu erzielen, sowohl im Trocken- wie auch im Naßspritzverfahren (Dichtstrom und Dünnstrom). Daneben erlaubt die Anwendung das Auftragen von dicken Schichten in einem Arbeitsgang und den Verzicht (ganz oder teilweise) auf herkömmliche Beschleunigerzugabe, falls nur geringe Frühfestigkeiten erforderlich sind.

Weiter wird durch den Einsatz von kolloidaler Kieselsäure beim Spritzen mit stahlfaserarmiertem Beton der bislang hohe Verlust an Stahlfasern reduziert. Dies konnte anhand einer 1991 in der Schweiz durchgeführten umfassenden Untersuchung von Stahlfaserspritzbeton /3/ nachgewiesen werden. Der Einsatz von kolloidaler

¹ *Spritzbetonzusatzmittel auf Basis von kolloidaler Kieselsäure, anorganischen Neutralsalzen und neutral reagierenden organischen Verbindungen sind durch Sika® -Patente und Patentanmeldungen weltweit geschützt.*

SiO₂ ermöglichte überhaupt erst die Weiterführung der Studie, da sämtliche Vorversuche am hohen Stahlfaserverlust beim Spritzen gescheitert waren.

Unproblematisch ist auch die abrasionsfreie Dosierung, die direkt in die Wasserzuleitung vorgenommen werden kann und, last but not least, die ökologische völlige Unbedenklichkeit der Produkte. Sie benötigen keine besonderen Vorsichtsmaßnahmen bei der Handhabung wie z.B. stark alkalische Beschleuniger und sind nach schweizerischer Gesetzgebung als "giftklassefrei" deklariert. Die Zusatzmittel sind außerdem als "nicht wassergefährdend" (WGK 0) eingestuft worden.

In der Bundesrepublik Deutschland wurde das Prüfzeichen vom Institut für Bautechnik, Berlin als Stabilisator für den Trockenspritzbereich erteilt. Am Hygiene-Institut, Gelsenkirchen konnte eine Unbedenklichkeitsbescheinigung für die Verwendung als Zusatzmittel im Grundwasserbereich, wie z.B. im Tunnelbau ausgestellt werden.

2.2 Abbindebeschleuniger

Um auf senkrechten oder überkopf liegenden Flächen Betonschichten aufspritzen zu können, die unmittelbar nach dem Aufprall erstarren, setzt man dem Spritzbeton oder -mörtel Beschleuniger zu, die praktisch im Zeitverlauf von wenigen Minuten eine Erstarrung des Gefüges bewirken. Leider wird durch die herkömmlichen BE-Mitteln der eigentliche Erhärtungsverlauf negativ beeinflusst, d.h., die Endfestigkeiten werden gegenüber nicht beschleunigtem Beton mehr oder weniger stark herabgesetzt.

In Bild 1 ist eine Übersicht der Abbindebeschleuniger-Entwicklungen speziell für Spritzbeton und -mörtel und ihre Wirkung auf die Endfestigkeiten dargestellt.



Bild 1: Übersicht: Abbindebeschleuniger - Typen für Spritzbeton und -Mörtel

Neben den heute am meisten eingesetzten Beschleunigern auf Alkali-Aluminat-Basis, findet in einigen Ländern Wasserglas (Na-Silicat) nach wie vor Anwendung, obwohl hohe Festigkeitsverluste und Aussinterungen der Spritzbetonschalen die Folge sind.

Neuentwicklungen dagegen sind zementöse Minerale, die hauptsächlich in Japan eingesetzt werden. Es handelt sich hierbei um spezielle Zementklinkerminerale (Calcium-Aluminate), die aus sorgfältig aufgearbeiteten Pulvergemischen im Zement-Drehrohröfen gebrannt werden.

An dieser Stelle sind auch Spezialzemente auf vorwiegend Portlandzementbasis, die sog. sulfatarmen Zemente zu nennen, die in letzter Zeit in Deutschland und Österreich entwickelt werden.

Weitere Beschleunigertypen basieren auf anorganischen Neutralsalzen und neutral reagierenden organischen Salzen.

2.2.1 Wirkungsweise von Abbindebeschleunigern



Bild 2: REM-Aufnahme einer Portlandzement-Matrix, nadelförmiger Ettringit

Die Mehrzahl der Beschleunigertypen wirkt als rasche Erstarrungshilfe, indem sie den Reakti-

onsablauf der Klinkerphase Tricalciumaluminat (C₃A) beeinflussen. Dies gilt für die Alkali-Aluminate, die zementösen Minerale, die anorganischen neutralen Salze und in gewisser Weise auch für die sulfatarmen Zemente. Letztere erzeugen allerdings nicht verstärkt das auch unter "Zementbazillus" bekannte Mineral Ettringit, das in Bild 2 in nadelförmiger Kristallform zu erkennen ist, sondern durch die Abwesenheit von genügend Sulfat reagiert ein großer Teil des C₃A direkt mit dem Anmachwasser und führt zum schnellen Abbinden des Zementes.

Die verstärkte Ettringit-Bildung

In Bild 3 sind die für die Praxis wichtigsten Eigenschaften der Klinkerminerale schematisch dargestellt. /4/ Dabei entsprechen die Kreisflächengrößen den Mengenanteilen der Klinkerphasen in einem durchschnittlichen Portlandzement. Zu beachten ist die für die schnelle Erstarrung verantwortliche C₃A-Klinkerphase.

