
Der Einsatz von Rückprallminderer im Trockenspritzverfahren

THE USE OF REBOUND-REDUCING AGENTS IN DRY-MIX SHOTCRETE

RUDOLF RÖCK, KLAUS MITTEREGGER

Zur Staubreduktion und vor allem zur Rückprallminderung wurde an der Tunnelbaustelle Umfahrung Landeck Süd Bentonitsuspension sowohl zur Vorbefeuchtung als auch an der Hauptdüse eingesetzt.

Es wird über die vorbereitende Entwicklungsarbeit und die abschließende Eignungsprüfung berichtet sowie die erfolgreiche Umsetzung im Tunnelbetrieb dargestellt. Der Rückprall konnte mit diesem System von über 40 % auf 25 % sowohl im Laborversuch als auch im Tunnel gesenkt werden.

In order to reduce dust formation and mainly rebound, bentonite suspension was added to dry-mix shotcrete both for pre-wetting and at the main nozzle.

The paper presents preparatory research and the concluding qualification test as well as the successful implementation of the method during the execution of the project Landeck by-pass tunnel south. By means of this system rebound was reduced from over 40 % to 25 % both in laboratory tests and at the construction site.

1. Allgemeines

Zu Beginn stand die Idee, Bentonitsuspension anstelle von Wasser beim Trockenspritzen einzusetzen, um damit eine Rückprall- und evtl. eine Staubreduktion zu erzielen. Die Idee selbst ist zwar notwendig aber für sich alleine gesehen gleichermassen nur ein Keim, von dem aus eine praktische Anwendung erwachsen kann, wenn die Umgebungsbedingungen stimmen.

Es kann ein Beispiel vorgestellt werden, wie durch gute Zusammenarbeit aller Beteiligten innerhalb von drei Monaten diese Idee zur praktischen Umsetzung im Tunnelvortrieb geführt werden konnte. Es war ein Glücksfall, daß es einen Bauleiter gab, der sich für die Idee begeisterte, eine Baufirma, die grünes Licht gab, einen Bauherrn, der zustimmte und schließlich eine Prüfanstalt und ein Universitätsinstitut, die unvoreingenommen gegen einen Stoff, der als betonschädlich gilt, die Entwicklung prüftechnisch begleiteten.

2. Vorversuche

Am Anfang der Entwicklung standen Laborversuche, die den Einfluss von Bentonit auf die technologischen Parameter des Spritzbetons ergründen sollten. Es zeigte sich schnell, dass die Bentonitzugabe im beabsichtigten Umfang von 2 % bis 4 % auf das Bindemittel bezogen keine wesentlichen Beeinträchtigungen bezüglich Erstarren und Festigkeitsentwicklung nach sich ziehen würden.

Das war insofern nicht verwunderlich, als die Zuschlagnorm B 3304 auch bei Klasse-I-Zuschlägen 3 % Abschlammbares zulässt, was auf das Bindemittel bezogen im Spritzbeton immerhin 15 % ausmacht.

Damit konnte sehr schnell mit den Pilotversuchen unter tunnelmäßigen Bedingungen und entsprechender Ausrüstung begonnen werden.

3. Pilotversuche am Spritzstand

Zur Verfügung stand ein beweglicher Spritzstand, bei dem eine Probefläche von 125 mal 125 cm in beliebige Position zum Düsenführer gebracht werden kann (Bild 1). Für alle Versuche wurde die Probefläche im Winkel von 45 ° überkopf im Abstand von 1.5 m zur Düse angeordnet. Die Probefläche bestand aus einer 10 cm dicken Betonplatte, in die faustgroße Bruchsteine gleichsam als Felsimitation eingelassen waren. Der Spritzstand befand sich im Werksgelände des Bindemittellieferanten in Vils auf einer asphaltierten Fläche. Als Rückprall wurde jedesmal alles aufgesammelt, was nach Versuchsende am Boden lag.

Weiters standen eine ALIVA-260 Spritzmaschine mit 16 l Rotor und 40 m Schlauch mit Ø 50 mm sowie eine Meyco-Düse und für die Vorbefeuchtung eine Testordüse zur Verfügung. Die Vorbefeuchtungsdüse wurde unmittelbar nach der Spritzmaschine montiert und mit ca. 240 Liter/h Flüssigkeit (Leitungswasser bzw. Bentonitsuspension) beaufschlagt.



