

---

# **Staub- und Rückprallreduktion beim Auftrag von Trockenspritzbeton**

---

## **REDUCTION OF DUST AND REBOUND IN DRY MIX-SHOTCRETE APPLICATION**

### **MARKUS TESTOR, MARKUS PFEUFFER**

Im ersten Teil dieses Beitrages wird auf Einflüsse hingewiesen, die beim Betontrockenspritzverfahren zu berücksichtigen sind. Die Entwicklung einer neuen Vorbenetzungsdüse, bei der zusätzlich Druckluft und Wasser in einem lokal verengten Förderstrom eingedüst wird, brachte eine Reduzierung der Staubemission von mehr als 60 %.

Auf Rückprallreduktionsmaßnahmen, welche durch den Düsenführer direkt bestimmt werden, wird im zweiten Teil eingegangen. Darüber hinaus konnte durch die Zugabe spezieller Zusatzstoffe in die Ausgangsmischung eine wesentlich plastischere Konsistenz des applizierten Spritzbetons, bei besserer Einbettung der Zuschlagkörner erreicht werden. Der Rückprallanteil konnte durch diese Maßnahme um ca. 35 % reduziert werden. Es handelt sich bei diesen Produkten vorwiegend um pulverförmige, sehr fein gemahlene Verdickungsmittel, die bei unveränderter Spritzbetonkonsistenz - wie die des Nullbetons - einen wesentlich höheren W/Z-Wert erlauben.

*In the first part of the paper influences are pointed out with regard to dust measurement that need to be taken into account when applying the sprayed concrete. Thanks to the development of a new pre-wetting nozzle which additionally injects compressed air and water into the mix, dust formation could be lowered by over 60% for the dry-mix method.*

*Measures to reduce rebound that are directly controlled by the nozzleman will be presented in the second part of the paper. Moreover, by admixing special additives to the pre-mix the placed shotcrete shows a much more plastic consistency and the aggregates are more embedded. Rebound could thus be reduced by about 35%. The products used are mainly powdery, very finely ground thickeners, which allow a markedly higher water cement ratio to be chosen while the consistency of the sprayed concrete remains unchanged compared to the base concrete.*

Die Höhe des Rückprall- und Staubanteiles beim Betonspritzen ist ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl der Verfahrenstechnik. Aus über 300

Messungen im Labor- bzw. im großtechnischen Maßstab, als auch unter Baustellenbedingungen konnten Zusammenhänge und Ursachen, sowie

Verbesserungsvorschläge zur Rückprall- und Staubminimierung abgeleitet werden.

Zwar besteht eine Korrelation zwischen Rückprall und Staubbelastung, die auch primär von den selben Einflußfaktoren bestimmt werden, doch hinsichtlich der Systematik und der Übersichtlichkeit werden beide Themenkomplexe getrennt voneinander behandelt.

## 1. Staub

Staub entsteht bei unterschiedlichen Tätigkeiten im Tunnel, wobei die größte Staubkonzentration bekanntlich beim Applizieren des Spritzbetons auftritt. Die Überwachung erfolgt in Österreich durch die AUVA, in Deutschland durch die TBG und in der Schweiz durch die SUVA.

### 1.1 Staubmeßmethoden

Da die Staubexposition im Grunde genommen eine subjektiv empfundene Belastung ist und sich mit der Zeit ein Gewöhnungseffekt einstellt, ist es wichtig, Kriterien und Meßmethoden festzulegen, die diesen Umstand ausschalten. Die Messung erfolgt entweder mit elektrooptischen oder mit gravimetrischen Staubmeßgeräten.

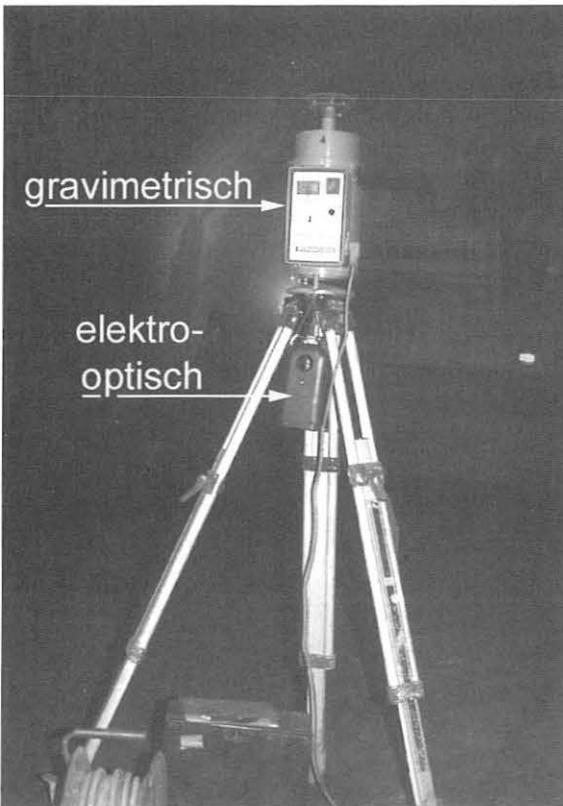


Bild 1: Elektrooptisches und gravimetrisches Staubmeßgerät

#### 1.1.1 Elektrooptische Staubmeßgeräte

Optische Meßverfahren erlauben eine kontinuierliche Staubaufzeichnung (Dauerüberwachung) und eine direkte Anzeige der Meßwerte während des Meßzyklus. Vorteilhaft ist dieses Meßverfahren zur schnellen Staubbewertung und als Entscheidungshilfe, ob und wann ein gravimetrisches Staubmeßgerät eingesetzt werden soll, da dadurch die hohen Kosten, welche letztere Meßverfahren verursacht, eingespart werden können.

#### 1.1.2 Gravimetrische Staubmeßgeräte

Im Gegensatz zu den Streulichtmeßgeräten wird bei dieser Meßmethode stets ein Mittel über eine bestimmte Probenahmezeit genommen. Es kann somit während des Meßvorganges nicht direkt und zu jedem Zeitpunkt die Staubkonzentration ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) mitverfolgt werden.

### 1.2 Bewertungskriterien

Zur Beurteilung der gemessenen Staubwerte werden Bewertungskriterien herangezogen. Eine Angabe der max. Staubgrenzwerte erfolgt lt. MAK-Werteliste [5]. Hierbei wird zwischen Gesamtstaub, Feinstaub, quarzhaltiger Feinstaub und Quarz unterschieden. Bei verkürzter Einwirkungsdauer wird zur Beurteilung ein  $k$ -ter Teil des Meßwertes, bei verlängerter Einwirkung der  $F$ -fache Wert herangezogen. Werden Atemschutzmasken verwendet, so dürfen lt. ÖNORM EN 149 diese Meßwerte mittels Schutzfaktoren nochmals reduziert werden. Beispiele dazu können im Heft Straßenforschungsvorhaben Nr. 3.163 [2] nachvollzogen werden. In der Richtlinie Spritzbeton [1] werden Umrechnungsfaktoren zwischen elektrooptischen und gravimetrischen Staubmeßgeräten für Arbeiten im Tunnel für verschiedene Tätigkeiten angegeben.

### 1.3 Staubuntersuchungen

Die vorliegenden Untersuchungen befassen sich mit der Messung staubhaltiger Luft im Korngrößenbereich kleiner  $5 \mu\text{m}$ . Für die durchgeführten Staubbmessungen wurde ein elektrooptisches Feinstaubmeßgerät der Firma hund, Modell TM data verwendet.

#### 1.3.1 Einflüsse auf die Staubentwicklung

Beim Spritzvorgang entsteht Staub, dessen Intensität mehr oder weniger von unterschiedlichen Parametern direkt oder indirekt beeinflußt wird. So ist die Staubentwicklung unter anderem von Verfahrenstechnik, Abstand zur Auftragsfläche, Düsenführung,

Spritzleistung, Förderdruck, Benetzungswassermenge oder von der Düsenart abhängig. Staubbelastungen treten nicht nur während des Betonspritzens auf, sondern auch bei Reinigungsvorgängen in konzentrierter Form, wenn auch nur in einem kleinen Zeitraum, insbesondere beim Freiblasen der belegten Förderschlauchleitung infolge Stopfer oder beim Säubern der Geräte und SpB-Maschinen mit Druckluft.

