
Anmerkungen zum Baustelleneinsatz der neuen Spritzbetontechniken

A FEW REMARKS ON THE CONSTRUCTION-SITE APPLICATION OF NEW SHOTCRETE TECHNOLOGIES

GÜNTER STRAPPLER, ILF - BERATENDE INGENIEURE AG, ZÜRICH

Mit dem Begriff „Neue Spritzbetontechniken“ sind die Anwendungsverfahren für die Applikation von Spritzbeton gemeint, die ein „umweltneutrales“ Endprodukt zum Ziel haben.

Diese Anwendungsverfahren, die seit gut einem Jahrzehnt in Entwicklung stehen, haben in den Jahren 1994 und 1995 einen starken Entwicklungsschub erlebt. Mehrere dieser Techniken erreichten den Zustand der Praxisreife und wurden im Baustellenbetrieb für den Sicherungsspritzbeton im Tunnelvortrieb eingesetzt.

Im Sommer 1995 wurden 3 verschiedene Verfahren, die zum selben Ziel führen sollen, im täglichen Baustelleneinsatz näher in Augenschein genommen:

1. Naßspritzbeton mit alkalifreiem Beschleuniger
2. Trockenspritzbeton mit feuchten Zuschlägen und Spritzbetonbindemittel ohne Beschleuniger
3. Trockenspritzbeton mit ofentrockenen Zuschlägen mit Spritzbetonbindemittel ohne Beschleuniger

Untersucht wurden Praxistauglichkeit, Akzeptanz bei den Mannschaften, Wirtschaftlichkeit, Grenzen der Anwendung bzw. ideale Einsatzbedingungen und Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren.

The term "new shotcrete technologies" stands for shotcreting methods that aim at providing an "ecologically neutral" final product.

These methods, which have been developed for over a decade, experienced a remarkable boost in 1994 and 1995. A number of them have reached the status of practical viability and have been used on construction sites for the production of supporting shotcrete in tunneling.

In the summer of 1995, three different methods that are to achieve the same goal were studied in depth in day-to-day construction site operations:

1. *Wet-mix shotcrete with alkali-free accelerator*
2. *Dry-mix shotcrete with moist aggregates and special cement for shotcreting without accelerator*
3. *Dry-mix shotcrete with oven-dry aggregates and special cement for shotcreting without accelerator*

We studied the practical suitability, the acceptance by crews, the economic viability, the limits of application and ideal conditions of application as well as the pros and cons of the different methods.

1. Einleitung

Gegenstand meines Beitrages sind die „umweltneutralen“ Spritzbetonverfahren, die in den letzten beiden Jahren einen

ungeheuren Entwicklungsschub erfahren haben.

Dank Herrn Dr. H. Huber ist ja der zweifelhafte Begriff „umweltfreundlich“ für Spritzbeton aus dem Sprachgebrauch verschwunden.

Meinem altem Hobby, dem Interesse an Spritzbeton folgend, habe ich mir die "umweltneutralen" Spritzbetontechniken im echten, serienmäßigen Baustelleneinsatz zu Gemüte geführt.

2. Referatsinhalt

Zur Zeit sind 3 verschiedene umweltneutrale Spritzbetonverfahren auf dem Markt:

- Naßspritzbeton mit alkalifreiem Beschleuniger
- Trockenspritzbeton mit Spritzzement ohne Beschleuniger mit erdfeuchten Zuschlägen
- Trockenspritzbeton mit Spritzzement ohne Beschleuniger mit ofentrockenen Zuschlägen

Von jeder Gattung habe ich einen Vertreter unter die Lupe genommen und zwar beim „Zammer Tunnel“ Naßspritzbeton beim „Sonnsteintunnel II“ Trockenspritzbeton mit Schnellzement und erdfeuchten Zuschlägen und beim „Tunnel Waldau“ in Stuttgart Trockenspritzbeton als Siloware mit Schnellzement und ofentrockenen Zuschlägen. Zum Vergleich haben wir beim Tunnel Waldau noch Trockenspritzbeton als Siloware mit herkömmlichem Zement und flüssigem, alkalihaltigem Erstarrungsbeschleuniger mit in die Betrachtung aufgenommen.

Mich hat in erster Linie interessiert, was mit diesen neuen Verfahren in der alltäglichen Baupraxis tatsächlich angestellt wird, abseits aller Prospektwahrheiten und den Lobhudeleien in den Produktinformationen.

3. Darstellung der jeweiligen Konfigurationen

ZAMMER TUNNEL

System:	Naßspritzbeton
Auftragsgerät:	Normet Spraymec mit Schwing-Pumpe BNP 300 RE
Zuschlagstoffe:	0-11 mm, Kalkstein, gebrochen
Zement:	PZ 375 F20 TZ2 Werk Kirchbichl, 350 kg/m ³
Beschleuniger:	Sigunit AF 49, alkalifrei, pulverförmig, Dosierung theoretisch 6%
BE-Dosierung:	mit Aliva-Spritzmaschine, stufenlos regelbar
Sonstiges:	60 kg/m ³ Flual
Fließmittel:	Sikament 10 HBR, Dosierung theoretisch 1,1%

SONNSTEINTUNNEL

System:	Trockenspritzbeton Mobil-Crete
Zuftragsgerät:	Mobil-Crete-System mit 2 Schürenbergspritzmaschinen SBS C1
Zuschlagstoffe:	0-8 mm, Dolomit, gebrochen, naturfeucht, 2,12%
Zement:	Spritzzement Mobil-Crete (Leube) 380 kg/m ³
Beschleuniger:	--
BE-Dosierung:	--
Sonstiges:	--
Fließmittel:	--

TUNNEL WALDAU

System:	Trockenspritzbeton Rombold (Siloware)
Auftragsgerät:	Dosierglasschnecke
Zuschlagstoffe:	0-11 mm, Muschelkalk, gebrochen, ofentrocknet
Zement:	Spritzzement Schwenk CEM I 32,5 R/SE, 310 kg/m ³
Beschleuniger:	--
BE-Dosierung:	--
Sonstiges:	20 kg/m ³ Kalksteinmehl
Fließmittel:	--

TUNNEL WALDAU (Vergleichssystem)

System:	Trockenspritzbeton Rombold (Siloware)
Auftragsgerät:	Schürenbergspritzmaschine, SBS B1
Zuschlagstoffe:	0-11 mm, Muschelkalk, gebrochen, 3,14% Feuchtegehalt nach Vorbefeuchtung
Zement:	Schwenk CEM I 42,5 R/S, 310 kg/m ³
Beschleuniger:	Addiment BE U11, flüssig theoretisch 5%, beim Versuch fast 9%
BE-Dosierung:	Panda-Mix Hochdruckpumpe
Sonstiges:	20 kg/m ³ Kalksteinmehl
Fließmittel:	--

Zu jeder einzelnen Spritzbetontechnik folgen ausführliche Einzelaufsätze. Ich kann Ihnen aber vielleicht einige Dinge berichten, die einem nur auffallen, wenn man innerhalb kurzer Zeit mehrere verschiedene Anwendungsverfahren im praktischen Einsatz zu sehen bekommt.