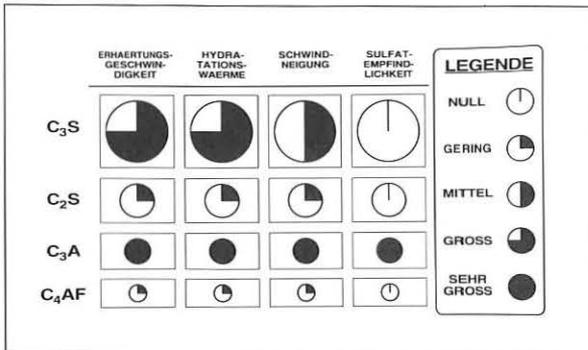


Bild 3: Klinkerminerale und ihre wichtigsten Eigenschaften, nach Keil, F. /4/

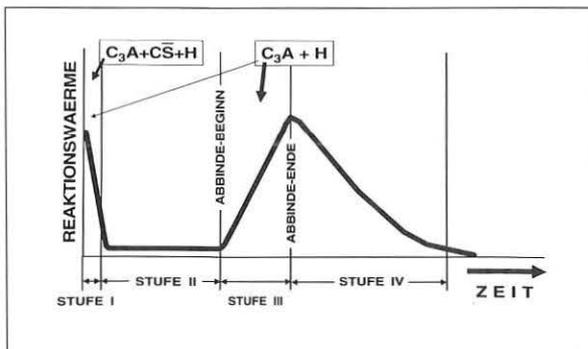


Bild 4: Normaler Hydrationsablauf des Portlandzementes (schematisch)

Bild 4 gibt den Ablauf der normalen Hydratation eines Portlandzementes wieder. Betrachtet man nur die Hydratation der Calciumaluminat, so geht diese zunächst unter lebhafter Beteiligung des Sulfats unter Wasserüberschuß vor sich. Dieses Sulfat stammt hauptsächlich aus dem zugemahlenden Gips, aber auch aus den Al-

kalisulfaten, die wegen ihrer Leichtlöslichkeit schnell und in ansehnlichen Mengen zur Verfügung stehen.

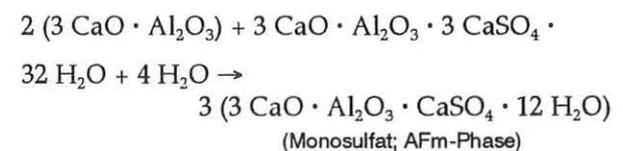
Das zugrundeliegende Reaktionsschema lautet in "zementchemischer Schreibweise":



Das wasserreiche neugebildete Trisulfat setzt sich auf der Aluminatoberfläche fest, was einen weiteren Wasserzutritt verzögert und damit das Raschbinden des Portlandzementes verhindert. Angesichts der Neigung des Ettringit zur Bildung nadelförmiger Kristalle, ist die Fähigkeit eine wirkungsvolle Schutzhülle um die Aluminate zu bilden, nicht gerade offensichtlich. Die Erklärung kann im schnellen Kristallwachstum zu finden sein, das bei so rasch verlaufenden Oberflächenreaktionen weniger ausgebildete Kristalle entstehen läßt.

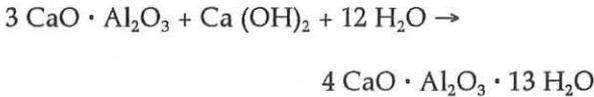
Dies geschieht wie gesagt in den ersten Sekunden bis Minuten nach Wasserkontakt, danach folgt die sog. "dormante Phase", die in der Regel 1 bis 3 Stunden andauert und mit dem Erstarrungsbeginn oder "Initial Set" endet. Hierbei kommt es sehr wahrscheinlich zu einer Rekristallisation der Ettringit-Kristalle, die durch "Brückenbildungen" in die Zwischenräume der Zementkörner wachsen und so zu einer Erstarrung des Systems führen. Daneben findet natürlich auch die direkte Hydratation des C₃A allmählich ihren Fortschritt.

Die gesamten komplexen Vorgänge der Zementhydratation sind auch heute noch nicht erschöpfend geklärt, aber soviel kann gesagt werden, daß auch nachdem aller ursprünglich vorhandene Gips verbraucht wurde, Aluminat immer noch reichlich vorhanden ist und seine Neigung zur Bildung von Aluminatsulfaten natürlich nicht verloren hat. "Und so macht sich denn das noch vorhandene Trialuminat über den Ettringit her und nimmt ihm einen Teil seines Sulfatgehaltes wieder ab." /5/



Der Ettringit wird also in das sulfat- und was-

serärmere "Monosulfat" überführt, das als die stabile Aluminatsulfatverbindung im erhärteten Portlandzement angesehen werden kann. Erst wenn überhaupt kein Sulfat mehr zur Verfügung steht, kommt es zur Bildung von reinem Calciumaluminathydrat. Diese Hydratation erfolgt über eine Reihe von Zwischenstufen bis zum chemisch stabilen C_3AH_6 (auch Hydrogranat genannt). Es konnte jedoch beobachtet werden, daß im Portlandzement diese Phase nicht erreicht wird, sondern daß nach folgendem Schema reagiert wird:



Es entstehen also kalkreichere Aluminathydrate unter Umsetzung von bei der Hydratation der Klinkerminerale C_2S und C_3S freigewordenen Kalkhydrates ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Die letzte Phase des Hydratationsvorganges läßt dann nur mehr einen stetigen Abfall der Hydratationswärme erkennen.

