

# Staubbekämpfung beim Trockenspritzverfahren

Dr.-Ing. Jörg SCHREYER

STUVA, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V., Köln

## 1. EINFÜHRUNG

Bei Spritzbetonarbeiten im Untertagebau ist in vielen Fällen auch heute noch der Düsenführer einer besonders starken Staubbekämpfung ausgesetzt. Das gilt insbesondere für das Trockenspritzverfahren.

Voraussetzung für eine Verbesserung der Arbeitsplatzsituation ist, daß die wichtigsten Staub-Einflußfaktoren bekannt sind. Die STUVA führte hierzu systematische Versuche durch (1) (2). Ziel dieser Versuchsreihen war es, die Konzentration an lungengängigem Feinstaub im Spritzdüsenbereich unter verschiedenen Ausgangsbedingungen zu messen und - soweit möglich - Vorschläge für eine Staubreduzierung zu unterbreiten. Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund:

- Welchen Einfluß hat die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung auf die Staubentwicklung?
- Wird durch den Einsatz einer Vorbenetzungseinrichtung beim Trockenspritzverfahren der Staub an der Spritzdüse reduziert?
- Welchen Einfluß hat der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine auf die Staubbekämpfung?
- Kann der Staub durch Betonzusatzmittel reduziert werden?

## 2. WAHL DES GERÄTES FÜR DIE STAUBPROBENAHME

Beim Betonspritzen entsteht ein Staub, der unter anderem Zement und Feuchtigkeit enthält. Bei Probenahmen von solchen Stäuben stellte sich nach Kaufmann (3) heraus, daß viele Staubmeßgeräte in kurzer Zeit stark verschmutzen. Erschwerend kommt hinzu, daß die Geräte zum größten Teil aufgrund ihrer mechanischen Konstruktion nur äußerst schwierig zu reinigen sind. Die sogenannten Gesamtstaubgeräte sind zur Probenahme von Spritzbetonstaub ungeeignet, weil der gesammelte Staub infolge des Zementgehaltes und der Feuchtigkeit zu einem Kuchen zusammenbackt und dadurch die üblicherweise bei der Auswertung verwendete Sedimentationsanalyse nicht mehr durchgeführt werden kann. Zur Probenahme sind demzufolge nur Geräte verwendbar, die über einen Vorabscheider verfügen und bei

denen der Weg von der Ansaugöffnung zum Staubfilter möglichst kurz und für Reinigungszwecke gut zugänglich ist. Geräte mit Zyklonen als Vorabscheider oder mit Plattenpaketen (Horizontaleleutriator) zur Abtrennung des Grobstaubes scheiden somit aus, weil sie diese Voraussetzung nicht erfüllen (3). Als geeignet erwies sich dagegen das VC 25\* mit aufgesetztem Feinstaubtopf (4). Es bietet unter anderem folgende wichtige Vorteile:

- Der Staubanfall wird unmittelbar im Gerät in Grob- und Feinstaub getrennt.
- Die Abscheidecharakteristik des Staubes entspricht der Johannesburger Konvention.
- Die Luftdurchsatzmenge des VC 25 von ca. 22,5 m<sup>3</sup>/h ist sehr groß, so daß nur relativ kurze Meßzeiten benötigt werden.

## 3. DURCHFÜHRUNG DER STAUBMESSUNGEN

Die Staubmessungen beim Betonspritzen wurden auf verschiedenen Tunnelbaustellen durchgeführt. Dabei wurden spezielle Versuchsstände (z.B. mit Folien abgeschottete Versuchsräume) hergerichtet. Außerdem wurde die Spritzdüse stets horizontal gehalten und der Spritzbeton auf eine nahezu lotrechte, ebene Prüffläche aufgetragen. Der Abstand der Spritzdüse zur Auftragsfläche betrug konstant ca. 1,5 m.

Das Staubprobenahmegerät war bei allen Versuchen in ca. 1 m Entfernung vom Düsenführer so aufgebaut, daß sich der Ansaugstutzen des Gerätes in ca. 1,50 m Höhe befand. Die exakte Stabmeßzeit von 6 Minuten wurde mit Hilfe einer Stoppuhr festgehalten. Ebenso wurden die Wasserzugabemenge und der Förderdruck an der Spritzbetonmaschine konstant gehalten und aufgezeichnet.

Alle durchgeführten Staubmessungen erfolgten ausschließlich während des Betonspritzens.

