

Ein neues System flüssiger Erstarrungsbeschleuniger für Spritzbeton – Erfahrungen im Tunnelbau

Practical Experience With A New System Of Liquid Setting Accelerators For Shotcrete In Tunnelling

Dipl.-Ing. Günter Vogel, Dynamit Nobel AG, Troisdorf/Bundesrepublik Deutschland

Auf Tunnelbaustellen der Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn, aber auch bei Straßentunneln und anderen Projekten, hat sich ein neues System Flüssiger Erstarrungsbeschleuniger für Spritzbeton bewährt. Über die vielfältigen praktischen Erfahrungen mit diesem System im Trockenspritzverfahren wird berichtet.

Bevorzugt wird auf die Reaktion der Erstarrungsbeschleuniger mit unterschiedlichen Zement-Typen eingegangen. Im Ergebnis stehen schnelle Erstarrung, hohe Frühfestigkeiten und Endfestigkeiten, wie sie als wesentliches Prinzip der NÖT nach hochwertigem Spritzbeton gefordert werden.

Ergänzend wird über den erfolgreichen Einsatz des Systems zur Ausführung der Innenschale in Spritzbetonbauweise, direkt auf die Abdichtungsbahn, berichtet; außerdem über Erkenntnisse beim Naßspritzen im Dichtstrom.

On the tunnel construction sites of the German Federal Railway's new express lines, and also for road tunnels and many other projects, a new system of liquid setting accelerators for shotcrete has been successfully applied. The paper deals with the various practical examples of using this system for the dry shotcreting method.

Particular attention is paid to the reaction of the accelerating agents and different types of cement. The results obtained show rapid hardening, high early strength and final strength, which all are essential requirements for highquality shotcrete according to the New Austrian Tunnelling Method.

In addition, the paper deals with the successful application of the system for the execution of the shotcrete inner lining directly on the sealing material. Another subject treated in the paper is wet shotcreting with pumped concrete.

1. EINFÜHRUNG

Die anerkannten technischen und wirtschaftlichen Vorteile der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) haben zur breiten Anwendung bei den zahlreichen Tunnelprojekten der Neubaustrecken der Deutschen Bundesbahn geführt. Ein wesentliches Element dieser Bauweise stellt die sofortige Sicherung des Vortriebs durch das Aufbringen der Spritzbetonschale dar.

Gerade im Lockergestein der Deutschen Mittelgebirge, durch erhöhte Sicherheitskriterien

bei der Unterfahrung von Gebäuden, Verkehrsflächen, selbst von Deponien mit geringer Überdeckung, werden höchste Anforderungen an die Spritzbeton-Qualität gestellt. Vorrangig sind dabei schnelle Erstarrung, hohe Früh- und Endfestigkeiten, d. h. Eigenschaften, die in direktem Zusammenhang mit der Auswahl des geeignetsten Erstarrungsbeschleunigers stehen.

2. FLÜSSIG-BE-SYSTEM IM TROCKENSPRITZVERFAHREN

Für den Einsatz im Trockenspritzverfahren wurde ein Flüssig-BE-System entwickelt, das folgende Komponenten umfaßt:

- DYNAGUNIT-Flüssig-BE
- Spezial-Container für den Transport der Erstarrungsbeschleuniger
- PANDA MIX-Dosiergerät
- SBS-Kapillar-Mischdüse



Abb. 1 DYNAGUNIT-BE und Panda Mix-Dosiergerät als Einheit für das Trockenspritzverfahren.



Abb. 2 Flüssig-BE-System, gesamt auf einem für Spritzbetonarbeiten umgebauten früheren Bohrwagen aufgebaut.



Abb. 3 Vorderansicht des Fahrzeugs mit Spritz-Manipulatoren, Düsen und Spritzrohren.