Kommen wir nun wieder zurück zu den Abbindebeschleunigern und ihrer Wirkungsweise. Wie bereits anfänglich erwähnt, beginnt das Erstarren des Zementes mit der Reaktion zwischen C_3A und Sulfat, die zu Ettringit- (Trisulfat-) -Bildung führt. Durch Zugabe oben erwähnter Beschleuniger kann diese Reaktion, welche beim Zement ohne entsprechendes Zusatzmittel nach Sekunden bis zu wenigen Minuten zum Stillstand kommt, so stark beschleunigt werden, daß ein sofortiges Erstarren eintritt. Diese Erstarrung wird durch eine vermehrte Bildung von Ettringit ausgelöst. Dies kann quantitativ erfaßt werden (Bild 5). Für Erstarrungsbeschleuniger interessiert der Reaktionsablauf in den ersten 5 Minuten. /6/

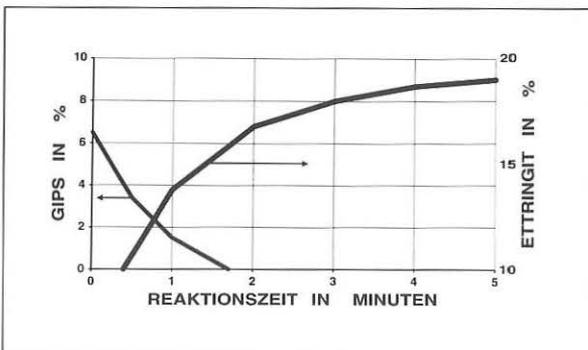


Bild 5: Quantitative Bestimmung des Gips- bzw. Ettringitgehaltes eines mit 5% Aluminat beschleunigten PZ

Da die unterschiedlichen Klinkerminerale auch charakteristische Hydratationswärmen aufweisen, die je nach Zementzusammensetzung, Mahlfeinheit und Beschleunigerzugabe zu unterschiedlichen Abbinde-temperaturverläufen führen, lassen sich anhand solcher Temperaturmessungen auch Aussagen über die Art und Wirkungsweise der Beschleuniger gewinnen.

Bild 6 gibt z.B. die Wärmeentwicklung zweier unterschiedlicher Portlandzemente als Summe der vier nach Bogue berechneten Klinkerminerale für die ersten drei Hydratationstage wieder. Der große Einfluß des C_3A -Gehaltes auf die Hydratationswärmeentwicklung ist gut zu beobachten.

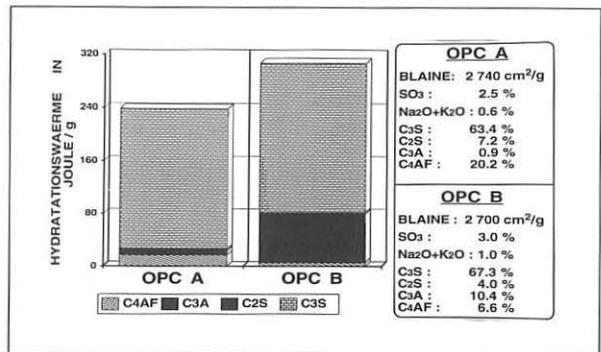


Bild 6: Hydratationswärmen nach 3 Tagen, berechnet aus der Klinkerzusammensetzung nach Bogue

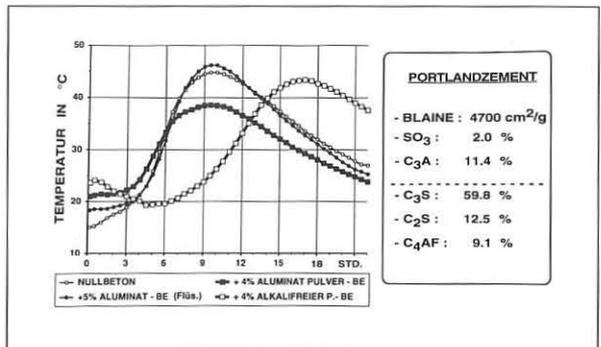


Bild 7: Abbinde-temperaturmessungen an Spritzbetonen mit unterschiedlichen Beschleunigern (25 % PZ + 75 % Zuschlag 0/8)

Bild 7 zeigt in-situ Abbinde-temperaturmessungen des Autors an Spritzbetonen gleichen Zementes mit unterschiedlichen Beschleunigertypen. Die Messungen wurden nicht im Labor-kalorimeter unter adiabatischen Bedingungen vorgenommen, sondern im Versuchsstollen direkt an Spritzkisten, die während der Messung annähernd konstanten Umgebungstemperaturen ausgesetzt waren. Die Beschleunigertypen unter-

scheiden sich erstens durch unterschiedliche Anfangstemperaturniveaus, die durch exotherme Abbindereaktionen in den ersten Minuten hervorgerufen werden, zweitens durch die Höhe des Haupttemperaturmaximums und drittens durch dessen Zeitpunkt nach Erstarrungsbeginn.

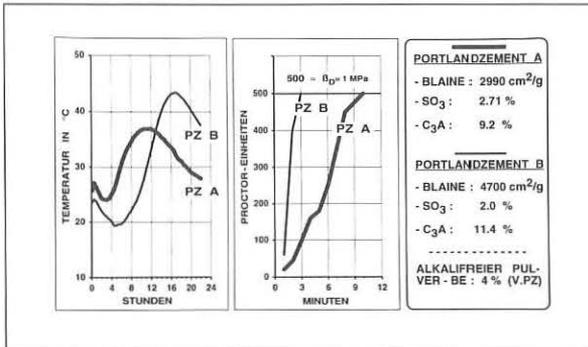


Bild 8: Abbinde- und Frühfestigkeitsmessungen an Spritzbetonen mit 2 unterschiedlichen PZ (25 % PZ + 75 % Zuschlag 0/8)

In Bild 8 sind Temperaturmessungen an zwei unterschiedlichen Portlandzementen, bei 4%-Dosierung eines alkalifreien Pulverbeschleunigers, dargestellt. Daneben erkennt man die Verläufe der Frühfestigkeitsentwicklung, ermittelt mit dem Proctor-Nadelgerät (3mm-Nadel). Der mahlfeinere (4700 Blaine) C₃A-reichere Zement B zeigt ein deutlich höheres Haupttemperaturmaximum als der gröbere C₃A-ärmere Zement A und kann somit als reaktiver bezeichnet werden, was sich auch in den Verläufen der Frühfestigkeiten entsprechend ausdrückt.