## 4. ERGEBNISSE DER STAUBMESSUNGEN BEIM BETONSPRITZEN

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse erläutert. Sie führen zu verbesserten Erkenntnissen über die wichtigsten Abhängigkeiten der Staubentwicklung im Spritzdüsenbereich beim Trockenspritzverfahren. Gemessen wurde stets die jeweilige Konzentration des lungengängigen Feinstaubes ( $d < 5 \mu\text{m}$ ).

\*) Vertrieb: Firma Strölein, Düsseldorf

#### 4.1 Einfluß der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung auf die Feinstaubkonzentration

Im Bereich der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 1 bis 4 % (üblicher Baustellenbereich) nimmt die Feinstaubkonzentration mit wachsender Eigenfeuchte zu, und zwar unabhängig vom Ort der Wasserzugabe (Düse oder Vorbenetzung). Dieses zunächst widersprüchlich erscheinende Ergebnis (Abb.1) läßt sich wie folgt erklären: Bei den Versuchen wurde der Gesamtwassergehalt im Spritzbeton konstant gehalten. Es ist also bei hoher Eigenfeuchte der Ausgangsmischung die Wasserzugabemenge gering und umgekehrt. Die größere Menge Zugabewasser bildet bei geringen Eigenfeuchten einen stärkeren Wasserschirm um das Fördermaterial. Dieser Effekt erschwert es dem Staub, sich auf dem Weg von der Spritzdüse zur Auftragsfläche auszubreiten (Abb.2).

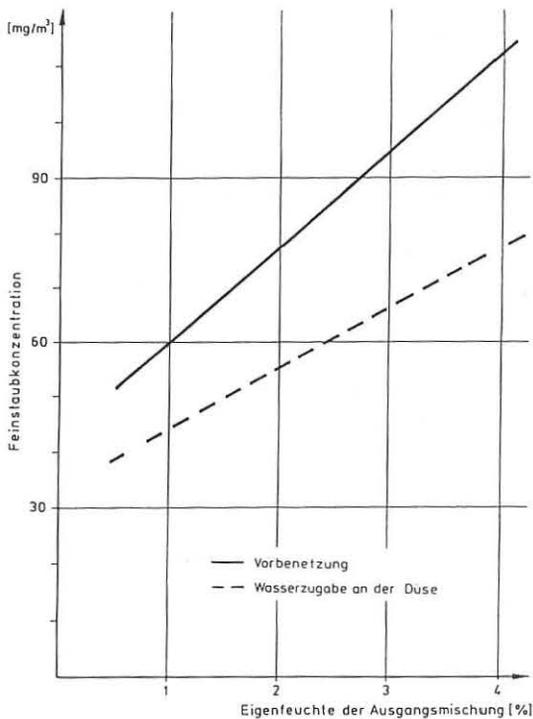


Abb.1. Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich beim Trockenspritzverfahren in Abhängigkeit von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung und dem Ort der Wasserzugabe (Düse bzw. Vorbenetzung); Gesetzmäßigkeit hat nur Gültigkeit für Eigenfeuchten von ca. 1 bis 4 % (1).

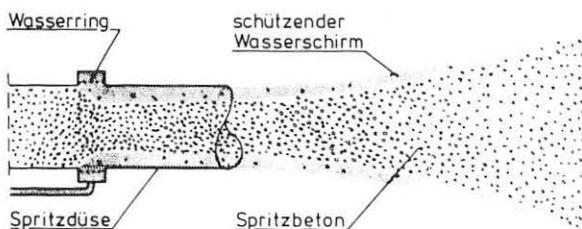


Abb.2. Schützender Wasserschirm beim Trockenspritzverfahren verhindert Ausbreitung des lungengängigen Feinstaubes.

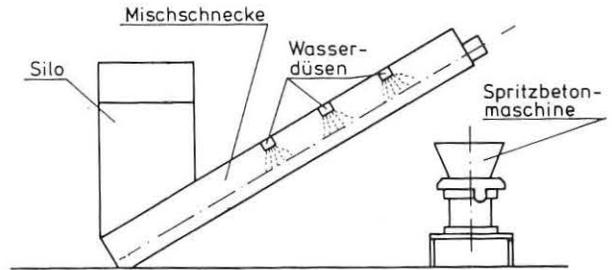


Abb.3. Vorbefeuchtungsanlage zur Erhöhung der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung.