### 1.3.2 Einfluß des Meßstandpunktes auf die gemessenen Staubwerte

Von Interesse für die am Tunnel Beschäftigten ist, wie weit die beim Spritzvorgang freigesetzten Feinstaubteile in der Tunnelluft nach hinten befördert werden (Verdünnungseffekt). Primär wird dies durch die Strömungsverhältnisse in der Tunnelröhre bestimmt. Folgende beeinflussende Parameter sind anzuführen:

1. Abstand des Luttenendes zur Ortsbrust [m]
2. Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel [m/s]
3. Mindestfrischluftzufuhr [m<sup>3</sup>/h]
4. Art der Belüftung (blasende, saugende)
5. Positionierung der Baugeräte und der Lutte in der Tunnelröhre
6. Tunnelquerschnitt
7. Position des Meßgerätes

Um das Flugverhalten der Feinstaubpartikel beurteilen zu können, müssen weiters Korngröße, Dichte und Form bekannt sein. Dieser Vorgang läßt sich bei nahezu ruhender Luftbewegung durch die Sinkgeschwindigkeit sehr gut beschreiben. Bei turbulenter Umströmung der Staubpartikel treten jedoch Luftzirkulationen auf, welche rechnerisch nur ungenügend erfaßt werden können.

#### 1.3.2.1 Abhängigkeit von der Lage des Meßstandpunktes entlang der Tunnelachse

Die meßtechnische Erfassung der Staubausbreitung beim Spritzvorgang war Ziel dieser Untersuchung. Dabei wurde jeweils der Mittelwert aus Einzelmessungen eines Intervalles von 10 bis 40 min herangezogen (Bild 2). Die Applikation des SpB (Blasdruck 2,3 bar) erfolgte im Trockenspritzverfahren mit naturfeuchten Zuschlägen mittels 2 Standarddüsen  $\varnothing$  65 mm auf sandigen Untergrund. Der Abstand der Lutte ( $\varnothing$  = 2 m) zur Ortsbrust betrug ca. 60 m; der Tunnelausbruchquerschnitt ca. 50 m<sup>2</sup>.

Die freigesetzten größeren Staubpartikel sinken relativ rasch ab, wobei die lt. MAK-Werte Liste geforderten Grenzwerte für Feinstaub von 6 mg/m<sup>3</sup> erst nach ca. 10 m Entfernung von der Ortsbrust eingehalten werden konnten. Gemäß der Richtlinie

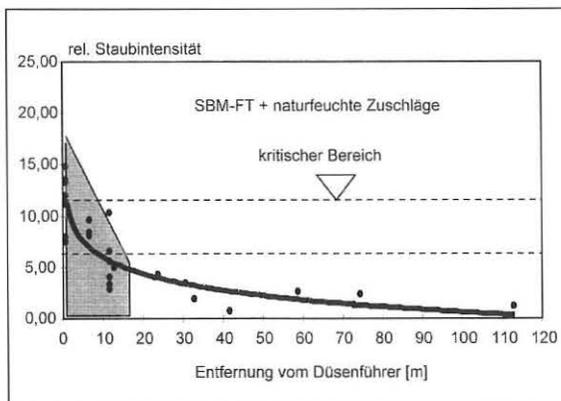


Bild 2: Staubkonzentration in Abhängigkeit des Meßstandpunktes [3]

Spritzbeton dürfen diese Werte kurzfristig auf den doppelten Betrag 12 mg/m<sup>3</sup> ansteigen.

Im folgenden Diagramm (Bild 3) wurde an einer anderen Tunnelbaustelle der zeitliche Verlauf der Staubkonzentration an unterschiedlich von der Ortsbrust entfernten Meßstandpunkten entlang der Tunnelröhre aufgezeigt.

Bei diesen Umgebungsbedingungen wurde am Standpunkt des Düsenführers bei einer Meßdauer von je 60 Minuten eine mittlere relative Staubintensität von 18,9 und 19,3 ermittelt. Innerhalb weniger Meter lagern sich die größeren Staubpartikel sehr rasch am Boden ab, womit die Staubbelastung um ca. 40 % sinkt. Eine nahezu gleichmäßige Staubbelastung entlang der Tunnelröhre herrscht bei einem größeren Abstand von der Tunnelbrust als 25 m.

Hier haben sich die Schwebstoffe zum größten Teil abgesetzt, bzw. mit der Tunnelluft so verdünnt, daß nur mehr 7 % der beim Düsenführer vorliegenden Staubkonzentration vorliegt. Erfolgt keine Staubbefreiung durch diverse Arbeitsgänge, so liegt eine nahezu unbelastete, reine Tunnelluft mit einer mittleren Staubintensität von 0,2 vor. Durch die Staubaufwirbelung eines vorbeifahrenden Muldenkippers steigt kurzfristig die Intensität auf ca. 4,7 an.

#### 1.3.2.2 Abhängigkeit von der Lage des Meßstandpunktes im Ortsbrustbereich

Besonders hohe Staubkonzentrationen herrschen im Arbeitsbereich der Düsenführer vor. Dabei ist zu berücksichtigen, daß wegen der blasenden Belüftung die Tunnelluft an der Ortsbrust aufgestaut wird, und eine Umwälzung mit Frischluft nur langsam eintritt. Die gemessenen Tunnelluftgeschwindigkeiten bleiben unter Werten < 0,2 m/s, wobei keine eindeutige Strömungsrichtung feststellbar ist. Werden Staubbmessungen bei gleichem Abstand zur Ortsbrust durchgeführt, so können sich zwischen

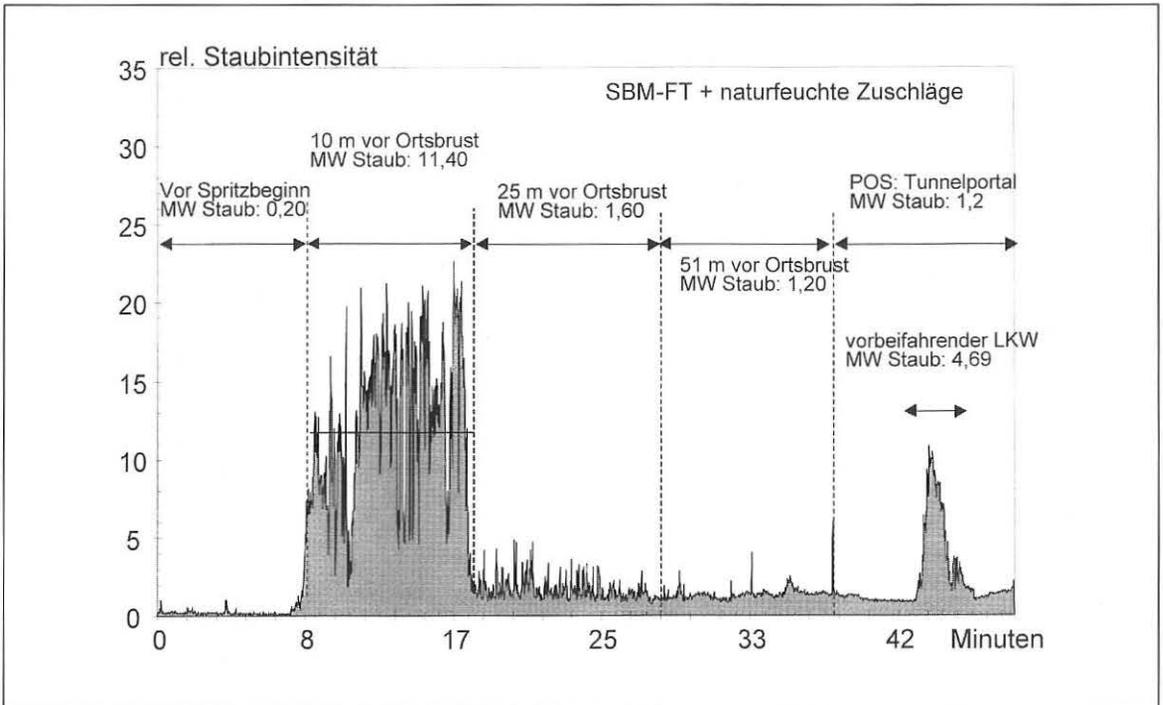


Bild 3: Staubkonzentration in Abhängigkeit des Meßstandpunktes [4]

der linken und rechten Tunnelhälfte große Unterschiede in der Staubkonzentration ergeben (Bild 4).

Auffallend sind die niedrigen Staubwerte an der entgegengesetzten Seite der Lutte, gekennzeichnet durch die Punkte 2, 6 und 10.

