

Hochwertiger Spritzbeton mit Calciumsulfataluminat-Zement in Südafrika

HIGH PERFORMANCE SHOTCRETE WITH CALCIUMSULPHOALUMINATE CEMENT IN SOUTH AFRICA

DIPL.-ING. REINHOLD AMTSBÜCHLER, BLUE CIRCLE CEMENT (PTY) LTD., JOHANNESBURG, SÜDAFRIKA.

Die besonderen Eigenschaften von Calciumsulfataluminat-Zement erlauben neue Anwendungsmöglichkeiten von Spritzbeton im Berg- und Tunnelbau.

Die Materialeigenschaften der Spritzbetonmischung "Rockshot" werden vorgestellt und Anwendungsbeispiele aus dem Kohlenbergbau sowie der Sofortsicherung im Tunnelbau aufgezeigt.

The specific properties of Calciumsulphoaluminate Cement allow new applications of Shotcrete in Mining and Tunnelling.

The material properties of the shotcrete combination "Rockshot" are being introduced and some case studies deal with applications in coal mines and as immediate support in tunnelling.

1. Allgemeines

Die Entwicklung von Calciumsulfataluminat-Zementen liegt schon etliche Jahre zurück. Diese Zemente sind meistens unter patentierten Handelsnamen am Weltmarkt erhältlich, so z.B. DENKA CSA (Onoda, Japan) oder CALUMEX (Blue Circle Industries, UK).

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Calciumsulfataluminat-Zemente wurden ausschließlich mit (CALUMEX) ROCKFAST 450 Klinker hergestellt, der in Barnstone (Blue Circle, UK) und auch versuchsweise in Whites (Blue Circle, Südafrika) produziert wurde.

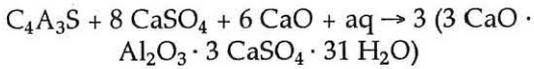
2. Rockfast 450

Rockfast 450 ist ein Calciumsulfataluminat-Zement, der die Basis von vielen Spezialzementen formt (Tab. 1). Seine Entwicklung geht auf das Hydropack-System zurück (Blue Circle Cement/British Coal).

TYPISCHE KLINKERPHASEN		
$2C_4A_3S$		60 %
CA		15
C_2A S		15
$C_{12}A_7$		1
C_4A F		4
TYPISCHE ZUSAMMENSTELLUNG		
Spez.Oberfläche	m ² /kg	450
SG	g/cm ²	2,7
CaO	%	35
Al ₂ O ₃	%	46
SO ₃	%	12
Fe ₂ O ₃	%	2
Freier Kalk	%	0,16
Na ₂ O + 0,6 · K ₂ O	%	0,2

Tab. 1: Klinkerphasen und Zusammenstellung von Rockfast 450

Rockfast 450 ist als "schwach hydraulisch" einzustufen, reagiert aber "unheimlich schnell" zusammen mit Kalk, Calciumsulfat und Wasser, wobei Ettringit entsteht.



Kombinationen von Rockfast 450, Portland Zement und Calcium Sulfat bilden die Grundlage für das Rockfast PCA System, mit dem Zemente folgender Eigenschaften hergestellt werden können :

- Sofortiges Abbinden
- Sehr hohe Frühfestigkeit (Schnell-Erhärten)
- Hohe Endfestigkeit
- Kein Schwinden (Quellzement-Kombinationen möglich)
- Sulfatbeständig
- Bindet u.a. mit Kohle
- Temperaturunempfindlich

Zitronensäure im Klinker, deren Wirkung mit Natriumkarbonat wieder aufgehoben werden kann, dient zur Steuerung (Verlangsamung) der Abbindereaktion.

Es liegt auf der Hand, daß die oben genannten Eigenschaften das Rockfast PCA System zum idealen Bindemittel für Trocken- und Naßspritzbeton machen, wobei die Zugabe von Beschleunigern (BE) auf der Baustelle wegfällt.

3. Rockshot - Spritzbetonmischung

"Rockshot" ist eine Spritzbetonmischung, die auf dem Rockfast PCA System beruht und im Kohlenbergbau sowie auch zur Sofortsicherung im Tunnelbau eingesetzt werden kann.