Bild 1: Beweglicher Spritzstand

Vier Versuche wurden gleichzeitig als Leistungsversuche ausgelegt, wobei stets ein voller Big-Bag mit 1200 bis 1500 kg Inhalt verspritzt wurde. Allerdings wurde stets nur eine bestimmte Zeit, in der Regel 60 bis 80 Sekunden auf das Probefeld gespritzt, und aus der Spritzzeit die Leistung berechnet. Der Rest vergrößerte den Spritzbetonberg im Betriebsgelände um ein Beträchtliches.

Der Rückprall wurde aufgesammelt, dessen Feuchte bestimmt und der errechnete Trockenanteil in Beziehung zur aliquoten Spritzleistung gesetzt.

Insgesamt wurden 19 Versuche mit verschiedenen Bindemittelgehalten, Flugaschezusätzen, W/Z-Werten und Bentonitkonzentrationen gefahren.

Als Referenz (Nullprobe) galt eine Spritzbetonrezeptur mit einer Bindemittelmenge von 340 kg/m³ Schretter Spezialbindemittel ST (SBM T gem. Richtlinie) und GK11-Kalkdolomitzuschlag der Firma TBA in Zams. Bei allen Versuchen kam derselbe Zuschlag zum Einsatz.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe (Tabelle 1a, 1b) kann zusammenfassend so dargestellt werden, daß mit einer 2-prozentigen Bentonitsuspension eine Rückprallreduktion von im Mittel 45 % auf ca. 31%, mit einer 6-prozentigen auf 25 % erzielbar war.

Die Ergebnisse waren eindeutig und weitgehend reproduzierbar. Sogar bei einer versuchten Minimalbindemittelmenge von 290 kg/m³ konnten immerhin noch 36 % Rückprall unter den gegebenen Versuchsbedingungen erzielt werden. Damit war durchaus mit der Möglichkeit einer zusätzlichen Einsparung bezüglich Bindemittel zu rechnen.

Mit diesen Ergebnissen ausgestattet, die durch die Prüfanstalt Tauernplan und das Institut für Baustofflehre begleitet wurden, entschloss sich die Baufirma nach Rückversicherung beim Bauherrn zur sofortigen Umsetzung im bereits laufenden Tunnelvortrieb Umfahrung Landeck-Süd.

4. Umsetzung der Versuchsergebnisse auf die Baustelle

Aufgrund der Versuchsergebnisse am Spritzstand wurde folgende Rezeptur ausgewählt:

340 kg/m³ SBM-T, Fa. Schretter

Zuschlag 0/11, ofentrocken, im günstigen Bereich 3 bis 4 kg Bentonit vorgequollen als 2 %ige-Suspension (Anmachwasser)

Die Eignungsprüfung wurde vertragskonform hinsichtlich Druckfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit durchgeführt. Es konnten durch die Bentonitzugabe

Versuch		A1	B3	B1	B5	A3	B10	A4	B9	B6	B7
Ausgangsdaten											
Rezept Nr.		77	77	77	77	58	58	58	58	59	59
SBM T (ST)	kg/m ³	360	360	360	360	340	340	340	340	340	340
SBM FT (SF)	kg/m ³										
FLUAL	kg/m ³	40	40	40	40						
Sieblinie		ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	FEIN	FEIN
Bentonit 2%	kg/min										
Bentonit 3%	kg/min				4,1					2,6	
Bentonit 4%	kg/min							3,5			
Bentonit 6%	kg/min			2,3					3,55		3,6
Gesamtmenge	kg	1490		1040		1530		1520			
Anmerkung							ungünstig				
Versuchsdaten											
Spritzdauer ges.	min	8,12		5,67		7,83		7,90			
Spritzdauer Feld	min	2,15	1,23	1,25	1,05	2,15	1,18	1,83	1,18	1,25	1,13
Rückprall feucht	kg	144,60	91,50	70,95	63,80	188,80	108,30	104,05	68,00	88,05	75,05
Feuchte RP	%	5,4	3,0	3,0	3,0	3,7	3,0	3,4	3,0	3,0	3,0
Wassermenge	l/h										
Ergebnisse											
RP trocken	kg	136,79	88,76	68,82	61,89	181,81	105,05	100,51	65,96	85,41	72,80
Spritzleistung	kg/min	183,50		183,42		195032		192,41			
Spritzleistung	m ³ /h	5,12		5,12		5,45		5,37			
Bentonitgehalt	kg/m ³	0,00	0,00	1,57	1,40	0,00	0,00	1,56	2,42	0,89	2,45
W/Z-Wert											
Rückprall	%	34	38	29	31	45	47	29	30	36	34

Tab. 1a: A-Spritzversuch 13.08.1998, B-Spritzversuch 21.08.1998, Werksgelände Schretter & Cie, Vils