### 1.3.3 Einfluß von der Anzahl der SpB-Düsen

Bei der Untersuchung soll gezeigt werden, daß bei unverändertem Standpunkt des Meßgerätes zwei Düsen nicht den doppelten Staubwert einer Einzeldüse liefern, da der Einfluß der zweiten Düse stark

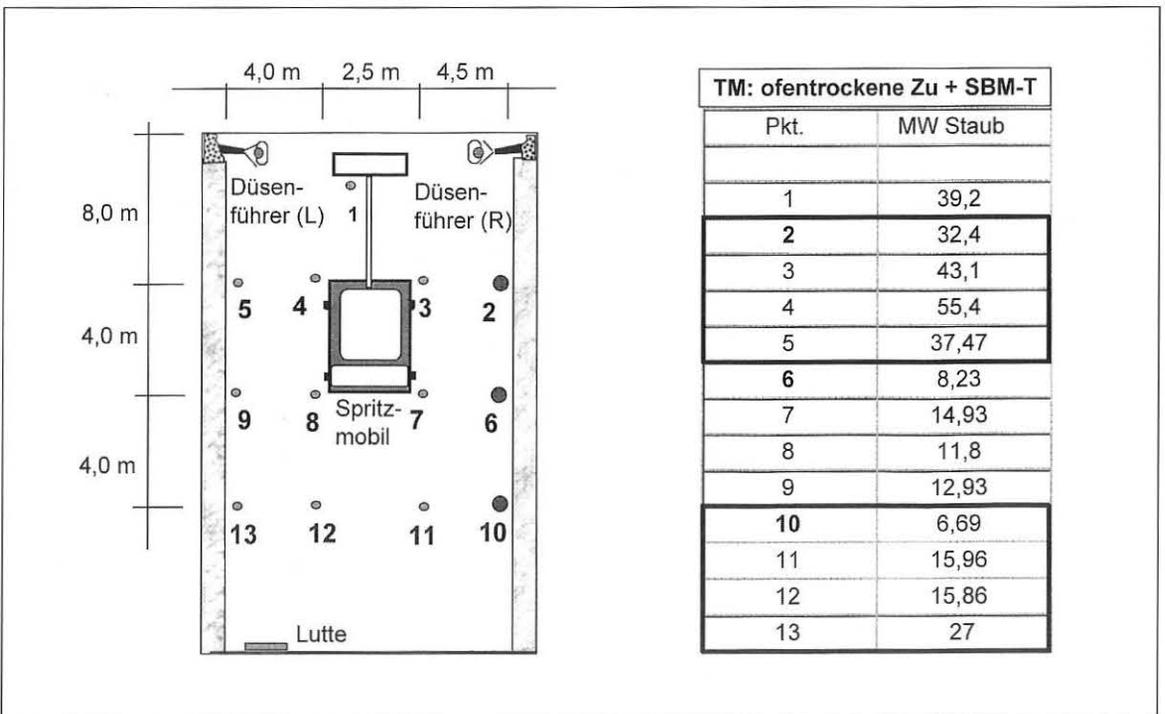


Bild 4: Staubkonzentration in Abhängigkeit des Meßstandpunktes [3]

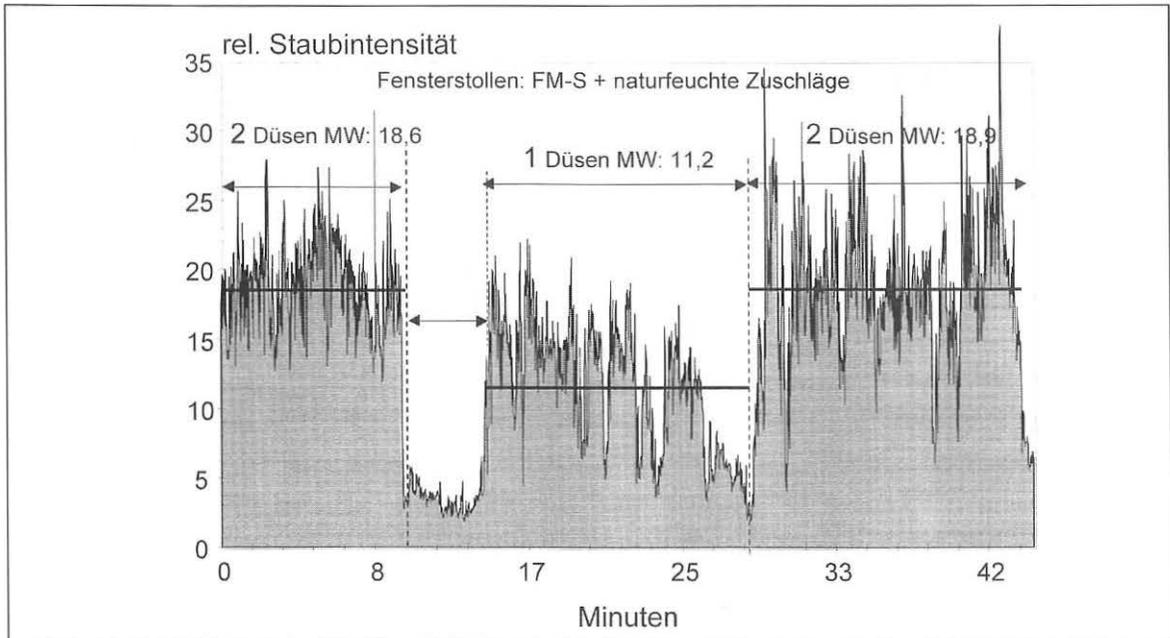


Bild 5: Einfluß der SpB-Düsenanzahl [3]

von den Strömungsverhältnissen der Tunnel Luft, wie Umlenkung infolge abgestellter Baugeräte, Lage der Lutte, sowie von der Größenverteilung der freigesetzten Schwebstoffe (Sinkgeschwindigkeit) abhängt (Bild 5). Nur die Angabe von Staubwerten, ohne genaue Beschreibung der Situation und Umgebungsbedingungen lassen einen Vergleich mit anderen Messungen daher nur unzureichend zu.

## 1.4 Staubreduktionsmaßnahmen

### 1.4.1 Verfahrenstechnische Schutzmaßnahmen

Durch geeignete Sondermaßnahmen kann die Staubexposition minimiert werden. Treten Staubaufwirbelungen infolge von Abbau, Laden und Transport auf, so kann die Staubentwicklung durch feinstrahliges Befeuchten der Sohle und des Ausbruchmaterials weitgehendst verhindert werden. Ein weiterer Schritt in Richtung Staubreduktion ist die Einkapselung aller Staubquellen. Wichtig ist eine ausreichende Be- und Entlüftung der Tunnelröhre. Die Positionierung des Lüfters am Tunnelportal muß so gewählt werden, daß der während des Baubetriebes aufgewirbelte Feinstaub und die nach außen entweichende Tunnelabluft nicht wieder eingezogen werden können. Weiters kann der Düsenführer durch geeignete Wahl des optimalen Düsenabstandes Einfluß auf die Staubbefreiung nehmen.

#### 1.4.1.1 Staubreduzierungsmaßnahmen durch Vorbenetzungsmaßnahmen

Zusätzlich zu den bereits genannten verfahrenstechnischen Maßnahmen kann an den exponierten

Hauptstaubquellen (Mischer, SpB-Maschine, Düsen) durch Zusatzgeräte eine Staubreduzierung erzielt werden. Bekanntlich werden mehr Staubpartikel freigesetzt, je trockener der Zuschlag verarbeitet wird.

Werden trockener Zuschlag und Tunnelzement vor Ort vermischt, so kann bereits in der Mischschnecke das Trockenmischgut mit einem Wassersprühnebel beaufschlagt werden.

Diese Zusatzmaßnahme kann auch mittels Vorbenetzungsdüse, welche vor der eigentlichen Hauptbenetzung angebracht ist, vorgenommen werden. Die Zuführung des Wassers erfolgt mit Hochdruck. Dieser Wasserdruck wird entweder mittels Druckkessel oder Dosierpumpe erzeugt, um Druckschwankungen, wie es bei der Baustellenwasserversorgung vorkommen kann, zu vermeiden. Abweichend von herkömmlichen Düsensystemen, bei denen nur Wasser in den Förderstrom eingedüst wird, wurde am Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität in Innsbruck an einem neuartigen Benetzungssystem gearbeitet.