3.1 "Rockshot" Einsatz bei "New Denmark Colliery"

New Denmark Colliery wird von Amcoal, der Coal Division of Anglo American Corp. of South Africa Ltd. betrieben.

Dieses Kohlenbergwerk (26 399 ha Abbaugelände) liegt östlich von Johannesburg im "Highveld" - Kohlengebiet.

Flöz Nr. 4, mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 1,96 m, liegt in 190 m Tiefe zwischen einer Sandstein- und Schieferschichte.

Jährlich werden 10 Mill. Tonnen (27 400 t/Tag) abgebaut und an das im Abbaugelände gelegene Kalor. Kraftwerk Tutuka (3 600 MW) geliefert. Mechanischer Strebbau (Langfrontabbau in Bruchbauweise) sowie Pfeilerbau (Kohlestempel) sind im Einsatz.

Im Zuge des unterirdischen Ausbaues plante Anglo American die Schaffung eines Reservoirs (3 km x 3 km), das unter Ausnutzung eines Hohlraumes und der Verbindung von 30 Kohlestempeln (etwa 19 m x 19 m) im Bereich des "South-East" -Schachtes gebildet werden sollte. (max. Wasserdruck im Reservoir: 200 kPa).

Die wasserdichte Verbindung von Stempeln durch 5m dicke Massenbeton-"Plugs" (Pfropfen) stützt sich normalerweise auf Zementinjektionen zwischen "Plug" und dem Hangenden bzw. Stempel.

Im vorliegenden Fall konnte diese Methode nicht verwendet werden, da Portlandzement und Kohle nur sehr langsam und schlecht oder gar nicht binden.

Ende Juni 1992 richtete Blue Circle Cement (BCC) den Vorschlag an Anglo American, "Rockshot" als Dichtungs- und Verbundschicht (**Bild 1**) in Spritzbetonbauweise zwischen Kohlestempeln und Massenbeton- "Plugs" einzusetzen.

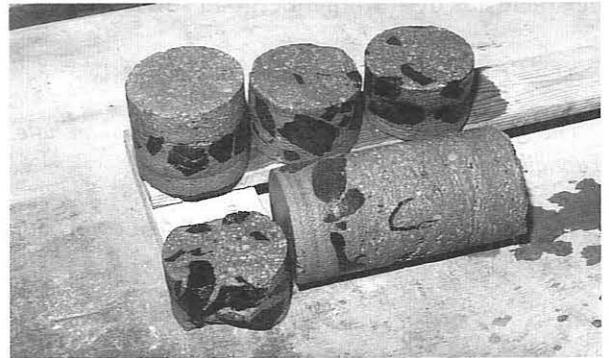


Bild 1: Bohrkern, die deutlich den guten Verbund zwischen Kohle und Spritzbeton "Rockshot" zeigen

Diese Idee wurde Anfang August von Anglo American aufgegriffen, und nach einigen Laborversuchen erfolgte bereits am 12. August 1992 eine Eignungsprüfung mit der ausführenden Firma Shaftsinkers (Pty) Ltd /1/.

BCC stellte Rockshot-Bindemittel und die Trockenspritzbetonrezeptur zur Verfügung. Der von BCC ausgewählte Zuschlag (Brechsand aus Reef-Quarz) wurde von CLP (Concrete Lining Products), einer Zulieferfirma von Shaftsinkers, beige stellt.

Verschiedene Spritzkisten, eine davon mit einem "Kohleboden", wurden über Tag gespritzt. Die verwendete Betonrezeptur lehnte sich an die von Blue Circle Industries (UK) gemeinsam mit British Coal erprobte Rockshot-Mischung an /2/ (Tab. 2)

BETONREZEPTUR (Trockenspritzbeton)		
	kg/m ³	kg/30kg Sackware
RS - Bindemittel	550	7,5 (25 %)
Brechsand (feucht)	1650	22,5 (75 %)
FESTIGKEITSENTWICKLUNG (Mittelwerte) [N/mm ²]		
Prüftermin	Labor (100 mm W)	Eignungsprüfung (Ø 90 mm Bohrkern)
β_D 1 ^h	3,5	-
24 ^h	16,5	16,5
48 ^h	23,5	-
3 ^d	31,5	28,5
7 ^d	37,5	-
14 ^d	47,5	-
21 ^d	-	37,5
28 ^d	59,0	44,0
β_{R7} 7 ^d (500x100x100 mm)	4,6	-