Versuch		C5	C1	C2	C3	C4	C8	C9	C10	C11	
Ausgangsdaten											
Rezept Nr.		58	83	83	82	82	84	84	81	81	
SBM T (ST)	kg/m ³	340	290	290	310	310			320	320	
SBM FT (SF)	kg/m ³						340	340			
FLUAL	kg/m ³										
Sieblinie		ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	ULS	
Bentonit 2%	kg/min			16		17,14		17,14		17,14	
Bentonit 3%	kg/min										
Bentonit 4%	kg/min	227									
Bentonit 6%	kg/min										
Gesamtmenge	kg										
Anmerkung		Eignungsp		Eignungsp		Eignungsp					
Versuchsdaten											
Spritzdauer ges.	min										
Spritzdauer Feld	min	0,68	1,25	1,25	1,18	1,05	1,13	1,07	1,07	1,03	
Rückprall feucht	kg	35,45	105,60	91,90	101,65	78,65	108,25	88,05	93,60	86,25	
Feuchte RP	%	3,0		3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	
Wassermenge	l/h	1223	876	960	816	1029	827	920	1017	654	
Ergebnisse											
RP trocken	kg	34,39	102,43	89,14	98,60	76,29	105,00	85,41	90,79	83,66	
Spritzleistung	kg/min	199,17	199,17	199,17	199,17	199,17	199,17	199,17	199,17	199,17	
Spritzleistung	m ³ /h	5,56		5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	5,56	
Bentonitgehalt	kg/m ³	13,78	0,00	3,45	0,00	3,70	0,00	3,70	0,00	3,70	
W/Z-Wert		0,65	0,54	0,60	0,47	0,60	0,44	0,49	0,57	0,37	
Rückprall	%	25	41	36	42	36	47	40	43	41	

Tab. 1b: C-Spritzversuch 3.09.1998, Werksgelände Schletter&Cie, Vils

keine messbaren Ergebnisveränderungen im Vergleich zum Nullbeton festgestellt werden. Zur Herstellung der Bentonitsuspension wurde eine ortsfeste Aufbereitungsanlage (Bild 2) bestehend aus:

- Kolloidalmischer
- 10 m³ Vorratsbehälter
- Druckerhöhungsanlage

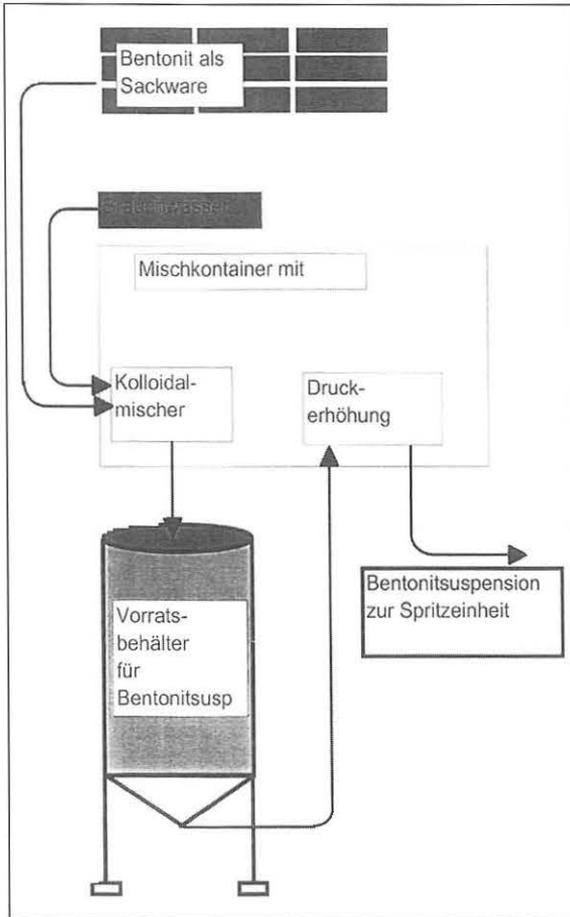


Bild 2: Prinzipaufbau der Bentonitanlage im Tunnel

im Tunnel aufgestellt. Von dieser Anlage wurde die Ortsbrust über eine Druckleitung versorgt. Am Spritzmobil mußte nur anstatt des Wasserschlauches der Bentonitsuspensionsschlauch angeschlossen werden.