#### 1.4.1.2 Neuentwickeltes Düsenystem

Diese Benetzungsweise (Bild 6) ist dadurch gekennzeichnet, daß anstelle einer direkten Zufuhr des Wassers in den Materialstrom ein Gemisch aus Druckluft und Wasser eingedüst wird. Die Wasser- (1) und Druckluftzuführung (2) erfolgen bis zur Düse getrennt und münden knapp vor dem Verlängerungsrohr (3) zusammen. Die Einleitung des feinst

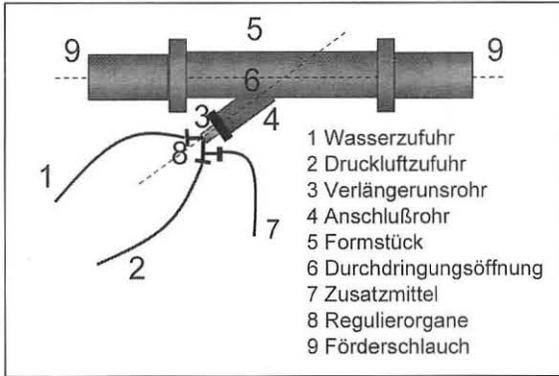


Bild 6: Vorbenetzungsdüse nach Testor

verteilten Sprühnebels zur Förderrichtung in das Benetzungformstück (5) erfolgt schleifend mit Hilfe eines aufgeweiteten und dem Sprühnebel angepaßten Anschlußrohres (4) bei ca. 30 °, um ein Entmischen und Abtropfen von der Rohrwandung zu vermeiden. Es ergibt sich eine große Durchdringungsöffnung (6), so daß ein Zuwachsen bzw. Anbacken weitgehendst vermieden werden kann. Wichtig ist, daß der Druck des Wassers in der Zuleitung (1) kleiner ist, als jener der zugeführten Druckluft (2), so daß ein effektiver Sprühnebeleffekt erzeugt werden kann. Höherer Luftdruck und größere Luftmenge führen bei geringem Flüssigkeitsdruck zu einer feineren Zerstäubung. Bei Bedarf können Zusatzmittel bzw. Zusatzstoffe mittels Schlauch (7), regelbar mit (8) dem Luftstrom zugegeben werden.

Das Benetzungformstück kann als Düse für die Vorbenetzung, als Hauptbenetzungsdüse, oder kombiniert eingesetzt werden.

Die Versuche dazu erfolgten zuerst unter Laborbedingungen (Bild 7). Dadurch wurde erreicht, daß gezielt auf beeinflussende Faktoren reagiert und im Vergleich zur Standarddüse unveränderte Umgebungs- und Rahmenbedingungen hergestellt werden konnten.

In den Versuchen 2 bis 6 konnte bei gewählter Vorbenetzungslänge von 2,2 m eine deutliche Staubreduktion mit dieser Düse erreicht werden. Hierbei zeigte sich, daß man bereits mit 30 % der Gesamtwassermenge, zugegeben an der Vorbenetzungsdüse, eine Reduktion der Staubbelastung von mehr als 60 % erreichen kann. Im Vergleich zu einer Standarddüse ergab sich infolge der besseren Durchfeuchtung eine weiche, plastische Konsistenz des aufgetragenen Betons. Der erzeugte Wassersprühnebel führte weiters zur besseren Benetzung der Feinteile.

Ziel der weiteren Versuche war es, die im Labor gewonnenen Erkenntnisse unter Baustellenbedingun-

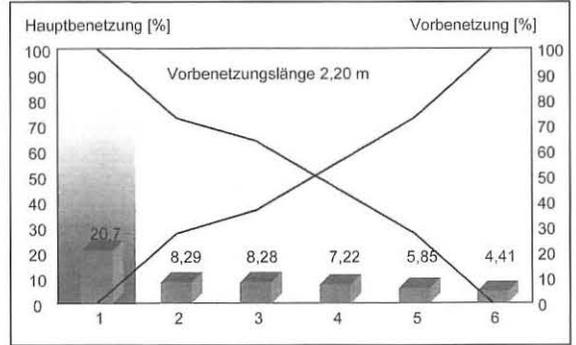


Bild 7: Staubintensitäten im Laborversuch: SBM-T + ofentrockener Zuschlag [3]

gen umzusetzen. Im ersten Schritt sollten die vorherrschenden Staubemissionen erfaßt werden, um diese dem neuentwickeltem Düsensystem gegenüberstellen zu können.

Zur Anwendung kam das Verfahren mit ofentrockenen Zuschlägen und Spritz-Bindemittel, wobei der SpB mit einer herkömmlichen Hochdruckdüse ohne Vorbenetzung auf Fels appliziert wurde. Der Mittelwert der rel. Staubintensität betrug 21,0.

Im Vergleich dazu erfolgte bei unveränderten Ausgangsparameter wie Belüftungssituation, Standpunkt des Meßgerätes, Auftragsfläche und Gerätekonfiguration der SpB-Auftrag mit Vorbeefeuchtung. Das Vorbenetzungsstück wurde ca. 2,0 m nach der Dosierblasschnecke in den Förderschlauch eingebaut, um einen eventuellen Rückstau des Wassers zu vermeiden. Im Dauertest stellte sich heraus, daß am stumpfen Winkel der Zusammenführung von Anschlußrohr und Benetzungformstück Verschleißerscheinungen auftraten. Dieses Problem konnte jedoch durch Aufdoppelung eines Stahlblechs gelöst werden. Positiv wirkte sich die Vorbenetzung auf den Verschleiß der Förderschläuche aus. Speziell bei Verwendung von ofentrockenen Zuschlägen (insbesondere Kantkorn) ergibt sich ohne Vorbeefeuchtung ein sehr hoher Abrieb.

Durch diese Vorbenetzungsmaßnahme und der Anpassung des Spritz-Bindemittels auf 1min Abbindezeit, konnte auch im Baustellenversuch die Staubfreisetzung um ca. 50 % herabgesetzt werden. Ein eingebauter Flowmeter garantierte eine konstante Zugabewassermenge von 4 l/min (entspricht ca. 30 % der Gesamtwassermenge) an der Vorbenetzungsdüse welche vom Bediener des "Spritzbeton-Bombers" eingestellt wurde; die Restwassermenge regelte der Düsenführer an der Hochdruckdüse. Verwendung fand diese Art der Vorbeefeuchtung bereits am Tunnel Sieberg, und Tunnel Landeck Süd.

### 1.4.1.3 Weiterentwickeltes Düsensystem

Aufgrund der vorherigen Ausführungen hat sich gezeigt, daß Spritzdüsen in Form einer Vorbenetzung einen entscheidenden Einfluß auf die Staubemission beim Trockenspritzverfahren haben können, so daß eine verbesserte Vorbenetzungsdüse mit einem Druckluft/Wassergemisch entwickelt werden sollte.

Durch modellhafte Einzelbetrachtungen des Systems "Benetzungskörper" wurden die strömungsmechanischen Vorgänge innerhalb dieses Systems analysiert [6]. Auf Basis dieser Grundlagen konnten durch nachfolgend aufgeführte Modifikationen (Bild 8) sowohl in Laborversuchen als auch im Baustelleneinsatz die Staubentwicklung und speziell das Problem der Anpackungen deutlich reduziert werden.

Grundprinzip der Modifikation ist die Verengung des Benetzungskörpers (1), zur Veränderung des Strömungsverhaltens des Mischgutes (Bild 8). Beruhend auf einer theoretischen Analyse der Strömungsvorgänge wird das Mischgut durch die Verengung beschleunigt. Es entsteht eine sogenannte Unterdruck-Sogwirkung. Zum einen verhindert dies ein Anpacken nach dem Einleitungsbereich und zum anderen ermöglicht die Druckminderung ein einfacheres Eindringen des Druckluft/Wassergemisches.

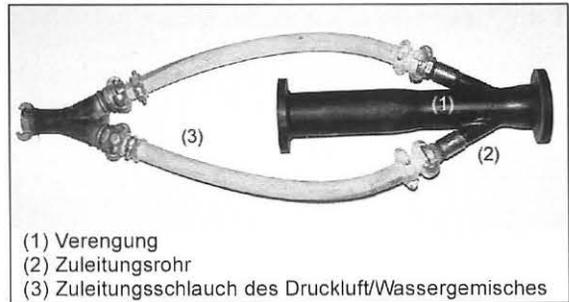


Bild 8: Vorbenetzungsdüse nach Pfeuffer

Weiter wird die Benetzungsfläche durch die Anordnung zweier Zuleitungen (2) erhöht und über den Benetzungsquerschnitt besser verteilt. Der Durchmesser der Zuleitungsrohre (2) muß dem Durchmesser des Zuleitungsschlauches (3) entsprechen, um einen tropfenförmigen Niederschlag des Sprühnebels zu vermeiden. Infolgedessen treten auch in den Zuleitungsrohren keine Anpackungen mehr auf.

Im Baustelleneinsatz (Tunnel St. Anton und S-Bahn-Tunnel Bernhausen) wird dieses weiterentwickelte Düsensystem derzeit eingesetzt. Erste Meßergebnisse zeigten (Bild 9), daß bereits mit einer Vorbenetzung von 15 % der Gesamtwassermenge, neben einem anpackungsfreien Benetzungsstück die Staubbelastung bis zu 70 % reduziert werden konnte. Hierbei wurde das Vorbenetzungsstück unmittelbar nach der Dosierblasschnecke eingebaut.