4. Vorgehen bei den Untersuchungen

1. Bauleiterinterview
2. Beobachtung
3. Rückprallmessungen
4. Festigkeitsuntersuchungen
5. Eluatmessungen
6. Staubmessungen

- Wir haben von den Bauleitern alle Informationen geholt, die sie uns geben konnten.
- Wir haben mehrere Spritzvorgänge, immer im Kalottenvortrieb, beobachtet.
- Wir haben bei Spritzvorgängen, die wir nach unseren Beobachtungen für repräsentativ gehalten haben, mit einer einfachen Methode Rückprallmessungen durchgeführt, die zumindest zu einer Abschätzung der Größenordnung dienen können. Im Bereich der vom Rückprall benetzten Fläche wurde eine dünne Baufolie aufgebracht, nach dem Spritzvorgang in einem Raster von 0,5 x 0,5 m die Rückprallhöhe gemessen und mit einer einfachen Auswerteformel das Rückprallvolumen ermittelt. Mit einem Stechzylinder haben wir die Rohdichte des Rückpralls bestimmt, um damit das Rückprallgewicht errechnen zu können.

Ich bin überzeugt, daß man mit dieser Methode die Rückprallmenge mit $\pm 2\%$ Genauigkeit bestimmen kann. Schaufeln und wiegen ist etwas genauer, dafür aber soviel aufwendiger, daß es praktisch nie gemacht wird.

Das Ergebnis einer solcherart durchgeführten Messung kann wie in **Bild 1** dargestellt werden.

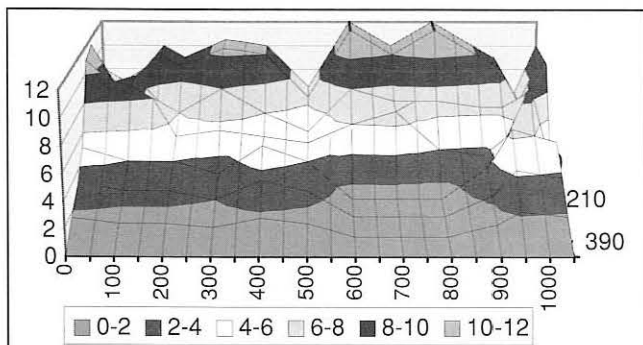


Bild 1: Rückprallmessung beim Sonnsteintunnel bei Anwendung des Mobil-Crete-Systems

- Wir haben Frühfestigkeitsuntersuchungen durchgeführt und Proben gespritzt für 3, 7 und 28-Tage Festigkeiten und E-Moduli.
 - Wir haben Elutionsversuche am Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der TU-Innsbruck durchgeführt.
 - Wir haben auch versucht, mit einer einfachen Meßmethode Staubmessungen durchzuführen, die Ergebnisse sind allerdings wegen der über den Querschnitt inhomogenen Luftströmungen unbrauchbar, sie können nicht einmal zu einem Grobvergleich herangezogen werden.
- Dank des Interesses der TBG an den neuen Spritzbetontechniken und des persönlichen Engagements von Hrn. Prof. Kieser, dem Leiter der Staubmessstelle der TBG und seines Mitarbeiters Hrn. Groh, haben wir wenigstens über die beiden in Stuttgart untersuchten Techniken echte Werte über die Feinstaubkonzentration.

5. Beobachtungen

5.1 Naßspritzbeton im Zammer Tunnel

5.1.1 Konfiguration des Systems

Der Spritzbetonauftrag erfolgte mit dem Spraymec der Firma Normet und einer Betonpumpe BNP 300 RE der Firma Schwing über eine mechanisch geführte Düse.

Das Haftverhalten des alkalifrei beschleunigten Naßspritzbetons im Auftrag ist beeindruckend. Trotz Förderleistungen von 12 bis 16 m³/h ist kein Rückfall zu beobachten. Auftragsstärken von 12 bis 15 cm stellen kein Problem dar.

Der Spraymec ist eine auf Rädern fahrbare Einheit mit angebauter Betonpumpe und mechanischem Spritzarm. Der Steuerstand des Düsenführers befindet sich auf dem Ausleger des Spritzarmes, sodaß der Bediener immer in Spritzrichtung auf die Auftragsfläche schauen kann.

5.1.2 Rückprall

Über Rückprallmengen beim Naßspritzen werden oft Größenordnungen von 3 bis 6 %, auf jeden Fall aber unter 10 %, kolportiert.

Meiner Ansicht nach kann es sich da nur um Werte, die an einem Laborspritzstand oder in einer Versuchsanlage unter optimierten Bedingungen ermittelt wurden, handeln. Baustellenmessungen liefern andere Ergebnisse.

Dank der Unterstützung des Bauleiters wurde eine Rückprallmessung durch Aufsammeln und Wiegen durchgeführt und lieferte als Ergebnis rund 16 % der verspritzten Menge. Das ist immer noch weniger als bei den anderen Verfahren, aber deutlich mehr als in den Werbebroschüren steht.

5.2 Festigkeitsentwicklung

Die Festigkeitsentwicklung ist als sehr gut zu bezeichnen, sie verläuft in einer stetigen Kurve (**Bild 2**). Die Anfangsfestigkeiten sind gut, die Endfestigkeiten über alle üblichen Forderungen weit hinausgehend.