2.1 DYNAGUNIT-BE

Bei den Anforderungen an ein leistungsfähiges Produkt steht naturgemäß die Beschleunigung des Erstarrungsvorgangs der Zementhydratation, d. h. eine schnelle Reaktion mit dem Partner Zement im Vordergrund. Der Einsatz von Zementen unterschiedlicher Herkunft, C_3A -armer HS-Qualitäten, der Zusatz von Flugasche, von Hütten sand und anderen Komponenten muß gewährleistet sein.

Die Flüssigen DYNAGUNIT-Erstarrungsbeschleuniger auf Alkalialuminat-Basis erfüllen vorgenannte Anforderungen und bieten darüber hinaus, im System mit dem speziell für diese Beschleuniger ausgelegten Dosiergerät und der Düse, eine Reihe zusätzlicher Vorteile:

- Hohe Wirksamkeit bei niedriger Anwendungskonzentration (2 - 5 % auf Zementgewicht).
- Problemloser Spritzbeton-Auftrag auch in größeren Stärken und über Kopf.
- Hohe Eigen- und damit Lagerstabilität auch bei extrem niedrigen Außentemperaturen.
- Niedrige Verarbeitungsviskosität auch unter Baustellenbedingungen im Winter und damit einfache und genaue Dosierung.
- Durch Hochdruck-Dosierung und optimale Benetzung des Trockengemisches mit der Kapillardüse wenig Rückprall (10 bis 20 %), daher besonders wirtschaftlich im Materialverbrauch.
- Geringe Staubbildung, ebenfalls durch die optimale Benetzung und daher hohe Arbeitssicherheit.

- In Abhängigkeit vom Zement schneller Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende, hohe Frühfestigkeit und geringer Abfall der

Bohrungen sowie der hohe Druck des Wasser-BE-Mediums gewährleisten eine optimale Benetzung des Trockengemisches.

	DIM.	TUNNEL A	TUNNEL B	TUNNEL C	TUNNEL D	TUNNEL E
PZ Zement		35 F	35 F	35 F HS	35 F	45 F
Menge	[kg/cbm]	350	350	360	360	350
FLUGASCHE	[kg/cbm]			40	40	30
Zuschlag	[mm]	0 - 16	0 - 16	0 - 16	0 - 16	0 - 16
DYNAGUNIT-BE		332	332	721	332	332
BE-Dosierung	[%]	3.5	4	5	4	4
DF 0-WERT 28 d	[MP _a]			40		
Dto.+ BE - 12 h	[MP _a]	7		9	7	
Dto. - 24 h	[MP _a]	16	15	15	13	
Dto. - 3 d	[MP _a]	24	24	29	19	22
Dto. - 7 d	[MP _a]		38	33	20	31
Dto. - 28 d	[MP _a]	49	42	38	27	37
Dto. - 56 d	[MP _a]				28	
PLOT-GV 0002 01.01.1987		EIGENSCHAFTSWERTE von SPRITZBETON (Tab. 1)			DN-AG GB-IC AWT-SC	

Tabelle 1 Spritzbeton-Eigenschaftswerte verschiedener Tunnel-Baustellen.

2.2 PANDA MIX-Dosiergerät

Die Flüssig-BE werden mit dem PANDA MIX-Hochdruckgerät in das Anmachwasser dosiert, in der Menge bezogen auf das Zementgewicht im Trockengemisch und die Verarbeitungsleistung der Spritzbetonmaschine. Das Dosiergerät arbeitet im Eingangsbereich mit getrennter BE- und Wasserführung, mit exakt in kg/h ablesbaren, hochwertigen Durchflußmessern für beide Medien. Die Voraussetzungen für die Kontrolle des W/Z-Verhältnisses bei der Verarbeitung des Spritzbeton-Trockengemisches und damit auch der Qualität des hergestellten Betons, sind gegeben. Meßtechnische sowie steuerungstechnische Einrichtungen der PANDA MIX-Geräte ermöglichen eine konstante BE-Dosierung auf Zementgewicht.