Tab. 2: Rezeptur und Festigkeitsentwicklung - Trokenspritzbeton New Denmark "Colliery"

Das vollständige Abbinden erfolgte in 10 bis 15 Minuten, Druck- und Biegezugfestigkeit zeigten gute Werte, und der dichte Spritzbeton stellte einen ausgezeichneten Verbund zwischen Beton und Kohle her. Die oben angeführte Mischung (Tab. 2) wurde ohne Veränderung zum Einsatz gebracht.

Zwischen September und November 1992 konnten dann alle 15 "Plugs" erfolgreich hergestellt werden, wobei etwa 156 Tonnen Rockshot (vorverpackt als Sackware) zur Verwendung kamen.

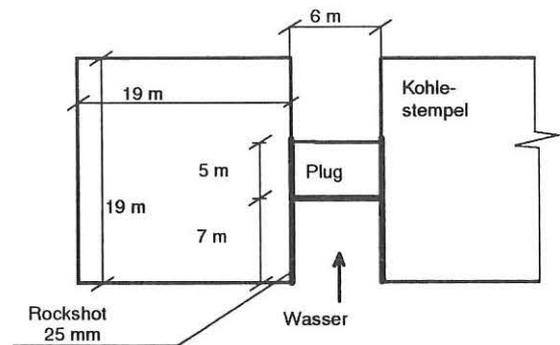
Jeder 30 kg-Sack enthielt gewaschenen, feuchten Brechsand und Rockshot-Bindemittel in getrennter, wasserdichter Verpackung.

Die Seitenwände zweier gegenüberliegender Kohlestempel wurden jeweils 24 Stunden vor dem Auftragen der Spritzbetonschicht von loser Kohle gereinigt ("barring down"). Das Auftragen der 25 mm Rockshot-Spritzbetonschicht erfolgte problemlos, wobei eine Meyco Piccola Spritzbetonmaschine zum Einsatz kam. Der Rückprall der bindemittelreichen Mischung betrug weniger als 10 % (kein Auftrag über Kopf).

Nach dem Einbau der "Plugs" wurde die Wasserseite ebenfalls mit einer dünnen Rockshot-Schicht abgedichtet.

Im Durchschnitt wurden etwa 120 m² Rockshot-Spritzbeton pro "Plug" aufgetragen.

GRUNDRISS



SCHNITT

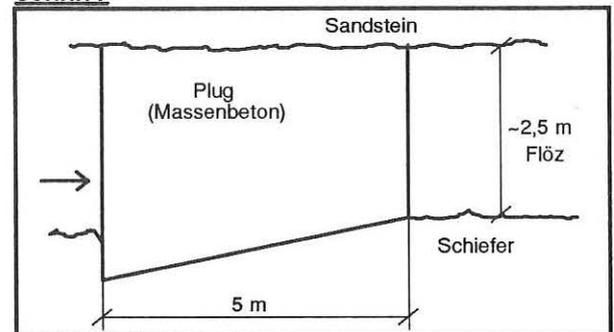


Bild 2: Übersicht- Spritzbetonarbeiten zur Schließung der Kohlestempel mit Massebetonpfropfen

GÜTEPRÜFUNG (Mittelwerte) Ø 90 mm Bohrkern			
β_D	14 ^d	N/mm ²	34,5
β_{SPZ}	14 ^d	N/mm ²	2,9

Tab. 3: Spritzbeton-Güteprüfung New Denmark Colliery

Alle Bohrkern der Güteprüfung zeigten ein gut verdichtetes, homogenes Gefüge mit guter Druck- und Spaltzugfestigkeit (Tab. 3).

Der Spritzbeton haftete gut an der Kohlenoberfläche und stellte so eine nicht schwindende, wasserdichte Verbindung zwischen Stempel und "Plug" her.

Labortests an RS-Bindemittelproben zeigten eine ähnliche Festigkeitsentwicklung aller untersuchten Proben (Tab. 4).