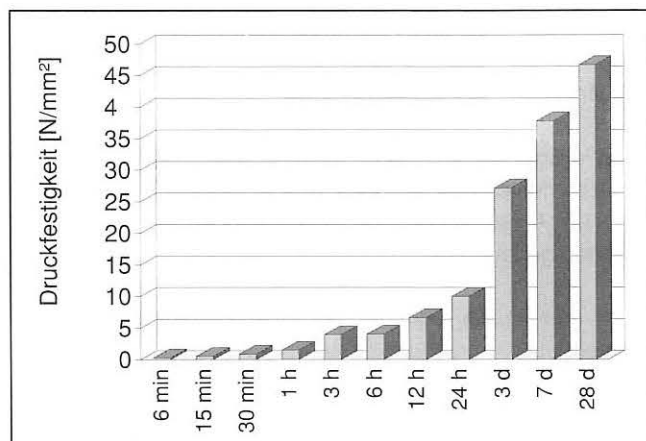


Bild 2: Festigkeitsentwicklung des Naßspritzbetons im Zammer Tunnel

5.2 Mobil-Crete-System beim Sonnsteintunnel II

5.2.1 Konfiguration des Systems

Das System besteht aus folgenden Komponenten:

2 Schürenbergspritzmaschinen

- 1 Hydrokuli als Kiessilo für naturfeuchte Zuschlagstoffe
- 1 Zementsilo
- 1 mechanischer Spritzarm
- 1 handgeführte Spritzdüse

Das alles ist mit den dazugehörigen Zuteileranlagen zusammengebaut in einem Rahmen, der auf 4 hydrostatisch angetriebenen Raupenfahrwerken verfahrbar ist.

Das System beruht auf der Vor-Ort-Mischung von Schnellzement mit naturfeuchten Zuschlagstoffen und der Förderung mit konventionellen Trockenspritzmaschinen und funktioniert ohne Beschleunigerzugabe.

Der Auftrag erfolgt mit hoher Förderleistung von $\approx 7,5$ m³

pro Spritzmaschine. Die Haftung an der Wand und das Erstarrungsverhalten wirken überzeugend.

Die ganze Anlage stellt „High Tech“ dar, alles wirkt ausgeklügelt und trotzdem funktionstüchtig. Die dauernde Funktionstüchtigkeit des Systems beruht allerdings auf der Betreuung und Wartung der Anlage durch die von Mobil-Crete beigestellten Serviceleute, die im selben Arbeitsrhythmus wie die Vortriebsmannschaften wechseln. Diese Betreuung ist wegen der Komplexität der Anlage notwendiger Teil des Systems und im Paketpreis für den m^3 Spritzbeton enthalten.

Die Anlage hat Ausmaße von rund 3,6 m Breite, 4 m Höhe und 12 m Länge. Beim Sonnsteintunnel war die Anlage in der Kalotte eingesetzt, die Strosse wurde von oben über Schläuche mitversorgt.

Die Versorgung der Spritzanlage mit Zuschlagstoffen erfolgt durch einen Radlader, der die vorgemischten Sand- und Kieskomponenten von einem Depot vor dem Tunnelportal holt.

Das Depot muß witterungsgeschützt sein, um einen akzeptablen Feuchtegehalt zu gewährleisten.

5.2.2 Festigkeitsentwicklung

Die Festigkeitsentwicklung (Bild 3) zeigt das für gewisse Spritzzemente typische „Ruhen“ der Festigkeitsentwicklung nach der Anfangserstarrung, das in diesem Fall mehr als 12 Stunden gedauert hat.

Auch hier ist die Endfestigkeit weit über den geforderten Werten.

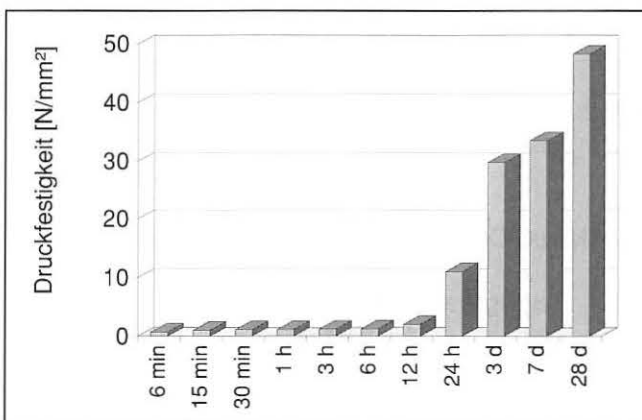


Bild 3: Festigkeitsentwicklung des Mobil-Crete-Systems beim Sonnsteintunnel II

5.3 System Rombold beim Waldautunnel in Stuttgart

5.3.1 Neues Auftragssystem

Details erfahren Sie in einem der nachfolgenden Beiträge, ich möchte nur kurz das Prinzip dieser neuen Anwendungstechnik erläutern.

Die Fa. Rombold hat sich bei dieser Entwicklung einer im

Bergbau für das Fördern von Trockenbaustoffen üblichen Technik bedient und daraus unter Verwendung von Schnellzement ein Auftragsverfahren für Trockenspritzbeton entwickelt.

Es besteht im Wesentlichen aus einem Druckkessel mit einer darunter angebrachten Dosier-Blasschnecke, an die direkt ohne weitere Fördergeräte der Spritzschlauch angekuppelt ist (Bild 4).

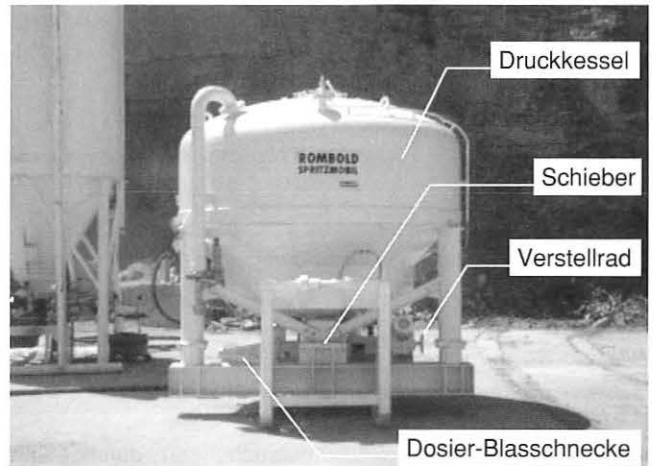


Bild 4: Grundgerät des Rombold-Systems mit Druckkessel und Dosier-Blasschnecke

Der Druckkessel ist mit ofengetrocknetem, vorgemischtem Trockenspritzgut mit Schnellzement als Bindemittel gefüllt und mit Druckluft beaufschlagt.