3. Applikationsbeispiele

3.1 Einsatz von kolloidaler Kieselsäure (SiO₂) im Naßspritzverfahren

In der Schweiz wurden 1992 u. a. Baustellenversuche im Naßspritzverfahren mit Dichtstromförderung durchgeführt. Es handelte sich um Eignungsprüfungen mit 4 Spritzvarianten, die sich ausschließlich durch differenzierte Zusatzmitteldosierungen unterschieden. Zur Anwendung kam ein Spritzmobil mit einer speziell konstruierten 2-Komponenten Dosieranlage mit Linear-Stromwandler mit Zusatzluft im Düsenbereich. Die Prinzipskizze ist in Bild 9 dargestellt. Der verwendete Beton konnte problemlos appliziert werden, so daß sogar ohne Schmiermischung gefahren werden konnte. Zusammensetzung und weitere allgemeine Versuchsdaten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die 4 Spritzvarianten unterschieden sich wie folgt :

- Variante 1: 1-Komp. Dosierung mit 4,3 % Aluminat - BE (flüssig); Sicherungsbeton, direkt auf Fels gespritzt
- Variante 2: 1-Komp. Dosierung mit 4,2 % Aluminat - BE (flüssig); Sicherungsbeton, auf vorgespitzten Untergrund
- Variante 3: 2-Komp. Dosierung mit 3,0 % Aluminat - BE plus 2,6 % kolloidaler SiO₂; Sicherungs- oder Ausbaubeton, auf vorgespitzten Untergrund
- Variante 4: 1-Komp. Dosierung mit 2. 6 % kolloidaler SiO₂; Ausbaubeton, auf vorgespitzten Untergrund

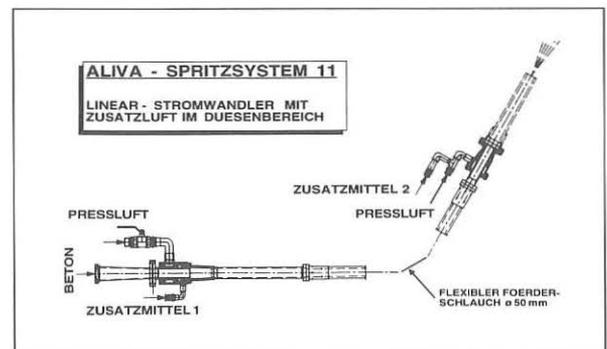


Bild 9: Baustellenversuch Naßspritzen im Dichtstrom 2-Komponenten-Dosierung

Allgemeine Versuchsdaten	
Zement	425 kg/m ³ PCHS
Zuschlag	1 750 kg/m ³
Siebkurve	0/4 (61 %) - 4/8 (27 %) - 8/16 (12 %)
Zusatzstoffe	Silicafume 20 kg/m ³ (~5 %) HBV - VZ 4,3 kg/m ³ (1 %)
Zusatzmittel	Aluminat Abbindebesch. und/oder kolloide Kieselsäure
Chargen pro Spritzetappe	3 m ³
Spritzbereich	½ Kalotte à 4 m
Auftragsstärke	ca. 7 - 10 cm
Spritzleistung	12 m ³ /h

Tab. 1: Baustellenversuch Naßspritzen im Dichtstrom - Variation der Zusatzmittel -

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Graphische Darstellungen der Festigkeitsentwicklungen und der gemessenen Rückprallwerte sind den Bildern 10 - 11 zu entnehmen.

Die 2-Komponenten Dosierung bewirkt nicht nur eine Rückprallverminderung unter 10 %,

sondern auch höhere Endfestigkeitswerte. Die Reduktion des herkömmlichen Beschleunigers unter gleichzeitiger Zugabe der kolloidalen SiO₂ konnte aber auch günstig für die Staubreduktion, Ökologie, Spritzzeitreduktion und generelle Qualitätssteigerung bewertet werden. Die Kosten sind vergleichbar mit denen von Variante 1. Es besteht Übereinstimmung darüber, daß durch noch optimalere Düsenführung, DruckluftEinstellung und Betonrezeptur eine weitere Rückprallreduktion zu erreichen sein wird.

		Versuch			
		Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4
<u>Frischbeton:</u>					
Raumgewicht	kg/m ³	2368	2391	2400	2365
Luftporen	%	2,9	2,3	2,3	3,1
Temp. Beton	°C	18	17	17	17
Temp. Luft	°C	18	18	18	18
Ausbreitmaß	cm	50	49	48	50
W/Z		0,47	0,46	0,46	0,46
<u>Zusatzmittel:</u>					
Beschleuniger	%	4,3	4,2	3,0	0,0
kolloidales SiO ₂	%	0,0	0,0	2,6	2,6
Auftragsfläche		Fels gesprengt	SpB	SpB	SpB
Frühfestigkeit, 12 h	MPa	n.b.	n.b.	14,6	n.b.
Bohrkern- druckfestigkeit 7 Tage	MPa	30,1	33,5	35,9	46,0
28 Tage	MPa	45,6	46,0	51,3	63,2
Rückprall	%	16	13	9	10