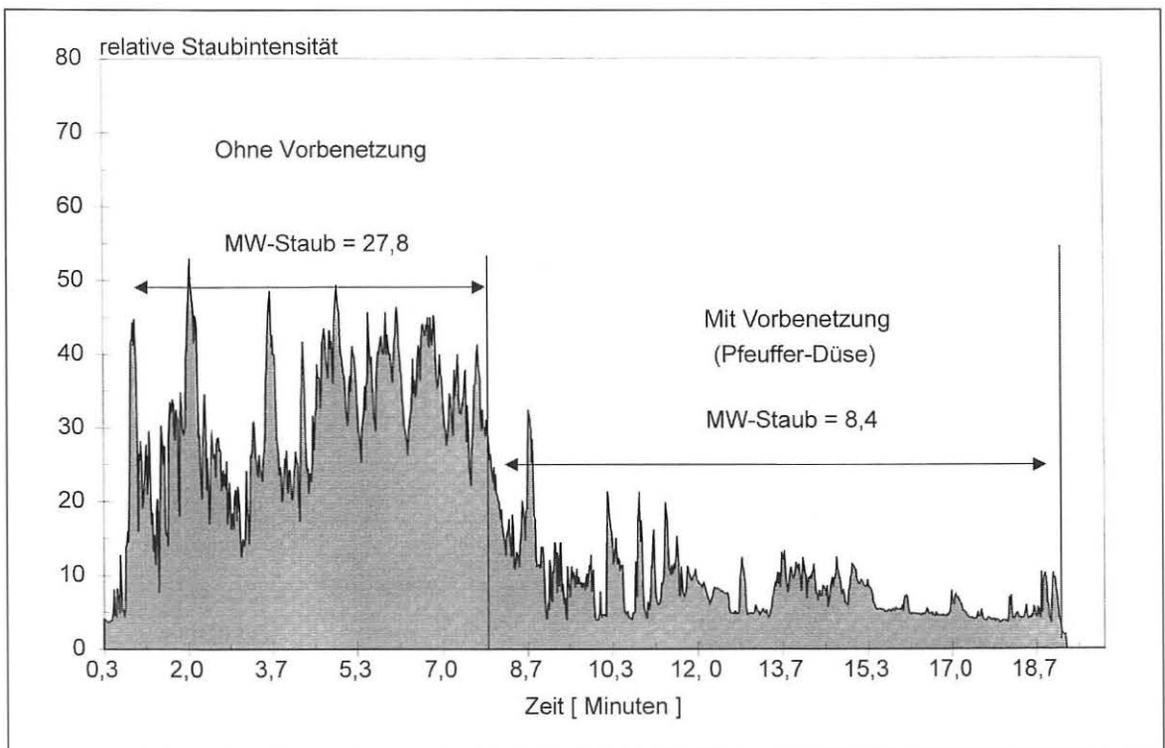


Bild 9: Baustellenversuch: SBM-T + ofentrockener Zuschlag [6]

### 1.4.2 Persönliche Schutzmaßnahmen

Sind die zuvor erwähnten Schutzmaßnahmen nicht ausreichend, so kann die Staubbelastung für den unmittelbar betroffenen Mineur mit Hilfe von filtrierenden Staubmasken verbessert werden.

### 1.4.3 Baustellenerfahrungen

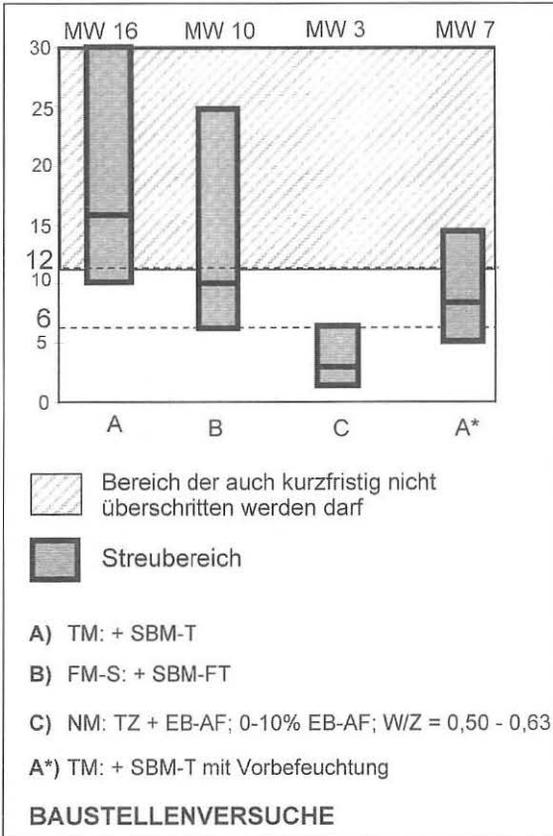


Bild 10: Staubintensitäten beim Applizieren alkaliarmer SpB [3]

Die Auswertung (Bild 10) von zahlreichen Staubmessungen im Labor- und Baustellenversuch und in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflüsse zeigt, daß die mittlere relative Staubintensität beim Trockenspritzverfahren ohne Vorbenetzung mit ofentrockenem Zuschlag die ungünstigsten Werte lieferte. Durch die relativ kurze Reaktionszeit erstarrt der SpB sofort an der Auftragsfläche, so daß das nachfolgende Spritzgut immer in eine bereits erhärtete Schicht auftrifft. Die Folge ist erhöhter Rückprallanfall, sowie vermehrte Staubbildung. Negativ wirkt sich weiters auch das oft bis zu 60 °C heiße ofentrockene Mischgut aus, da insbesondere die Benetzung der Feinsteile nur unzureichend erfolgt.

## 2. Rückprall

Der Rückprall wird definiert als jener Anteil des Spritzgemisches, der unmittelbar nach dem Applizieren von der Auftragsfläche rückprallt (= Spritzgemisch abzüglich Spritzbeton). Dieser ist nicht mit dem Rückfall zu verwechseln. Der Rückfall ist jener Teil, der sich infolge schlechter Haftung von der Auftragsfläche löst und abfällt. Bei der Erfassung des Rückprallanteils müssen zwei unabhängige Parameter ermittelt werden. Zum einen ist es erforderlich, die geförderte Menge an Spritzgemisch (Ausstrag aus der Düse) zu kennen, zum anderen muß die applizierte Spritzbetonmenge an der Auftragsfläche oder die Rückprallmenge am Boden erfaßt werden.

zieren von der Auftragsfläche rückprallt (= Spritzgemisch abzüglich Spritzbeton). Dieser ist nicht mit dem Rückfall zu verwechseln. Der Rückfall ist jener Teil, der sich infolge schlechter Haftung von der Auftragsfläche löst und abfällt. Bei der Erfassung des Rückprallanteils müssen zwei unabhängige Parameter ermittelt werden. Zum einen ist es erforderlich, die geförderte Menge an Spritzgemisch (Ausstrag aus der Düse) zu kennen, zum anderen muß die applizierte Spritzbetonmenge an der Auftragsfläche oder die Rückprallmenge am Boden erfaßt werden.

## 2.1 Rückprallermittlung

### 2.1.1 Ermittlung der Spritzleistung

Ohne großen Aufwand gestaltet sich die vollständige und gleichzeitige Erfassung aller Komponenten im Spritzgemisch mit der sogenannten "Behältermethode" (Bild 11). Dazu wird das Spritzgemisch in ein leeres Faß hineingespritzt und die dafür benötigte Zeit festgehalten. Durch den Gewichtsunterschied des Fasses vor und nach dem Spritzen ergibt sich die Masse des verspritzten Betons und daraus die Spritzleistung.

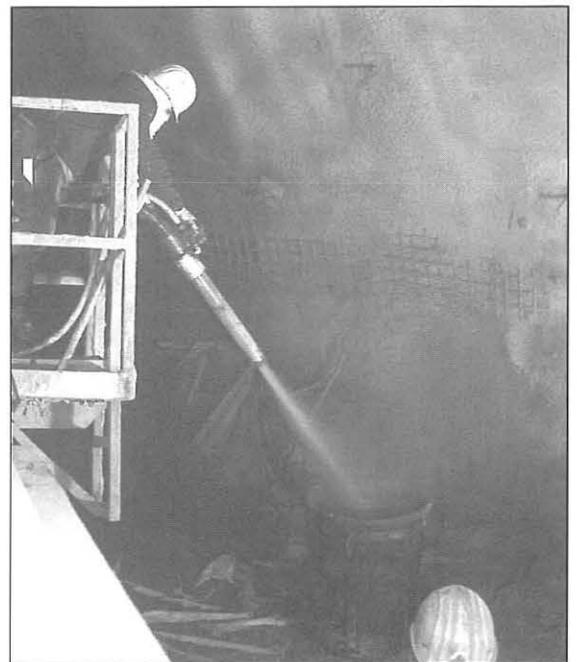


Bild 11: Ermittlung der Spritzleistung mittels der Behältermethode

### 2.1.2 Ermittlung des Zugabewassers

Die Ermittlung der Zugabewassermenge an der Düse erfolgt entweder mittels Flowmeter oder Wasseruhr. Wird für andere Zwecke die genaue Wassermenge, z.B. W/Z-Wert, im Spritzbeton benötigt,

so ist der Wasseranteil im Zuschlag (meßbar mit dem CM-Gerät) zu berücksichtigen.