Die Grundvoraussetzungen für das Funktionieren dieses Anwendungs Verfahrens mit vorgemischtem Spritzgut mit Schnellzement sind ofengetrocknete Zuschläge und ein geschlossenes System ohne Möglichkeit des Feuchtigkeitszutritts vom Mischvorgang im Werk bis zum Transport in den Tunnel.

Das erfordert auch wegen der Staubfreudigkeit des getrockneten Mischgutes besondere Einrichtungen für den Umschlag vom Straßenfahrzeug in den Baustellensilo und von dort in das Tunneltransportfahrzeug. Diese Probleme wurden beim Tunnel Waldau in Stuttgart in Kooperation der Baustelle mit der Fa. Rombold gut und funktionstüchtig gelöst.

Das Kernstück der Anlage ist die sogenannte Dosier-Blasschnecke (Bild 5), eine Schneckenwendel in einem Rohrgehäuse mit einem Elektroantrieb und einem stufenlos verstellbaren Getriebe. Sie zieht aus einer mit einem Druckschieber verschließbaren Öffnung im Boden des Druckkessels das Trockenmischgut ab. Am vorderen Ende des Schneckengehäuses sitzt der Konus, der sich auf den gewünschten Schlauchdurchmesser verjüngt. Direkt an den Konus ist der Schlauch mit einer Schnellkupplung angeschlossen.

Der Trick liegt nun darin, daß die Schneckenwendel auf einer Hohlwelle sitzt, durch welche die Treibluft zur Förderung des Spritzgutes gelangt. Am Ende der Wendel drückt die Treibluft das Spritzgut über den Konus in den Schlauch.

Dadurch, daß außer der Schnecke keine weiteren bewegli-

chen und angetriebenen Teile vorhanden sind, und Feuchtigkeit erst an der Spritzdüse dazukommt, ist das System sehr wartungsfreundlich und verschleißarm.

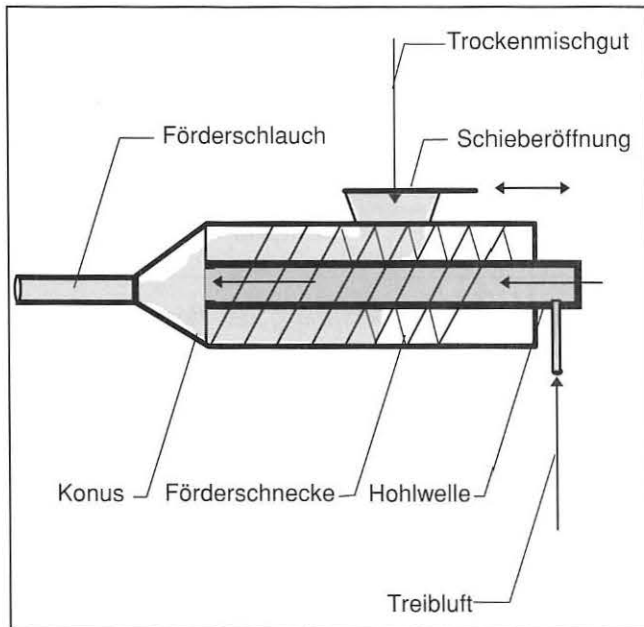


Bild 5: Prinzipskizze der Dosier-Blasschnecke

Für die Versorgung der Vortriebe beim Tunnel Waldau wurden 2 der in **Bild 4** gezeigten Druckkessel auf ein tunneltaugliches Fahrzeug aufgebaut. Damit standen rund 14 m³ Spritzbeton für einen Spritzvorgang ohne Nachfüllen zur Verfügung.

Um das bei ofentrockenen Zuschlägen bekannte Problem der Staubentwicklung an der Spritzdüse in den Griff zu bekommen, wurde das Wasser mit 80 bar eingedüst und der Schlauch- und Düsendurchmesser auf 50 mm reduziert.

5.3.2 Festigkeitsentwicklung und Rückprall

Die Festigkeitsentwicklung verläuft ähnlich wie beim Mobil-Crete-System und auch die Rückprallmenge liegt mit rund 28 % in derselben Größenordnung (**Bild 6 und 7**).

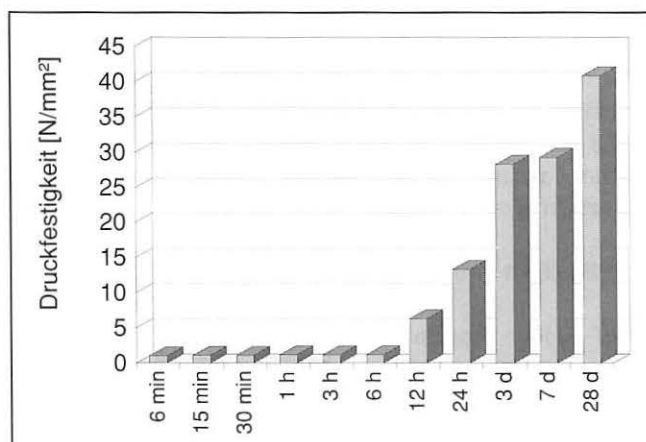


Bild 6: Festigkeitsentwicklung: Rombold-Systems beim Waldautunnel in Stuttgart

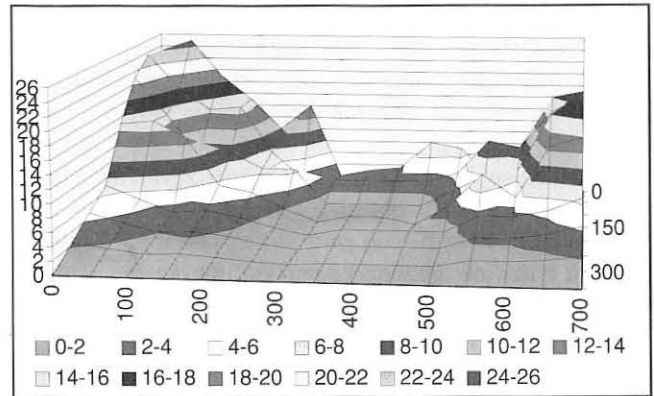


Bild 7: Rückprallmessungen: Rombold-System mit Schnellzement und Dosier-Blasschnecke

6. Vor und Nachteile der Systeme

6.1 Naßspritzbeton im Zammer Tunnel

Ein großer Nachteil der Anwendung des Naßspritzbetons im Zammer Tunnel ist die Schwierigkeit, bei den gewählten Förderleistungen von 12 bis 16 m³/h eine ebene Spritzbetonoberfläche herzustellen.

