

# Sicherungsmaßnahmen mit Spritzbeton

## **Educational Material**

### **Author(s):**

Girmscheid, Gerhard

### **Publication date:**

2001

### **Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004260068>

### **Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted



# Sicherungsmaßnahmen mit Spritzbeton

Autor:

Prof. Dr.-Ing. G. Girmscheid  
Institut für Bauplanung und Baubetrieb  
ETH Hönggerberg  
8093 Zürich

[girmscheid@ibb.baug.ethz.ch](mailto:girmscheid@ibb.baug.ethz.ch)



Das vorliegende Dokument Sicherungsmassnahmen mit Spritzbeton wurde aus dem Buch „Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau“ von Prof. Dr.-Ing. G. Girmscheid entnommen.



Gerhard Girmscheid

### **Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau**

2000. XVIII, 658 Seiten mit  
534 Abbildungen und 118 Tabellen.  
Format: 17 x 24 cm. Gb.

DM 298.- / € 152.36 / CHF 265.-

ISBN 3-433-01350-0

[www.ernst-und-sohn.de](http://www.ernst-und-sohn.de)

In dem Buch werden, ausgehend von der geologischen Situation, für die Planung und Durchführung von modernen Tunnelbauwerken die gesamten Bauverfahren des Tunnelbaus vorgestellt. Neben den Vortriebsarten werden die Vortriebsverfahren wie Sprengvortrieb, Vortrieb mittels Teilschnittmaschinen und Tunnelvortriebsmaschinen im Locker- und Festgestein sowie die Spezialtunnelbauverfahren zur Durchörterung von Störzonen umfassend beschrieben. Zudem werden die modernen Logistiksysteme zur Ver- und Entsorgung sowie die Baustelleneinrichtungen und Fertigungsanlagen, z.B. zur Tübbingherstellung, detailliert erläutert. Die hochmechanisierten Sicherungs- und Ausbaumethoden runden den baubetrieblichen Prozess ab. Zur erfolgreichen Abwicklung werden die wichtigsten Aspekte der Arbeitsvorbereitung, des Sicherheitsmanagements sowie der Vertrags- und Projektabwicklungsformen mit dem dazugehörigen Risikomanagement betrachtet. Trotz der Fokussierung auf die baubetrieblichen Aspekte wurde in dem Buch grossen Wert auf die Interaktion mit den Nachbardisziplinen wie Geologie, Felsmechanik, Werkstoffkunde, Maschinenbau und Betriebswirtschaft gelegt, um dadurch den Baubetrieb in den Gesamtprozess einzubetten.

Aus dem Inhalt:

Geologische Vorerkundung – Beurteilung des Gebirges – Gebirgs- und Ausbruchsklassifizierung – Untertagebauwerke und ihre Ausbruchsarten – Vortriebsmethoden – Ausbruch durch Sprengvortrieb – Mechanischer Vortrieb mittels Bagger, Rippergeräten und Teilschnittmaschinen (TSM) – Sicherungsmassnahmen – Vortrieb mittels Schirmgewölbesicherungen – Transport des Ausbruchmaterials aus dem Tunnel – Temporäre Entwässerungsmassnahmen – Permanente Hauptabdichtung – Hohlraumauskleidung – Arten von Tunnelvortriebsmaschinen – Tunnelbohrmaschinen (TBM) – Wiederverwendung von Tunnelausbruchsmaterial – Schildvortriebsmaschinen – Tübbingauskleidungen – Steuerung von Vorschubpressenkräften sowie Vortriebsrichtung – Baulüftung von Untertagebauwerken – Vorbereitung und Logistik einer Tunnelbaustelle – Sicherheitsmanagement im Untertagebau – Projektabwicklungsformen als Schlüssel zur Innovation, Risikomanagement sowie Kostenoptimierung.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Hohlraumsicherung</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Spritzverfahren</b> .....	<b>3</b>
2.1	Trockenspritzverfahren .....	4
2.1.1	<b>Spritzdüsen (Trockenspritzverfahren)</b> .....	<b>9</b>
2.2	Nassspritzverfahren .....	11
2.2.1	<b>Fördermaschinen</b> .....	<b>13</b>
2.2.2	<b>Spritzdüsen beim Nassspritzverfahren</b> .....	<b>16</b>
2.3	Vergleich der Verfahren .....	18
<b>3.</b>	<b>Materialtechnologie</b> .....	<b>20</b>
3.1	Zuschlagstoffe .....	20
3.2	Bindemittel .....	23
3.3	Zusatzmittel und Zusatzstoffe .....	24
3.3.1	<b>Die Zusatzmittel im Spritzbeton</b> .....	<b>25</b>
3.3.2	<b>Zusatzstoffe im Spritzbeton</b> .....	<b>30</b>
3.4	Rezeptur Normspritzbeton .....	32
3.5	Rezeptur Hochleistungsspritzbeton mit Kunststoffpolymeren und Silicafume - Technologie .....	33
3.6	Optimierung des Spritzbetoneinsatzes .....	35
3.6.1	<b>Untergrundbeschaffenheit</b> .....	<b>36</b>
3.6.2	<b>Personal</b> .....	<b>37</b>
3.6.3	<b>Applikationsphasen</b> .....	<b>37</b>
3.6.4	<b>Auftragstechnik</b> .....	<b>38</b>
3.6.5	<b>Rückprall</b> .....	<b>41</b>
3.6.6	<b>Staubentwicklung</b> .....	<b>48</b>



<b>3.6.7</b>	<b>Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit .....</b>	<b>51</b>
<b>3.6.8</b>	<b>Stahlfaserspritzbeton .....</b>	<b>55</b>
<b>4.</b>	<b>Ausführung von Spritzbeton in druckhaftem Gebirge.....</b>	<b>57</b>
<b>5.</b>	<b>Arbeitssicherheit.....</b>	<b>59</b>
<b>6.</b>	<b>Maschinentechnik.....</b>	<b>61</b>
<b>7.</b>	<b>Herstellungsbedingte Fehler im Spritzbeton.....</b>	<b>65</b>
<b>8.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>69</b>

# 1. Hohlrumsicherung

Tunnel, die in einem Gebirge mit nicht ausreichender Stehzeit aufgeföhren werden, erfordern den Einbau von Sicherungen, die Eigentragsfähigkeit des Gebirges unterstützen und verbessern. Man kann die Sicherungsmassnahmen als Bewehrung oder Randverstärkung des Gebirges ansehen. Die meisten Sicherungsmassnahmen besitzen eine Ausbausteifigkeit oder überdrücken im Fall von Ankern zum Teil durch ihre Vorspannung sekundäre Zugkräfte, bzw. übernehmen Zugspannungen und bewehren dadurch das Gebirge.

Bei standfestem Gebirge kann auf eine Sicherung verzichtet werden. Meist ist jedoch ein Kopfschutz erforderlich und zwingend vorgeschrieben. Kann die Standfestigkeit des Gebirges nicht ausreichend gewährleistet werden, ist eine Sicherung notwendig die nach dem Ausbruch eingebaut wird. Ist die Stehzeit des Gebirges geringer, als die notwendige Zeit zum Einbau der Sicherung, müssen vorauseilende Hilfsmassnahmen ergriffen werden, wie z. B. Injektionen, Rohrschirme, Spiesse, etc.

Eine biegeeweiche, verformbare Randverstärkung erhöht das Tragvermögen des Gebirges. Daher sollte möglichst früh der notwendige Sicherungseinbau erfolgen, durch z. B. Spritzbeton, Anker, Gitterträger, TH - Profile, etc. Das Gebirge wird zudem in seinem Kluftkörperverband erhalten. Dadurch können Nachbrüche, welche die Geometrie des Traggewölbes stören und Auflockerungen weitgehend reduziert bzw. vermieden werden. Eine mögliche Verwitterung - besonders bei Schwellgebirge - kann durch die Oberflächenversiegelung mit Spritzbeton minimiert werden.

Für die Einbauzeit der Sicherung ist nicht nur die Sicherung im First und/oder in den Ulmen von Bedeutung, sondern auch der Ringschluss der Sicherung.

Folgende Stützmittel können zur Sicherung verwendet werden:

- Spritzbeton, Spritzbeton mit Bewehrungsnetzen, Stahlfaserspritzbeton
- Stahlbögen (TH - Profile etc.)
- Gitterträger
- Anker
- Verzugsbleche und Kanaldielen
- Spiesse
- Beton
- Bernoldbleche etc.

An dieser Stelle soll nochmals auf die Gefährdungsbilder sowie Stehzeit, die Ringschlusszeit und die Ringdistanz hingewiesen werden. Die Wahl des Einbauzeitpunktes, die Sicherungsmittel sowie die notwendigen Bauverfahren müssen aufgrund dieser Beurteilung gewählt werden. Das den Tunnel umgebende Gebirge kann durch eine systematische Ankerung oder Injektionen sowie durch Ausbaubögen und eine Spritzbetonschale in seiner Tragwirkung verstärkt werden. Nach dem Öffnen des Hohlraumes kann man Spritzbeton [1] direkt auf das Gebirge aufbringen, um die Oberfläche zu versiegeln und einer Gebirgsauflockerung entgegenzuwirken. Dadurch wird

das Gebirgstragverhalten verbessert. Das wesentliche tragende Element bleibt das Gebirge. Der Spritzbeton kann an der freigelegten Gebirgsoberfläche folgende Aufgaben übernehmen:

- teilweise oder vollflächige Versiegelung (3 - 10 cm)
- tragfähige Verbundschicht zum Gebirge (10 - 35 cm)

Zur Steigerung der Tragfähigkeit der Spritzbetonschale kann man eine einlagige oder zweilagige Bewehrung einbringen. Für besondere Zwecke kommt Stahlfaser - Spritzbeton zur Anwendung. Der Vorteil den die Spritzbetonschale bietet, ist die elastoplastische Verformbarkeit, vor allem im frisch eingebauten Zustand. Die Verformungen des Ausbruchquerschnittes nach dem Erhärten können vom Spritzbeton nur beschränkt ohne Risse und Abplatzungen mitgemacht werden. Durch die Rissbildung kann man frühzeitig Bewegungen des Tunnels visuell erkennen. Dies ist gleichzeitig eine Vorankündigung möglicher Standsicherheitsprobleme. Mögliche grosse Verformungen können in Zonen von parallel zur Tunnelachse angeordneten Dilatationsfugen im Spritzbeton (stark verringerte Spritzbetonwandstärke) übernommen werden. Der Spritzbeton zeichnet sich durch seinen vollflächigen Verbund mit dem Gebirge und die durch Zusatzmittel erzielbare Frühfestigkeit aus.

Die Anwendung des Spritzbetons im Tunnelbau liegt in den folgenden baubetrieblichen Faktoren begründet:

- Auftragen und Verdichten erfolgt in einem Arbeitsgang
- ohne Schalung auch überkopf verarbeitbar
- hohlraumfreier, satter Anschluss ans Gebirge
- hoher Haftverbund mit dem Untergrund (Verbundkonstruktion: Spritzbeton - Gebirge)
- verschiedene Schichtstärken in einem Arbeitsgang
- beliebige Formgebung
- frühes Aufbringen auch in Teilbereichen
- relativ biegeweich im Erhärtungsstadium
- in Kombination mit Ankern, Bewehrung, Stahlbögen etc. einsetzbar

Spritzbeton wird heute nicht nur als vorläufige Sicherung eingebaut, sondern auch bei der einschaligen Bauweise für die Lastabtragung innerhalb des Verbundtragwerkes Gebirge - Spritzbetonschale. Beim Spritzbeton als Felssicherung gilt es jedoch immer zu beachten, dass im ersten Moment des Auftragens des Spritzbetons das Gebirge durch das Gewicht noch zusätzlich belastet und daher noch nicht gesichert wird. Andererseits wird durch das Schliessen offener Klüfte und Spalten eine gewisse Keilwirkung erzeugt, die das progressive Nachbrechen des Gesteins meist verhindert.

Tritt auf der Gebirgsoberfläche Wasser aus, wird das Auftragen von Spritzbeton erschwert. In diesem Fall sollte das Wasser örtlich gefasst und abgeleitet werden (z. B. mit flexiblen Halbschalen, lokalen Noppenplattenstreifen, etc.). Bei geringen Wassermengen kann auch durch das Aufspritzen einer dünnen Schicht von ca. 2 cm mit hochbeschleunigtem Spritzbeton (z.B. Sika Shot) eine Versiegelung erreicht werden. Bei aggressiven Bergwässern müssen Zement, Zusatzmittel, Zusatzstoffe und Zuschlagstoffe sulfatbeständig sein und einen dichten porenarmen Spritzbeton mit geringer Wasser-

eindringtiefe ermöglichen. Bei anstehendem, aggressivem Bergwasser besteht bei nicht säurebeständigen Zuschlägen die Gefahr der Versinterung der Tunnelentwässerung. Daher sollten kalkhaltige Zuschlagstoffe nicht zugelassen werden. Abbindebeschleunigungsmittel sollten nicht zu Ausfällungserscheinungen oder stärkeren Festigkeitsreduktionen neigen und keine Chloridverbindungen enthalten oder aufbauen.

Die verschiedenen sprachlichen Bezeichnungen für Spritzbeton sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Charakteristik von Spritzbeton und Spritzmörtel (Gunit) ist in Tabelle 2 erläutert.

Sprache	Fachausdruck
Deutsch	CH: Gunit (gunitieren), Spritzbeton A, D: Torkret (torkretieren)*, Spritzbeton
Französisch	Gunite, béton projeté
Italienisch	Gunite, calcestruzzo spruzzato
Englisch	Gunite, spray concrete, shotcrete

Tabelle 1: Übersicht der sprachlichen Begriffe für Spritzbeton

\*Lat.: TECTOR (=Verputzer von Wänden), CONCRETUM (=Hauptbindemittel der Römer)

	Ausgangsgemisch Kornzusammensetzung	Dosierung Bindemittel
<b>Spritzbeton</b>	min.: 0 - 8 mm norm.: 0 - 16 mm max.: 0 - 32 mm	Portland - Zement 375 - 450 kg/m <sup>3</sup>
<b>Spritzmörtel / Gunit</b>	< 0 - 8 mm	> 350 kg/m <sup>3</sup>

Tabelle 2: Unterschied zwischen Spritzbeton und Spritzmörtel (Gunit)

## 2. Spritzverfahren

Die ersten Spritzverfahren zum Auftragen von Mörtel und Beton wurden Ende letzten und zu Beginn dieses Jahrhunderts entwickelt.

Die Unterschiede in den Verfahren ergeben sich aus der Zugabe von Trocken- oder Nassgemischen in die Spritzmaschine und aus der Art der Materialförderung (Bild 1).

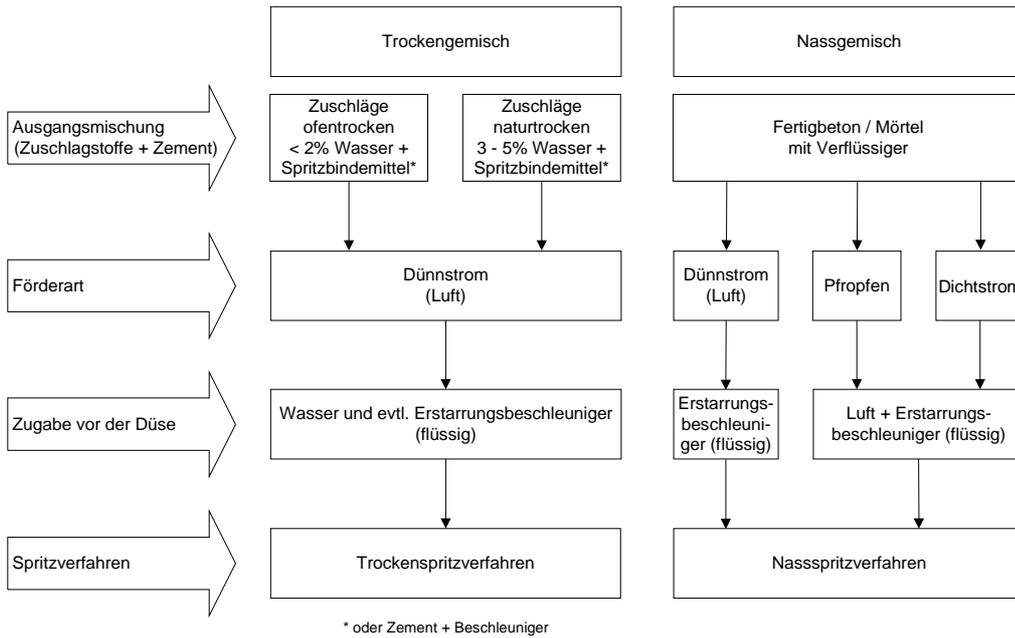


Bild 1: Übersicht der Betonspritzverfahren

## 2.1 Trockenspritzverfahren

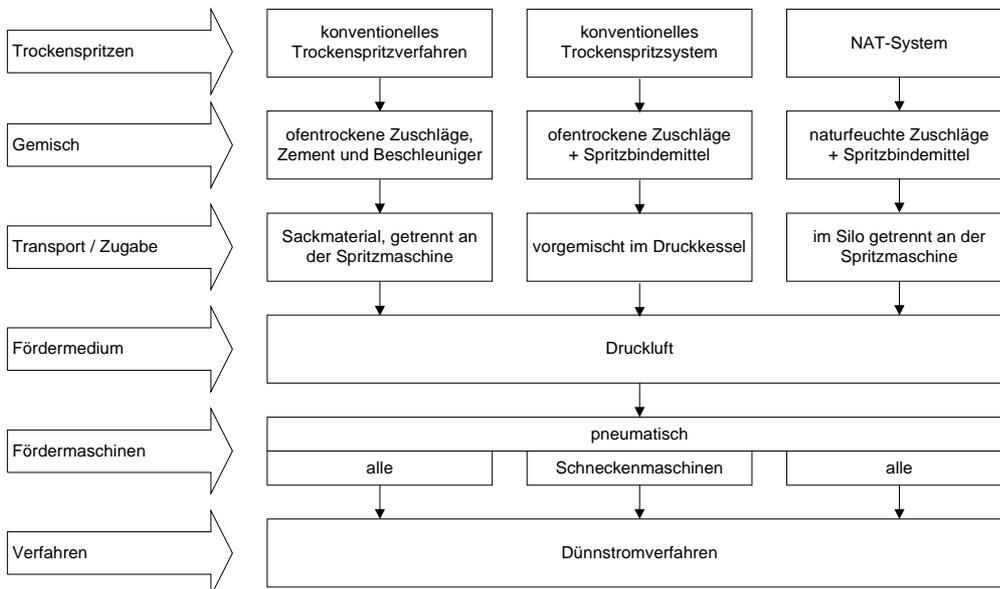


Bild 2: Übersicht der Trockenspritzverfahren und –systeme

Beim Trockenspritzverfahren (Bild 2) sind drei Systeme zu unterscheiden:

- konventionelles Trockenspritzverfahren mit ofentrockenen Zuschlägen
- konventionelles Trockenspritzsystem (TS) mit ofentrockenen Zuschlägen und Spritzbindemittel
- neues, modifiziertes Trockenspritzsystem (NATS) mit naturfeuchten Zuschlägen und Spritzbindemittel.