Einige Maschinenhersteller bieten in ihrem Programm sogenannte Vorbefeuchtungsanlagen (Abb.3) zur Verminderung der Staubbelastung im Spritzdüsenbereich an. Hierbei wird die Spritzbetonmischung über eine Mischschnecke mit über dem Mischgut befindlichen Wasserdüsen in das Silo der Spritzbetonmaschine gefördert. Mit Hilfe dieser Bedüsung läßt sich die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung erhöhen.

Der Einsatz solcher Vorbefeuchtungsanlagen zur Staubreduzierung im Spritzdüsenbereich ist unterschiedlich zu beurteilen:

- Bei Verwendung üblicher Baustellenmischungen (Eigenfeuchte ca. 1 bis 4 %) ist eine Vorbefeuchtungsanlage aufgrund der inzwischen gewonnenen Erkenntnisse nicht ratsam. Es besteht dabei nämlich - wie aufgezeigt - die Gefahr, daß durch die Erhöhung der Eigenfeuchte auch die Feinstaubkonzentration ansteigt (Abb.1). Bei einer Eigenfeuchte ab ca. 5 % ist darüber hinaus beim Trockenspritzverfahren mit erheblichen Förderproblemen zu rechnen.
- Bei Verwendung ofentrockener Mischungen hat eine Vorbefeuchtungsanlage ihre Berechtigung. Hier kann die Eigenfeuchte auf ca.1 bis 1,5 % gebracht werden, und so die

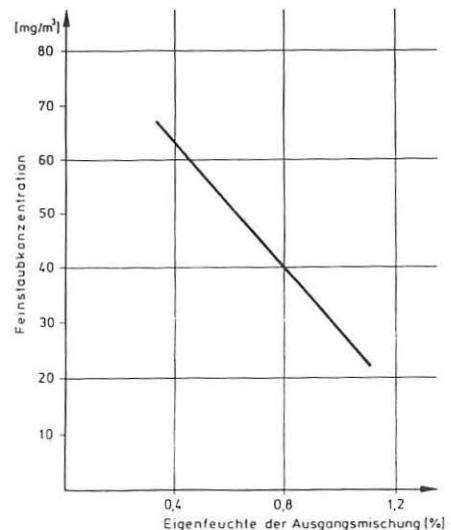


Abb.4. Feinstaubkonzentration beim Trockenspritzverfahren in Abhängigkeit von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung; Gesetzmäßigkeit hat nur Gültigkeit für Eigenfeuchten von 0 bis 1 % (1).

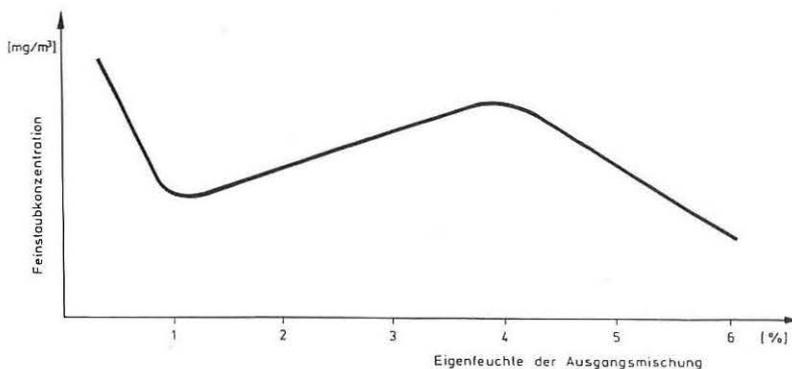


Abb. 5. Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung (Übersicht) (1).

Feinstaubkonzentration an der Maschine und im Spritzdüsenbereich spürbar gesenkt werden (Abb. 4).

Faßt man die Aussagen der Abbildungen 1 und 4 zusammen, so erhält man die in Abbildung 5 qualitativ dargestellte Abhängigkeit der Feinstaubkonzentration von der Eigenfeuchte der Ausgangsmischung. Danach sinkt die Feinstaubkonzentration zunächst mit zunehmender Eigenfeuchte der Ausgangsmischung. Dies gilt für den Eigenfeuchtebereich von ca. 0 bis 1 %. Die Feinstaubkonzentration steigt jedoch mit wachsender Eigenfeuchte im Bereich von ca. 1 bis 4 % (üblicher Baustellenbereich). Bei Werten über ca. 4 % wirkt sich hingegen ein Anstieg der Eigenfeuchte wieder günstig auf die Staubeentwicklung im Spritzdüsenbereich aus.