Nach mehrmonatigem Einsatz auf der Baustelle kann folgendes berichtet werden:

- Die installierte Bentonitaufbereitungsanlage ist ausfallfrei und wartungsarm.
- Als Druckerhöhungspumpe ist eine Kolbenpumpe, wie sie bei Injektionsanlagen verwendet wird, einzusetzen. Kreiselpumpen eignen sich nicht.
- Das Spritzen mit Hochdruckausrüstung funktioniert nicht. Die in der Bentonitsuspension enthaltenen

Feststoffanteile greifen zum einen die Druckerhöhungspumpe an, zum anderen verlegen sich die Feinteilsiebe ständig. Es muß auf herkömmliche Niederdruckdüsen (Meyco, Aliva o.ä.) zurückgegriffen werden.

- Die Verwendung üblicher Niederdruckdüsen hatte durch den gleichzeitigen Einsatz einer funktionierenden Vorbenetzung positive Auswirkungen auf die Staubemission.
- Die Dosierung von Bentonit wurde mit 2 % (2 kg Bentonit/98 kg Wasser) (Bild 3) festgelegt. Die Bentonitsuspension ist in dieser Konzentration stabil. Ein Absetzen oder Ansteifen der Suspension wurde nicht beobachtet. Mit dieser Konzentration wurde auch die gewünschte Konzentration je Kubikmeter Beton erreicht.
- Die Standzeiten der Schlauchleitungen erhöhten sich beträchtlich.

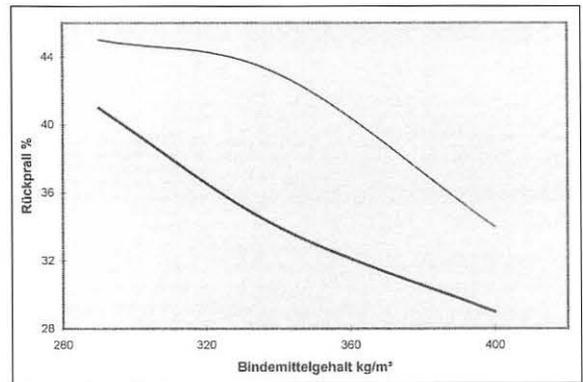


Bild 3: Abhängigkeit des Rückpralls vom Bindemittelgehalt bei ca. 2 kg Bentonit/m³ (Trendlinie)

Wurden auf der Baustelle im Beisein einer autorisierten Prüfanstalt anfänglich bis zu 40 % Spritzbetonrückprall gemessen (Bild 4), so betrug dieser Wert zum Ende der Baustelle nur noch 25 %.

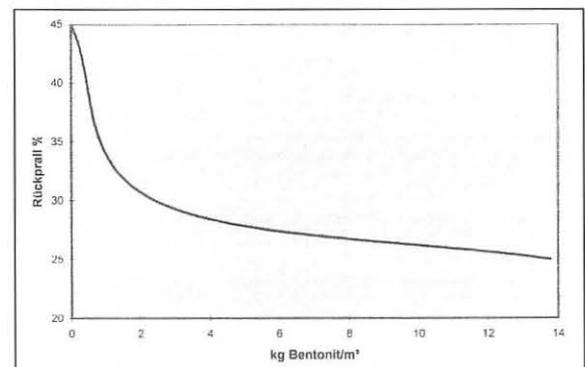


Bild 4: Abhängigkeit des Rückpralls vom Bentonitgehalt bei 340 kg BM/m³ (Trendlinie)

Diese Werte sind neben der Einführung von Bentonit auch noch auf die folgenden Faktoren zurückzuführen:

- Verhinderung der Entmischung des Trockengemisches durch Adaptierungen am Verladesilo.
- Optimierung der Sieblinie des Trockenmischgutes.
- Einsatz einer wirksamen Vorbenetzung des Mischgutes, 25 Meter vor der Spritzdüse (diese Vorbenetzungsdüse wurde von Herrn Dipl.-Ing. Testor an der Technischen Fakultät der UNI Innsbruck entwickelt).
- Einsatz eines Spritzroboters zur Optimierung des Spritzabstandes und des Spritzwinkels.

4. Auswirkungen auf die Kosten

In der Richtlinie Spritzbeton wird der Rückprall wie folgt definiert:

Rückprall ist jener Teil der verspritzten Menge, welcher am Ende des Spritzvorganges am Boden liegt.

Das ist zwar nichts Neues, wird aber in sehr vielen Kalkulationen falsch ermittelt.

Bei einem zu erwartenden Rückprall von angenommen 40 % beträgt die zu liefernde Menge an Spritzbeton nicht $1 \times (1 + 0,4) = 1,4 \text{ m}^3$ sondern $1 / (1 - 0,4) = 1,67 \text{ m}^3$. Anders ausgedrückt verhalten sich die gesamten Kosten des Spritzbetons in Abhängigkeit zum Rückprall nicht linear.