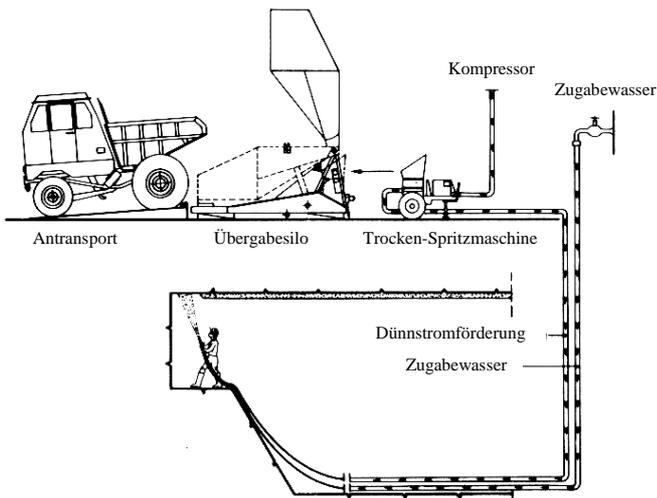


Bild 3: Konventionelles Trockenspritzverfahren im Tunnelbau [1,2]

Beim konventionellen Trockenspritzverfahren (Bild 3) wird ein Trockengemisch aus Zement, ofentrockenen Zuschlagstoffen und meist pulverförmigem Abbindebeschleuniger von der Spritzmaschine mit Druckluft zur Spritzdüse gefördert. In der Spritzdüse wird das im Dünnstromverfahren geförderte Trockenmischgut mit Anmachwasser hydrodynamisch gemischt. Das Gemisch verlässt die Düse mit einer Geschwindigkeit von meist grösser 20 m/s, wird auf den Untergrund aufgebracht und verdichtet sich durch die kinetische Energie selbst. Neue Entwicklungen mischen einen flüssigen Abbindebeschleuniger in das Anmachwasser, das dann über die Düse dem Trockenmischgut zugegeben wird. Das konventionelle Trockenspritzsystem mit ofentrockenen Zuschlägen wird nach der Herstellerfirma auch als Rombold - Verfahren bezeichnet (Bild 4).

Die Hauptnachteile des konventionellen Verfahrens werden durch die Systemlösung weitgehend beseitigt. Einer der grossen Nachteile ist die Staubentwicklung im Beschickungsbereich. Beim Rombold - System befindet sich das Trockengemisch in geschlossenen Kesseln, die unter Druckluft stehen. Diese sind einschliesslich Fördereinrichtung auf einem Transportfahrzeug installiert (Bild 5). Das Fahrzeug kann sehr flexibel jeden Einsatzort erreichen. Dieses mobile Spritzsystem ist meist mit 2 bzw. 4 Spritzdüseneinheiten versehen. Somit kann am Einsatzort mit 4 Spritzdüsen mit Leistungen von 5 - 8 m<sup>3</sup>/h je Düse gearbeitet werden. Beim konventionellen Verfahren bzw. System muss mit ofentrockenen Zuschlägen gearbeitet werden. Dazu ist eine spezielle, relativ kostenintensive Trocknungsanlage notwendig (Beschaffung und Betrieb). An dieser Anlage erfolgt auch das Befüllen der Kesselwagen.

Der Überdruck im Kessel dient für folgende Zwecke:

- Mischgut wird in die Förderschnecke gedrückt.
- Überdruck verhindert das Eindringen von atmosphärischer Luft mit einem höheren Feuchtigkeitsgehalt. Dadurch wird verhindert, dass das Trockengemisch feucht wird und abbindet.

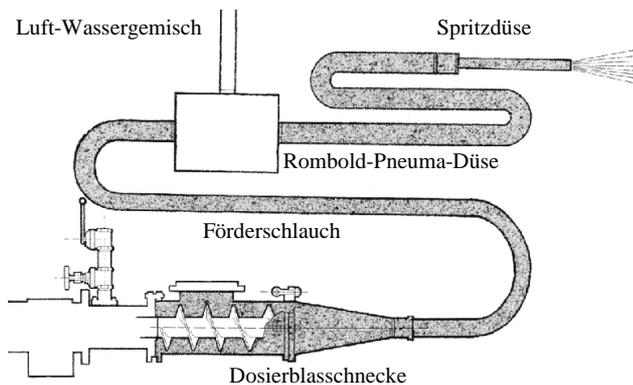


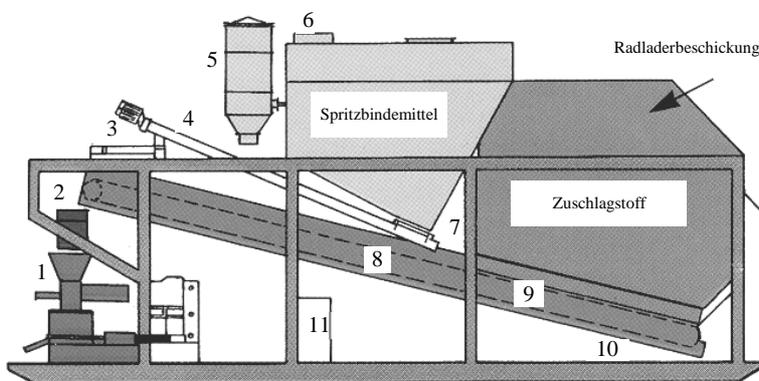
Bild 4: Rombold Spritzsystem [3]

Bild 5: Transportfahrzeug beim Rombold System [3]

Das modifizierte Trockenspritzverfahren (Bild 6), auch NATS genannt (**New Austrian Torkret System**), ist ein technologischer Entwicklungssprung beim Trockenspritzverfahren. Durch die gleichzeitige Entwicklung eines neuen Spritzbindemittels, das kurzzeitig naturfeuchten Zuschlagstoffen mit 3 - 5 % Wassergehalt ausgesetzt werden kann sowie die Entwicklung eines neuen Misch- und Spritzsystems, konnten wesentliche Vorteile erreicht werden. Zu diesen Vorteilen gehören:

- keine kostenintensive Ofentrocknung der Zuschlagstoffe
- geringe Staubentwicklung am Beschickungssystem (Mixomat)
- weitgehende Vereinigung der Vorteile der Nass- und Trockenspritzverfahren.

Legende:



- 1 Füllstandsregler
- 2 Durchlaufmischer
- 3 Wiegeband für Spritzbindemittel
- 4 Schnecke für Spritzbindemittel
- 5 Rüttelfilter
- 6 Ober- und Unterdruckklappe
- 7 Notschieber
- 8 Wiegebereich
- 9 Grobdosierung
- 10 Kiesförderband
- 11 Schaltschrank

Bild 6: Modifiziertes Trockenspritzverfahren NATS [4]

Die Wasserzugabe bei allen Trockenspritzverfahren und –systemen erfolgt dabei manuell durch den Düsenführer. Dieser bestimmt entscheidend den W/Z - Wert und damit die Qualität des Spritzbetons. Im Hinblick auf das NATS und das konventionelle Trockenspritzsystem ist zukünftig eine prozessgesteuerte Wasserzugabe denkbar.

Beim Trockenspritzverfahren verwendet man folgende vier Maschinentypen:

- Zweikammermaschinen (Bild 7)
- Rotormaschinen (Bild 8)
- Schneckenmaschinen (Bild 9)
- Rotor - Druckkammermaschinen (Bild 10)

Die **Zweikammermaschine** ist das älteste System und kommt wegen seiner Robustheit und seinem relativ geringen Verschleiss noch heute zum Einsatz (relativ selten). Die zwei übereinander angeordneten Kammern sind mit einem Kegelventil voneinander getrennt. Das gemischte Trockenmaterial (Zement, Zuschlagstoffe, etc.) wird nach Öffnen des oberen Kegelventils in die erste Kammer gegeben. Das Kegelventil wird geschlossen und die obere Kammer wird durch Druckluft unter Druck gesetzt. Jetzt wird das Kegelventil der unteren unter Druck stehenden Kammer geöffnet. Das Material fällt durch Gravitation sowie durch die Sogwirkung des unter Druckluft abfließenden Materials in die untere Kammer. Die untere Kammer wird durch das Kegelventil wieder geschlossen und die Füllung der oberen Kammer wird erneut eingeleitet. Zwischenzeitlich wird das Material aus der unteren Kammer mit Druckluft über ein Taschenrad im Dünnstromverfahren (auch Flugförderung genannt) durch den Schlauch zur Düse gefördert. Dieser zweiphasige Vorgang wiederholt sich kontinuierlich. Die Förderleistung wird durch unterschiedliche Kammergrößen bzw. Förderschlauchdurchmesser bestimmt. Die Leistung der Maschinen ist relativ gering.

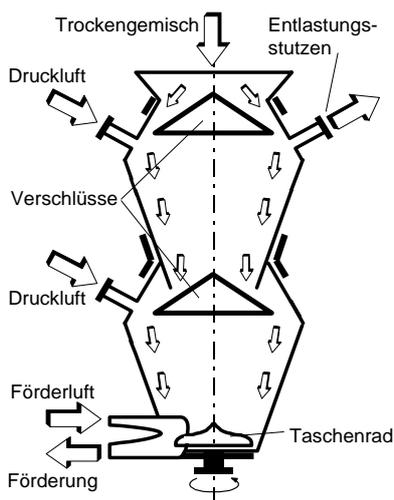


Bild 7: Zweikammermaschine [5]

Die **Rotormaschine** ist sehr weit verbreitet. Das Material wird in einen offenen Vorratsbehälter (1) eingegeben. Unter dem Vorratsbehälter befindet sich eine Rotationstrommel (2) und (3), die von unten mechanisch angetrieben wird. Die Rotationstrommel befindet sich zwischen dem unter atmosphärischem Druck stehenden Vorrats- und Einfüllbehälter sowie der unteren Druckluftfördereinrichtung. Die Rotationstrommel hat die Form eines Trommelrevolvers. Die Trommel ist unterteilt in zwei Bereiche die gleichzeitig folgende Funktionen ausführen:

- Im Bereich 1 (2) wird aus dem Trichter das Material mittels Rührarm in die Öffnung des gerade darunter befindlichen Trommelzylinders gefüllt.
- Im Bereich 2 (3) fließt die Druckluft ein (5,7), stösst den Inhalt eines Trommelzylinders nach unten und entleert dadurch den gerade darunter befindlichen Zylinder der Trommel in die Förderleitung.

So wird auf der einen Seite während der Rotation der Trommel ein Trommelzylinder beladen (2) und gleichzeitig wird der Inhalt des gegenüberliegenden Trommelzylinders (3) in den Förderschlauch (4) geblasen. Zur Abdichtung der rotierenden Trommel zu den beiden Bereichen wird oben und unten eine Neoprenplattendichtung verwendet. Diese unterliegt einem erheblichen Verschleiss. Das Material wird mittels Dünnstromverfahren (Flugverfahren) zur Düse gefördert.

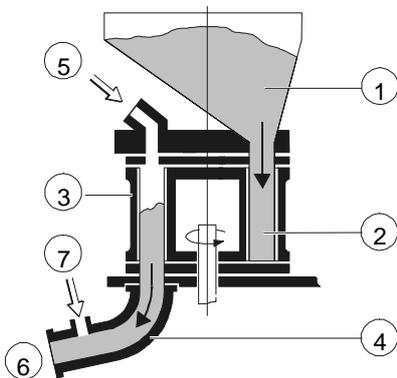


Bild 8: Rotormaschine [2]

Die **Schneckenmaschine** zeichnet sich durch eine kontinuierliche Förderleistung aus. In einen Trichter wird das Material eingefüllt. Eine vertikale Schnecke fördert das Material in einem geschlossenen Rohr nach oben. Am oberen Austritt wird das Material vom Luftstrom einer Düse erfasst und im Dünnstromverfahren (Flugförderung) durch den Schlauch zur Spritzdüse gefördert. Die Schneckenmaschine wird meist beim konventionellen Trockenspritzsystem (Rombold) angewandt. Durch das trockene Material und die damit verbundene hohe Rauigkeit des Trockengemisches ist der Verschleiss der Schnecke technisch wie wirtschaftlich hoch.

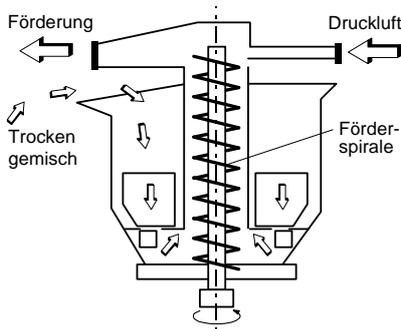


Bild 9: Schneckenmaschine

Die **Rotordruckkammermaschine** vereint und kombiniert die Vorteile der Zweikammer- und Rotormaschine. Das Trockengemisch wird in einen Aufgabetrichter gefüllt. Von dort wird es im unteren Bereich mittels einer Trommel, die mit grossen Taschen versehen ist, rotierend in die darunter befindliche Druckkammer gefördert. Diese Trommel mit Taschen dichtet gleichzeitig die untere Druckkammer gegen den oberen Aufgabetrichter ab. In der unteren Druckkammer wird das Material dann mit einem hutförmigen Taschenrad im Dünnstromverfahren (Flugförderung) durch den Förderschlauch zur Spritzdüse gefördert. Die Maschine hat beim Befüllen keinen dauernden Druck- und Luftverlust wie die Zweikammermaschine und zudem einen geringeren Verschleiss gegenüber der Rotormaschine.

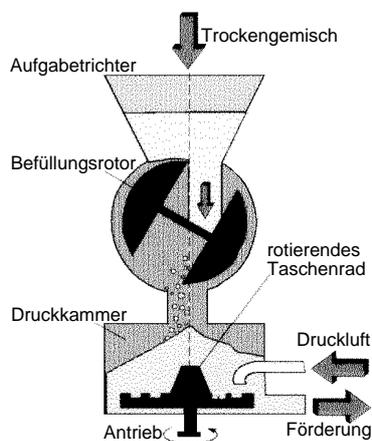


Bild 10: Rotordruckkammermaschine [6]

### 2.1.1 Spritzdüsen (Trockenspritzverfahren)

Die Spritzdüse hat beim Trockenspritzverfahren die folgenden multifunktionalen Aufgaben:

- Mischkörper: zum Vermischen des Wassers mit dem im Flugverfahren durchgeschleusten Trockenbetongemisch - wird nur Zement und kein Spritzbindemittel verwendet, so wird zusätzlich Abbindebeschleuniger ins Mischwasser dosiert.
- Strahlformer: am Förderleitungsende muss der Spritzstrahl optimal geformt werden um einen kompakten, freien und möglichst wirbelarmen Strahl zu bilden.