Unter Berücksichtigung auch der Staubeentwicklung an der Spritzbetonmaschine und der Verarbeitbarkeit des Materials sollte die Eigenfeuchte der Spritzbeton-Ausgangsmischung möglichst 3 % betragen.

#### 4.2 Einfluß des Ortes der Wasserzugabe auf die Feinstaubkonzentration

Der Ort der Wasserzugabe ist für die Staubeentwicklung im Spritzdüsenbereich ebenfalls entscheidend (Abb. 1).

Von einer Vorbenetzung spricht man, wenn die Wasserzugabe hier einige Meter vor der Austrittsöffnung des Förderschlauches erfolgt (nicht zu verwechseln mit der Vorbefeuchtung, Punkt 4.1). Hierbei kann sich das Material auf den letzten Metern im Förderschlauch gut mit dem Wasser vermischen und dadurch mehr Wasser binden. Dies bedeutet aber auch, daß sich nur ein geringer schützender Wasserschirm um den Spritzbeton ausbildet (vgl. hierzu 4.1) und somit eine größere Staubeentwicklung möglich ist als bei der Wasserzugabe an der Düse. Die Staubmessungen lassen erkennen, daß insbesondere bei einer Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von ca. 3 % die Wasserzugabe direkt an der Düse Vorteile bietet. Hier wird gegenüber einer Vorbenetzung die Feinstaubkonzentration bereits ohne Kleberzugabe um 40 % reduziert (Abb. 6). Bei geringer (< ca. 1 %) bzw. hoher (> ca. 5 %) Eigenfeuchte der Ausgangsmischung spielt der Ort der Wasserzugabe (Düse bzw. Vorbenetzung) eine weniger große Rolle. Der Einsatz einer Vorbenetzung erscheint deshalb - wenn kein Kleber zugegeben wird - zur Staubreduzierung nicht sinnvoll. Bei der Zugabe eines Klebers bietet die Vorbenetzungseinrichtung dagegen jedoch erhebliche Vorteile, wie nachfolgend unter Punkt 4.3 erläutert wird.

#### 4.3 Einfluß von Betonzusatzmitteln auf die Feinstaubkonzentration

##### 4.3.1 Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern

Nach Angaben der Hersteller reagieren Erstarrungsbeschleuniger sehr stark mit Wasser. Sie sollen auch eine gewisse Klebewirkung besitzen, die bei ausreichender Reaktionszeit den Staubeinfall vermindert. Dies konnte in den Versuchen allerdings nur zum Teil bestätigt werden. So zeigten die Staubmessungen bei Verwendung eines speziellen Erstarrungsbeschleunigers eine Reduzierung der Feinstaubkonzentration bis zu ca. 30 %. Andere Erstarrungsbeschleuniger wirkten hingegen kaum staubreduzierend. Letzteres gilt auch für das untersuchte flüssige BE-Mittel (Abb. 7). Im Einzelfall sollten die Angaben der Hersteller deshalb durch entsprechende Staubmessungen überprüft werden.

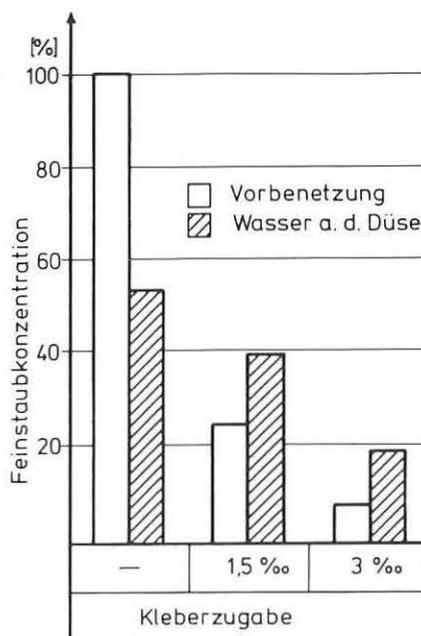


Abb. 6. Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich beim Trockenspritzverfahren in Abhängigkeit von der Kleberzugabe und dem Ort der Wasserzugabe. Die Eigenfeuchte der Ausgangsmischung betrug ca. 3 % (1).