Die erfolgreiche Anwendung von Rockshot ermutigte Anglo American noch im Oktober 1992, dieselbe Spritzbetonmischung zur Verstärkung und Abdichtung von 2 großen Stempeln (Bereich D und E) im Reservoirbereich zu verwenden.

Die Notwendigkeit dazu ergab sich, da beide

Stempel, die Teil der Reservoirwand ausmachen, durch Rettungskammern geschwächt waren.

Rockshot Labor-Kontrolltests* an RS-Bindemittelproben								
Plug 1		Plugs : Bauabschnitt						
		I			II			
		Probe			Probe			
**	***	1	5	10	1	2	3	4
1 ^h	3,1	3,5	3,8	3,6	-	-	-	-
24 ^h	17,0	16,5	15,5	15,5	19,0	19,0	17,0	20,0
48 ^h	27,0	-	-	-	-	-	-	-
3 ^d	30,5	29,0	28,5	28,5	-	-	-	-
7 ^d	45,5	* Druckfestigkeiten der RS-Spritzbetonmischung						
14 ^d	65,0	** Prüftermin						
28 ^d	71,5	*** Festigkeit in [N/mm ²]						

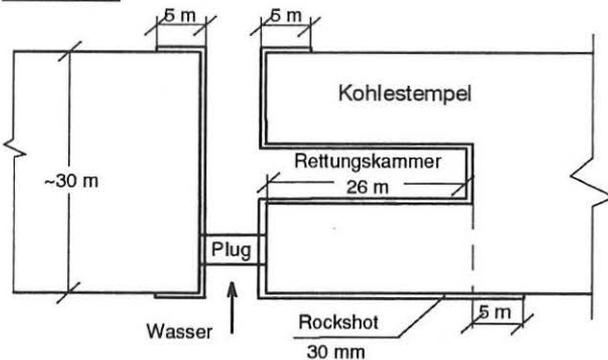
Tab. 4: Labortests an Rockshot-Bindemittelproben

Amcoal R&D, Anglo American Civil Eng. Dep. und BCC kamen zu der folgenden Sanierungslösung /3/ (Bild 3):

Abdichten der Kohlestempel an Luft und Wasserseite mittels einer 30 mm Rockshot-Spritzbetonschichte, die sich an der Wasserseite auch einen Meter ins Hangende und Liegende erstrecken muß.

"ROADWAY FILLING PROJECT" (GRUNDRISS)

BEREICH D



BEREICH E

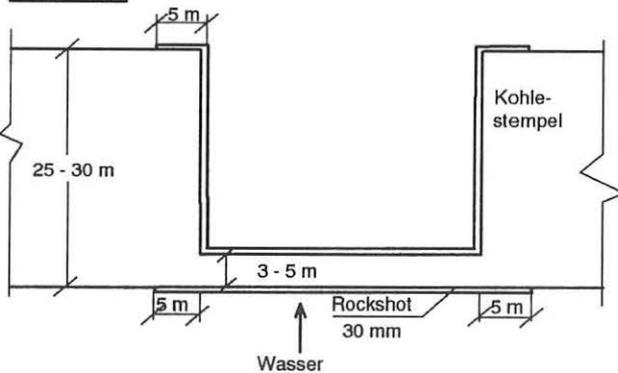


Bild 3: Übersicht - Roadway Filling Project

Stempel E sollte eine zusätzliche Verstärkung der Wasserseite mittels Felsankern (1,5 m) und Netzbewehrung (75 x 75 x 3 mm) erhalten.

Insgesamt waren etwa 1000 m² Kohlestempel abzudichten (Roadway Filling Project).

Alle Abdichtungsarbeiten wurden von Shaft-sinkers problemlos zwischen November und Anfang Dezember 1992 durchgeführt, wobei das erforderliche Spritzgut (Rockshot) wieder als Sackware von CLP angeliefert wurde. (ca. 80 Tonnen Rockshot).

3.2 "Rockshot" als Sofortsicherung

Das schnelle Abbinden und die gute Frühfestigkeitsentwicklung von Rockshot sowie das Vermögen, auch mit nicht standfestem, feuchtem Gestein zu binden, erlauben die Anwendung als Sofortsicherung im Tunnelbau.