Beim Trockenspritzverfahren wird das Trockengemisch in der Düse mit Wasser hydrodynamisch durchmischt. Bei Verwendung von Zement ist meist ein flüssiger Abbindebeschleuniger zusätzlich erforderlich, dessen Zugabe ebenfalls an der Düse erfolgt. Bei Spritzbindemittel ist im Regelfall kein Abbindebeschleuniger notwendig. Die Spritzdüsen bestehen meistens aus einem konisch zulaufenden Kunststoffrohr, dem ein Wasserdüsenring vorgeschaltet ist. Das Wasser wird turbulent in der Spritzdüse im Zehntelssekundenbereich mit dem Trockengemisch hydrodynamisch vermischt (Bild 9). Die Injektion des Wassers kann erfolgen durch:

- Sprühvorhang senkrecht zur Flugförderung
- tangential zur Flugförderung
- Drallstrahl durch geneigte Einspritzung zur Flugförderung

Das durch Flugförderung vorbeiströmende Material wird durch den Sprühvorhang benetzt. Zur Verbesserung der Oberflächenbesprühung wird in der DMT - Düse ein Leitkörper eingebaut bei einer gleichzeitigen Vergrößerung des Durchmessers (Bild 12). Dadurch braucht der Wasservorhang nur noch 50 % der Penetrationswirksamkeit. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der Düsen am Umfang zu. Dadurch lässt sich eine gleichmässige, homogenisierte Befeuchtung des Gemischs erreichen mit einer einhergehenden Reduzierung des Feinstaubanfalls.

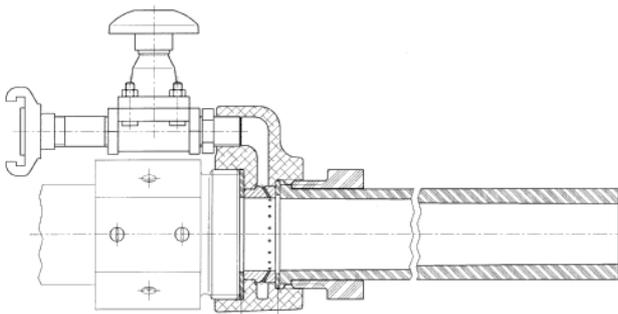


Bild 11: Trockenspritzdüse von MBT [7]

Die Wasserzufuhr wird meist vom Düsenführer reguliert. Dadurch ist der W/Z - Wert des Trockenspritzbetons nicht klar definiert. Die subjektive, gefühlsmässige Wasserzugabe des Düsenführers wird jedoch durch folgende relativ engen physikalischen Grenzen eingeschränkt:

- zu trocken, W/Z - Wert  $< 0.45$   $\Rightarrow$  mehr Rückprall. erhöhte Staubentwicklung
- zu nass, W/Z - Wert  $> 0.55$   $\Rightarrow$  Abfließen des Spritzbetons von der Wand

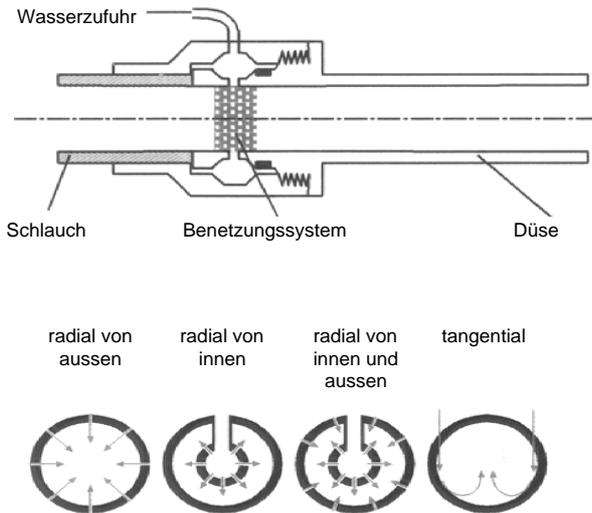


Bild 12: Verschiedene Benetzungssysteme in Trockenspritzdüsen [8]

Die Düsenführer in Deutschland und Österreich müssen einen Spritzdüsenführernachweis erbringen. Dadurch wird trotz der subjektiven Beeinflussung  $W/Z$  - Wertes eine relativ hohe Qualität des erreichten Spritzbetons erreicht. Zur Verbesserung des Verfahrens hinsichtlich definiertem  $W/Z$  - Wert ist künftig eine robuste Mengenmess- und Dosiereinrichtung notwendig.

Wünschenswert wäre:

- konstanter  $W/Z$  - Wert (geringe Streuung)
- konstante Abbindebeschleunigermenge
- mögliche Verringerung des Feinstaubanteils an der Düse

Für den Stahlfaserspritzbeton verwendet man zum Teil Spezialdüsen. Die Stahlfasern werden bei diesen Spezialdüsen pneumatisch über eine separate Schlauchleitung zur Düse gefördert, wo sie zum trockenen Materialstrom gemischt werden. Bei den moderneren Verfahren werden die Fasern bereits dem Trockengemisch beigemischt und gemeinsam zur Düse gefördert.

## 2.2 Nassspritzverfahren

Beim Nassspritzverfahren (Bild 13) wird meist Transportbeton bestehend aus Zement, Zuschlagstoffen, Anmachwasser und Verflüssiger, verwendet. Der Transportbeton wird direkt in den Aufgabetrichter der Nassspritzmaschine übergeben.

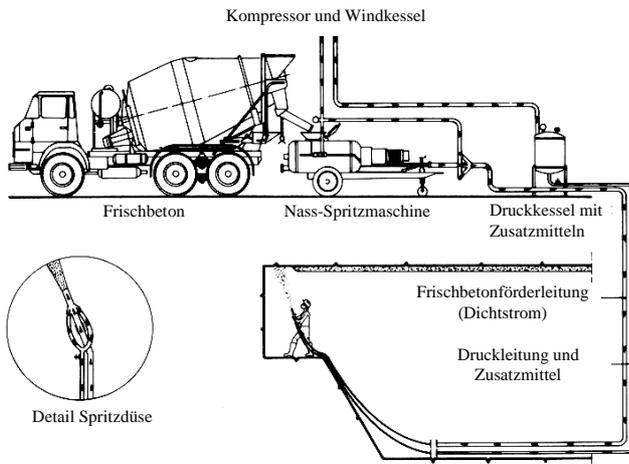


Bild 13: Verfahrenstechnik des Nassspritzverfahrens im Tunnelbau [1, 7]

Beim **Nassspritzverfahren** unterscheidet man folgende Fördermethoden (Bild 14):

- pneumatische Förderung: Dünnstrom- und Pfropfenverfahren, auch Flugförderung genannt
- hydraulische Förderung: Dichtstromverfahren, auch Schubförderung genannt

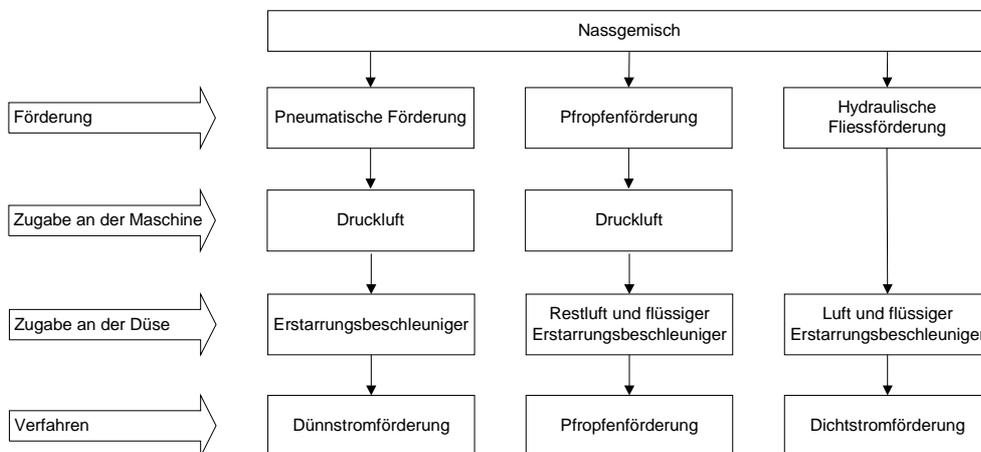


Bild 14: Übersicht der Fördertechniken beim Nassspritzverfahren [1]

## Dünnstromförderung

Das fertige Betongemisch wird mit Druckluft gefördert, wobei an der Spritzdüse nochmals Druckluft und meist Abbindebeschleuniger zugegeben werden. Damit wird die zum Auftragen und Verdichten des Spritzbetons notwendige Fluggeschwindigkeit erreicht.

## Pfropfenförderung

Das fertige Betongemisch wird in einer Druckkammer meist über eine Portionierscheibe in eine Einschleusedüse geben. Von hier werden die Pfropfen nacheinander mit Druckluft durch den Schlauch zur Spritzdüse gefördert, wo die restliche Luft sowie meist Abbindebeschleuniger zugegeben werden.

## Dichtstromförderung

Das Fördermaterial wird mit normalen Betonkolbenpumpen im kompakten Materialstrom (Schubförderung) hydraulisch zur Düse gefördert. An der Spritzdüse wird das kompakte Material für die Flugphase durch Zugabe von Druckluft beschleunigt, um die zum Auftragen auf den Untergrund und zum Verdichten notwendige Geschwindigkeit zu erreichen. An der Düse wird meist flüssiger Abbindebeschleuniger zugegeben. Das Dichtstromverfahren wird heute meist bei grossen Förderleistungen eingesetzt. Der charakteristische Materialfluss des Nassspritzgemisches ist für die verschiedenen Förderarten in Bild 15 dargestellt.

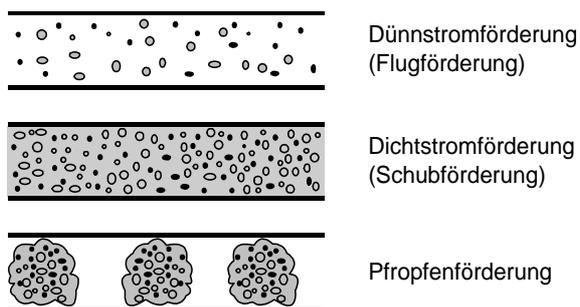


Bild 15: Spritzbeton - Förderarten

Durch die Verwendung von Fertigbeton mit definiertem W/Z - Wert wird im Vergleich zum Trockenspritzverfahren eine gleichmässiger Betonqualität erreicht und die Staubentwicklung ist stark reduziert.

### 2.2.1 Fördermaschinen

Beim Nassspritzverfahren im **Dünnstrom** wird hauptsächlich die Rotormaschine (siehe Trockenspritzverfahren) sowie (seltener) die Druckkammermaschine mit Schneckenförderung (Bild 16) eingesetzt. Sie eignet sich speziell für die Verarbeitung von microsilikamodifiziertem Beton und Mörtel. Der im Kessel integrierte Zwangsmischer ermöglicht es, die trocken angelieferten Zuschlagstoffe mit Wasser zu mischen. Unter dem gefüllten Kessel liegt die Schnecke. Die Schnecke fördert das Nassspritzgemisch zur Einschleusedüse. Dort wird das Material durch die von hinten zugegebene Druckluft durch

den Förderschlauch zur Spritzdüse gefördert. Dieses System wird auch beim Trockenspritzverfahren (Rombold) mit trockenen Zuschlägen eingesetzt.

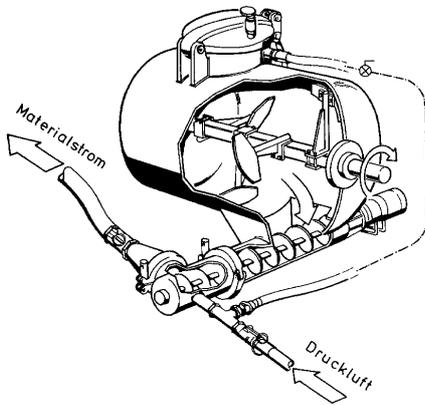


Bild 16: Druckkammermaschine mit Schneckenförderung (Dünnstromförderung) [9]

Bei der **Pfropfenförderung** (Bild 17) wird das Nassspritzgemisch im Druckkessel durch Mischarme der Ausblasöffnung portionenweise zugeteilt. Durch Zugabe von Druckluft in der Einschleusdüse wird das Material zur Spritzdüse gefördert.

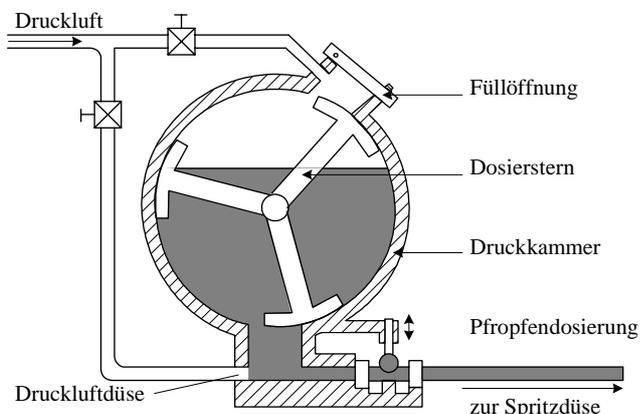


Bild 17: Nassspritzmaschine für Pfropfenförderung, Putzmeister M500 [10]

Bei der **Dichtstromförderung** setzt man folgende handelsüblichen Betonpumpen ein:

- Kolbenpumpen (Bild 18)
- Pumpen mit Schneckenförderung
- Rotorschlauchpumpen (Bild 19)

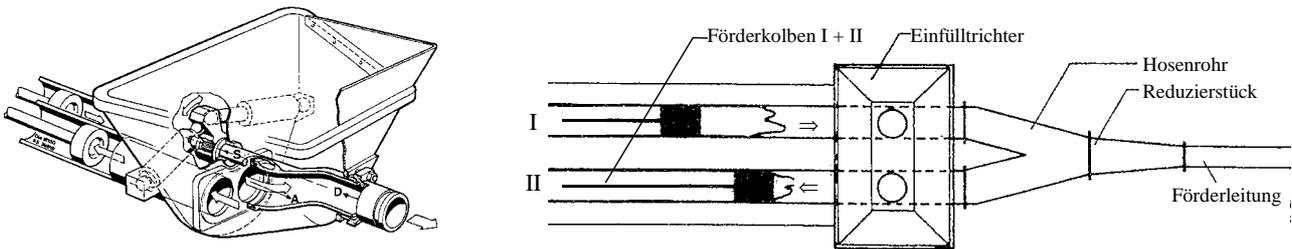


Bild 18: Kolbenpumpe (Dichtstromförderung) [7]

In der Nassspritztechnik im Dichtstromverfahren werden hauptsächlich Kolbenpumpen eingesetzt. Das Nassspritzbetonmaterial wird über einen Aufgabetrichter den Kolben zugeführt. Das Material wird abwechselnd von den zwei Kolben in den Förderschlauch geschoben und zur Spritzdüse gefördert. Die Frequenz der Kolben muss so gesteuert werden, dass es zu einem kontinuierlichen Schubfluss im Schlauch kommt, um einen gleichmässigen Ausstoss aus der Düse zu erhalten.

Die Schneckenförderung gewährleistet einen kontinuierlichen Betrieb. Der Nassstrom reduziert den extrem hohen Verschleiss, wie er bei der Trockenförderung auftritt. Mit Schneckenförderpumpen und breiigem Nassstrom kann man bis zu 20 bar Förderdruck erreichen.

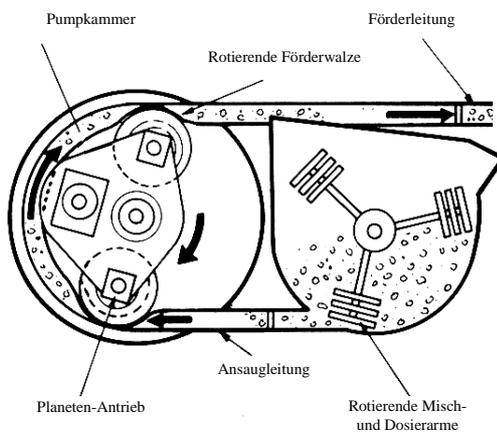


Bild 19: Rotorschlauchpumpe für Dichtstromförderung, Squeeze-Crete 250 / Tubaflo [10, 11]

Die Leistungswerte von Spritzgeräten sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Anmerkung:

Förderschlauchdurchmesser  $\leq 50$  mm für Handspritzen,  $> 65$  mm bei Manipulatoreinsatz

Verfahren	Maschine		Förderleistung [m <sup>3</sup> /h]	Förderschlauch Ø [mm]	Luftmenge (Ansaugleistung Kompressor) [Nm <sup>3</sup> /min]	Luftdruck (Ausgang Kompressor) [bar]	Wasserdruck [bar]
Dichtstrom	Kolbenpumpe		bis 20 2-20	50/65 65/80/100	0.6-1 m <sup>3</sup> /min pro m <sup>3</sup> /h Beton 10-12	6 6-7	
Dünnstrom	Rotor- maschine 1	Trocken	4.5-6.0 6-9	50 60	8-13 11-15	2-5 2-5	3-6 3-6
		Nass	4.5-6.0 6-9	50 60	8-13 11-15	4-7 4-7	
	Rotor- maschine 2	Trocken	8-12 13-18	60 65-80	11-15 13-17	2-5 2-5	3-6 3-6
		Nass	8-12 13-18	60 65-80	11-15 13-17	4-7 4-7	

Tabelle 3: Leistungswerte von Spritzgeräten

## 2.2.2 Spritzdüsen beim Nassspritzverfahren

Beim Nassspritzverfahren muss man verfahrensbedingt zwischen Düsen für die Dünnstrom- und solchen für die Dichtstromförderung unterscheiden (Bild 20).