Durch die hohe Förderleistung des Systems sind in einer Sekunde 3,3 bis 4,4 l an der Wand zu verteilen. Die schnelle, etwas zappelige Düsenbewegung macht es unmöglich, eine glatte Oberfläche zu spritzen.

Die optimale Fördermenge des Systems sollte in Versuchen als Funktion von Auftragsgeschwindigkeit, Rückprall und Ebenflächigkeit ermittelt werden und an der Betonpumpe als Obergrenze fix eingestellt werden.

Eine Ebenflächigkeitsmessung der Oberfläche in der Kalotte des Zammer Tunnels hat folgendes **Bild 7** ergeben.

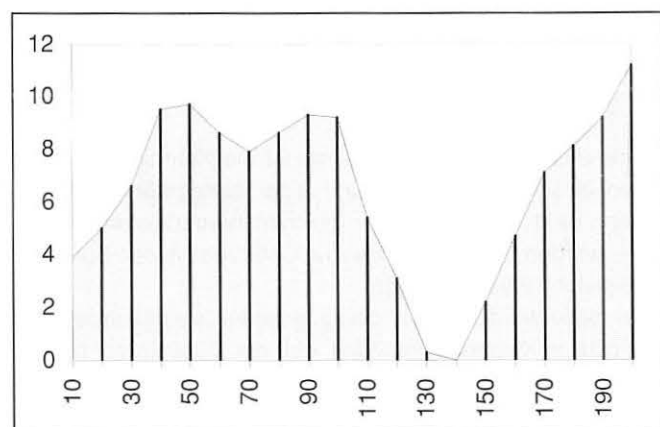


Bild 7: Ebenflächigkeitsmessung im Zammer Tunnel (Maße in cm)

Die Zugabe des alkalifreien Beschleunigers in Pulverform wird vermutlich demnächst, der Vergangenheit angehören. Die Manipulation von BE-Pulversäcken wirkt heute schon etwas anachronistisch und ist außerdem personalintensiv. Das Weiterblasen der Beschleunigerdosiereinrichtung des

bei einem Stopfer oder beim Fahrzeugwechsel an der Betonpumpe führt zu einer hohen Staubentwicklung, die zwar vielleicht nicht gesundheitsschädlich ist, aber den Gesamteindruck im wahrsten Sinn des Wortes trübt.

Positiv ist zu sehen, daß das System sehr zuverlässig funktioniert hat, die Wartungs- und Verschleißkosten nach Angaben der Baustelle niedrig sind und vor allem der Energieaufwand durch die geringe Luftmenge, die für den Auftrag benötigt wird, sehr niedrig ist.

6.2 Mobil-Crete-System beim Sonnsteintunnel

Beim Mobil-Crete-System im Sonnsteintunnel II fallen die Maße der Anlage negativ ins Gewicht.

Auf der Kalotte blockiert das Gerät durch seine Größe entweder die Frischluftversorgung oder die Fahrbahn (**Bild 8**).

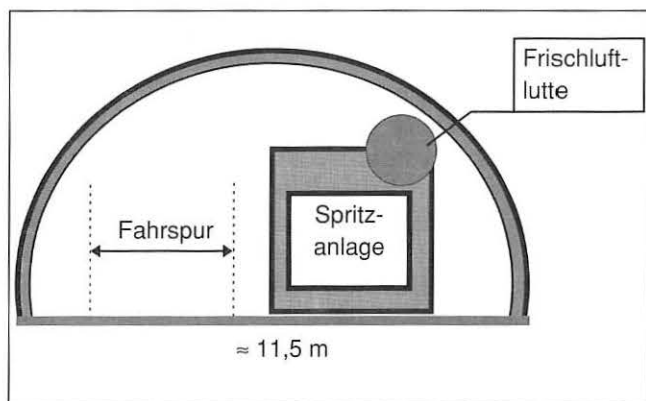


Bild 8: Schematische Darstellung der Platzverhältnisse

Wie an der Skizze zu erkennen ist, kann die Frischluftlutte an der Spritzanlage rechts nicht vorbeigeführt werden. Links würde sie die Fahrspur blockieren. Andererseits muß die Anlage in einem Sprengvortrieb einen Sicherheitsabstand von rund 150 m zur Ortsbrust einhalten und das bedeutet, daß die Luftverhältnisse vor der Spritzanlage wahrlich nicht die besten sind.

Eine weitere ungünstige Lösung ist die Kombination eines mechanischen Spritzarms mit einer handgeführten Düse. Wenn beide Düsen mit der gleichen Förderleistung betrieben werden, müssen beide zur Optimierung der Spritzzeit die gleiche Fläche spritzen.

Das bedeutet aber unter den gegebenen Verhältnissen von rund 16 m Kalottenabwicklung, daß der Düsenführer mit der mechanisch geführten Düse ca. 8 m Breite in der Firste spritzt und der Handdüsenführer links und rechts jeweils 4 m hoch aus dem Stand spritzt (**Bild 9**). Das kann er aber nur mit entsprechendem Druck und entsprechendem Abstand von der Wand, was bei der Handdüse zu enormem Rückprall führt.

Die von uns gemessenen 28 % Rückprall wären durch ein anderes Vorgehen beim Auftrag sicher deutlich zu verringern. Die Höhenschichtenlinien unserer Rückprallaufnahme (**Bild 1**) machen das sichtbar.