Auf die Baustellenzugabe von BE-Mitteln, die normalerweise die Endfestigkeit negativ beeinflussen, kann verzichtet werden.

Im Oktober 1992 kam es zu einer ersten Baustellenerprobung beim "Delivery Tunnel North" des "Lesotho Highlands Water Projects".

Dieses Wasserprojekt sieht in der 1. Phase u.a. den Bau von 80 km Wasserstollen vor.

Der Bauabschnitt "Delivery Tunnel North" zwischen Caledon-Fluß (Grenze zu Lesotho) und Ash (Axle-) River in Südafrika hat eine Länge von 22 km und führt durch Sedimentgestein (Mudstones, Siltstone & Claystone). Die ausführende Firma "HMC Tunneling Venture" (Hochtief - Marti - Concor) verwendet eine Wirth Tunnelbohrmaschine mit Doppelschild in Kombination mit Stahlbetontübbings (Innendurchmesser : 4,6 m), wobei die Caledon-Flußquerung im Sprengvortrieb hergestellt wird. Werksgemischter und auch beschleunigter Naßspritzbeton (Aliva) wird zur Sofortsicherung und Auskleidung verwendet (Tab. 5).

NAßSPRITZBETONREZEPTUR		
OPC (BCC)	kg/m ³	340
Flugasche	"	60
Microsilica	"	60
Füller-Sand	"	400
Brechsand	"	720
9,5 mm Kantkorn	"	800
Fosroc 337	ml	2000
BE (Flüssig)		-
Wasser	l/m ³	234

Tab. 5: Naßspritzrezeptur Delivery Tunnel North

Die ersten Versuche mit Rockshot wurden allerdings als Trockenspritzbeton durchgeführt, da zu wenig Erfahrung mit dem Einsatz im Naßspritzverfahren vorlag (Steuerung/Verzögerung des Abbindevorganges).

Die Baustellenerprobung fand im Bereich des Auslaufbauwerkes statt.

Werksgemischter, feuchter Zuschlag (Füllersand, Brechsand, 9,5 mm Kantkorn) wurden in einem Fahrmischer angeliefert. Die Mischung mit Rockshot-Bindemittel erfolgte händisch auf der Baustelle. Das so vorgemischte Spritzgut wurde in eine "Springbok" Spritzmaschine (Turner Morris) geschaufelt und verarbeitet (Bild 4). Das Auftragen des rückprallarmen, klebrigen Spritzbetones war problemlos.



Bild 4: Füllen der "Springbok" Spritzmaschine mit händisch vorgemischtem Mischgut mit Rockshot-Bindemittel

Die Frühfestigkeitsbestimmung erfolgte mit der HILTI Setzbolzenmethode, die weitere Festigkeitsentwicklung an Hand von Bohrkernen aus Spritzkisten (Tab. 6).

Sowohl auf der Baustelle als auch im Labor wurde ein rasches Abbinden, gefolgt von einer eher langsamen Festigkeitsentwicklung bis zu 7 Tagen beobachtet.

Dieses eigenartige Verhalten ist höchstwahrscheinlich auf den Einfluß von Tonmineralen in dem Zuschlag aus Dolerit (Fouriesburg Crusher) zurückzuführen.

Alle weiteren Versuche wurden daher mit Quarz-Zuschlägen durchgeführt, und beschränkten sich auf Laboruntersuchungen.

Die für Naßspritzbeton erforderliche längere Abbindezeit (Pumpbeton/Anfahrtsweg, usw.) wurde durch Zugabe von Zitronensäure und Natriumcarbonat zum werksgemischtem RS-Bin-

demittel gesteuert. (Dosierung 0,6 %).