Die Spritzdüse hat beim Nassspritzverfahren die folgenden multifunktionalen Aufgaben:

- Mischkörper: zur Beschleunigung und zum Aufreißen des im Schubverfahren geförderten Nassbetongemisches wird Druckluft eingeblasen.
- Strahlformer: am Förderleitungsende muss der Spritzstrahl optimal geformt werden, um einen kompakten, freien und möglichst wirbelarmen Strahl zu bilden.

Beim Dichtstromverfahren unterscheiden sich die Spritzdüsen durch die konstruktive Gestaltung der Luftzugabe in der Düse. Man unterscheidet:

- zentrale Luftzufuhr in der Düse
- periphere Luftzufuhr am Umfang der Düse

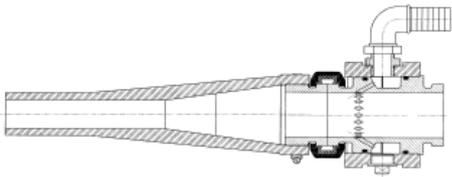


Bild 20: Nassspritzdüsen für Dichtstromverfahren von MBT [7]

Die Dichtstromförderung ist dadurch gekennzeichnet, dass das Betonfertiggemisch kompakt im Schubstrom zur Düse gelangt. Das Material muss zur Erreichung der notwendigen kinetischen Energie für die Verdichtung auf der Auftragsfläche auf die erforderliche Geschwindigkeit beschleunigt werden. Die Beschleunigung des festen Materialstroms erfolgt durch Zugabe von Druckluft an der Spritzdüse. Zusätzlich kann man neben der Druckluft ein Abbindebeschleunigungsmittel zugeben.

Um eine bessere Durchmischung mit dem Abbindebeschleuniger zu erreichen, hat man beim Top - Shot - Verfahren einen Verlängerungsschlauch zwischen 2 - 6 m auf die Düse gesetzt (Bild 21 und Bild 22). Der Betonstrom wird in der Düse aufgerissen und die letzten Meter werden im Dünnstromverfahren gefördert.

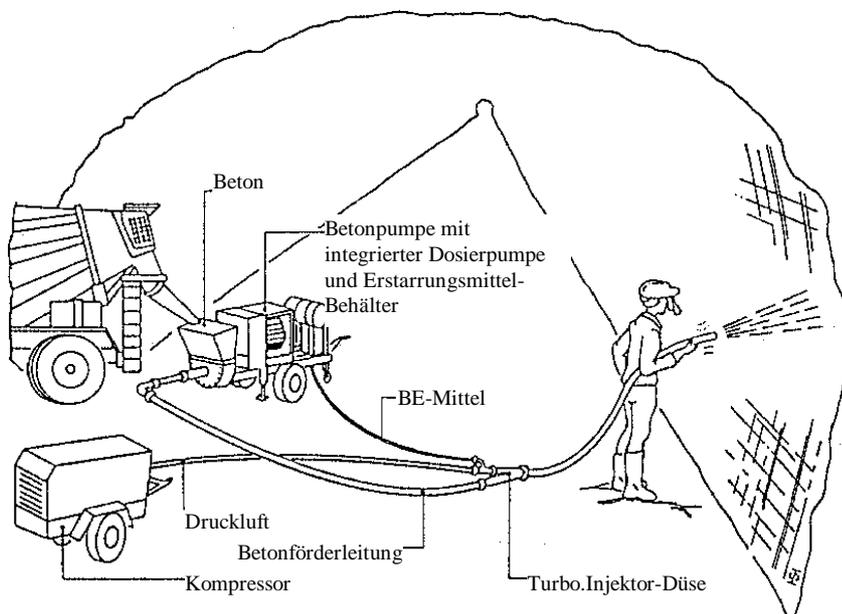


Bild 21: Systemskizze Top – Shot [9]

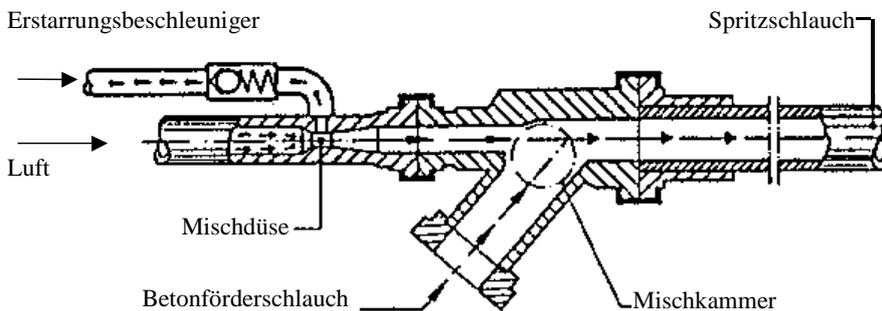


Bild 22: Turboinjektordüse Top – Shot [9]

## 2.3 Vergleich der Verfahren

Die wesentlichen verfahrenstechnischen Unterschiede, Vor- und Nachteile sowie Anwendungskriterien sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Keines der Verfahren ist grundsätzlich besser. Beide Verfahren erweisen sich in bestimmten Anwendungsfällen gegenüber dem jeweils andern eindeutig als überlegen, und zwar aus folgenden Gründen:

- Trockenspritzverfahren: bei kleineren Querschnitten, häufigen kürzeren Arbeitsunterbrechungen, langen und beengten Förderwegen oder mehreren Arbeitsorten auf der gleichen Baustelle
- Nassspritzverfahren: bei hohen Förderleistungen und Gesamtmengen, besonders im Dichtstromverfahren mittels Spritzmanipulatoren

Die Nassspritztechnik hat sich im Tunnelbau u.a. bedingt durch folgende Vorteile durchgesetzt:

- hohe Applikationsleistungen  $> 8 - 20 \text{ m}^3/\text{h}$  besonders durch Einsatz von Kolbenpumpen und Spritzmanipulatoren und in Zukunft durch Spritzroboter
- geringerer Rückprall (Verlust, Sonderabfall)
- geringere Staubbelastung (Gesundheitsgefährdung)
- gesicherter W/Z - Wert  $< 0.5$  durch Vormischen und damit geringere Qualitätsstreuungen, allerdings nur mit Hilfe von chemischen Verflüssigern
- Abbindebeschleuniger kann in definierter Menge zugegeben werden

Auch beim Trockenspritzverfahren haben sich effizienzsteigernde Verbesserungen ergeben durch:

- Entwicklung von Spritzbindemittel mit Beschleuniger für naturfeuchte Zuschläge
- Entwicklung von flexiblen Mischanlagen, die das Gemisch nach Bedarf und Anforderungen vor Ort mischen

Anmerkung: Spritzmanipulatoren werden beim Trocken- und Nassspritzen eingesetzt.

Methode: Verfahren:	Trockenspritzverfahren		Nassspritzverfahren	
	Dünnstrom		Dichtstrom	Dünnstrom
<i>Gemischzustand</i>	Trockengemisch: Spritzbindemittel + Zuschläge oder Zement, Zuschläge, Beschleuniger		Fertigbetongemisch: Zement, Zuschläge, Anmachwasser, Verflüssiger	
<i>Herstellung</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Misch- und Trockenanlage auf der Baustelle</li> <li>ofengetrocknete oder bei neuen Verfahren naturfeuchte Zuschläge</li> <li>abgepackter Fertigmix, darf nicht geöffnet der Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sein</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Mischanlage auf der Baustelle</li> <li>Zuschläge dürfen nass sein</li> <li>Fertigbeton</li> </ul>	
<i>Zusatzmittelzugabe</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pulverförmig im Gemisch oder im Spritzbindemittel</li> <li>flüssig an der Düse</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>im allgemeinen flüssig</li> </ul>	
<i>Geräte</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>niedrigere Investitionskosten für Fördergerät</li> <li>einfache Instandhaltung, hohe Verschleisskosten</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>niedrigere Verschleisskosten an Pumpe, Schlauch und Düse</li> <li>60 % weniger Druckluftverbrauch</li> </ul>	wie Trockenverfahren
<i>Vielseitigkeit des Geräteeinsatzes</i>	Nutzung für: <ul style="list-style-type: none"> <li>Spritzbeton</li> <li>Sandstrahlung</li> </ul>		Nutzung für: <ul style="list-style-type: none"> <li>Spritzbeton</li> <li>Pumpbeton</li> </ul>	wie Trockenverfahren
<i>Leistung</i>	5 - 8 m <sup>3</sup>		2 - 10 m <sup>3</sup> 20 m <sup>3</sup> mit Manipulator	5 - 8 m <sup>3</sup>
<i>Förderung</i>	Flugförderung		Schubförderung	Pfropfen- oder Flugförderung
<i>Spritzdüsenzugabe</i>	Anmachwasser, Abbindebeschleuniger		Druckluft / Abbindebeschleuniger	Druckluft / Abbindebeschleuniger
<i>Düsengeschwindigkeit</i>	20 m/s		10 - 12 m/s	15 m/s
<i>max. Spritzleistung (z.Z.)</i>	8 m <sup>3</sup> /h		20 m <sup>3</sup> /h	8 m <sup>3</sup> /h
<i>max. Förderlänge</i>	400 m		100 m	80 m
<i>Zementgehalt</i>	300 - 400 kg/m <sup>3</sup>		350 - 450 kg/m <sup>3</sup>	330 - 450 kg/m <sup>3</sup>
<i>Rückprall</i>	15 - 30 % vertikale Flächen 20 - 40 % überkopf		kann < 10 % werden	wie Trockenverfahren
<i>Staub</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>höhere Staubbelastung kann reduziert werden durch:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Benetzung vor der Düse</li> <li>neue Verfahren mit naturfeuchten Zuschlägen</li> </ul> </li> <li>Staubablagerung auf Spritzbetonoberfläche - Haftproblem</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>geringe Staubbelastung</li> <li>bessere Sicht im Tunnel</li> <li>keine Gefahr der Staubablagerung auf Oberfläche</li> </ul>	
<i>Qualität</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>höhere Festigkeit durch kleineren W/Z - Wert</li> <li>geringere Homogenität durch Wasserzugabe</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>oft geringere Festigkeit durch hohen W/Z - Wert</li> <li>relativ homogen</li> </ul>	
<i>Vorteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>geringe Gerätekosten</li> <li>hohe Flexibilität durch:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Spritzpausen ohne Reinigung</li> <li>kleine Mengen problemlos</li> <li>geringer Platzbedarf</li> <li>geringer Reinigungsaufwand</li> <li>grosse Förderlängen</li> <li>geringe BE - Mengen</li> </ul> </li> <li>hohe Festigkeit</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>kontrollierter W/Z - Wert</li> <li>grosse Spritzleistung</li> <li>geringer Rückprall</li> <li>geringere Staubentwicklung</li> <li>geringerer Verschleiss</li> <li>geringere Materialkosten (Rückprall)</li> </ul>	
<i>Nachteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>W/Z - Wert nicht definiert</li> <li>starke Staubentwicklung</li> <li>hohe Energiekosten</li> <li>relativ geringe Spritzleistung</li> <li>relativ hoher Rückprall</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>aufwendige Gerätereinigung nach Spritzpausen und kleinen Mengen</li> <li>hohes Düsengewicht</li> <li>geringere Flexibilität des Gerätes</li> <li>hohe Gerätekosten</li> </ul>	

Tabelle 4: Gegenüberstellung des Nass- und Trockenspritzverfahrens

Die neuen Trockenspritzverfahren (NATS) haben den grossen Vorteil, dass gegenüber dem Nassspritzverfahren wesentlich weniger Zusatzmittel erforderlich sind. Der Rückprall und Staubanfall ist jedoch immer noch höher als beim Nassspritzverfahren. Um grosse Tunnelquerschnitte mit Spritzbeton schnell und effizient zu sichern (die ersten 5 cm) und die mächtigere Spritzbetonschale einzubauen, sind nicht nur leistungsfähige Pumpen, sondern auch **hochmechanisierte und teilrobotisierte Applikationssysteme** erforderlich. Die Anforderungen an die Hochleistungsspritzsysteme, die für Trocken- und Nassspritzverfahren eingesetzt werden können, sind:

- Baubetrieblich optimiertes, prozessgesteuertes System für die verschiedenen in - situ – Verhältnisse.
- Gleichmässige hohe Qualität bei gleichmässiger hoher Leistung, unabhängig von der individuellen menschlichen Leistungskurve.
- Verbesserung der Arbeitssicherheit und Reduktion der Arbeitsbelastung.
- Nachhaltige Bewirtschaftung der Baustoffe, geringere Materialverluste und Umweltbelastung.

### 3. Materialtechnologie

Spritzbeton kann man als ein Fünf - Stoff - System bezeichnen, das aus den folgenden Komponenten besteht:

- Bindemittel
- Zuschlagstoffe
- Wasser
- Zusatzmittel
- Zusatzstoffe

Beim Aufbau der Mischung ist jedoch darauf zu achten, dass sich das Ausgangsgemisch vom verdichteten Gemisch an der Wand unterscheidet und zwar durch den Verlust von Material während des Auftragens durch Rückprall und Feinstaub, der an der Spritzdüse abgeschieden wird. Dadurch verändert sich die Zusammensetzung gegenüber dem Ausgangsgemisch, da sich die Fein- und Grobanteile in unterschiedlichen Anteilen ausscheiden. Die Art der Ausgangsstoffe, Qualität, Herstellung und Anwendung wird in den verschiedenen Ländern mit Normen, Richtlinien und Empfehlungen geregelt, andernfalls kommen die normalen Betonnormen zur Anwendung. In der Schweiz gelten gemäss der SIA - Norm 162 die gleichen Anforderungen sowohl für Spritzbeton wie für den Normalbeton. In Deutschland und Österreich gelten spezielle Normen (DIN 1045 und Ö - Norm / Richtlinie für Spritzbeton).

#### 3.1 Zuschlagstoffe

In Bild 23 sind mögliche Grenzsieblinien für ein Grösstkorn von 8 mm und 16 mm angegeben. Die Kornzusammensetzung sollte gemischtkörnig sein. Ein hoher Anteil an Grobkorn wirkt sich ungünstig aus in Bezug auf den Rückprall. Bei engliegender

Bewehrung sollte das Größtkorn auf 8 mm beschränkt werden. Auf jeden Fall sollte das Größtkorn auf ein Drittel des Förderleitungsdurchmessers begrenzt werden. Im allgemeinen wird die Verwendung von natürlichem, rundem Korn empfohlen. Dies hat folgende Vorteile:

- geringerer Rückprall als bei länglichem, splittigem Material
- geringere Porenbildung als bei gebrochenem Korn
- geringere Zementmenge bei gleichem W/Z - Wert durch geringere spezifische Oberfläche
- geringerer Verschleiss in den Maschinenaggregaten

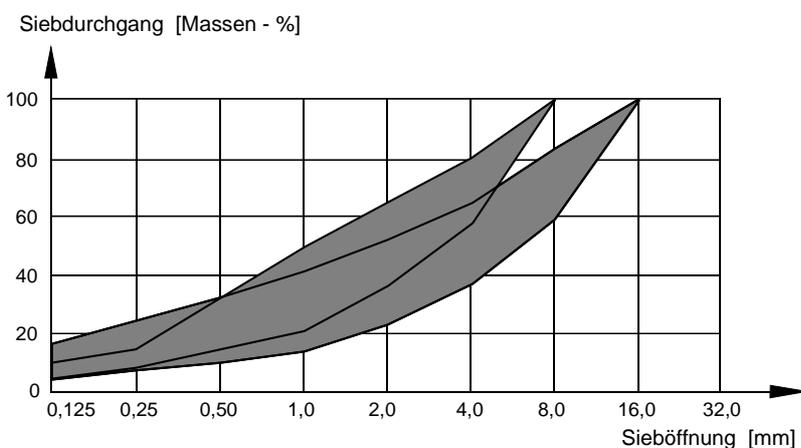


Bild 23: Erfahrungswerte geeigneter Kornverteilungen der Zuschlagstoffe für Spritzbeton [12]

Nachfolgend sind einige von verschiedenen Normen empfohlene Kornverteilungskurven angegeben (Bild 24 bis Bild 27).