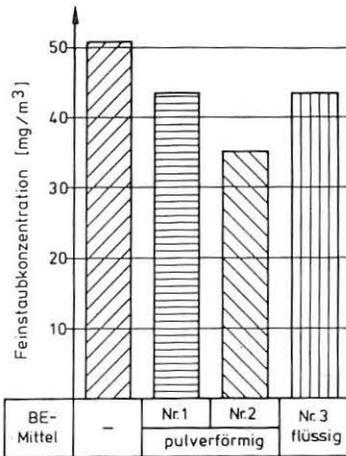


Abb.7. Reduzierung der Feinstaubkonzentration beim Trockenspritzverfahren in Abhängigkeit von drei verschiedenen BE-Mitteln (1).

#### 4.3.2 Zugabe eines speziellen Klebers in die Spritzbetonausgangsmischung

Die Zugabe eines speziellen Klebers\*) in die Spritzbetonausgangsmischung verringert die Feinstaubkonzentration erheblich. Bei einer Eigenfeuchte der Ausgangsmischung von 3 % ließ sich z.B. die Feinstaubkonzentration durch den Kleber (Zugabemenge 3 % vom Zementgewicht) bei Wasserzugabe an der Düse um ca. 70 % verringern. Bei Vorbenetzung wurde sogar ein Abbau der Staubkonzentration von ca. 90 % erreicht (Abb.6). Da der Kleber einige Zeit zum Reagieren mit dem Wasser braucht, wirkt sich hier eine Vorbenetzung sehr günstig aus. Zu beachten ist jedoch, daß der Kleber die Frühfestigkeit des Spritzbetons unter Umständen vermindert. So wurde z.B. im Alter von 8 Stunden eine Abnahme der Spritzbetondruckfestigkeit durch die Kleberzugabe von ca. 10 bis 60 % gemessen. Die zugehörige Druckfestigkeit nach 28 Tagen wurde allerdings nur um etwa 10 % verringert. Eine Eignungsprüfung, bei der insbesondere die

\*) Silipon SPR6, Henkel AG, Düsseldorf

Frühfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons untersucht wird, ist deshalb bei Verwendung eines Klebers angeraten.

Die jeweils verwendete Kombination BE-Mittel/Kleber beeinflusst nicht nur den Druckfestigkeitsverlauf (Abb.8), sondern auch die Feinstaubkonzentration. So erhöhte sich in einem Versuch durch das dort verwendete BE-Mittel die Feinstaubkonzentration um etwa 50 %. Kleber und BE-Mittel müssen also auch im Hinblick auf ein optimales Zusammenwirken bei der Staubreduzierung überprüft werden.

Wenn aus Kostengründen die Kleberzugabe von 3 auf 1,5 % gesenkt wird, so vergrößert sich bei der Wasserzugabe an der Düse bzw. Einsatz einer Vorbenetzung die zugehörige Feinstaubkonzentration ungefähr um das 2- bzw. 3-fache (Abb.6).

#### 4.4 Einfluß des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine auf die Feinstaubkonzentration

Mit Steigerung des Förderdruckes an der Spritzbetonmaschine wächst auch der erforderliche Luftmengenbedarf bei der Spritzbetonförderung (Abb.9). Der größere Luftmengenbedarf führt im Bereich der Spritzdüse durch die Expansion der dort ebenfalls größeren Luftmenge zu einer stärkeren Verwirbelung der Feinstaubanteile des Spritzbetons. Dies verursacht eine erhöhte Feinstaubkonzentration im Düsenbereich (Abb.10). Ein Vergrößerung des Förderdruckes von z.B. 2 auf 3 bar erhöht die Feinstaubkonzentration nach Abbildung 11 bei einem Schlauchdurchmesser von 50 mm um ca. 300 %, bei einem Durchmesser von 65 mm um ca. 450 %. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß der Förderdruck im Hinblick auf eine geringe Staubbelastung im Spritzdüsenbereich möglichst niedrig gewählt werden sollte. Dabei ist jedoch unbedingt darauf zu achten, daß die Spritzbetonförderung nicht negativ beeinflusst wird (Verstopfer).