2.3 SBS-Kapillar-Mischdüse

Die SBS-Kapillar-Mischdüse weist 1 Millimeter-Bohrungen in 3 Ebenen auf. Die Anordnung der

Die anerkannten Vorteile der flüssigen Erstarrungsbeschleuniger, die durch ihre hohe Dosiergenauigkeit, ihre bessere Verteilung im Spritzbeton zu einer deutlichen Verbesserung im technischen Bereich und im Bereich der Arbeitssicherheit und Arbeitshygiene führten, wurden bereits in mehreren Veröffentlichungen - gerade aus österreichischer Feder - deutlich herausgestellt. Die bisher vorherrschende Einschätzung, daß bei Wasserandrang im Vortrieb die Erstarrung gegenüber Pulvern schlechter sei, ist inzwischen nach Erfahrungen aus der Praxis bei diesen Flüssig-BEs mit höchsten Wirkstoffgehalten nicht mehr gültig.

Die wirtschaftlichen Vorteile beim Einsatz flüssiger BEs liegen allgemein im Arbeitsablauf, im gleichmäßigen Betrieb des maschinellen Vortriebs, Tabelle 2 zeigt in einer Gegenüberstellung die Vorteile im einzelnen auf.

Tabelle 2

**Kosten-Vergleich Flüssig-BE und Pulver-BE
im Trockenspritzverfahren**

Annahmen: Spritzbeton-Maschine mit 6 m³/h Leistung,
Verarbeitung von 1.500 m³ Spritzbeton pro Monat
(12 h/Tag bei 22 Tagen/Monat)

		BE-Pulver	Flüssig-BE
<u>Daten:</u>			
BE auf Zement	(%)	8	4
Rückprall	(%)	35	15
Zement-Typ		PZ 45 F	PZ 35 F
Zement-Menge	(kg/m ³ Beton)	380	350
BE abhäng. Personal		0,5 Mann/ Schicht	-
BE-Preis	(DM/kg)	0,65	1,45
Zement-Preis	(DM/t)	150,--	130,--
Beton-Preis	(DM/m ³)	125,--	110,--
<u>Bewertung:</u>			
BE	(kg/Mo)	45 600	21 000
	(DM/Mo)	29 640,--	30 450,--
	(DM/m ³)	19,76	37,20
Rückprall-Verlust	(m ³ /Mo)	525	225
	(DM/Mo)	65 625,--	24 750,--
Maschinen-Kosten Personal (50,-- DM/h)	(DM/Mo)	-	600,--
<u>Summe</u>	(DM/Mo) =	108 465,--	55 800,--

3. ZEMENT/BE-REAKTION

Für das Trockenspritzverfahren stehen 3 optimal formulierte und zugelassene DYNAGUNIT-Typen zur Verfügung. In Voruntersuchungen im Labor ist in Abhängigkeit von der Reaktion des Zements das geeigneteste Produkt auszuwählen. Zur Vorabklärung folgen Eignungsprüfungen auf der Baustelle und zur notwendigen Anpassung an die Baustellenbedingungen eine Optimierung des BE-Einsatzes.

Beim Zement ist zu unterscheiden nach

- Zementtyp
- Charakteristischen Klinker-Daten wie C₃A-Gehalt, C₄AF-Gehalt und Tonerdemodul (TM)

- Mahlfineinheit (Blaine-Wert)
- Korngrößenverteilung
- Gipsmodifikation.

Ein für Spritzbeton geeigneter Zement sollte bekanntlich aus einem reaktiven Klinker gemahlen werden und eine Mindestmahlfineinheit aufweisen.

Die Praxis auf deutschen Tunnelbaustellen hat bestätigt, daß in Einzelfällen ein feingemahlener PZ 45 F durchaus langsam erstarrte und in den ersten Stunden ungenügende Frühfestigkeiten entwickelte, während ein PZ 35 F mit geringerer Mahlfineinheit und ebenfalls 3 % BE-Zugabe aber schnell erstarrte und günstige Frühfestigkeiten ergab (Abb. 4).