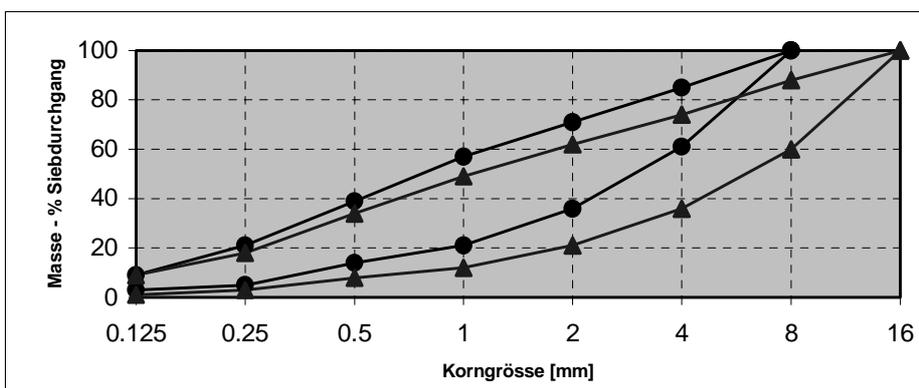


Bild 24: Empfohlene Kornverteilungskurven nach DIN 1045

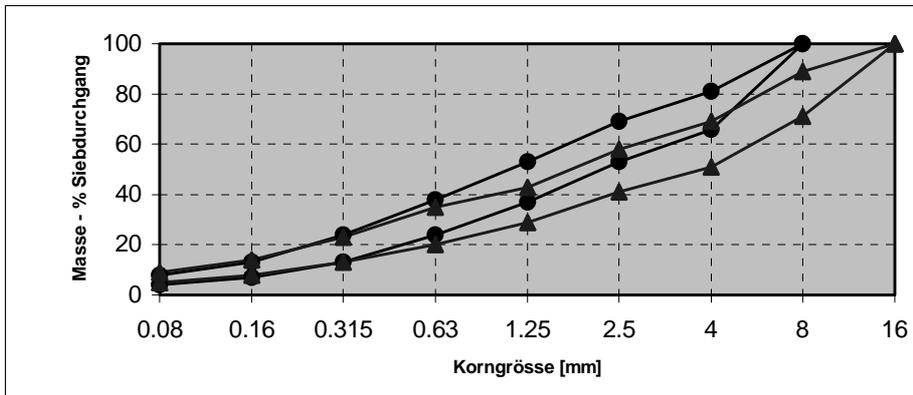


Bild 25: Empfohlene Kornverteilungskurven der Association Française du Béton

Im Tunnelbau wird heute, im Rahmen der nachhaltigen Materialbewirtschaftung, das Ausbruchmaterial (gebrochenes Korn) aufbereitet und für den Spritzbeton mitverwendet. Mit gebrochenem Korn lässt sich die gleiche Festigkeit des Spritzbetons erreichen wie mit rundem Korn. Das liegt daran, dass gebrochenes Korn eine bessere Verzahnung erreicht als rundes Korn, obwohl die Kornfestigkeit durch den Brechvorgang durch Mikrorisse verringert wird. Ein gewisser Anteil an splittigem Korn wirkt sich positiv hinsichtlich der reinigenden Wirkung auf Schläuche und Leitungen aus. Ferner wird die Verstopfungsfahr verringert.

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit muss der chemischen Beständigkeit der Zuschlagstoffe in Zukunft grössere Bedeutung zukommen. Ist saures, aggressives Grundwasser zu erwarten, so sollen die Zuschläge folgende Bedingungen erfüllen:

- hohe Säurebeständigkeit
- keine kalkhaltigen Bestandteile

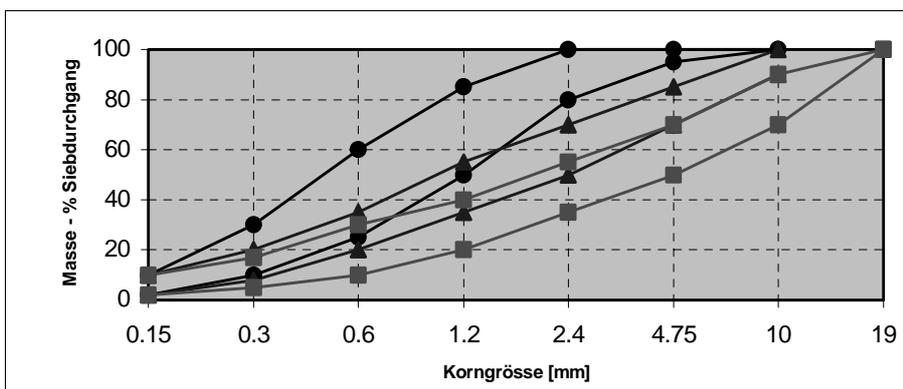


Bild 26: Empfohlene Kornverteilungskurven nach ACI 506

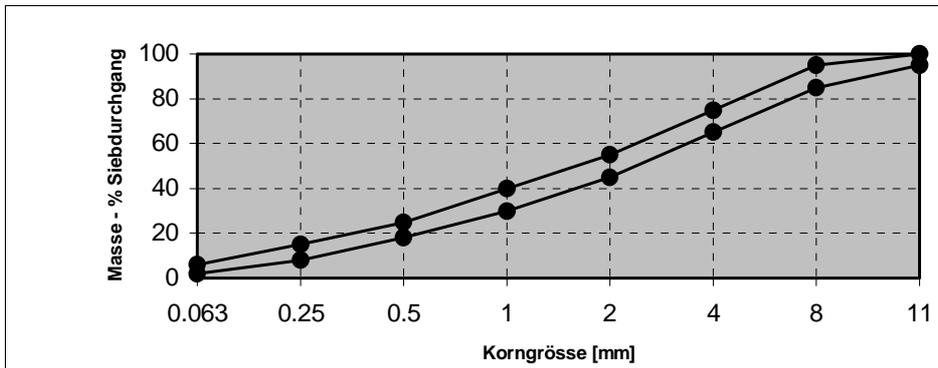


Bild 27: Empfohlene Kornverteilungskurven des österreichischen Betonvereins

Die Auswirkung der Eigenfeuchte der Zuschlagstoffe beim Trockenspritzverfahren ist in Tabelle 5 dargestellt.

Eigenfeuchtigkeit in %	Auswirkungen
< 3 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>– grössere Staubentwicklung beim Spritzen</li> <li>– geringere Vorhydratation infolge Wassermangels</li> </ul>
3 - 6 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>– günstiger Feuchtigkeitsanteil</li> <li>– Raumgewicht für Korn - Ø 0 - 8 mm: 1450 -1490 kg/m<sup>3</sup></li> </ul>
> 6 - 8 %	<ul style="list-style-type: none"> <li>– zunehmende Störungen an der Fördereinrichtung</li> <li>– Verkrustungen in Maschine und Leitungen</li> <li>– Leistungsverminderung</li> </ul>

Tabelle 5: Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagstoffe und deren Auswirkungen (Trockenspritzverfahren) [2]

### 3.2 Bindemittel

Man verwendet handelsübliche Zemente oder sogenannte Tunnelzemente in einer Dosierung von 325 - 450 kg/m<sup>3</sup>. Bei geringer Stehzeit soll der Spritzbeton im Tunnelbau möglichst schnell hohe Festigkeiten erreichen. Daher sollte der Zement möglichst folgende Anforderungen erfüllen:

- Bei aggressiven Bergwässern ist sulfatbeständiger Zement erforderlich. Es sollten Portlandzemente mit geringem Tricalciumaluminatgehalt ( $C_3A < 3\%$ ) sowie mit einem Aluminiumoxidgehalt von weniger als 5 % oder Hochofenzement mit mindestens 70 % Hüttensand und höchstens 30 % Portlandzementklinker verwendet werden.
- Der Beton sollte nach 2 Tagen eine Mindestdruckfestigkeit von 10 N/mm<sup>2</sup> und nach 28 Tagen von 35 N/mm<sup>2</sup> erreichen.

Besondere Aufmerksamkeit ist auf die Verträglichkeit mit Abbindebeschleunigern zu richten. Für das Trockenspritzverfahren wurden spezielle Zemente entwickelt, die keinen zusätzlichen Abbindebeschleuniger benötigen. Man bezeichnet sie als Spritzbindemittel (SBM). Diese Spritzbindemittel reagieren bei Kontakt mit Wasser sehr stark. Sie werden aufgrund ihrer Reaktionsgeschwindigkeiten klassifiziert als:

- Spritzbindemittel (SBM - T) für ofentrockene Zuschläge (< 3 % Feuchtigkeit)
- Spritzbindemittel (SBM - FT) für naturfeuchte Zuschläge (3 - 6 % Feuchtigkeit)

Das **Spritzbindemittel SBM - T** für ofentrockene Zuschläge hat eine Reaktionszeit von unter einer Minute und ist daher nur verwendbar mit Zuschlägen, deren Wassergehalt unter 0.2 Gew.-% liegt. Das schnelle Abbindeverhalten wird nicht durch Zugabe von Abbindebeschleunigern erzielt, sondern entsteht durch den Sulfatanteil im Basisklinkermaterial. Dies bedingt, dass der Schnellbinder extrem kurze Erhärtszeiten aufweist. Die Frühfestigkeit nach dem Auftragen des Spritzbetons ist sehr hoch, daher erhöht sich der Rückprall beim Auftragen des nächsten Übergangs erheblich. Nach dem schnellen Erstarren erfolgt die Festigkeitsentwicklung innerhalb der folgenden drei bis fünf Stunden langsamer. Nach dieser Periode ist die Festigkeitsentwicklung mit normalem Portlandzement vergleichbar.

Das **Spritzbindemittel SBM - FT** hat eine abgestimmte Reaktionszeit von 1 - 3 Minuten. Dadurch kann es auch in Verbindung mit naturfeuchten Zuschlägen mit einem Wassergehalt von 2 - 4 Gew.-% verwendet werden. Da der niedrige Sulfatgehalt im natürlichen Klinker schwankt, muss zur Kontrolle der verzögerten Erhärtung eine geringe Menge von umweltfreundlichen Zusätzen beigegeben werden. Dadurch kann beim Auftragen des Spritzbetons in verschiedenen Übergängen der Rückprall geringer gehalten werden, da die vorherige Lage noch bearbeitbar ist. Dies erfordert eine abgestimmte Verfahrenstechnik bei Verwendung von naturfeuchten Zuschlägen, da die Verarbeitungszeit sehr begrenzt ist. Das SBM - FT wird mit feuchten Zuschlägen unmittelbar vor Ort in einer geeigneten Anlage für den unverzüglichen Spritzbetonauftrag gemischt. Die charakteristischen Kennwerte für die Spritzbindemittel sind in der Richtlinie Spritzbeton des Österreichischen Betonvereins [13] zu finden.

### 3.3 Zusatzmittel und Zusatzstoffe

Der Unterschied zwischen Zusatzmitteln und -stoffen wird wie folgt definiert:

- Zusatzmittel werden in der Stoffbilanz des Mehrstoffgemisches nicht berücksichtigt, d.h. der Mengenanteil ist sehr gering. Beispiele dazu sind Abbindebeschleuniger, Betonverflüssiger, Staubbindemittel oder Verzögerer.
- Zusatzstoffe müssen in der Stoffbilanz des Mehrstoffgemisches berücksichtigt werden, da ihr Mengenanteil grösser ist. Zu ihnen gehören Flugasche, Silikastaub, Mehlkorn oder Fasern.

## 3.3.1 Die Zusatzmittel im Spritzbeton

### 3.3.1.1 Abbindebeschleuniger

Spritzbeton erhärtet wie Normalbeton. Im Tunnelbau ist aufgrund der Stehzeit wie auch aus baubetrieblichen Gründen (z. B. zügig folgende Sprengarbeiten) eine schnelle Abbindezeit erforderlich. Ferner lassen sich dadurch schneller stärkere Schichten aufbringen (ca. 10 - 15 cm über Kopf). Neben der Wirkung des frühen Erstarrens und Erhärtens verbessert der Abbindebeschleuniger die Haftung durch Erhöhung der Klebrigkeit des Frischbetons und kann die abdichtende Wirkung sowie die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe erhöhen.

Folgende Abbindebeschleuniger [14] werden verwendet:

- Alkalialuminate
- Aluminiumverbindungen
- Aluminiumhydroxide
- Calciumsulfoaluminate
- Alkalicarbonate
- Alkalisilikate (Wasserglas)
- organische Beschleuniger

Zur Zeit werden überwiegend Alkalialuminate verwendet. Folgende Abbindebeschleuniger sollten nicht verwendet werden:

- Abbindebeschleuniger mit Chloritverbindungen
- Alkalisilikate, wegen ihrer nachhaltigen Gefügestörung durch hohe Frühfestigkeit aber teilweise geringer Endfestigkeit
- sulfathaltige Abbindebeschleuniger

Die Abstimmung des Zementes und Abbindebeschleunigers sollte zwingend durch eine Verträglichkeitsprüfung erfolgen. Der Abbindebeschleuniger bewirkt eine erhöhte Festigkeit innerhalb der ersten 1 bis 12 Stunden. Für spezielle Anwendungen im Tunnelbau werden zur schnellen Versiegelung des Ausbruchs ein Erstarrungsbeginn nach 3 Minuten und Druckfestigkeiten von  $> 3$  MPa nach 4 Stunden verlangt. Man bezeichnet solche Spritzbetone als "flash set". Dies ist erreichbar durch eine gute Abstimmung zwischen Zement und Abbindebeschleuniger (Bild 28). Darüber hinaus wirken Abbindebeschleuniger meist festigkeitsmindernd (Bild 29). Der normale Anteil an Abbindebeschleuniger beträgt rund 2 % des Zementgewichts. Der Anteil kann jedoch bis zu 7 % ansteigen, wenn eine besonders beschleunigte Erhärtung erforderlich ist. Bei der Dosierung der Abbindebeschleuniger ist zu beachten, dass eine grössere Menge nicht unbedingt eine Steigerung der Wirkung bedeutet. Das Umschlagen des Abbindebeschleunigers ist ein bekanntes Phänomen.

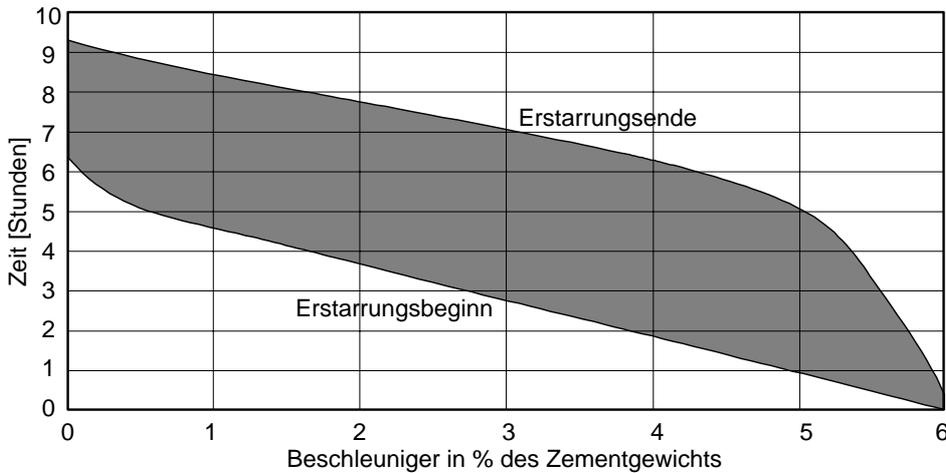


Bild 28: Qualitativer Einfluss der Dosierung von Abbindebeschleuniger auf die Erstarrungszeit von trockengemischtem Spritzbeton nach ASTM C403 [15]

Abbindebeschleuniger sind in flüssiger Form wie auch als Pulver erhältlich. Sie sind im allgemeinen sehr aggressiv, toxisch und ätzend. Durch die substanzielle Verbesserung der maschinellen Dosiereinrichtungen für trockene und flüssige Beschleuniger ist in jüngster Zeit eine wesentliche Verbesserung in der Verteilung des Beschleunigers im Spritzbeton erreicht worden. Die Dosiereinrichtungen sind gekoppelt mit dem mechanischen oder hydraulischen Spritzbetonantrieb sowie mit Messeinrichtungen, die den Förderstrom messen. Damit wird die verlässliche Dosierung erhöht und eine möglichst gleichmässige Verteilung im aufgetragenen Spritzbeton erreicht. Eine gleichmässige Verteilung des Beschleunigers wird beim Trockenspritzverfahren erreicht durch:

- die neuen Spritzbindemittel
- vorgemischte Trockenspritzmörtel

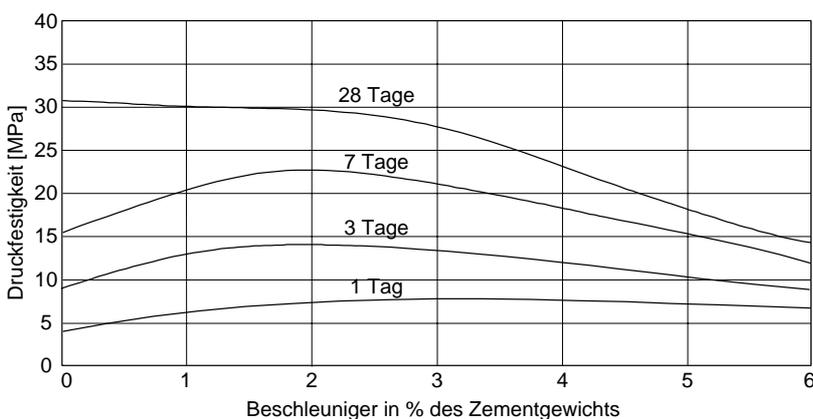


Bild 29: Einfluss der Dosierung von Abbindebeschleuniger auf die Druckfestigkeit von trockengemischtem Spritzbeton [2]