### 2.1.3 Ermittlung der Rückprallmenge

Der Rückprall wird oft auf einer Plane aufgefangen (Bild 12) und anschließend in einem geeigneten Gefäß zwischengelagert. Das zeitintensive händische Schaufeln des Rückpralls von der Plane in einen Behälter kann entfallen, wenn unter die aufgelegte Rückprallfolie ein reißfestes Netz mit Halteösen an den Eckpunkten gelegt wird.



Bild 12: Auffangen des Rückpralls mittels untergelegter Plane

Die Wägung erfolgt vor Ort mittels Kranwaage (Bild 13), die z.B. an der Baggerschaufel oder am Ausleger des Spritzmobils montiert ist. Der Zeitaufwand einer Rückprallmessung für einen Querschnittsbereich zwischen 12 und 14 Uhr kann dann mit ca. 30 Minuten angesetzt werden.

### 2.1.4 Angabe des Rückpralls in [ % ]

Wurden die Spritzleistung des Spritzgemisches und der Rückprall - angegeben in kg/h - ermittelt, so erfolgt die Umrechnung des Rückprallanteils in Prozent, bezogen auf das Spritzgemisch. Um diese

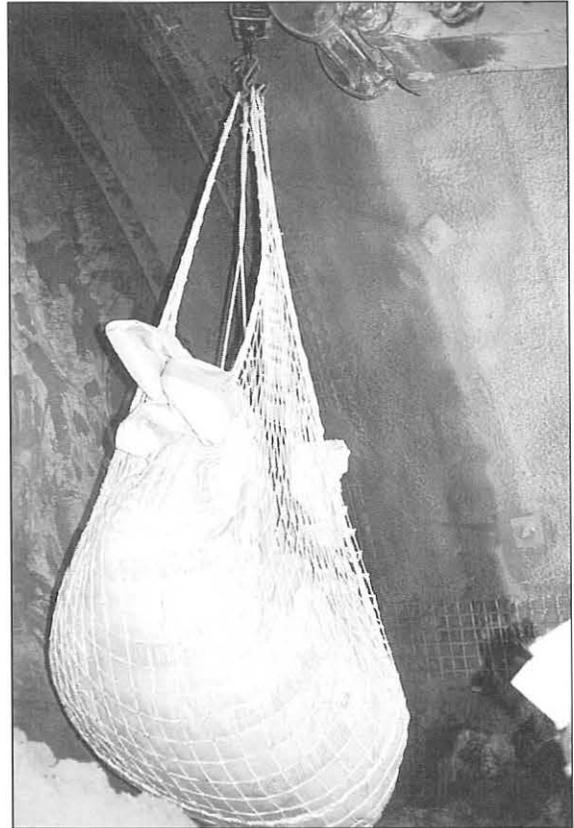


Bild 13: Wägen des Rückpralls mittels Kranwaage

Werte bei selber Verfahrenstechnik miteinander vergleichen zu können, sollte immer der w/z-Wert und der Spritzbereich z.B. an Ulme/First mit angegeben werden.

$\text{Rückprall \%} = [100 / (\text{Spritzleistung SpG kg/h})] \times (\text{Rückprall Verbrauch kg/h})$

Derzeit gibt es auch spezielle Vermessungsgeräte, die eine Profilaufnahme des gesamten Tunnelquerschnittes vor und nach dem Spritzvorgang ermöglichen. Mit der entsprechenden Software ist eine sehr genaue Volumsberechnung und bei bekannter Spritzleistung die Angabe des Rückpralls möglich.

## 2.2 Rückprallreduktionsmaßnahmen

Beim Auftrag des Spritzbetons ist eine gänzliche Vermeidung von Rückprall ausgeschlossen. Kaum ein anderer Wert erhitze die Gemüter der SpB-Experten mehr und wird heftiger in der Fachwelt diskutiert als der prozentmäßige Rückprallanteil. Für das Rückprallverhalten gelten ähnliche Einflußfaktoren, wie wir es zuvor bei der Staubentwicklung kennengelernt haben. Dazu gehören: Düsenabstand, W/Z-Wert, Materialzusammensetzung (Sieblinie), Orientierung der Auftragsfläche (Überkopf, Sohle) oder einzuspritzende Ausbauelemente, um nur einige Faktoren aufzuzählen.

In Abhängigkeit dieser Einflußfaktoren ergaben Rückprallmessungen (ohne die Verwendung von Rückprallminderer) an unterschiedlichen Baustellen im Mittel beim Trockenspritzen mit ofentrockenen Zuschlägen 30 %, mit naturfeuchten Zuschlägen 25 % und zum Vergleich beim Naß-Spritzverfahren 13 %. Durch die Kunst des Düsenführers können unabhängig der Verfahrenstechnik bereits rückprallreduzierende Maßnahmen getroffen werden.

### 2.2.1 Rückprallduzierung durch Wahl eines günstigen Spritzwinkels

Der Düsenführer spritzt meist unter flachem Winkel im Firstbereich, um außerhalb des Bereiches der abprallenden Körner zu sein. Trifft ein Korn unter dem Winkel  $\alpha$  auf die Auftragsfläche, so wird es unter dem selben Winkel reflektiert, wenn es auf einen harten Untergrund trifft und nicht in der SpB-Matrix eingebettet werden kann. Das heißt, das Teilchen wird vom nachfolgenden Spritzstrahl nicht erfaßt und liegt außerhalb der Flugbahn der auftreffenden Körner. Je größer der Winkel zwischen Auftragsfläche und Düsenrichtung, desto größer ist der Materialverlust (Bild 14).

### 2.2.2 Rückprallreduzierung bei schwierigen Untergründen

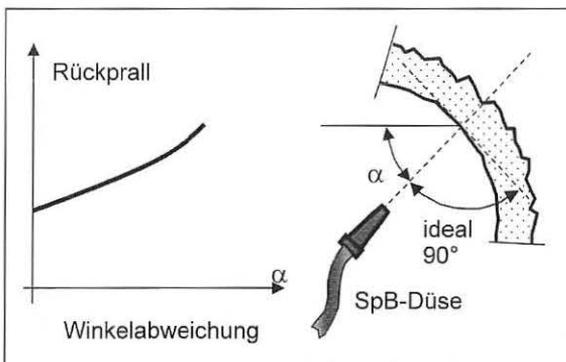


Bild 14: Rückprallreduzierung durch Wahl eines günstigen Spritzwinkels [3]

Aus diesem Grund muß der Düsenführer bei einem festen kompakten Untergrund die Spritzdüse immer rechtwinklig zur applizierten Fläche halten. Damit der Spritzbeton haftet, darf sein Eigengewicht nicht größer sein als die Haftzugfestigkeit an der Grenzfläche Spritzbeton/Untergrund oder die Zugfestigkeit des Untergrundes. Ist die applizierte Schichtstärke zu groß und damit zu schwer, so löst sich diese ab. Hierbei ist ein möglicher Rückfall primär auf das unzureichende Klebevermögen und auf die Zugfestigkeit (innere Kohäsion) des SpB zurückzuführen. Anders stellt sich die Situation bei der Applikation

der ersten Spritzbetonlage auf einen überwiegend aus absandenden Fein- und Mittelsanden bestehenden Baugrund. Die hohe Aufprallenergie bewirkt, daß das Spritzgut den relativ weichen Sandstein "abrasiert". Partielle Ablösungen bis schollenartige Abbrüche sind die Folge. Wegen des "weichen" Untergrundes muß die sonst bei festem Felsuntergrund übliche Spritztechnik geändert werden. Seitlich aufbauend an den Gitterbögen, beginnend von unten nach oben wird versucht, eine feste Auftragsfläche zu erreichen. Begünstigt wird dies durch den Einbau eines stehenden Bewehrungsgitters zwischen Bogen und Untergrund. Sind die beiden seitlichen Streifen entlang des Bogens hergestellt, kann die Fläche zwischen den Gitterbögen in Angriff genommen werden. Technische Maßnahmen zur Rückprallminderung bei sandigem Untergrund, wie aufspritzbare Verfestiger, z.B. Steinfestiger, Silikatfestiger, oder Kombinationen mit gesättigter Kalkmilch, zwei Komponenten Reaktionsmittel od. Bitumenemulsionen brachten keine bzw. nur geringe Verbesserungen, da die Eindringtiefe nur wenige Millimeter betrug, bzw. die Abbindezeit zu lange dauerte. Auch beim Aufspritzen von Versiegelungsmörtel in einer Stärke von 5 - 10 mm im Naßspritzverfahren mit sehr hoher Frühfestigkeit zur Oberflächenverfestigung konnte das teilweise Ablösen nicht vermieden werden.