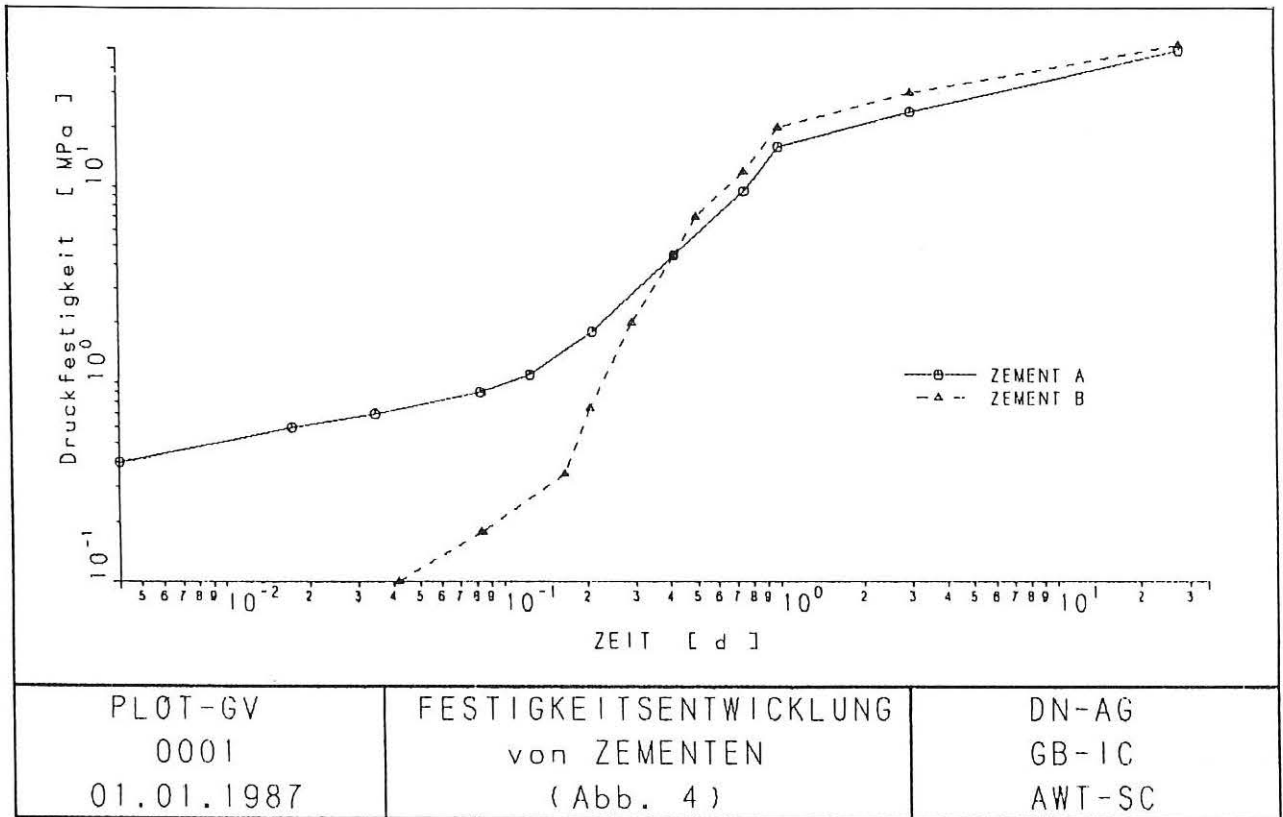


Abb. 4 Festigkeitsentwicklung von zwei für Spritzbeton eingesetzten Zementen.