Tab. 2: Baustellenversuch Naßspritzen im Dichtstrom - Versuchsdaten -

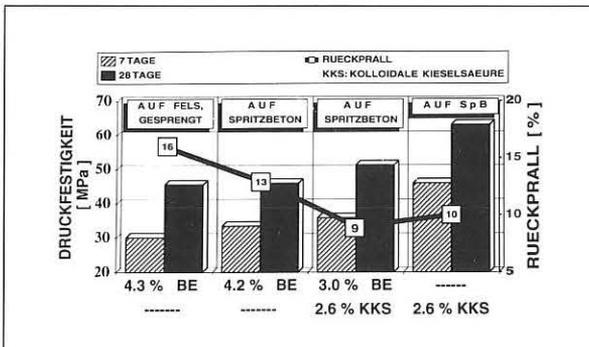


Bild 10: Baustellenversuch Naßspritzen im Dichtstrom - Festigkeitsentwicklung 7 - 28 Tage -

Die Resultate der Variante 4 beweisen, daß es ohne weiteres möglich ist, für Spritzbetone ohne Frühfestigkeitsanforderungen, Spritzstärken um 10 cm auch ohne herkömmlichen Beschleuniger mit nicht modifiziertem Portlandzement aufzutragen. Voraussetzung sind ein trockener Untergrund und optimale Düsenführung. Belohnt

werden diese Bemühungen mit deutlich höheren Festigkeiten und geringen Rückprallverlusten.

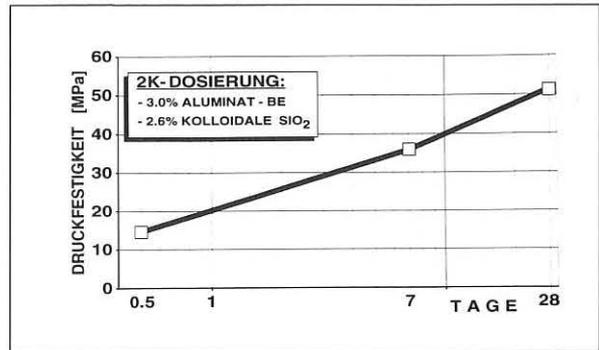


Bild 11: Baustellenversuch Naßspritzen im Dichtstrom - Festigkeitsentwicklung 0,5 - 28 Tage

Die bei diesen Eignungsprüfungen gestellten Anforderungen bezüglich Qualität, Rückprall und Staub konnten durch den Einsatz von kolloidaler Kieselsäure mit Sicherheit erfüllt werden.

3.2 Einsatz von kolloidaler Kieselsäure (SiO₂) im Trockenspritzverfahren

In Deutschland konnten 1992 Trockenspritzversuche unter Einsatz von kolloidaler SiO₂ an einem Tunnelprofil-Modell durchgeführt werden.

Ziel der Versuche war der Einsatz von Trockenspritzbeton ohne jeglichen Zusatz von herkömmlichen stark alkalischen Abbindebeschleunigern, um z.B. Trink- und Heilwasserschutzgebiete vor eventueller Kontaminierung zu schützen. Aus diesem Grunde sollte ein Trockengemisch, bestehend aus sulfatarmem Portlandzement (380 - 400 kg/m³) und ofengetrocknetem Zuschlag aus Rheinsand/Kies 0/8 mm, zum Einsatz kommen. Im Verlauf von Vorversuchen stellte sich heraus, daß der sulfatarme Zement schlagartig bei Wasserkontakt erstarrte und daher einerseits noch in der Spritzdüse zu Verstopfen neigte und andererseits, was noch schlimmer zu beurteilen war, Rückprallmengen von erheblichem Ausmaß (40 - 50 %) verursachte, da der überwiegende Anteil des Trockengemisches bereits erstarrt auf die Wandung aufprallte. Da es sich um vorgetrocknetes Material handelte, war auch eine erhebliche Staubemission zu beobachten.

Es wurden daher drei Varianten, basierend auf obigem Trockengemisch, wie folgt, appliziert :

- Variante 1: Trockengemisch ohne jegliche Zusatzmittel bzw. -stoffe
- Variante 2: Trockengemisch unter Zusatz von 16 % Silicafume Slurry
- Variante 3: Trockengemisch unter Zusatz von 3 % kolloidaler SiO₂ und unter Verwendung eines Wasser-Hochdruck-Systems

Die Varianten 1 + 2 wurden unter Normalwasserdruck-Bedingungen durchgeführt.

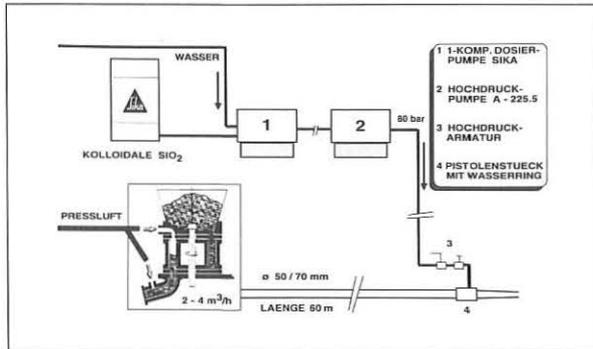


Bild 12: Spritzbeton ohne BE (D) Einsatzordnung Trockenspritzen HD - Wasserpumpe AL - 225.5 und -Düsensystem Al - 221.2

In Bild 12 ist die Einsatzordnung für Variante 3 schematisch dargestellt. Unter Normaldruck wird über eine 1-Komponenten Dosierpumpe die kolloidale Kieselsäure dem Düsenwasserzulauf zugegeben. Die nachgeschaltete Hochdruckpumpe erhöht den Flüssigkeitsdruck auf 80 - 100 bar. Über einen Hochdruckschlauch wird das Wasser/kolloidale SiO₂-Gemisch zur Hochdruckarmatur am Pistolenstück geleitet und durch einen Spezial-Wasserring in den Materialstrom verspritzt. Der Aufbau des HD-Düsensystems ist Bild 13 zu entnehmen. Die Anordnung ermöglicht ein intensiveres Benetzen des Trockenmaterials als dies mit Normaldruck möglich ist.