### 2.2.3 Rückprallduzierung durch Wahl eines günstigen Düsenabstandes

Da oft nur mit einer Spritzbühne gearbeitet wird, erfolgt der Auftrag des Spritzbetonbereichs versetzt. Dabei kommt es vor, daß der Düsenführer auch den ungünstigen Querschnittsbereich von 11 Uhr spritzt und somit eine zu große Distanz zwischen Düse und Untergrund besteht (Bild 15). Der Förderdruck muß dann erhöht werden, um das Spritzgemisch noch mit ausreichender Energie zu applizieren und eine gute Haftung und Verdichtung des SpB zu bewirken.



Bild 15: Wichtig ist die Wahl des idealen Spritzwinkels und -abstandes

Es trifft nicht mehr ein eng gebündelter Spritzstrahl auf, sondern die Grundfläche des Spritzstrahls vergrößert sich quadratisch mit zunehmendem Düsenabstand. Der auftreffende Spritzkegel bedeckt einen großen Bereich von bereits angesteiften Spritzbetonschichten. Weiters werden vermehrt Feinstpartikel freigesetzt, die sich als sogenannte "Over Spray"-Schichten cm Untergrund anlegen. Daher sollte auch im Trockenspritz die Anwendung von 2-armigen Spritzmanipulatoren in Betracht gezogen werden.

Bei zu geringem Düsenabstand zur Auftragsfläche ergeben sich ebenso erhöhte Rückprallwerte. Wird dabei der Förderdruck nicht reduziert, erfolgt der Auftrag des Spritzgemisches mit einer zu hohen Verdichtungsenergie. Die Körner dringen mit hoher kinetischer Energie in die frische SpB-Schicht und reißen infolge der Wucht "Krater" auf. Es kommt zur teilweisen Zerstörung des Betongefüges, wobei die große Förderluftmenge und der große Förderdruck dazu beitragen, die oberste, noch nicht abgebundene Schicht wegzublasen. Dieser Effekt macht sich umso stärker bemerkbar, je weicher und plastischer die aufgetragene SpB-Schicht (insbesondere beim Naßspritzbeton) bleibt.

### 2.2.4 Rückprallreduzierung durch Einsatz von Rückprallminderer

Unabhängig von den vorgenannten Maßnahmen, die der Düsenführer durch seine Geschicklichkeit direkt beeinflussen kann, müssen auch in den Ausgangsmischungen Abstimmungen der einzelnen Komponenten getroffen werden. Die Kornzusammensetzung sollte innerhalb der Grenzl意思ien der einschlägigen Normen liegen, der Bindemittelanteil sollte nicht zu gering gewählt werden. Es ist erwünscht, eine "klebrige", zähe und plastische SpB-Konsistenz an der Auftragsfläche zu erzielen, in denen sich die Zuschlagskörner besser einbetten können. Dies kann durch die Verwendung spezieller Zusatzstoffe erreicht werden (Bild 16).

Der applizierte Spritzbeton wird dadurch bei gleichem W/Z-Wert plastischer und weicher, oder die Produkte erlauben eine Erhöhung des Wasseranteils ohne Konsistenzänderung. Selbst bei geringer

Dosierung dieser dieser Zusatzstoffe kann dieser stabilisierende Effekt erzielt werden. Das Zuschlagskorn, das mit hoher kinetischer Energie in die Betonschicht eindringt, verdrängt und verdichtet dabei die noch weiche Spritzschicht. Die weichere Konsistenz begünstigt diesen Effekt, indem gleichzeitig das Korn von einer Zementschlämme umgeben und der entgegen wirkende Impuls durch Adhäsionskräfte (Klebewirkung) gedämpft wird. Zur Anwendung kommen überwiegend pulverförmige Zusatzmittel, da diese mit genauer Dosierung zwischen 1 bis 10 % (abhängig vom Zusatzstoff) dem Zement untergemischt werden können. Flüssige Zusatzstoffe werden dem Zugabewasser über Kolbenpumpen zudosiert.

Die Produkte RM 1 bis 3 sind pulverförmige, sehr fein gemahlene Verdickungsmittel bzw. Klebemittel und bilden sofort bei Zugabe von Wasser eine gelartige Struktur. Sie lösen sich leicht in Wasser und ergeben schon bei geringer Konzentration eine Verdickung infolge einer hohen Fließgrenze bzw. Stabilisation mit erhöhter Viskosität des Zement-Leimgemisches. Das Produkt RM 4 ist ein sulfoniertes Vinyl-Copolymer, das üblicherweise dem Beton zugegeben wird, um ihn pumpfähiger zu machen und Wasser einzusparen.

#### 2.2.4.1 Versuchsdurchführung im Labormaßstab

Die pulverförmigen Rückprallminderer wurden dem SBMFT zugegeben und mittels Quirl zwei Minuten homogenisiert, die flüssigen Zusatzmittel direkt in den Wasserdruckkessel geleert. Zuerst wurde die Nullprobe gespritzt, um den Wasseranspruch für die weiteren Versuche beurteilen zu können. Infolge der unterschiedlich hohen Dosiermengen und der Rückprallmittelarten verändert sich auch der Wasseranspruch, so daß das Augenmerk auf eine gleiche Konsistenz des SpB gelegt wurde.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, daß der Anteil des Rückpralls primär durch die Konsistenz des applizierten SpB bestimmt wird. Je weicher, feuchter und plastischer der Beton ist, desto geringer die Menge der rückprallenden Zuschlagskörner. Diese Bandbreite wird durch ein unteres, bzw. oberes SpB-Plastizitätsniveau begrenzt. Wird zu trocken gespritzt, so steigt der Rückprallanteil einhergehend mit großer Staubeentwicklung rapid an, da die Körner auf eine bereits erhärtete Auftragsfläche (mattgrau bis hellgrau mit staubiger poröser Oberfläche) auftreffen. Erhöht man hingegen die Wasserzufuhr an der Düse, so reduzieren sich sowohl Rückprall als auch Staubeentwicklung, jedoch leider auch Dichtigkeit und Frühfestigkeit, wel-

VERDICKER		KLEBER	VERFLÜSSIGER
inert	reaktiv		
Kalksteinmehl	hydr. Kalk	Dispersionspulver	Polyether-Polymerdispersion
Ziegelmehl	Flugasche	Kunststoffdispersionen	Acryl-Polymer
Bentonite	Traß	Methylcellulose	Venyl-Copolymer (RM 4)
Zeolite	Mikrosilika	Polyethylenoxid (RM 3)	
Sepiolite (RM 1)	Kieselsole (RM 2)		

Bild 16: Rückprallmindernde Stoffe [6]

che gerade im Hohlraumbau von entscheidender Bedeutung sind.

Die obere Grenze der Wasserzugabe ist gegeben, wenn sich der SpB durch Überschreiten der inneren Haftzugfestigkeit ablöst und langsam "abrinnt". Die Auswertung (Bild 17) der Versuche zeigte, daß sehr fein gemahlene Zusatzstoffe einen sehr hohen Wasseranspruch aufweisen. Das heißt, es kann bei gleicher Konsistenz wie der Nullbeton, mehr Wasser zugegeben werden. Diese feinst gemahlene Stoffe bilden mit Wasser und Zement eine weichplastische, "klebrige" Suspension, die den Zusammenhalt (Erhöhung der Kohäsion und Adhäsion) des frischen SpB begünstigt.

Die Versuche mit RM 4 unterscheiden sich grundsätzlich von den anderen Versuchen. Bei diesem Produkt handelt es sich um einen Betonverflüssiger, dessen Wirkung auf einer Verminderung der Oberflächenspannung des Wassers beruht. Durch die relativ hohe Dosierung, ändert sich die Konsistenz - Übergang von flüssig zu trocken - bei geringer Änderung der Wasserzufuhr an der Düse schlagartig. Der Beton rinnt ähnlich einer Kautschukmasse plastisch bis zähflüssig einige Zentimeter ab, erstarrt jedoch dann blitzartig. Die Spritzfläche zeigt Krater und Rillenspuren. Durch die Zugabe von 1 % des Fließmittels konnte der W/Z-Wert gegenüber dem des Nullbetons um ca. 15 - 20 % reduziert werden. Bezüglich des Rückpralls konnten keine Verbesserungen erzielt werden. Auch der Einsatz des Produktes RM 3 mit klebender Eigenschaft erreichte keine wesentliche Reduzierung der Rückprallmenge.