Die heute eingesetzten Abbindebeschleuniger aus Alkalialuminatverbindungen mit einem pH - Wert von 13 sind durch die verwendeten Alkalien (Natrium- oder Kaliumaluminat) sehr stark ätzend. Die Nachteile dieser Produkte sind:

- hoher pH - Wert; potentielle Gefahrenquelle
- Endfestigkeitsverlust gegenüber Ausgangsgemisch
- Endfestigkeit muss teilweise durch Silika - Fume erhöht werden

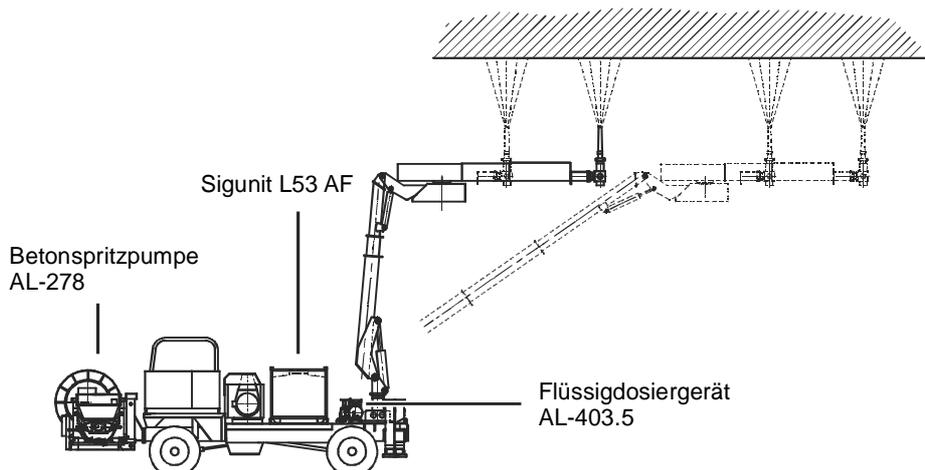


Bild 30: Nassspritzbeton mit Sigunit - L 52/53 AF im Dichtstromverfahren [14]

Daher werden aus ökologischen und Gesundheitsschutzgründen **alkalifreie Abbindebeschleuniger** (z. B. Sigunit – L52/53 AF) von den Bauherren verlangt. Die neuen alkalifreien Abbindebeschleuniger haben keine ätzende Wirkung bei einem pH - Wert von 4. Dadurch entstehen keine ätzenden Wasserspritznebel in der Tunnelluft. Zudem verhalten sich diese neuen Abbindebeschleuniger teilweise festigkeitssteigernd. Dazu verringert sich der Anteil an löslichen Alkalien im Beton, die somit nicht zur Steigerung der Versinterung der Tunneldrainage beitragen. Zudem wird die Deponierbarkeit des Spritzbetons in Bezug auf die Bildung von grundwasserbelastendem Sondermüll verbessert. Die Anwendung ist im Bild 31 dargestellt.

### 3.3.1.2 Betonverflüssiger und Superverflüssiger

Besonders beim Nassspritzverfahren werden Betonverflüssiger zur Reduzierung der Schubwiderstände während der Förderung eingesetzt. Dadurch lässt sich der W/Z - Wert reduzieren, einhergehend mit einer Erhöhung der Wasserdichtigkeit und Frostbeständigkeit. Betonverflüssiger und Superverflüssiger sollten bei Trockenspritzverfahren nicht angewendet werden, da die kurze Benetzungszeit in der Spritzdüse zur Beurteilung der Verflüssigungswirkung - welche zur Reduzierung des Wassergehalts führt - nicht ausreicht. Meist wird die Wirkung erst verzögert an der Wand durch anschliessendes Abfließen des Spritzbetons sichtbar.

### 3.3.1.3 Staubbindemittel

Staubbindemittel sind meist Stabilisatoren, z. B. auf der Basis von Polyethylenoxid. Sie werden im Trockenspritzverfahren eingesetzt. Ihre wesentlichen Wirkungen sind:

- Erhöhung der Viskosität
- Erhöhung der Klebrigkeit
- Verringerung der Wasserabsonderung
- reduzierter Rückprall
- reduzierte Früh- und Endfestigkeit

### 3.3.1.4 Langzeitverzögerer - Stabilisatoren zur Steuerung der Zementhydratation

Sie werden heute immer stärker und öfters beim Nassspritzverfahren eingesetzt. Dies ermöglicht die Bereitstellung des Betongemisches über mehrere Stunden oder sogar Tage (Bild 31).

Die Vorteile sind:

- lange Verarbeitungszeiträume
- keine Pumpenreinigung bei kurzfristigen Unterbrechungen
- Verringerung der Betonverluste und Umweltbelastung durch Reinigung
- leichtere Gerätereinigung
- Herstellung und Transport wird entkoppelt

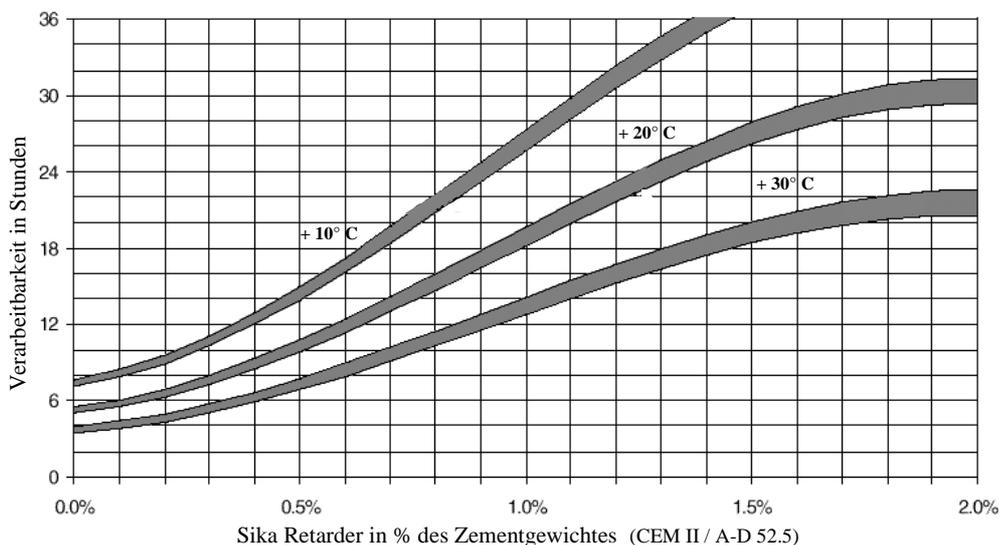


Bild 31: Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit der Verzögerungsmenge und der Temperatur [14]

Die Steuerung der Zementhydratation erfolgt z. B. mit dem Delvo - Stabilisator von MBT [16]. Es handelt sich um ein zweikomponentiges, chloridfreies Hydratations-Steuerungssystem, das die Weiterverwendung von Restbeton und zementhaltigem Waschwasser ermöglicht. Die erste Komponente, der sogenannte Stabilisator, unterbindet die Hydratation, die zweite Komponente, der sogenannte Aktivator, ist der Hydratationsbeschleuniger. Beim Abbinden des Betons kristallisieren die bei der Zementhydratation

gebildeten Hydrate aus. Bei vollständiger Durchmischung des Stabilisators mit der Betonmischung wird die Zementhydratation unterbunden, indem eine Schutzschicht um die Zementpartikel gelegt wird. Der Stabilisator besteht aus Carboxylsäure und phosphorhaltigen organischen Säuren und Salzen. Das Abbinden und Erhärten des Betons kann auf zwei Arten erfolgen:

- warten bis der Stabilisator nachlässt
- Zugabe von Aktivator, der die Schutzschicht um die Zementpartikel aufbricht

Beim Spritzbeton im Tunnelbau muss aus baubetrieblichen Gründen ein Aktivator zugegeben werden, um eine möglichst schnelle Erstarrung und ein schnelles Abbinden einzuleiten, zur Erreichung einer schnell wirksamen Versiegelung oder zur Applikation von grossen Schichtstärken mit hoher Frühfestigkeit. Die Aktivatoren haben eine Doppelfunktion:

- Neutralisation des Stabilisators
- Beschleunigung der Zementhydratation

Diese Stabilisatoren werden beim Trocken- und Nassspritzverfahren eingesetzt. Beim konventionellen Trockenspritzverfahren können durch Zugabe von Stabilisatoren Zuschläge mit einer Eigenfeuchte von 5 % und Zement zusammengemischt werden und je nach Mengenzugabe von Stabilisatoren bis zu 72 h stabilisiert werden. Beim Nassspritzverfahren kann die Mischung je nach Mengenzugabe bis zu 72 h stabilisiert bzw. verarbeitet werden. Dies hat baubetrieblich grosse Vorteile für den flexiblen Einsatz des Nassspritzverfahrens in Bezug auf Menge, Verlust und notwendige Gerätereinigungen. Der Stabilisator wird je nach gewünschter Verzögerungszeit des Trocken- und Nassspritzgemisches in einer Menge von 0.4 - 2 % des Zement-Gehalts zugefügt. Der Aktivator wird beim Trocken- und Nassspritzverfahren an der Spritzdüse zugegeben. Dies bedeutet, dass das Gemisch innerhalb der Mischstrecke der Düse aktiviert und beschleunigt wird. Die notwendige Menge des Aktivators (auf die Zementmenge bezogen) richtet sich nach der Menge des zugegebenen Stabilisators und beträgt beim:

- Trockenspritzverfahren 4 - 6 %
- Nassspritzverfahren 5 - 8 %

### 3.3.1.5 Polymerlatex

Polymerlatex wird hauptsächlich beim Trockenspritzverfahren angewendet. Durch dieses Zusatzmittel wird die Adhäsionswirkung vergrössert, was folgende Vorteile hat:

- Verringerung des Rückpralls
- Reduktion der Permeabilität
- Erhöhung des Chloridwiderstandes
- Reduktion der Frostempfindlichkeit
- Erhöhung der Festigkeit

### 3.3.2 Zusatzstoffe im Spritzbeton

Die Zusatzstoffe dienen zur Erhöhung des Mehlkornanteils und lassen sich teilweise auf den Zementgehalt anrechnen. Ein erhöhter Mehlkornanteil verbessert die Pumpbarkeit, erhöht die Klebewirkung, reduziert den Rückprall und erhöht die Dichtigkeit.

Folgende Zusatzstoffe werden hauptsächlich verwendet:

- Hochofenschlacke
- Flugasche
- Silikastaub
- natürliche Puzzolane, etc.

#### 3.3.2.1 Flugasche

Die Flugasche erhöht die **Sulfatbeständigkeit** des Spritzbetons. Bei sorgfältiger Abstimmung von Zement, Zusatzmittel und Flugasche lassen sich folgende Verbesserungen erreichen:

- erhöhte Festigkeit
- verbesserte Gefügedichte
- erhöhte Klebewirkung
- geringerer Rückprall
- geringere Staubentwicklung
- verbesserte Pumpfähigkeit
- geringerer Wasseranspruch

Die Flugasche wird gemäss EU - Normen teilweise als Bindemittel in der Stoffmatrix angerechnet.

#### 3.3.2.2 Silikastaub

Silikastäube sind unter den Produktnamen Mikrosilika und Silika - Fume bekannt. Diese Stäube entstehen als Abfallstoffe in der Metallindustrie bei der Herstellung von Siliziummetall oder Siliziumlegierungen. Die dabei entstehenden Rauchgase kühlen sich in den Schloten ab und oxidieren zu  $\text{SiO}_2$ . Diese Silikastäube haben eine spezifische Oberfläche von 180'000 - 250'000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Somit sind sie nahezu 100 - fach feinkörniger als Zement. Damit lassen sich die Hohlräume zwischen den Zementpartikeln füllen. Der Silikastaub beteiligt sich an der chemischen Reaktion des Zementes wie folgt:

- Zement und Wasser reagieren vereinfacht gesagt zu dem festigkeitsbestimmenden C-S-H - Gel und freiem Kalk
- der freie Kalk reagiert mit dem Silicafume zu zusätzlichem Zementstein.

Dadurch verbessert sich der Spritzbeton wie folgt:

- höhere Gefügedichte
- erhöhter Widerstand gegen das Eindringen von Wasser, Luftkohlendioxid, aggressiven Gasen und Lösungen
- hohe Frost- und Tausalzbeständigkeit
- erhöhte Sulfatbeständigkeit

- höhere Festigkeit
- reduzierter Rückprall und Staubanfall durch erhöhte kohäsive Eigenschaften.

Als Lieferformen kommen in Frage:

- nichtkompaktiertes Silicafume - Pulver, 0.15 - 0.25 kg/l, schwierige Handhabung
- kompaktiertes Silicafume - Pulver, 0.5 - 0.75 kg/l, kann wie Flugasche, etc. in Silos eingeblasen werden oder in Säcken geliefert werden
- Silicafume in Slurryform, 1.4 kg/l als 50 % Suspension von Wasser und Pulver

Man verwendet heute bei der Spritzbetonherstellung im Ausgangsgemisch meist kompaktiertes Silicafume - Pulver. Wenn vor Ort Silicafume zugegeben werden muss, eignet sich besonders Silicafume in Slurryform.

Eine besondere Variante stellen die Silikazemente dar, die auf den Markt drängen. Man rechnet den Silikastaub auf den Zementgehalt an. Die Dauerhaftigkeit und Verträglichkeit mit anderen Zusatzmitteln muss systematisch untersucht werden. Durch Zugabe von Silikastaub in den Spritzbeton verringert sich als weiterer positiver Effekt der notwendige Anteil an Beschleuniger. Dies ist besonders von Bedeutung, wenn Beschleuniger zum Auftragen grösserer Betonstärken oder zur Verhinderung von Auswaschungen eingesetzt werden. Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Silika - Fume Spritzbetons ist meist ein Super - Verflüssiger notwendig.

### 3.3.2.3 Fasern

Zur Erhöhung des Tragvermögens von Spritzbeton verwendet man Fasern aus Stahl und Kunststoff. Am häufigsten werden Stahlfasern verwendet. Die Stahlfasern verbessern den Spritzbeton folgendermassen:

- erhöht die Zugfestigkeit
- reduziert das Schwinden
- steigert das mechanische Arbeitsvermögen

Die Stahlfaserlängen betragen bis zu 40 mm. Ihr Durchmesser beträgt ca. 0.5 mm. Durch den Faser - Spritzbeton lassen sich leichte Netzbewehrungen ersetzen. Das Hauptproblem bei der Verwendung glatter Drahtfasern ist die Igelbildung, d.h. eine Zusammenballung und Verklumpung von Fasern. Das neue Meyco Cutex - Verfahren, sowie das Dramix - Stahlfaser - Verfahren bieten zwei der möglichen Lösungen.

Im Festbeton sollten mindestens 30 kg Fasern pro  $m^3$  Festbeton enthalten sein. Bedingt durch den Rückprall müssen 40 - 50 kg Fasern pro  $m^3$  in das Ausgangsgemisch gegeben werden, sowohl beim Trocken- wie beim Nassspritzverfahren. Die Stahlfasern werden beim Nassspritzbeton ins Ausgangsgemisch zugemischt. Beim Trockenspritzverfahren werden die Fasern direkt ins Trockengemisch gegeben oder an der Düse separat zugeführt und dort erst vermischt.

### 3.4 Rezeptur Normspritzbeton

In Tabelle 6 sind für die verschiedenen Spritzbetonverfahren mögliche Rezepturen für Normspritzbeton aus der Praxis wiedergegeben.

Trockenspritzbeton Stadtbahn Bensberg TM		NATS Landeck Nord NATS FM-S		Nassspritzbeton Vereina Tunnel Endausbau Nass-Dicht	
	[kg/m <sup>3</sup> ]		[kg/m <sup>3</sup> ]		[kg/m <sup>3</sup> ]
Zement CEM I 42.5, R-SE	330	Bindemittel Schretter SF	350	Zement CEM II	
Brechsand 0/2 mm	825	Zuschlagstoffe 0/8 mm gebrochen	1960	52.5/BTC800	425
Splitt 2/4 mm	460			Zuschlag Sand 0/3 mm	525
Splitt 4/8 mm	550			Zuschlag Sand 0/4 mm	695
				Zuschlag Kies 4/8 mm	475
				Zusatzmittel Sika Tard 903	5.4
				Beschleuniger Sigunit 49AF	17
Wasser [l/m <sup>3</sup> ]	ca. 165	Wasser [l/m <sup>3</sup> ]	ca. 150	Wasser [l/m <sup>3</sup> ]	ca. 225
Druckfestigkeit 28d N/mm <sup>2</sup> ]	40	Druckfestigkeit 28d N/mm <sup>2</sup> ]	45	Druckfestigkeit 28d N/mm <sup>2</sup> ]	50

Tabelle 6: Spritzbetonrezepturen aus der Praxis

Eine Materialbilanzberechnung für das Trockenspritzverfahren unter Berücksichtigung des Rückpralls ist in Bild 32 dargestellt.