TROCKENSPRITZBETONREZEPTUR in kg/m³			
RS-Bindemittel (25%)	563		
Füller Sand	465		
Brechsand	505		
9,5 mm Kantkorn	720		
DRUCKFESTIGKEITSENTWICKLUNG (Mittelw.) [N/mm²]			
Prüftermin	Labor	Baustelle	
	(100 mm W)	(∅ 90mm)	(HILTI)
1 ^h	1,5	-	-
3 ^h	-	-	3,5
24 ^h	7,5	8,5	-
3 ^d	17,0	12,5	-
7 ^d	26,0	16,0	-
28 ^d	61,5	-	-

Tab. 6: Trockenspritzbetonrezeptur und Druckfestigkeitsentwicklung im Delivery Tunnel North

Anschließend wurde das RS-Naßspritzbetonbindemittel mit dem RS-Trockenspritzbetonbindemittel verglichen (Tab. 7). Der Einfluß von 12 min. Mischzeit im Hobart Mischer (Simulation von Naßspritzbeton) wurde auch getestet.

FESTIGKEITSENTWICKLUNG (Labor) [N/mm²]			
Prüftermin	RS-Trockenspritzbeton	RS-Naßspritzbeton	
		0 - Beton	12 min. mischen
1 ^h	2,8	-	-
3 ^h	-	1,5	4,0
24 ^h	17,0	9,0	16,5
3 ^d	26,5	19,5	31,5

Tab. 7: Gegenüberstellung der Druckfestigkeitsentwicklung von RS-Trocken- und Naßspritzbetonproben im Labor

Die Festigkeitsentwicklung von Naßspritzbeton nach kontinuierlichem Mischen läßt sich gut mit jener von Trockenspritzbeton vergleichen. Bemerkenswert ist, daß die 3 Stunden Festigkeit nach kontinuierlichem Mischen eine Zunahme von 165 % gegenüber der 0-Mischung aufweist.

Um einen weiteren Aufschluß über das Verhalten der RS-Naßspritzbetonmischung unter langsamem Durchmischen (Fahrmischer) zu erhalten, wurde das RS-Bindemittel auch im VISCO CORDER (Brabender) bei 120 U/min. getestet. (DIN/ISO-Sand).

Die relative Viscosität, gemessen in cm · g

Scherwiderstand, blieb für 40 min. konstant ($\pm 200 \text{ cm} \cdot \text{g}$), gefolgt von einem plötzlichen Ansteifen zu $1000 \text{ cm} \cdot \text{g}$ innerhalb von 16 Minuten (Bild 5).

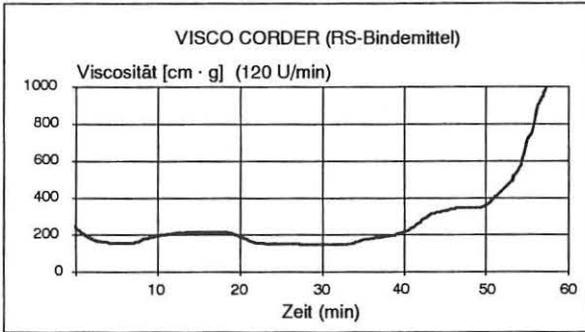


Bild 5: Viscositätsprüfung RS-Bindemittel

Die ersten Resultate lassen den Schluß zu, daß Rockshot auch als Naßspritzbeton eingesetzt werden kann.

Eine Baustellenerprobung soll 1993 erfolgen.

4. Hochfestigkeitsspritzbeton "Sprayrock"

Die südafrikan. Bergbauindustrie untersucht seit vielen Jahren verschiedene Möglichkeiten, die Streckenvortriebe in den tief liegenden Goldbergwerken (4000 m und tiefer) abzusichern und offen zu halten.

Folgende Anforderungen wurden an eine mögliche Spritzbetonauskleidung gestellt:

- Hohe Biegezugfestigkeit, wenn möglich 8 N/mm^2
- Thermische Konduktivität von max. $0,1 \text{ W/mS}$ (Felstemperatur + 50°C)

BCC Südafrika erarbeitete den folgenden Lösungsvorschlag:

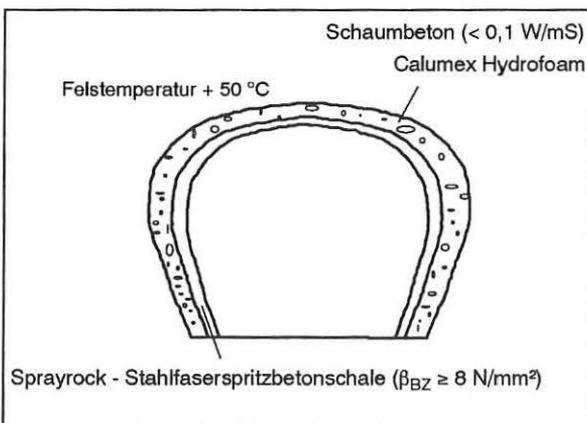


Bild 6: Lösungsvorschlag von BCC Südafrika für tiefliegende Streckenvortriebe

Einbau eines "Sandwich"-Systemes, bestehend aus:

- Schaumbetonsschichte (CALUMEX Hydrofoam System) zur thermischen Isolierung
- Sprayrock (Rockfast PCA) Spritzbetonschichte mit Stahlfasern als hochfeste tragende Schale und zugleich Abdichtung des Schaumbetons.

Die ersten Spritzbetonversuche wurden bereits im Oktober 1990 durchgeführt.

Hohe Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeiten wurden erreicht (Tab. 8).

SPRITZBETONREZEPTUR für 30 kg Sackware		
Sprayrock *	14,5 kg	
Brechsand (Andesit)	15,0 kg	
Harex SF 01/32 (5,4%)	1,60 kg	
Melment F10	0,095 kg	
* Mischung mit südafrikanischem Rockfast 450		
FESTIGKEITSENTWICKLUNG [N/mm²]		
Prüftermin	LABOR (100 mm W)	BAUSTELLE (Ø 90mm)
β _D 1 ^h	4,0	-
3 ^h	5,5	-
6 ^h	6,0	-
24 ^h	12,5	-
3 ^d	14,5	-
7 ^d	46,5	48,5
28 ^d	65,0	82,0
56 ^d	76,0	-
β _{BZ} 28 ^d	9,1*	5,9*
β _{SPZ} 28 ^d	-	6,9
* Gemessen an Balken		

Tab. 8: Rezeptur und Festigkeitsentwicklung - Spritzbeton "Sprayrock"

Die langsame Festigkeitsentwicklung zwischen einer Stunde und 3 Tagen ist auf die Qualität des synthetischen Anhydrits zurückzuführen.

Eine 2. Versuchsserie mit neuen Grundstoffen ergab höhere Frühfestigkeiten und gute Spätfestigkeiten (Tab. 9).

Trotz der hohen Faserdosierung (ca. 120 kg/m^3) kam es zu keiner Igelbildung.

Weitere Versuche wurden vorübergehend eingestellt, da der heutige niedrige Goldpreis den Ausbau von tief liegenden Goldbergwerken unwirtschaftlich macht.

SPRITZBETONREZEPTUR Für 30 kg Sackware		
Sprayrock	12,0 kg	
Brechsand	14,0 kg	
Harex SF 01/32 (5,6%)	1,45 kg	
Melment F10	0,095 kg	
DRUCKFESTIGKEITSENTWICKLUNG [N/mm ²]		
Prüftermin	LABOR (100 mm W)	BAUSTELLE (Ø 90mm)
1 ^h	10,0	-
3 ^h	18,5	-
24 ^h	51,5	-
3 ^d	68,5	23,5
7 ^d	76,5	42,0
14 ^d	-	48,5
28 ^d	(74,0)	57,5

Tab. 9: Rezeptur und Festigkeitsentwicklung - verbesserter Spritzbeton "Sprayrock"

5. Zusammenfassung

Rockshot" und "Spayrock", die beide auf dem

Rockfast PCA System beruhen, sind speziell abgestimmte Spritzbetonmischungen, die unter Einbeziehung der besonderen Eigenschaften von Calciumsulfataluminat-Zement für bestimmte Aufgaben angewendet werden können:

- Verbund mit Kohle
- Schwindfreier Spritzbeton
- Schnelles Abbinden ohne BE-Zugabe
- Hohe Frühfestigkeit für Sofortsicherung im Tunnelbau
- Hohe Endfestigkeit für Spezialaufgaben

6. Literatur

- /1/ BCC Technical Note, Johannesburg 17 August 1992.
- /2/ Blue Circle Industries/BCC Communication, 17 December 1991.
- /3/ Anglo American Corporation of South Africa, New Denmark Colliery, Progress Meeting No. 5, 13 October 1992.