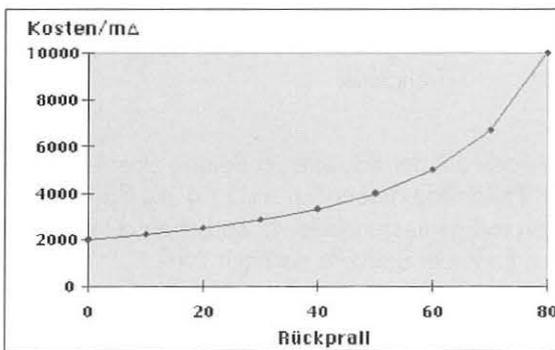


Bild 5: Spritzbetonkosten in Abhängigkeit vom Rückprall

Dem Bild 5 ist zu entnehmen, daß die Kosten des Spritzbetons mit steigendem Rückprall exponentiell zunehmen.

Ein hoher Spritzbetonrückprall wirkt sich nicht nur in den direkten Kosten der Beschaffung aus sondern vor allem auch in der Verarbeitung und den damit verbundenen zeitabhängigen Kosten, da ein höherer Rückprall direkten Einfluss auf die effektive Spritzleistung eines Systems hat und somit höhere zeitabhängige Kosten (direkte Löhne, Gehälter, Gerät, Energie) bringt.

Dies kann man am Beispiel eines Tunnels, wie der Südumfahrung Landeck, Baulos Süd sehr schön demonstrieren.

Grundlagen für die Kalkulation in Tab. 2:

- Gesamtkosten des Tunnels für Ausbruch und Sicherung inkl. zeitabhängiger Kosten: 246.000.000 öS
- Gesamtmenge Spritzbeton theoretisch 13.000 m³
- Spritzleistung des Systems ohne Rüstzeiten: 14 m³/h

Die Staubentwicklung wurde in Verbindung mit der Vorbefeuchtungsdüse deutlich reduziert, sodaß die MAK-Werte von 4 mg/m³ gemäß einer Messung der ÖSBS mit 2.66 mg/m³ Feinstaub im Schichtmittelwert einwandfrei eingehalten werden konnten. Die Staubkonzentration während des Spritzvorganges wurde zu 7,8 mg/m³ ermittelt.

6. Zum Schluss der Ausführungen noch ein Wort zur Wirtschaftlichkeit des Systems

Was kostet der Einsatz von Bentonitsuspension im Verhältnis zum erzielten Erlös?

Folgende vorsichtige Annahmen am Beispiel ULS wurden für die Berechnung zugrundegelegt:

- Rückprall des Systems ohne Bentonit 35%
- Rückprall des Systems mit Bentonit 25%

Den gesamten Kosten für den Einsatz von Bentonit steht eine Kosteneinsparung in der 9-fachen Höhe gegenüber.

Rückprall Prozent	Gesamtkosten Spritzbeton öS	Anteil an den Gesamtkosten in Prozent	Spritzdauer in Tagen ohne Rüsten	Bauzeitverlust in Monaten
0	45.802.000	18,6	65	0,00
10	47.865.000	19,5	80	0,50
20	55.741.000	22,6	99	1,13
30	62.969.000	25,6	122	1,90
40	72.678.000	29,5	153	2,93
50	86.340.000	35,1	197	4,40

Tab. 2: Abhängigkeit der Spritzdauer und der Gesamtkosten vom Rückprall

Bereits durch die mögliche Bindemittelreduzierung können die gesamten durch Bentonit verursachten Kosten mehr als wettgemacht werden.

In den oben angesetzten Kosten sind folgende durchaus auch kostenintensive Anteile nicht enthalten, sodaß der Vergleich eher zu vorsichtig bewertet wurde.

Es sind dies:

- Die Entsorgung des Rückpralls wurde überhaupt nicht bewertet
- Die Reduzierung des Staubanfalls
- Die Reduzierung des Rückpralls reduziert in glei-

chem Ausmaß die Anzahl der Verletzungen (insbesondere Augen) der Mineure und damit die Lohnkosten

7. Zusammenfassung

Der Einsatz von 2-prozentiger Bentonitsuspension hat an der Baustelle Umfahrung Landeck-Süd zu einer drastischen Reduktion der Rückprallwerte und zu einer deutlichen Verminderung des Staubanfalles geführt und damit sowohl in wirtschaftlicher Hinsicht als auch im Sinne des Arbeitnehmerschutzes zu einer erfreulichen Verbesserung des Systems "Ofentrockener Spritzbeton" geführt.