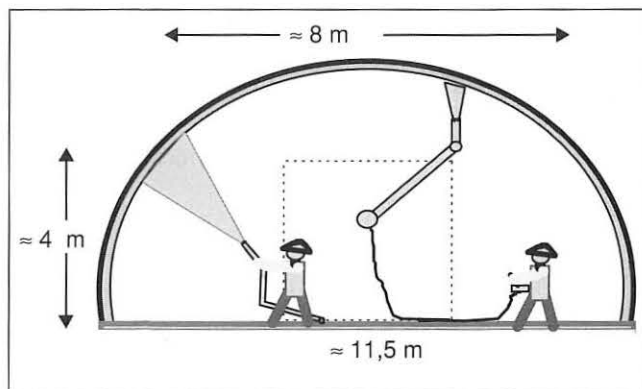


Bild 9: Schematische Darstellung der Kombination hand- und mechanisch geführte Düsen

Durch die hohe Luftgeschwindigkeit im Schlauch und die dadurch verursachte enorme Geschwindigkeit beim Aufprall verteilt sich der Rückprall über die ganze Fläche fast gleichmäßig.

Positiv beeindruckend ist die Gesamtförderleistung des Systems mit insgesamt ca. 15 m³/h, ohne Nachteile im Auftrags- und Erstarrungsverhalten, wenn man von der Problematik der Handdüse absieht.

Ein Grundsatzproblem der Spritzsysteme, die naturfeuchte Zuschläge verarbeiten können, stellt die Versorgung mit Zuschlagstoffen dar. Man findet schwer ein Kieswerk, das einen gleichmäßigen Feuchtegehalt der Zuschläge garantieren kann. Ein Wassergehalt von 3 bis 5 % wäre für die Verarbeitung im Spritzverfahren ideal. Das würde geringe Verklebung der Spritzmaschinen und geringe Staubentwicklung bedeuten.

Bei feuchter Witterung sind aber Zuschlagstofffeuchten von mehr als 5 % keine Seltenheit, was einerseits zu intensiver Wartungsarbeit an der Anlage und andererseits, durch die Vorhydratation während der Verarbeitung, zu schlechter Anfängerstarrung führt.

Zum Zeitpunkt unseres Besuches im Hochsommer haben wir einen Feuchtegehalt von nur 2,12 % gemessen, was sich zwar günstig auf die Reinigungsarbeiten an der Anlage und die Anfängerstarrung ausgewirkt hat, sich aber in der Staubentwicklung deutlich negativ bemerkbar gemacht hat.

Wer hier ein Versorgungssystem erfindet, bei dem der Wassergehalt der Zuschläge innerhalb der gewünschten Bandbreite gehalten werden kann, der hat sicher einen großen Schritt vorwärts zur Verbreitung solcher oder ähnlicher Spritzbetonsysteme getan.

6.3 System Rombold beim Waldautunnel

Beim System Rombold ist zur Zeit das Problem der Befuchtung des ofentrockenen Mischgutes an der Spritzdüse nur für Schlauch- und Düsendurchmesser 50 mm gelöst.

Das hat einen großen Vorteil und einen Nachteil:

Der Vorteil liegt darin, daß die Düsenführung von Hand für die Mineure sehr erleichtert wird und eine sehr gute Ebenförmigkeit erzielt werden kann.

Das Ziel der Staubreduktion wurde damit ebenfalls erreicht, wie die von der TBG durchgeführten Messungen ergeben haben.

Der Nachteil ist die damit verbundene Reduktion der Fördermenge auf rund 4,5 m³ pro Stunde und pro Düse. Bei größeren Verbrauchsmengen pro Spritzvorgang würde das negativ zu Buche schlagen. Im Waldautunnel bei rund 6 bis 7 m³ Verbrauch pro Spritzvorgang und dem Spritzen mit 2 Düsen hat das keine Rolle gespielt.

Die Förderleistung des Systems hängt im wesentlichen von der Druckdifferenz zwischen Druckkessel und Treibluft ab, die Änderung der Schneckendrehzahl beeinflusst die Förderleistung zwar theoretisch, in der Praxis aber kaum, wie wir bei unseren Untersuchungen festgestellt haben.

Bei Tests im Werk Rombold mit derselben Anlage bei gleicher Einstellung von Drücken und Drehzahl konnten 6,7 m³ Förderleistung gemessen werden, unsere Baustellenmessungen haben dagegen Förderleistungen von max. 4,5 m³/h ergeben.

Worin dieser eklatante Unterschied begründet ist, konnte für mich noch nicht nachvollziehbar erklärt werden. Meine Annahme, daß es am Verschleiß der Dosier-Blasschnecke liegt, hat sich nicht bestätigen lassen.

7. Praxisanwendung

Wenn man mit Kritik wie unter Punkt 6. zu den Propagandisten der Systeme geht, dann hört man einen Spruch, den jeder von uns schon einmal irgendwo gehört hat.

Der Spruch lautet:

„Unser System wäre ja super, aber „die“ auf der Baustelle.“

Und jetzt behaupte ich: Wenn Sie diesen Spruch hören, dann heißt es aufpassen!

Dann haben Sie es in der Regel mit einem Gerät oder einem System zu tun, das die Praxisreife noch nicht wirklich erlangt hat.

Dann leisten Sie als Firma mit Ihrer Baustelle oder Sie als Bauherr mit Ihrem Projekt Entwicklungshilfe für einen Prototyp.

Grundsätzlich habe ich dagegen auch nichts einzuwenden, irgendwo muß eine Neuentwicklung ja in der Praxis ausprobiert werden.

Nur muß dann diese Erprobungsphase auch als solche deklariert werden und von der Vertreiberfirma intensiv über mehr als eine Baustelle begleitet werden, um daraus einen maximalen Lerneffekt erzielen zu können.

Wenn diese Ehrlichkeit nicht praktiziert wird, werden die Entwicklungskosten auf die Baustellen verlagert.

Die Schwierigkeiten, die die Baustellen dann mit den nicht

ausgereiften Produkten haben und die Klagen über die Kosten- und Zeitverluste, die daraus entstehen, führen automatisch zu dem oben angeführten Spruch: „.....aber die auf der Baustelle.....“

Wer sind nun eigentlich „die“ auf der Baustelle?

Es sind die Mineure, welche die in der Darstellung der Systemvertreiber „einfachsten“ Bedienungsanleitungen nicht befolgen.