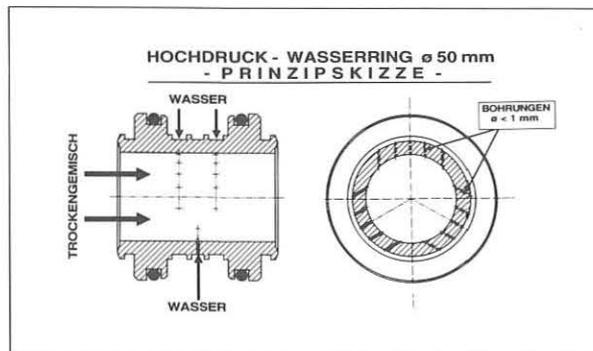


Bild 13: Spritzbeton ohne BE (D) Hochdruck - Düsensystem Typ Aliva - 221.2

Qualitativ sind die erhaltenen Resultate in Bild 14 bewertet. Während das Spritzen ohne Zusätze (Variante 1) durch zahlreiche Verstopfer an der Düse gekennzeichnet war, konnte Variante 2 durch Verstopfen der Wasserringdüse (vgl. hierzu auch Bild 17) bzw. durch Verstopfen der Slurry- Pumpe beim generellen Handling nicht überzeugen. Bei der Bewertung der Klebkraft, vor allem überkopf, konnte der Einsatz kolloidaler Kieselsäure als zufriedenstellend bewertet werden. Ebenso wurden die besten Ergebnisse bezüglich Rückprall und Staubemission durch den kombinierten Einsatz von kolloidaler SiO₂ und Hochdruck-Wasser-System bewerkstelligt.

	SPRITZBETON		
	OHNE ZUSATZ	+ 16 % SLURRY	+ 3 % Koll. SiO ₂
HANDLING	[White box]	[White box]	[Dark grey box]
KLEBKRAFT UEBERKOPF	[Light grey box]	[Light grey box]	[Dark grey box]
RUECKPRALL	[White box]	[Light grey box]	[Dark grey box]
STAUBEMISION	[White box]	[Light grey box]	[Dark grey box]

UNBEFRIEDIGEND
 MITTELMAESSIG
 ZUFRIEDENSTELLEND

Bild 14: Spritzbeton ohne BE (D) Trockenspritzversuche an einem Modell (Tunnelprofil) - Ergebnisse -

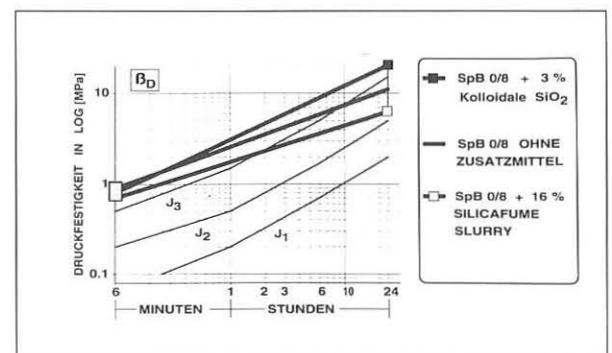


Bild 15: Spritzbeton ohne BE (D) - Frühfestigkeitsentwicklung -

Die Festigkeitsentwicklungen sind in den

Bildern 15 und 16 graphisch aufgetragen. Die Frühfestigkeiten liegen, wie eingangs schon erwähnt, bei allen drei Varianten hoch. Variante 3 mit Zusatz kolloidaler Kieselsäure erfüllt mit Sicherheit die Anforderungen der ÖBV-Richtlinie "J3". Die weitere Festigkeitsentwicklung dieser Variante ist ebenfalls positiv zu bewerten. Die hohen Druckfestigkeitswerte sind u.a. darauf zurückzuführen, daß der Einsatz der kolloidalen SiO_2 das Erstarrungsverhalten des sulfatarmen Zementes beruhigt ohne dabei gleichzeitig eine Wasser/Zement-Wert-Erhöhung nötig zu machen. Wasserdurchflußmessungen während der Versuche haben dies bestätigt. Sie sind aus Bild 17 ersichtlich.

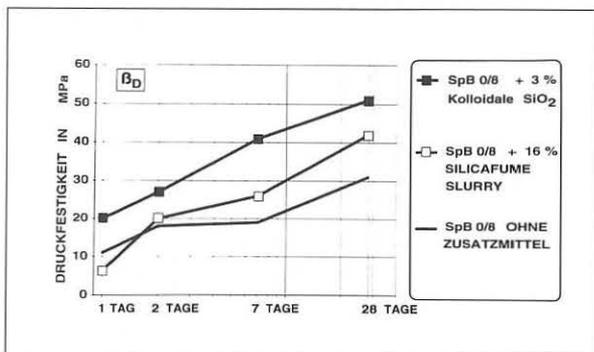


Bild 16: Spritzbeton ohne BE (D) - Festigkeitsentwicklung -

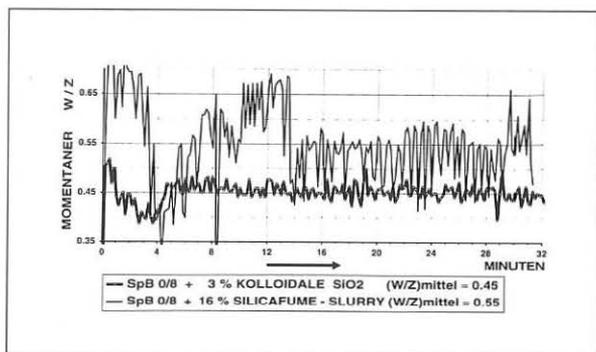


Bild 17: Spritzbeton ohne BE (D); Momentaner W/Z-Wert bestimmt mittels Durchflußmessgerät

Hierbei konnten die mittels elektronischem Durchflußmessgerät gemessenen momentanen Wasserdurchflußraten (l/min), unter der Voraussetzung eines konstanten Materialflusses, in momentane W/Z-Werte ((W/Z) momentan) umgerechnet und dargestellt werden. Neben den unterschiedlichen mittleren W/Z-Werten ((W/Z) mittel) ist bei der Slurry-Variante ein deutlich unregelmäßiger Durchfluß zu beobachten. Dies ist sehr wahrscheinlich zum erheblichen Teil auf kurzzeitige Verstopfer in den Wasserring-Bohrungen zurückzuführen. Ein

wahrscheinlich totaler Wasser/Slurry-Unterbruch ist beispielsweise nach einer Versuchsdauer von ca. 4 Minuten bzw. ca. 8 Minuten eingetreten (vgl. Bild 17).