Sehr gute Ergebnisse (Bild 18) hingegen erzielten die verdickenden Zusatzstoffe RM1 und RM2 mit denen

der Rückprall um mehr als 35 % reduziert werden konnte. Dabei zeigte sich generell, daß bei Erhöhung der Dosierung auch die Wasserzugabe erhöht werden muß, um dieselbe Konsistenz des aufgetragenen Betons zu erhalten. Das Produkt RM 1 benötigte den höchsten Wasseranteil, doch gleichzeitig konnte auch das beste Resultat erreicht werden. Diese Rückprallergebnisse mit ca. 18-20 % können auf Grund des hohen W/Z-Wertes durchwegs mit jenen des Naßspritzbetons verglichen werden, doch leidet einhergehend die Frühfestigkeit und Dichtigkeit. Diese Nachteile konnten jedoch beim RM 2 in diesem Ausmaß nicht festgestellt werden.

In weiteren Versuchsreihen konnten am Institut für Baustofflehre und Materialprüfung Innsbruck die betontechnologische Ursachen des Rückprallphänomens analysiert werden [6].

### 3. Zusammenfassung

Die beim Trockenspritzen erzeugten Feinstäube werden bei der Atmung aufgenommen und führen mit zunehmender Dauer der Einwirkung zu Gesundheitsschäden. Neben den aufgezeigten persönlichen und verfahrenstechnischen Schutzmaßnahmen konnte durch die Entwicklung einer neuen Vorbenetzungsdüse ein erheblicher Beitrag zur Arbeitshygiene (Staubreduzierung über 60 %) erzielt werden. Der Einsatz feinst gemahlener Zusatzstoffe erlaubt im Gegensatz zum Nullbeton eine Erhöhung des W/Z-Wertes zur Erzielung eines weich plastischen Spritzbetons an der Auftragsfläche. Der Rückprallanteil konnte durch diese Maßnahme um ca. 35 % reduziert werden.

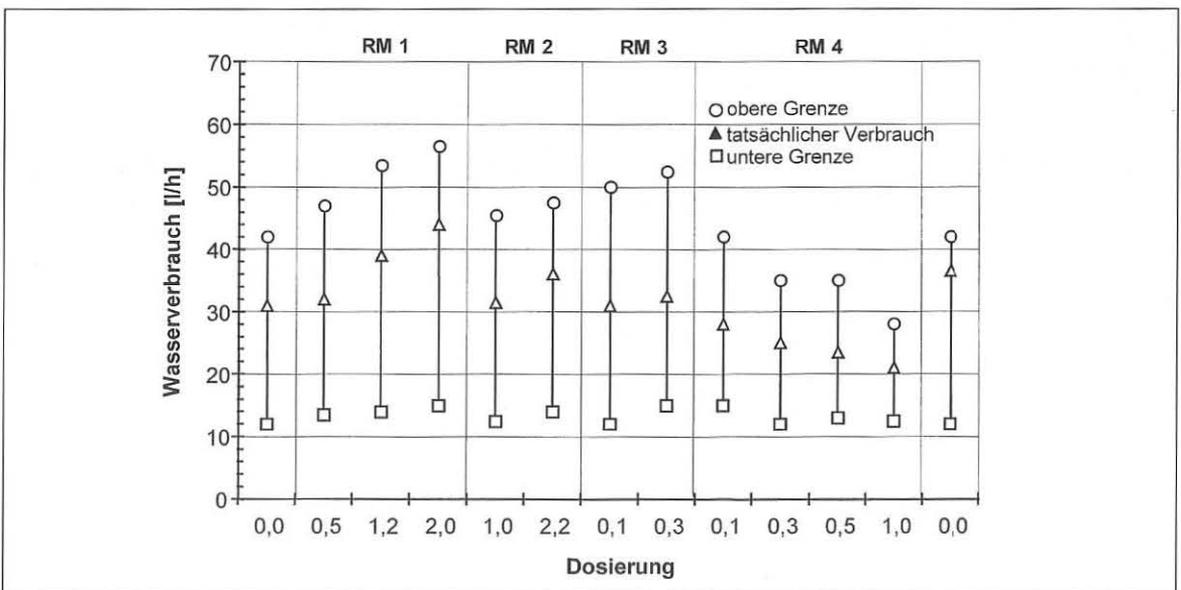


Bild 17: Wasseranspruch der Rückprallminderer [6]

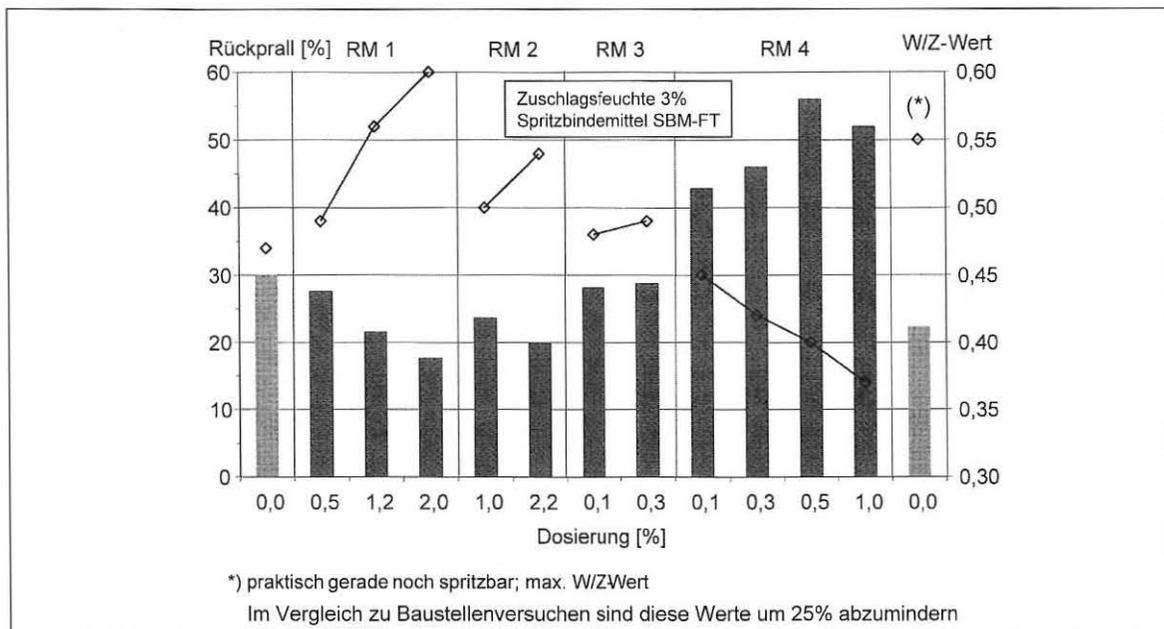


Bild 18: Rückprallwerte in Abhängigkeit von Rückprallminderern bei gleicher Konsistenz

4. Literatur

[1] Österreichischer Betonverein:  
Richtlinie Spritzbeton. 1998.

[2] Lukas, W.; Huber, H.; Kusterle, W.; Pichler, W.; Testor, M.; Saxer, A.:  
Bewertung von neuentwickelten Spritzbeton-Verfahrenstechniken. Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschungsvorhaben Nr. 3.163, 1998.

[3] Testor, M.:  
Alkaliarme Spritzbetontechnologie - Verfahrenstechnik; Druckfestigkeits-, Rückprall- und Staubuntersuchungen. Dissertation, Universität Innsbruck, 1997.

[4] Testor, M.; Kusterle, W.:  
Vergleichende Staubmessungen bei Spritzbeton-

arbeiten. Meßmethoden - Einflußfaktoren - Reduktionsmöglichkeiten. Felsbau 15 (1997) Nr.2.

[5] Bundesministerium für Arbeit u. Soziales (Hrsg.):  
MAK-Werte-Liste. Juni 1995, Amtliche Nachrichten Arbeit-Gesundheit-Soziales. Sondernummer 2/1993.

[6] Pfeuffer, M.:  
Betontechnologische Maßnahmen und Benetzungstechniken zur Reduzierung von Rückprall und Staub beim Trockenspritzverfahren. Dissertation i.V., Universität Innsbruck, 1999.

[7] Testor, M.; Kusterle, W.:  
Alkaliarme Spritzbetontechnologie, Spritzsysteme-Dosiertechnik-Benetzungstechnik. Tunnel 5/98.