Man muß sich einmal vor Augen führen, welche Tätigkeiten von unseren Mineuren innerhalb eines Abschlagszyklusses in einem Sprengvortrieb ausgeübt werden und welche Fähigkeiten und Kenntnisse dabei von ihnen verlangt werden (**Tabelle 1**):

Tätigkeit	Erforderliche Kenntnisse
Abbohren der Ortsbrust	Maschinist und Experte für Bohr- und Sprengtechnik
Besetzen mit Sprengstoff und Zündern	Experte für Sprengtechnik
Schüttern	Maschinist und Experte für Erdbewegung
Felssicherung	Experte für Ausbau- und Ankertechnik
Spritzbetonsicherung	Maschinist, Betontechnologe, Maschinenbauer

Tab. 1: Zusammenstellung der Tätigkeiten und der dazu erforderlichen Kenntnisse eines Mineurs

In einem TBM-Vortrieb sind es andere Tätigkeiten, bezüglich Spritzbetonsicherung bleibt es dasselbe.

Wenn man sich diese Tabelle unbefangen ansieht, kommt man zur Ansicht, daß diese Tätigkeiten mit einer Belegschaft von 15 bis 20 Mann mit einer entsprechenden Spezialausbildung leicht auszuführen sind.

Tatsächlich besteht heutzutage eine Kalottenvortriebsmannschaft oder eine TBM-Crew aus 6 bis 7 Mann und es gibt keine Anzeichen, daß es in der nächsten Zeit wieder mehr werden.

Das bedeutet, daß jeder alles nahezu gleich gut können muß. Spezialisten für nur eine der Tätigkeiten kann man sich nicht mehr leisten.

Wenn man unter diesen Voraussetzungen eine Vortriebsleistung erbringen muß, die die Wettbewerbsfähigkeit der Firma sicherstellen soll, dann ist die Vortriebsorganisation wie ein Fließbandbetrieb aufzubauen. Dann muß aber auch alles, was zur Erbringung der Leistung benötigt wird, wie an einem Fließband reibungslos funktionieren. Wenn ein Fließbandarbeiter bei jedem Handgriff nachdenken und überprüfen muß, ob sein Werkzeug richtig eingestellt ist, kann er niemals das geforderte Leistungssoll erbringen.

Daraus folgt der zwingende Schluß, daß jegliche Gerätschaft, die einer Vortriebsmannschaft zur Verfügung steht, auf Antrieb funktionieren muß. Wenn umfangreiche Einstel-

lungsarbeiten für die optimale Funktion erforderlich sind, ist es das falsche Gerät.

Beim Spritzbetongerät wäre der Idealfall ein Ein-Aus-Knopf und ein Hebel mit einer Skala für die Fördermenge.

Ich möchte daher die Gerätehersteller und Vertreiber neuer Spritzsysteme bitten, ihre Anlagen einmal unter diesem Gesichtspunkt unter die Lupe zu nehmen.

Das Erfüllen dieser Forderung ist weitaus wichtiger als ein paar Prozent Rückprall mehr oder weniger.

8. Zusammenfassung

8.1 Erstarrungsverhalten und Endfestigkeit

Die für Sicherungsspritzbetone normalerweise geforderte Endfestigkeit stellt für keine der betrachteten Spritzbetontechniken ein Problem dar.

Im Erstarrungsverhalten in den ersten 24 h gibt es deutliche Unterschiede zwischen beschleunigtem Naßspritzbeton und Trockenspritzbetonen mit Spritzzementen (**Bild 10**), sodaß man die Entscheidung darüber, welche Technik und welcher Zement eingesetzt werden soll, von den erwarteten Gebirgsverhältnissen abhängig machen sollte.

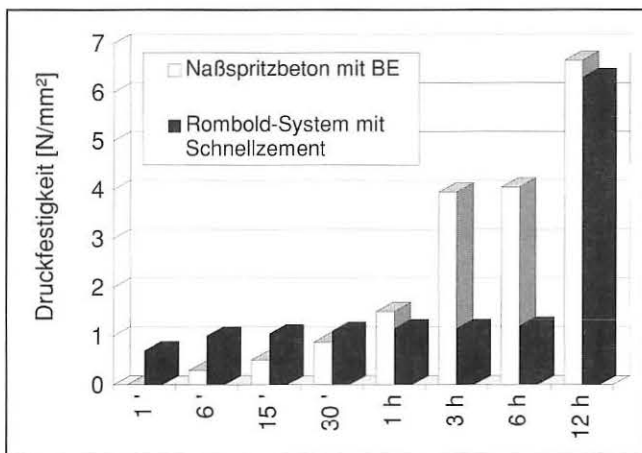


Bild 10: Gegenüberstellung der Festigkeitsentwicklung von Naßspritzbeton mit BE und Trockenspritzbeton mit dem verwendeten Schnellzement in den ersten 12 Stunden

Aus diesen Diagrammen könnte man interpretieren, daß sich die Systeme mit Schnellzementen besser für Verhältnisse eignen, in denen die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons in den ersten Minuten eine wesentliche Rolle spielt, z.B. bei Vortrieb im Lockermaterial und bei starkem Gebirgswasserandrang.

Der beschleunigte Naßspritzbeton liefert dagegen innerhalb der ersten 24 h schneller einen höheren Ausbauwiderstand. Wieweit die Verlangsamung der Festigkeitsentwicklung nach der ersten Stunde bei den Schnellzementen tunnelstatisch im Sinne einer größeren Nachgiebigkeit des Spritzbetons genutzt werden kann, müßte einmal einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden.

8.2 Rückprallverhalten

Die von uns festgestellten rund 28 % Rückprall bei den Systemen mit den LSC Spritzzementen deuten darauf hin, daß es sich um ein generelles Problem der vielleicht zu schnell erstarrenden Zemente handelt. Beim Vergleichssystem mit Normalzement und Flüssig-BE haben wir übrigens rund 24 % gemessen.

16 % bei Naßspritzbeton und 28 % bei Trockenspritzbeton mit Schnellzement klingt nach einem großen Unterschied. Eine Kostengegenüberstellung relativiert aber diesen Unterschied.

Für eine vereinfachte Rechnung, die 1. keine Firmengeheimnisse verrät und 2. regionale Unterschiede egalisiert, habe ich eine verschlüsselte Form gewählt, indem ich feststelle, daß eine Standardmischung für 1 m³ feste Masse Spritzbeton 100 „Taler“ kostet.

Diese Mischung enthält 360 kg/m³ Portlandzement und 1800 kg/m³ Sand und Kies.