Bei anderen Baustellen wurden bei Ausgangsmischungen aus reaktivem Zement, Kalksteinsplitt-Zuschlag, hoher Zuschlagfeuchte, langer Kontaktzeit und damit partieller Vorhydratation des Zements keine ausreichenden Betonfestigkeiten nach 7 Tagen und 28 Tagen erhalten. Nach Einsatz feingemahlener HOZ 35 L und HOZ-35 L NW/HS-Zemente waren die Festigkeiten dann zufriedenstellend. Es wurde hiermit bewiesen, daß feingemahlene Zemente, die nur noch 30 % Zement (Rest Hüttensand) enthalten, mit Erfolg für Spritzbeton eingesetzt werden können.

Bei PZ 35 F-Zementen, die im Blaine-Wert unter $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ liegen ist zu empfehlen, bei niedrigen Außentemperaturen auf PZ 45 F-Qualitäten mit einem Blaine-Wert von mindestens $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ umzustellen. Es ist nach unseren Erfahrungen unbedingt anzustreben, auf deutschen Tunnelbaustellen zu einer Standardisierung der eingesetzten Zemente für Spritzbeton zu kommen. Spritzbeton bedeutet eben nicht nur Druckfestigkeit nach 2 und 28 Tagen, sondern schnelle Erstarrung, hohe Frühfestigkeit und hohe Festigkeit über die Zeit.

4. NASSSPRITZVERFAHREN

Die große Zahl von Tunnelbaustellen in den letzten Jahren - verbunden mit dem hohen Bedarf an Spritzbeton - hat nicht nur dem Trockenspritzverfahren einen gewaltigen Aufschwung gebracht, sondern auch dem Naßspritzverfahren neue Impulse gegeben.

Über den Einsatz von Wasserglas als Spritzhilfe wurde im Vergleich zum Trockenspritzverfahren in der Literatur ausführlich berichtet.

Umfangreiche Versuche an Instituten und eine steil ansteigende Zahl von Baustellen haben im vergangenen Jahr dagegen die hervorragende Eignung von Produkten auf Kaliumaluminat-Basis als Beschleuniger beim Naßspritzen im Dichtstrom bewiesen.

Als letzter Stand der Technik ist folgendes System anzusehen:

- Betonpumpe nach dem Doppelkolbenprinzip mit Dosiereinrichtung
- Schwing Turbo-Injektordüse
- DYNAGUNIT^R-BE
- DYNAFLUID^R 400 - FM



Abb. 5 Schwing-Gerät für das Naßspritzverfahren auf LKW-Fahrwerk.



Abb. 6 Betonpumpe für Spritzbeton auf LKW-Fahrwerk

So wurden in der Praxis bereits 11 bis 12 m³/h Beton durch Spritzen -auch über Kopf- problemlos aufgetragen und verdichtet. Verwendet wurden 370 - 400 kg Zement/m³ PZ 35 F oder PZ 45 F mit Zuschlag Größtkorn 16 mm. Mit ausreichend reaktivem Zement und einer günstigen Siebkurve B/A 16 für pumpbaren Beton waren 4 % DYNAGUNIT-BE beim Über Kopf-Spritzen und 3 % beim Auftragen in der Vertikalen ausreichend. Diese geringen, besonders wirtschaftlichen Dosiermengen resultieren einmal aus der synchronen Förderung der Dosiereinrichtung für das Zusatzmittel mit der Förderung der Betonpumpe. Zum zweiten bildet sich in der Turbo-Injektordüse aus Luft-Flüssig-BE ein Aerosol, also fein verteilte Flüssigkeits-Tröpfchen, die im dichten Betonstrom gleichförmig verteilt werden. In einem 5 bis 6 m langen Spritzschlauch - als Mischstrecke - kann der BE-Nebel optimal reagieren und eine schnelle Erstarrung des Betons bewirken. Daraus resultieren entsprechend hohe Rohdichten, im Vergleich zu Wasserglas hohe Früh- und Endfestigkeiten (Tabelle 3).