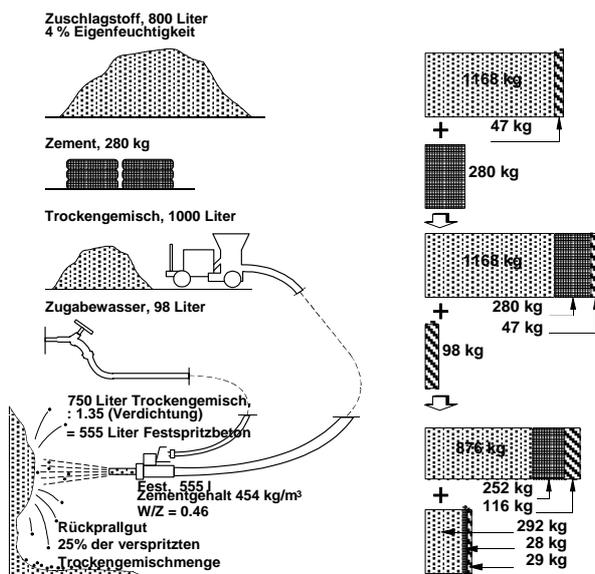


Bild 32: Materialbilanz von Spritzbeton für eine Standardmischung

Der W/Z - Wert hat wie beim Normalbeton einen entscheidenden Einfluss auf die Festigkeit. Beim Trockenspritzbeton variiert der Wert zwischen 0.45 und 0.55 und ist von der subjektiven Einschätzung des Düsenführers abhängig. Beim Nassspritzverfahren werden aus verarbeitungstechnischen Gründen oft W/Z - Werte von ca. 0.6 erreicht. Dieser Wert liegt an der oberen Grenze, er kann jedoch durch Zugabe von Superverflüssiger auf einen W/Z - Wert von  $< 0.45$  verringert werden.

### 3.5 Rezeptur Hochleistungsspritzbeton mit Kunststoffpolymeren und Silicafume - Technologie

Die Silicafume - Technologie basiert meist auf der Kombination von Silicafume und Betonzusatzmitteln, wie Superplastifizierer und Kunststoffpolymeren. Diese Technologie lässt sich beim Nass- und Trockenspritzverfahren einsetzen. Beim Trockenspritzverfahren wird das kompaktierte Silicafume dem Trockengemisch im Betonwerk zugegeben. Die wichtigsten Parameter, die mit Hilfe der Silicafume - Technologie positiv beeinflusst werden, sind:

- Betonkonsistenz, Pumpbarkeit
- Druckfestigkeit
- Porosität

Dadurch erhöht sich die Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit in Bezug auf Wasserundurchlässigkeit, Chloridpenetration und Karbonatisierung. Ein wichtiges Kriterium ist die Baustellentauglichkeit, welche sich wie folgt charakterisieren lässt:

kompaktiertes Silicafume - Pulver

- Dosierung im Betonwerk, mittels Säcken oder über Silos und Zementwaage
- Trockengemisch kann mit herkömmlichen Benetzungsdüsen gespritzt werden
- Silicafume - Pulver bindet Feuchtigkeit der Zuschläge weitgehend, damit bleibt die Vorhydratation des Zementes gering (günstig in Verbindung mittels SBM - T und SBM - FT, z. B. bei NATS)
- Lagerstabilität und Frostunempfindlichkeit

Silicafume - Slurry

- Dosierung direkt im Vortrieb mittels spezieller Dosierpumpen
- Slurry nur kurze Zeit stabil
- Probleme an der Düse durch Abrasion und Verstopfung der Düsenlöcher

Silicafume kann folgendermassen mit Abbindebeschleuniger kombiniert werden:

- kompaktiertes Silicafume - Pulver mit Abbindebeschleuniger ohne zusätzlichen maschinentechnischen Aufwand
- Silicafume - Slurry mit Abbindebeschleuniger erzwingt durch die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften neben zwei Dosierpumpen für getrennte Zugabe der Stoffe auch zwei getrennte Sprayringe in der Benetzungsdüse

Kunststoffzusätze werden eingesetzt, um die Qualität von dünnen Spritzbetonschichten zu verbessern. Sie kommen unter anderem bei Tunnelanierungen zur Anwendung. Der Spritzbeton erhält in Verbindung mit Polymeren und Silicafume folgende Eigenschaften:

- bessere Verarbeitbarkeit
- grössere Dichtigkeit
- höhere Haftzugfestigkeit
- erhöhte chemische Beständigkeit
- verbessertes termisches Verhalten

Bei der Zementhydratation bildet sich das C-S-H - Gel, womit der Wasseranteil im Spritzbeton kleiner wird. Die Dispersionspartikel rücken zusammen, bis sie verfilmen. Die Poren, das schwächste Glied in der Spritzbetonmatrix, werden durch die Zugabe von der Kunststoffdispersion aufgefüllt und abgedichtet. Durch die Kunststoffmodifizierung wird die Duktilität des Spritzbetons verbessert. Das Nassspritzverfahren kann in Verbindung mit Silicafume, Hochleistungsverflüssiger und alkalifreiem Abbindebeschleuniger wesentlich verbessert werden in Bezug auf Pumpfähigkeit, Verarbeitbarkeit und Rückprall sowie zur Erreichung hochfester Nassspritzbetone mit geringeren Wandstärken. Dasselbe gilt für das Trockenspritzverfahren bei der Anwendung der Spritzbindemittel für ofentrockene und naturfeuchte Zuschläge. Dies wirkt sich besonders günstig bei dem neuen NATS - Verfahren aus, da ein Teil der Feuchtigkeit durch das Silicafume gebunden wird.

Eine typische Nassspritzbetonrezeptur ist in Tabelle 7, eine typische Trockenspritzrezeptur ist in Tabelle 8 dargestellt.

Komponente	Dosierung / Kennwerte
Bindemittel: PC Untervaz (CEM I 42.5)	430 kg/m <sup>3</sup>
Zuschlagstoffe: Körnung	0-16 mm
Zusatzstoffe: Silicafume	0-15%
Zusatzmittel -Hochleistungsverflüssiger -Abbindebeschleuniger	1.2% 3% (Wandauftrag)
Ausbreitmass	37-58 cm
W/Z-Wert	0.40-0.46
Druckfestigkeit (28 Tage)	47.5 – 60 N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 7: Typische Nassspritzbetonrezeptur mit Silikafume [2]

Die Anwendung von Hochleistungsspritzbeton ergibt folgende Effizienzsteigerungen und Verbesserungen:

- hohe Festigkeiten und einhergehend dünnere Wandstärken - besonders wirksam, wo dicke, konventionelle Spritzbetonschalen notwendig sind.
- hohe Dichtigkeit, Frost- und Tausalzbeständigkeit
- hohe Frühfestigkeiten und Endfestigkeiten

- geringerer Rückprall und Staubentwicklung durch viskose Frischbetonmatrix.

Komponente	Dosierung / Kennwerte
Bindemittel: PC Untervaz (CEM I 42.5)	350 kg/m <sup>3</sup>
Zuschlagstoffe: 0-4 mm 4-8 mm	940 kg 510 kg
Zusatzstoffe: Silicafume	5 / 10%
Zusatzmittel -Abbindebeschleuniger	4 - 6%
Druckfestigkeit (28 Tage)	44 – 61 N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8: Typische Trockenspritzbetonrezeptur mit Silikafume [2]

### 3.6 Optimierung des Spritzbetoneinsatzes

Die in diesem Kapitel gemachten Aussagen über Auftragstechnik, Rückprall und Staubentwicklung basieren auf den umfangreichen Untersuchungen und Forschungen von Professor B. Maidl an der Ruhr-Universität Bochum [1]. Rückprall, Staubentwicklung sowie Festigkeits- und Dichtigkeitseigenschaften des Spritzbetons werden massgeblich durch die Faktoren Betontechnologie und Verfahrenstechnik beeinflusst (Tabelle 9). Auf der Basis dieser Faktoren und Einflüsse muss man den Einsatz des Spritzbetons (Bild 34), in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht optimieren.

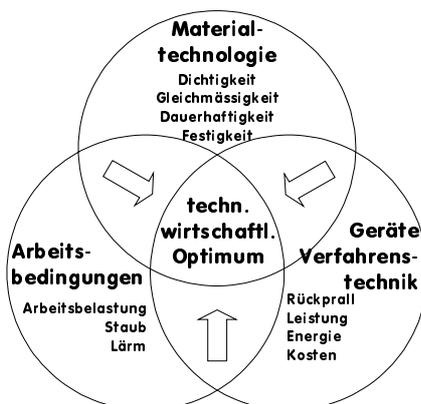


Bild 33: Optimierungspotential der Spritzbetonapplikation

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rezeptur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zuschläge (glatt / gebrochen)</li> <li>- Zusatzmittel und -stoffe</li> <li>- W/Z - Wert</li> <li>- Zement / Spritzbindemittel</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mischer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Typ</li> <li>- Mischzeit</li> <li>- Dosierung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zwischentransport</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transportgerät</li> <li>- Transportzeit</li> <li>- Schutz vor Austrocknung / Regen</li> <li>- Umgebungstemperatur</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umschlag in Spritzmaschine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Umschlagart</li> <li>- Nachmischung</li> <li>- Umschlagzeit</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spritzmaschine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Typ</li> <li>- Art der Förderung</li> <li>- Maschinist / Wartung</li> <li>- Druck</li> <li>- Leistung</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Förderleitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material (Kunststoff / Stahl)</li> <li>- Geometrie (Länge, Krümmungsradien, usw.)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Düsenteknik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- geometrische Form</li> <li>- Art der Luft- bzw. Wasserzugabe</li> <li>- Luft- bzw. Wasserdruck</li> </ul>

Tabelle 9: Einflussfaktoren von Betontechnologie und Verfahrenstechnik auf den Spritzbeton

### 3.6.1 Untergrundbeschaffenheit

Der Untergrund sollte möglichst frei von losem Material sein. Wenn mehrere Lagen Spritzbeton aufgebracht werden, sollte die Oberfläche vorher mit Druckluft und Wasser besprüht werden. Muss der Spritzbeton auf einen weichen, geschichteten, schiefrigen oder sandigen Untergrund aufgetragen werden, ist es ratsam, diesen Untergrund zu konsolidieren und durch eine sehr dünne Spritzbetonschicht zu versiegeln. Damit ist nach dem Erstarren eine Haftbrücke für das Auftragen einer dickeren Lage vorhanden. Bei lockerem Untergrund ist zu beachten, dass nahezu keine Adhäsionskräfte vorhanden sein können. Dann besteht die Gefahr, dass stärkere Spritzbetonschichten im Firstbereich nicht gehalten werden können und als "Sargdeckel" abstürzen. In diesen Fällen muss die Spritzbetonschale sehr sorgfältig von der Sohle nach oben aufgebaut werden. Ferner sollte die Oberfläche vor dem Auftrag der nächsten Lage befeuchtet werden, weil eine sehr trockene Oberfläche dem frisch aufgetragenen Spritzbeton zuviel Wasser entzieht. Andererseits sollte kein Wasser auf der Oberfläche fließen, damit der frische Spritzbeton nicht weggespült wird.

Bei geringerem Wasserfluss ist die Oberfläche vorab mit einer Schicht schnellbindendem Versiegelungsspritzbeton zu überziehen, oder die lokalisierbaren Wasseraustritte müssen drainiert (abgeschlaucht) werden. Dies kann mittels flexibler Halbschalen oder bei grossflächiger Erscheinung mit Hilfe von Noppenfolien erfolgen.

### 3.6.2 Personal

Die erfolgreiche technische und wirtschaftliche Durchführung von Spritzbetonarbeiten hängt nicht nur von der Maschinen- und Systemtechnik ab, sondern ganz entscheidend auch vom Düsenführer. Die Qualifikation und Erfahrung des Düsenführers beeinflusst die Qualität des Spritzbetons und den Rückprall - und damit auch die Kosten - ganz wesentlich. Es ist nicht einfach, qualifizierte Mitarbeiter zu finden, die diese schwere und belastende Arbeit durchführen. Ferner ist es erforderlich, dass Arbeiter im Beschickungsbereich und an der Förderpumpe für gleichmässigen Nachschub sorgen, so dass ein konstanter Materialfluss an der Düse herrscht. Aus diesem Grund versucht man heute, durch Spritzmanipulatoren und durch die Entwicklung von Spritzrobotern den Düsenführer zu entlasten und seine Konzentration auf die Interaktion zwischen Oberfläche und optimaler Applikation zu lenken. Diese Aufgabe kann er aus sicherem Abstand visuell durchführen.

### 3.6.3 Applikationsphasen

Um die angestrebte Optimierung zu erreichen, ist es notwendig, die Phasen der Auftragstechnik zu kennen. Das Auftragen einer Spritzbetonschicht erfolgt in folgenden Phasen:

**Phase I:** Das aus der Düse austretende Material bewegt sich mit hoher Geschwindigkeit zur Tunnelwand. Die leichteren Sandpartikel werden mit höherer Geschwindigkeit zur Wand getragen als die schweren Kiesteile, u.a. bedingt durch den höheren Luftwiderstand. Während dieser Phase des Initialaufpralls werden die grösseren Aggregate zu fast 100 % weggeschleudert. Nur die feinen, mit Zementleim umhüllten Aggregate bilden ein feines Zementmörtelkissen.

**Phase II:** Der folgende Spritzbeton schlägt nun auf das weiche Zementmörtelkissen. Dabei lagern sich in dieser Phase die gröberen Aggregate in das Zementleimmörtelkissen ein, was den Rückprall meist auf unter 20 % reduziert.

Wenn der Spritzbeton in zwei oder mehreren Lagen aufgebracht wird, wiederholen sich diese Phasen bei abgetrockneter Oberfläche.

### 3.6.4 Auftragstechnik

Die verschiedenen Auftragstechniken sind in Bild 34 dargestellt. Die Gewichtskraft des aufgetragenen Spritzbetons bewirkt tendenziell ein Ablösen von der Auftragsfläche, wogegen aber die Haftkräfte des frischen Betons wirken. Der Spritzbeton sollte von unten nach oben aufgetragen werden, weil so die stützende Wirkung des bereits aufgetragenen Betons hinzukommt.

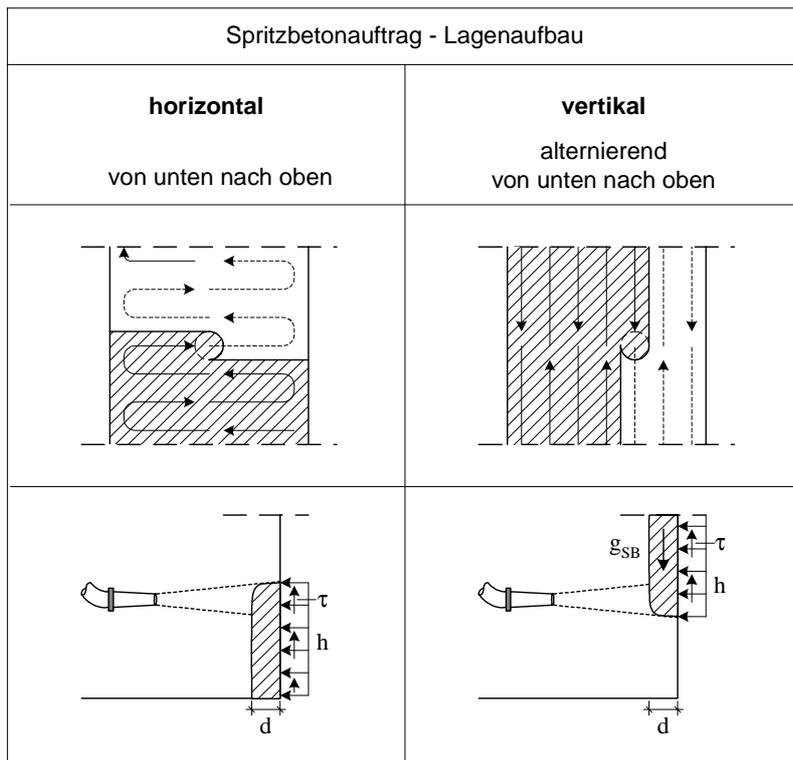


Bild 34: Auftragstechnik [17]

Legende:  $d$ : Spritzbetonschichtstärke [m]  
 $g_{SB}$ : Gewichtskraft der aufgetragenen Spritzbetonschicht  
 $h$ : Haftkräfte zwischen Spritzbeton und Auftragsfläche [ $\text{kN/m}^2$ ]  
 $T$ : Schubkräfte zwischen Spritzbeton und Auftragsfläche [ $\text{kN/m}^2$ ]

Die **Düseneigenbewegung** hat einen grossen Einfluss auf den Spritzbeton. Die vom Spritzstrahl bestrichene Fläche ( $t_{\text{konst}}$ ) nimmt von der starren über die pendelnde zur kreisförmigen Düsenbewegung zu, dadurch wird die Gleichmässigkeit (qualitativ und optisch) verbessert (Bild 35).