Wenn man jetzt eine Plus-/Minus-Rechnung vornimmt, beispielsweise beim System Rombold mit Dosierblassschnecke und dem Naßspritzbeton mit alkalifreiem Beschleuniger, indem man beim Rombold-System den reduzierten Zementgehalt, aber mit dem Preis für Schnellzement, die Trocknungskosten für den Zuschlagstoff und die Aufwendungen für den Transport und beim Naßspritzbeton den Preis und die Dosiermenge des alkalifreien Beschleunigers und des Fließmittels berücksichtigt, ergibt sich für 1 m³ Spritzbeton frei Bau beim Naßspritzbeton ein Mehrpreis von 40 Taler.

Der Arbeitsstundenaufwand beim Spritzen ist mit 0,33 h/m³ zufällig identisch, da beim Naßspritzbeton 4 Mann (Pumpenfahrer, Düsenführer, BE-Dosierung, BE-Versorgung) 12 m³/h verarbeiten und beim Rombold-System 3 Mann (2 Düsenführer, 1 Mann beim Fahrzeug) 9 m³/h verarbeiten. Energie- und Verschleißkosten habe ich als identisch betrachtet.

Bei Annahme eines Spritzbetonbedarfs von 10 m³ für einen Spritzvorgang ergibt sich durch die unterschiedliche Rückprallmenge im ersten Fall eine verspritzte Menge von 12,8 m³ und im anderen Fall 11,6 m³.

Durch den Unterschied im Materialpreis kosten die 12,8 m³ inkl. Arbeitsstunden aber nur 2.170 Taler, während sich die 11,6 m³ auf 2.430 Taler belaufen.

Ein Plus für den Naßspritzbeton wäre in diesem Beispiel die höhere Förderleistung pro Stunde, die nur zum Teil durch die schnellere Verfügbarkeit des anderen Systems kompensiert werden kann.

Im gegenständlichen Fall würde sich mit Naßspritzbeton eine um 17 min kürzere Spritzzeit pro Vorgang ergeben.

Sollten sich aber mit der Dosier-Blassschnecke Förderleistungen von 6 m³ anstatt der von uns gemessenen 4,5 m³ pro Düse realisieren lassen, dann sieht man, daß die Mehrkosten des Materials nicht einmal durch eine Rückpralldifferenz von 12 % wettzumachen sind.

Das heißt, man muß bei kostenmäßigen Aufwendungen für Rückprallminderung genau darauf achten, ob sich der Aufwand tatsächlich rechnet.

8.3 Feinstaubkonzentration und Elutionen

Wie schon erwähnt, verfügen wir nur bei den beiden in Stuttgart untersuchten Verfahren über exakte Feinstaubmessungen. Hier hat das Spritzverfahren mit ofentrockenen Zuschlägen fast genau die gleichen Werte erreicht, wie das zum Vergleich untersuchte konventionelle Verfahren und zwar als Momentanwert rund 10 mg/m^3 , wobei beim beschleunigerlosen Verfahren mit 2 Düsen und daher zusammen 9 m^3 Förderleistung und beim konventionellen Verfahren nur mit einer Düse mit rund 6 m^3 Förderleistung gespritzt wurde.

Bei den Elutionen entspricht das Ergebnis den Erwartungen (**Tabelle 2**).

Eluate (mg/l)	Naßspritzbeton mit alkalifr. BE	Mobil-Crete	Rombold mit Schnellzement	Rombold mit BE
Ca	14,0	15,0	8,5	6,0
K	20,3	17,1	23,8	15,3
Na	6,2	9,8	0,9	24,4
Al	2,0	0,4	< 0,01	0,5

Tab. 2: Gegenüberstellung der verschiedenen Verfahren anhand des Auslagerverhaltens

8.4 Potential für Verbesserungen

Die Naßspritzbetontechnik scheint für große Auftragsflächen geeignet. Für eine Anwendung in gebrächem Gebirge mit einem Sicherungsausbau mit Ausbaubögen müßte meiner Ansicht nach die Auftragstechnik modifiziert werden. Lieber eine geringere Fördermenge und eine langsamere Düsenbewegung, als eine wild geklüftete Spritzbetonoberfläche, die viel Nacharbeit erfordert.

Unter den umweltneutralen Spritzbetontechniken hat sie den Nachteil, nicht ohne Beschleuniger auskommen zu können.

Die Technik, Trockenspritzbeton mit Schnellzement, ohne Beschleuniger und mit erdfuchten Zuschlägen herzustellen,

wäre von der Grundidee her bestechend, allerdings muß eine Methode gefunden werden, wie man die Feuchte der angelieferten Zuschläge gesichert innerhalb einer Bandbreite von 3 bis 5 % halten kann.

Bei der Baustelleneinrichtung muß man den Platzbedarf des überdachten Zuschlagdepots mitberücksichtigen.

Trockenspritzbeton mit Schnellzement und ofentrockneten Zuschlägen ist ideal für Tunnelbaustellen mit beschränktem Platzangebot. Für Tunnel mit großen Spritzbetonmengen pro Abschlag müßte das Versorgungsproblem noch gelöst werden. Die Staubentwicklung hat man mit Schlauch- und Düsendurchmessern von 50 mm im Griff. Für den beim Trockenspritzen üblichen Standarddurchmesser 65 mm ist noch eine Weiterentwicklung der Düsentechnik erforderlich.

Generell ist bei den umweltfreundlichen Trockenspritzbetontechniken anzumerken, daß eine forcierte Weiterentwicklung der Düsentechnik den effektivsten Fortschritt in Bezug auf Staub- und Rückprallentwicklung verspricht.

Das Fördersystem mit Druckkessel und Dosier-Blas-schnecke ist das wartungsfreundlichste und verschleißärmste System, das derzeit auf dem Markt ist, es kommt der Forderung nach Funktionieren auf Knopfdruck schon sehr nahe.

Ganz allgemein muß hinzugefügt werden, daß eine eindeutige Empfehlung für eines der Systeme nicht gegeben werden kann und soll. Man muß in jedem Fall die Randbedingungen berücksichtigen, unter denen das System eingesetzt werden soll.

9. Literaturverzeichnis

- [1] **Bauer, G.:** Materialtechnologische Bewertung neuentwickelter Trockenspritzverfahren. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 1995.