Zusammenfassend konnte anhand der Versuche im Trockenspritzverfahren bei Verwendung von sulfatarmem Portlandzement ohne Abbindebeschleuniger gezeigt werden, daß die gestellten Anforderungen bezüglich Qualität, Rückprall und Staub durch den kombinierten Einsatz von kolloidaler Kieselsäure und Hochdruck-Wasser-System überzeugend erfüllt werden können. Auch weiterhin bleiben allerdings optimale Düsenführung, DruckluftEinstellung und Betonrezeptur unverzichtbare Grundvoraussetzungen für optimale Trockenspritzbeton-Resultate.

3.3 Einsatz eines alkalifreien Beschleunigers im Trockenspritzverfahren

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustofflehre und Materialprüfung, Universität Innsbruck wurde 1992 ein Baustellenversuch in Österreich, mit einem neu entwickelten umweltfreundlichen, sich in der Versuchsphase befindlichen Beschleuniger im Trockenspritzverfahren, erfolgreich durchgeführt.

Zunächst wurde anhand von Labor-Abbindeprüfungen die Wirkung des alkalifreien Pulverbeschleunigers auf das Erstarrungsverhalten von unterschiedlichen handelsüblichen Portlandzementen festgestellt. Die Ergebnisse zeigt Bild 18. In Abhängigkeit von der Dosiermenge wurden Abbindebeginn und -ende bestimmt. Zum Vergleich sind die Resultate auch für einen herkömmlichen Aluminat-Beschleuniger (flüssig) mit aufgeführt.

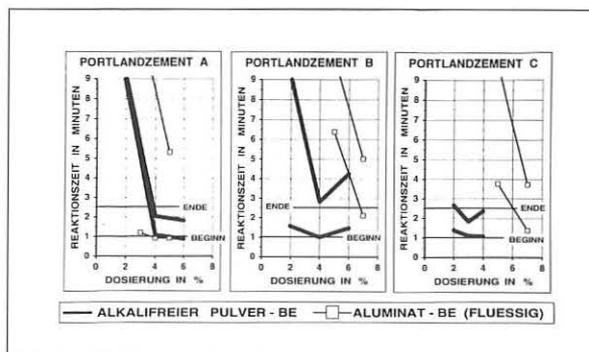


Bild 18: Alkalifreier Pulver-BE (A); Labor-Abbindeprüfung an 3 Portlandzementen PZ 45 F (W/Z = 0,45)

Erwartungsgemäß, wie bei den herkömmlichen

chen Beschleunigern, ist die Wirkungsweise des alkalifreien BE auch von der chemischen Zusammensetzung der Zemente abhängig. Der für Spritzbeton benötigte rasche Erstarrungsbeginn wurde bei diesen Laborversuchen mit einer Dosiermenge von etwa 3 - 6 % (bezogen auf das Zementgewicht) erzielt.

Bei dem eigentlichen Baustellenversuch wurde ein Trockengemisch bestehend aus PZ 275 (F) mit einem Zementanteil von 350 kg/m³ und feuchter Zuschlag 0/12 mm verwendet. Die Gemischtemperatur betrug ca. 17 °C. Die Zugabe des alkalifreien Pulver-BE erfolgte mittels modifizierter Pulverdosiervorrichtung direkt auf das Trockenspritzgemisch am oberen Ende der Bandförderanlage, unmittelbar vor dem Aufgabebetrücker der Rotor-Spritzmaschine. Es wurde mit einer Dosiermenge von ca. 6 % (bez. a.d. Zementgewicht) gearbeitet und direkt auf die Felswand aufgetragen.

Die Ergebnisse der Festigkeitsentwicklungen sind in den Bild 19 und 20 graphisch wiedergegeben.

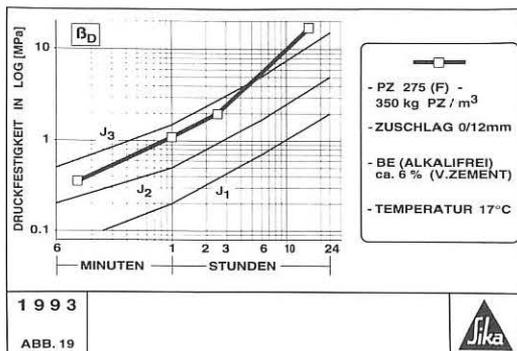


Bild 19: Alkalifreier Pulver-BE (A) - Frühfestigkeitsentwicklung -

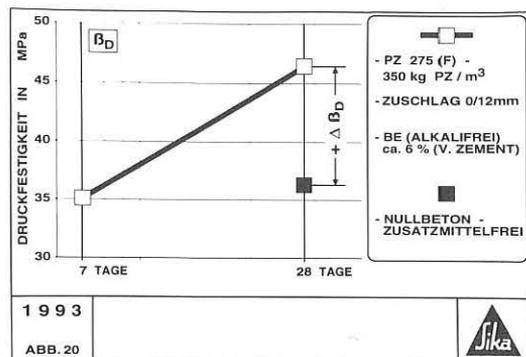


Bild 20: Alkalifreier Pulver-BE (A) - Festigkeitsentwicklung -

Es konnte die Frühfestigkeitsklasse nach ÖBV-Richtlinie "J2" sicher nachgewiesen werden. Der

Wert der 1-Tages-Druckfestigkeit war jedoch bereits größer als 10 MPa.