Um die Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich möglichst gering zu halten, muß deshalb im Hinblick auf eine möglichst geringe Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich angestrebt werden, den Förderdruck und damit den Luftmengenbedarf soweit wie möglich zu senken. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

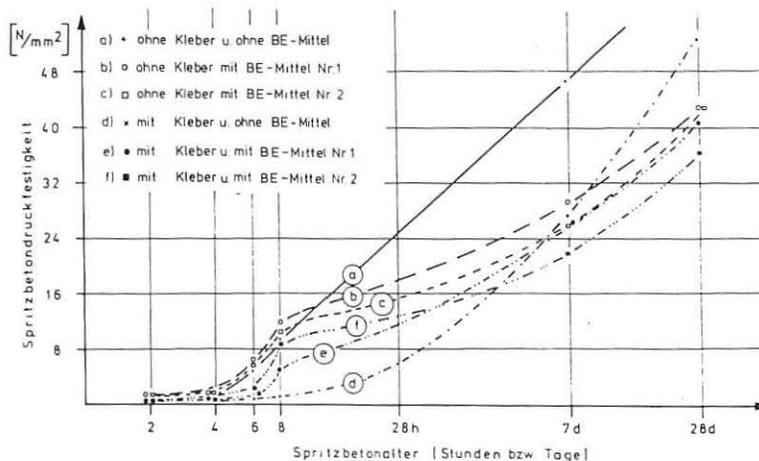


Abb.8. Druckfestigkeit des im Trockenspritzverfahren hergestellten Spritzbetons in Abhängigkeit von der Kleberzugabe, vom verwendeten BE-Mittel und vom Spritzbetonalter (1).

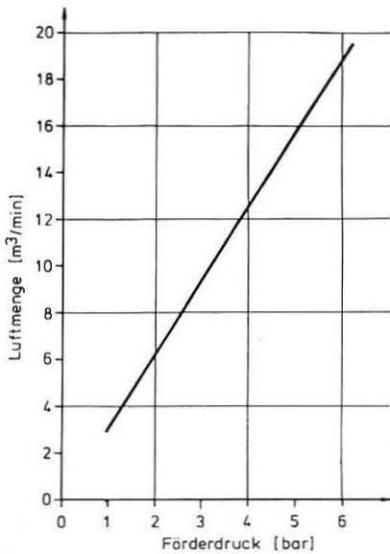


Abb.9. Förderdruck an der Spritzbetonmaschine in Abhängigkeit von der erforderlichen Luftmenge (Beispiel) (1).

#### 4.4.1 Düsenabstand

Mit zunehmendem Abstand zwischen Düse und Auftragsfläche ist eine entsprechend höhere Luftgeschwindigkeit in der Förderleitung erforderlich. Nur so können die Mischungsbestandteile ausreichend beschleunigt werden, um den Spritzbeton an der Auftragsfläche genügend zu verdichten. Eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit bei konstantem Leitungsdurchmesser ist aber nur durch einen größeren Luftmengenumsatz zu erreichen. Dies wiederum verursacht im Spritzdüsenbereich eine höhere Feinstaubkonzentration (Abb.10). Ziel muß es deshalb sein, den Düsenabstand von ca. 1 bis 2 m nicht zu überschreiten und so mit relativ geringem Luftmengenbedarf und niedriger Staubentwicklung zu spritzen.

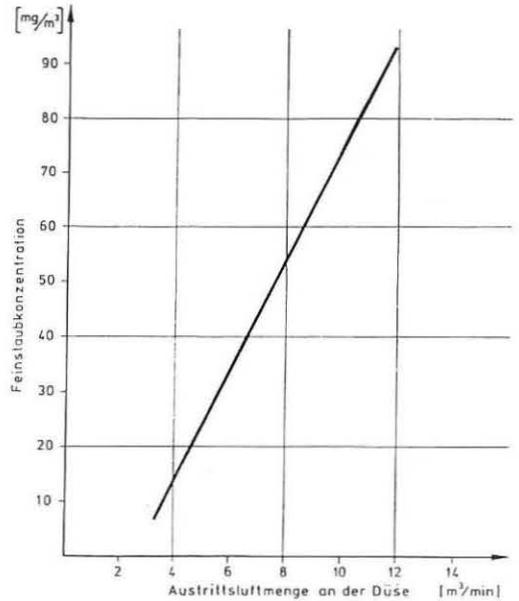


Abb.10. Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Austrittsluftmenge an der Spritzdüse (1).