Mit berücksichtigt werden muß der Einsatz eines wirksamen und auf den BE abgestimmten Fließmittels.

Es ermöglicht den für die Wirkung des Beschleunigers notwendigen W/Z-Wert von kleiner 0,52, verbessert die Pumpfähigkeit, die Homogenität, das Fließen des Betons und über einen gleichförmigen Beton-Auftrag nicht zuletzt eine Verringerung des Rückpralls. Es muß unbedingt vermieden werden, die Pumpfähigkeit des Betons etwa durch Verflüssigung mit Wasser zu erreichen.

5. GESAMTDARSTELLUNG

Mit dem hier vorgestellten Erstarrungsbeschleuniger-System für das Trockenspritzverfahren können - technisch hochstehend - unter wirtschaftlichen Bedingungen Spritzbetonarbeiten im Tunnelbau ausgeführt werden. Dies gilt auch bei schwierigsten Gebirgsgüteklassen, bei geringer Überdeckung oder Wasserandrang aus dem Gebirge.

Nicht unerwähnt bleiben soll, daß es mit diesem System sogar möglich ist, selbst die Innenschale einer Metro-Station, direkt auf die Abdichtungsbahn und Bewehrung, im Trockenspritzverfahren einwandfrei auszuführen.

Das Naßspritzverfahren, System Schwing/DYNAGUNIT, bietet sich im Tunnelbau bevorzugt an:

- Für Vortriebe in großen Querschnitten und Abschlagslängen einschließlich Strossen und Strossensohle mit hohem Spritzbetonbedarf
- für Schächte mit großem Durchmesser
- für offenen Verbau
- für großflächige Hangsicherungen,

d. h. für Projekte, wo möglichst kontinuierlich ohne Unterbrechungen für die Reinigung der Anlage Spritzbeton verarbeitet werden kann. Höchste Anforderungen an die Qualität des Spritzbetons hinsichtlich Druckfestigkeit- und anderer Eigenschaftswerte werden erfüllt.

Tabelle 3

Vergleich DYNAGUNIT-Flüssig-BE und Wasserglas
im Naßspritzverfahren

Annahmen:	Maschinen-Leistung	12 m ³ /h		
	Auslastung	250 h/Mo		
	Leistung	1 500 m ³ /Mo		
<u>Daten</u>		DYNAGUNIT		Wasserglas
Zement-Type		PZ 35 F	PZ 45 F	PZ 45 F
Zement-Menge	(kg/m ³)	370	350	400
Zement-Preis	(DM/t)	130,--	150,--	150,--
Beton-Preis	(DM/m ³)	115,--	122,--	130,--
<u>Bewertung</u>				
BE-Preis	(DM/kg)	1,45	1,45	0,25
BE-Einsatz	(%)	4	4	16
BE-Menge	(kg/Mo)	22 200	21 000	96 000
BE-Kosten	(DM/Mo)	32 190,--	30 450,--	24 000,--
Spez. Lagern des BE auf der Baustelle	(DM/kg)	-	-	0,15
	(DM/Mo)	-	-	14 400,--
BE rel. Pers. Einsatz	(DM/kg)			0,25
	(DM/Mo)	200	200	24 000,--
Rückprall	(%)	10	10	20
	(m ³ Beton/Mo)	150	150	300
	(DM/Mo)	17 250,--	18 300,--	39 000,--
Verflüssiger (BV)	(kg/Mo)	2 775	2 625	2 400
	(DM/Mo)	3 552,--	3 360,--	3 072,--
SUMME	(DM/Mo)	53 192,--	52 310,--	104 472,--
DM BE-rel. Kosten pro m ³ Spritzbeton		35,50	34,90	69,65
Festigkeit nach				
24 h	(MPa)	17	20	12
3 Tagen	(MPa)	29		20
7 Tagen	(MPa)	36		28
28 Tagen	(MPa)	45	60	35