Die Festigkeitsentwicklung konnte bis zu 28 Tagen weiterverfolgt werden. Die 28-Tage-Druckfestigkeit ist im Vergleich zum zusatzmittelfreien Nullbeton um fast 30 % höher (vgl. Bild 20). Die Festigkeitsentwicklung ist daher, im Gegensatz zur Entwicklung bei herkömmlichen BE, als progressiv zu bezeichnen. Es findet also keine Festigkeitsreduktion wie bei den herkömmlichen BE statt.

Die Bewertung von Rückprall und Staubbildung ergab ähnliche Ergebnisse wie beim Trockenspritzen mit herkömmlichen BE. Selbstverständlich müssen gerade hier weitere Optimierungen vorgenommen werden.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse dieses Baustellenversuches, daß es grundsätzlich möglich ist, festigkeitssteigernde Beschleunigertypen in der Trockenspritzpraxis, also auch zusammen mit Feuchtgemischen, einzusetzen. Der alkalifreie Beschleuniger ist darüber hinaus ökologisch unbedenklich, für den Menschen ungiftig und völlig ungefährlich in der Handhabung.

4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Anhand von drei Applikationsbeispielen konnten Praxiserfahrungen mit neu entwickelten Zusatzmitteln für die moderne Spritzbetontechnologie, aber auch speziell entwickelte Maschinenkomponenten, vorgestellt werden.

Es wurde gezeigt, daß wäßrige kolloidale Kieselsäure, nach deutscher Nomenklatur in die Reihe der Stabilisierer eingestuft, in der Schweiz als Adhäsions-, Rückprallreduktions- und Staubreduktions-Zusatzmittel bezeichnet, sowohl im Naß- wie auch im Trockenspritzverfahren mit Erfolg eingesetzt werden kann.

Sie verbessert die Klebeeigenschaften, hilft bei der Rückprall- und Staubreduzierung, vermindert bei stahlfaserarmiertem Spritzbeton den hohen Stahlfaserverlust und ist vor allem als ökologisch unbedenklich einzustufen.

Kolloidale SiO₂ ist nach schweizerischer Gesetzgebung giftstofffrei und auch bei der Verarbeitung und Anwendung ungefährlich. Das Zusatzmittel ist als "nicht wassergefährdend" (WGK O) einzustufen. Das generelle Handling gilt als problemlos. Es findet kein Absetzen oder

Andicken bei der Lagerung statt. Kleine Dosiermengen bedingen geringere Transport und Lagerkapazitäten.

Kolloidale SiO₂ kann bei Spritzbetonarbeiten die keine Frühfestigkeiten erfordern, ganz oder teilweise den herkömmlichen kaustischen Beschleuniger ersetzen. Neben den oben schon genannten Vorteilen bewirkt dies zusätzlich eine Qualitätssteigerung (Endfestigkeit, Wasserdichtigkeit) und es resultiert keine oder nur eine verminderte Wassergefährdung, z.B. in Wasserschutzgebieten.

In der Bundesrepublik Deutschland wurde das Prüfzeichen vom Institut für Bautechnik, Berlin für die Wirkungsgruppe "Stabilisierer" erteilt.

Am Hygiene-Institut, Gelsenkirchen/BRD konnte eine Unbedenklichkeitsbescheinigung für die Verwendung als Zusatzmittel im Grundwasserbereich, wie z.B. im Tunnelbau ausgestellt werden.

Weiter wurde von einem Baustellenversuch berichtet, bei dem mit einem neu entwickelten umweltfreundlichen, sich in der Versuchsphase befindlichen, alkalifreien Beschleuniger im Trockenspritzverfahren erfolgreich gearbeitet werden konnte. Es wurde gezeigt, daß es grundsätzlich möglich ist festigkeitssteigernde Beschleunigertypen in der Trockenspritzpraxis, also auch zusammen mit Feuchtgemischen, einzusetzen. Der alkalifreie Beschleuniger ist darüber hinaus ökologisch unbedenklich, für den Menschen ungiftig und völlig ungefährlich in der Handhabung.

5. Literaturverzeichnis

- /1/ **Amberg, R.:**
Wirtschaftliche Aspekte beim Bau von Tunnels mit großen Überlagerungen, veröffentlicht anlässlich des Europäischen Symposiums für Tunnelbau, Olten/Schweiz, 05. Februar 1992
- /2/ **SUVA (Schweizerische Unfall-Versicherungs-Anstalt):**
Erprobung von chemischen Zusätzen sowie technischer Einrichtungen zur Staubreduzierung am Arbeitsplatz bei Naßspritzbetonarbeiten, unveröffentlichter Bericht, Luzern/Schweiz, März 1992
- /3/ **Amberg Ingenieurbüro:**
Biegeversuche an stahlfaserarmierten Spritzbetonplatten, unveröffentlichter Bericht Nr. R 034/1, Regensdorf/ Schweiz, 16. April 1992
- /4/ **Keil, F.:**
Zement, Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1971, S.45
- /5/ **Czernin, W.:**
Zementchemie für Bauingenieure, Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH 1977, S.43
- /6/ **Bürge, T.A. :**
Betone der Zukunft, veröffentlicht anlässlich des Europäischen Symposiums für Tunnelbau, Olten/Schweiz, 05. Feb. 1992