#### 4.4.2 Förderleitungsdurchmesser

Bei konstantem Förderdruck an der Spritzbetonmaschine nimmt die Feinstaubkonzentration mit größer werdendem Leitungsdurchmesser zu, da auch der Luftmengenbedarf entsprechend anwächst. So steigt z.B. die Feinstaubkonzentration bei einer Vergrößerung des Förderleitungsdurchmessers von 50 auf 65 mm bei einem Förderdruck von 3 bar um etwa das Doppelte (Abb.11). Der Förderleitungsdurchmesser sollte deshalb entsprechend dem Größtkorn der Ausgangsmischung möglichst klein gewählt werden (Leitungsdurchmesser  $\geq 3 \times$  Größtkorndurchmesser).

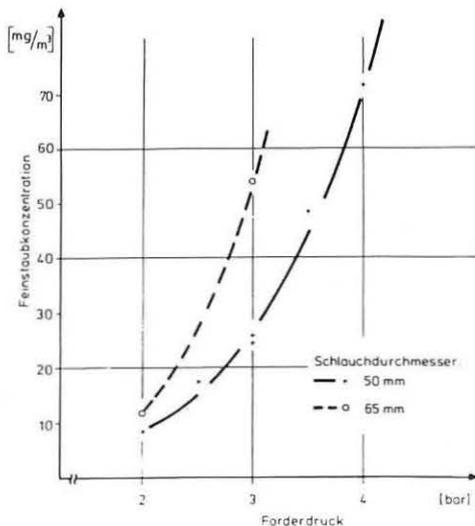


Abb.11. Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit vom Förderdruck an der Spritzbetonmaschine und vom Förderleitungsdurchmesser (5).

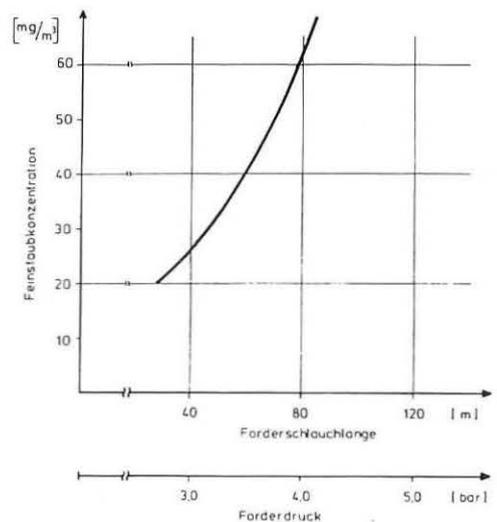


Abb.12. Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Förderlänge bei konstantem Spritzbetonaufprall (gleiche Spritzbetonverdichtung) (5).

#### 4.4.3 Förderleitungslänge

Mit wachsender Förderlänge ist ein entsprechend höherer Förderdruck an der Spritzbetonmaschine einzustellen, um den Spritzbetonaufprall an der Auftragsfläche möglichst gleich zu halten (vgl. 4.4.1 Verdichtung). Ein größerer Förderdruck bei konstantem Schlauchdurchmesser bedeutet aber auch gleichzeitig einen höheren Luftmengenbedarf (Abb.9). Dieser bewirkt eine stärkere Verwirbelung der Feinstaubanteile und damit eine höhere Staubbelastung im Spritzdüsenbereich (Abb.10). So steigt z.B. bei einer Verlängerung des Förder Schlauches von 40 auf 80 m infolge der erforderlichen Erhöhung des Förderdrucks die Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich nach Abbildung 12 um mehr als das Doppelte.

Im Hinblick auf eine möglichst geringe Feinstaubkonzentration im Spritzdüsenbereich sollte deshalb die Spritzbetonförderlänge so kurz wie verfahrenstechnisch und baubetrieblich vertretbar gewählt werden.

#### 4.5 Einfluß der Spritzdüsenausbildung auf die Feinstaubkonzentration

Folgende Spritzdüsen wurden im Hinblick auf die Feinstaubentwicklung vergleichend untersucht:

- Spritzdüse A bestehend aus einem ca. 30 cm langen Schlauch mit einem Durchmesser von 60 mm, der auf ein 50 mm-Rohr gesteckt wird.
- Spritzdüse B bestehend aus einem Spezialmischkörper, in dem in drei versetzten Ebenen feine Düsen so angeordnet sind, daß laut Herstellerangaben Wasser unter einem Druck von ca. 70 bar in den Förderstrom eingedüst wird. Die Wasserstrahlen bilden dabei ein "Wassergitter". Der geförderte Spritzbeton muß durch dieses Gitter hindurch und soll dabei soviel Zugabewasser aufnehmen, daß kein Staub freigesetzt wird.

Das zugehörige 70 cm lange Strahlrohr wird auf den Spezialmischkörper aufgesetzt und verjüngt sich kontinuierlich von 55 auf einen Durchmesser von 46 mm an der Austrittsöffnung.

- Spritzdüse C wie Typ B, jedoch mit einem konstanten Strahlrohrdurchmesser von 55 mm (keine Verjüngung).

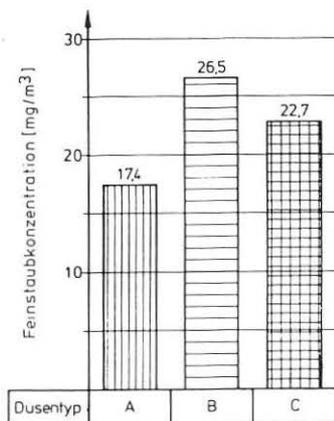


Abb.13. Feinstaubkonzentration in Abhängigkeit von der Spritzdüsenausbildung (Erläuterung zu den Düsen im Text) (5).

Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die Spritzdüsen mit dem Spezialmischkörper (Düsen B und C) die Feinstaubkonzentration um bis zu 50 % gegenüber der herkömmlichen Spritzdüse (Düse A) erhöhen (Abb.13).

Durch die Spezialdüsen B und C wird zwar eine bessere Wasseraufnahme des Materials erreicht. Hierdurch wird aber der schützende Wasserschirm (Abb.2) vermindert und dadurch eine entsprechend größere Staubentwicklung verursacht (vgl. Punkt 4.1). Dies gilt nur für Eigenfeuchten der Ausgangsmischung von ca. 1,5 bis 4 % (üblicher Baustellenbereich). Bei sehr trockenen Ausgangsmischungen (Eigenfeuchte < 1,5 %) erscheint der Einsatz der Spritzdüse C zur Staubreduzierung in gewissem Rahmen erfolgversprechend.

Ein Vergleich der Spezialdüsen B und C zeigt, daß die Düse mit verjüngtem Strahlrohr die Feinstaubkonzentration um ca. 15 % erhöht. Dies ist erklärlich, da durch die Verjüngung des Strahlrohres die Geschwindigkeit der Austrittsluft und damit die Verwirbelung der Feinstaubanteile erhöht wird.

Bevor deshalb in Zukunft speziell ausgebildete Spritzdüsen eingesetzt werden, empfiehlt es sich dringend, entsprechende Messungen durchzuführen, um die Wirksamkeit im Hinblick auf eine Reduzierung des lungengängigen Feinstaubes zu überprüfen.

#### 5. SCHLUSSBEMERKUNG

Die oben dargestellten Versuchsergebnisse zeigen deutlich, daß auch mit herkömmlichen Mitteln die Konzentration von lungengängigem Feinstaub im Spritzdüsenbereich gesenkt werden kann. An dieser Stelle sei deshalb an alle Verantwortlichen appelliert, die aufgeführten staubmindernden Maßnahmen auch schnellstmöglich in die Praxis umzusetzen und auf den Baustellen einzuführen.

Die STUVA wird sich in Zusammenarbeit mit der Tiefbau-Berufsgenossenschaft und interessierten Baufirmen weiterhin darum bemühen, die Feinstaubkonzentration und die damit verbundene gesundheitliche Belastung der Arbeitskräfte im Tunnelbau spürbar zu verringern.

#### LITERATUR

1. Schreyer, J.: Spritzbeton unter Druckluft. STUVA-Forschungsbericht 15/81; Herausgeber: STUVA, Köln (1981).
2. Schreyer, J.: Anwendung von Spritzbeton unter Druckluft. Tiefbau - Ingenieurbau - Straßenbau 23, Heft 8, S. 558 - 560 (1981).
3. Kaufmann, E.: Staubmessungen auf Untertagebaustellen - Gesichtspunkte zur Auswahl der Staubsammelgeräte. Tiefbau-BG 87, Heft 8, S.422 - 424 (1975).
4. Coenen, W.: Feinstaubmessungen mit dem VC 25: Neuere Untersuchungen und praktische Erfahrungen; Staub - Reinhaltung der Luft 35, Nr. 12, S. 452 - 458 (1975).
5. Protokoll über Spritzbetonversuche der STUVA in München. Auftraggeber: Bilfinger + Berger Bau-AG (unveröffentlicht).