Die Auswirkung des Spritzwinkels auf den Rückprall und die Handhabung der Spritzdüse für optimale Spritzbetonqualität sind in Bild 36 und Bild 37 verdeutlicht.

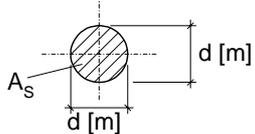
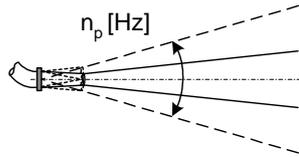
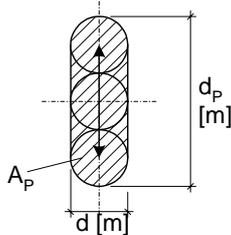
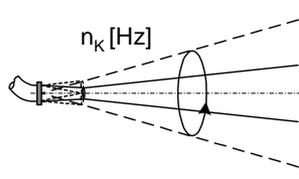
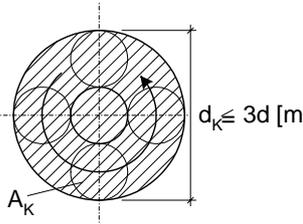
Düseneigenbewegung		Aufspritzfläche
starr		
pendelnd		
kreisförmig		

Bild 35: Düseneigenbewegungen [17]

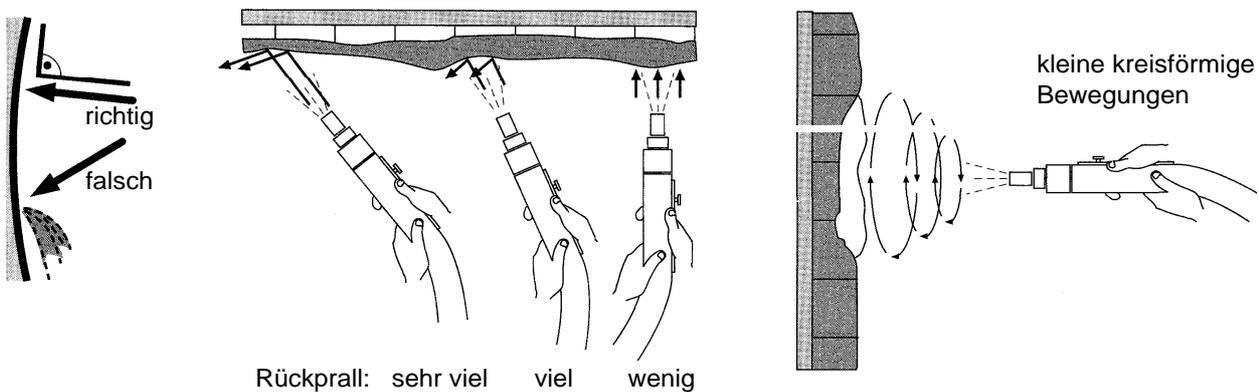


Bild 36: Einfluss des Spritzwinkels auf den Rückprall

Bild 37: Handhabung der Spritzdüse für eine optimale Spritzbetonqualität

Zum Verständnis des Rückprallverhaltens wie auch der Staubentwicklung ist das Strömungsbild sowie die Betrachtung der kinetischen Energie von Wichtigkeit. Das Strömungsbild lässt die Ursachen der **Staubentwicklung** plausibel werden. Der Massenstrom aus Luft und Spritzgut schießt aus der Düse. In der turbulenten

Grenzschicht entstehen Wirbel, die Feinstanteile aus dem Massenstrom reissen und somit einen Feinnebel erzeugen (Bild 38). Ferner wird der **Rückprall** und weiterer Staub durch das seitliche Abprallen des Massenstrahls an der Wand erzeugt, bedingt durch Teilchen, die nicht sofort in die Mörtelmatrix eingebettet werden.

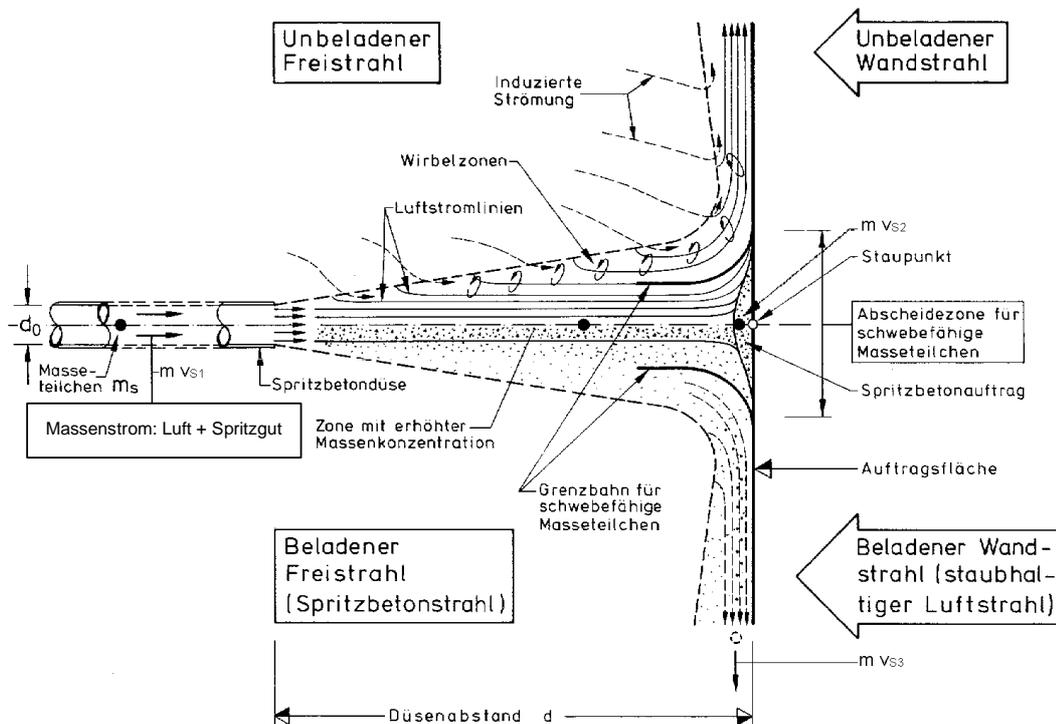


Bild 38: Strömungsbild beim Auftreffen eines Freistrahls auf eine senkrechte Wand [18]

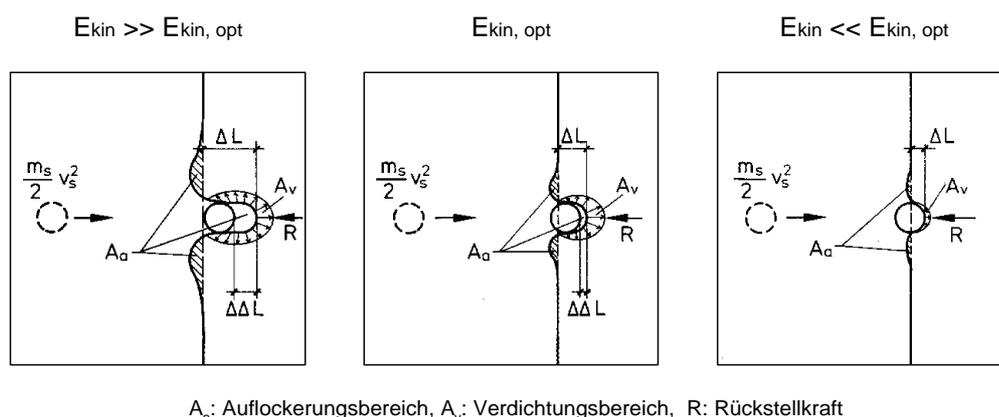


Bild 39: Verdichtungskriterien bei der Spritzbetonherstellung [17]

Die **Dichtigkeit wie auch der Rückprall** lassen sich aus der Betrachtung der kinetischen Energie (Bild 39) wie auch aus dem Impulssatz erklären. Bei zu hoher kinetischer Energie wird ein Rückprallimpuls erzeugt der grösser ist als die Reibungs- und Haftkräfte des

umgebenden Materials, sowie die verbrauchte Formänderungsenergie beim Auftreffen. Bei zu geringer kinetischer Energie wird das Korn nicht ausreichend eingebettet, da die notwendige Formänderungsenergie zum Eindringen und Verdichten fehlt. Die Verluste entstehen durch herunterfallendes Material.

## 3.6.5 Rückprall

### 3.6.5.1 Allgemeines

Der Rückprall wird von folgenden Faktoren bestimmt:

#### **Betontechnologie**

- W/Z - Wert
- Eigenfeuchte der Zuschlagstoffe
- Zementgehalt
- Beschaffenheit der Zuschlagstoffe (rund / splittig)
- Sieblinienverlauf (Anteil von Feinst- und Grobkorn)
- Dosierung der Zusatzmittel
- Art und Dosierung der Zusatzstoffe

#### **Verfahrenstechnik**

- Spritzwinkel
- Neigung der Spritzfläche zur Horizontalen
- Luftmenge
- Düsenabstand zur Auftragsfläche
- Aufprallgeschwindigkeit des Spritzbetons (kinetische Energie (Bild 39))
- Spritzdüsenkonstruktion
- Spritzmethode (Trocken- oder Nassspritzmethode)
- Förderverfahren (Dünn-, Pfropfen- oder Dichtstromverfahren)

#### **Randbedingungen**

- Beschaffenheit der Auftragsfläche (Struktur, Härte)
- mit oder ohne Bewehrungsnetz
- Schichtstärke (sehr dünn, dick)

Verschiedene Einflüsse der Betontechnologie wie auch der Verfahrenstechnik wurden u.a. an der Ruhr - Universität Bochum untersucht. Die Ergebnisse sind abhängig von der verwendeten Maschinenteknik. Die Streubreite der Einflüsse ist jedoch relativ gering, so dass die Ergebnisse qualitativ ihre allgemeingültige Aussagekraft beibehalten. Folgende qualitativen Untersuchungen [1] sollen dargestellt werden:

### Trockenspritzverfahren

- Spritzwinkel und Rückprall
- Neigung der Spritzfläche zur Horizontalen
- W/Z - Wert
- Eigenfeuchte der Zuschlagstoffe
- Zementgehalt
- Luftmenge
- Ort der Wasserzugabe
- Düsenabstand zur Auftragsfläche

### Nassspritzverfahren

- Spritzwinkel und Rückprall
- Neigung der Spritzfläche zur Horizontalen
- W/Z - Wert
- Luftmenge
- Düsenabstand zur Auftragsfläche

#### 3.6.5.2 Trocken- und Nassspritzverfahren

Die Auswirkungen des Spritzwinkels zur Auftragsfläche, wie auch die Neigung der Fläche zur Horizontalen, sind qualitativ unabhängig von der Spritzmethode (Trocken-/ Nassspritzverfahren). Der Rückprall hängt vom Spritzwinkel zur Auftragsfläche ab und wird bei 90° minimal (Bild 36).

Die Zunahme des Rückpralls aus der Veränderung des Spritzwinkels (Bild 40) senkrecht zur Spritzfläche für  $\alpha < 90^\circ$  lässt sich mechanisch erklären. Die kinetische Energie wird in potentielle Energie umgesetzt. Die entstehende Newtonsche Kraft erhält dabei eine Komponente in paralleler Richtung zur Wand. Diese Komponente erhöht die Abprall- bzw. Spritzverluste, was mit kleiner werdendem Winkel potentiell zunimmt.

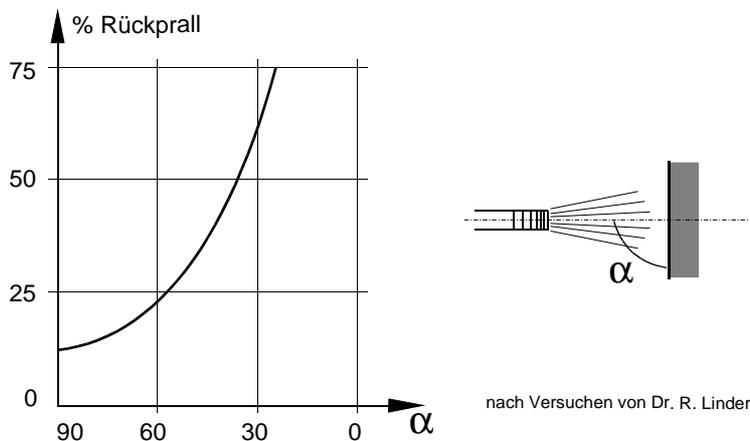


Bild 40: Zusammenhang zwischen Spritzwinkel und Rückprall [19]

Der Rückprall nimmt mit zunehmender **Spritzflächenneigung zur Horizontalen** exponentiell zu (Bild 41). Die wichtigste Ursache liegt in der Komponente der Gravitationskraft der Spritzbetonkörnchen in Abhängigkeit von der Neigung der Auftragsfläche zur Horizontalen.

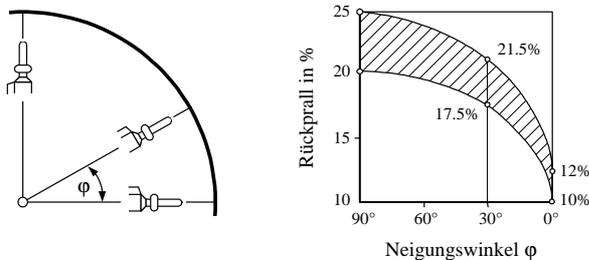


Bild 41: Rückprall in Abhängigkeit der Neigung der Spritzfläche zur Horizontalen [20]

Beim Anspritzen einer vertikalen Fläche stützt sich der neue Beton beim Auftragen von unten nach oben gegen, den zuvor aufgetragenen Schichten ab. Die kinetische Energie bewirkt eine Kraft auf den Frischbeton und wird zum grossen Teil in Verformungsenergie umgewandelt, die den Beton verdichtet. Wird nun Überkopf gespritzt, so wird diese Kraft durch die Gravitationskomponente vektoriell reduziert. Rückprallrichtwerte für das Trockenspritzen sind:

- Überkopf: 25 - 40 %
- vertikale Wand: 15 - 30 %
- nach unten: ca. 0 %

### 3.6.5.3 Trockenspritzverfahren

Mit grösser werdendem **W/Z - Wert** reduziert sich der Rückprall. Dies hängt sicherlich mit der kurzen Mischstrecke in der Mischdüse zusammen. Man erhält mit steigendem W/Z - Wert einen Spritzbeton mit ausreichender Kohäsion zur Reduktion des Rückpralls. Der günstigste W/Z - Wert liegt zwischen 0.45 und 0.55. Beim Trockenspritzverfahren beeinflusst die **Eigenfeuchte der Zuschläge** das Rückprallverhalten (Bild 42). Wenn die Feinstanteile bereits durch die Eigenfeuchte gebunden sind, verringert sich der Rückprall. Dadurch wird die Effizienz der Zugabe des Anmachwassers an der Düse in Bezug auf die Benetzung der Aggregatsoberfläche erhöht. Wenn die Zuschläge staubtrocken sind, können die Feinstanteile nur durch erhöhte Wasserzugabe gebunden werden. Dies ist mit einem Festigkeitsverlust oder höherer Zementdosierung verbunden. Bei zu hoher Eigenfeuchte geht der Vorteil des Trockenspritzverfahrens verloren, da die Gefahr des Abbindens des Gemisches im Schlauch besteht. Die Eigenfeuchte sollte beim konventionellen Trockenspritzverfahren bzw. beim Trockenspritzsystem zwischen 1 - 2 % liegen. Beim neuen NAT - Spritzsystem soll die Eigenfeuchte 5 - 6 % nicht übersteigen.

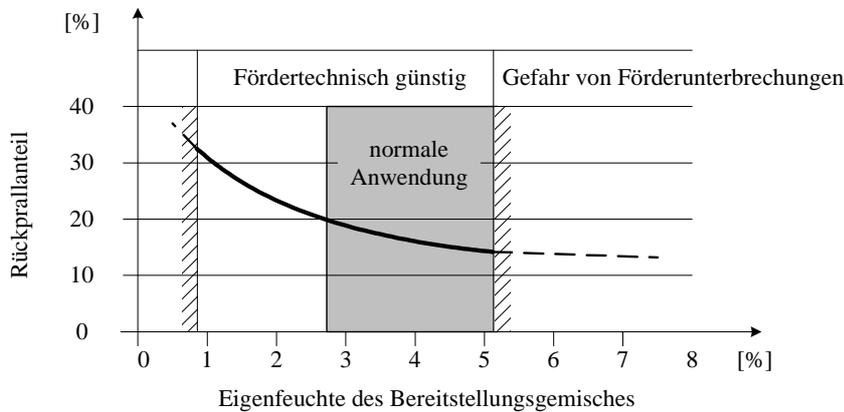


Bild 42: Rückprallverhalten in Abhängigkeit der Eigenfeuchte bei konstantem Gesamtwassergehalt [21]

Der **Zementgehalt** hat einen erheblichen Einfluss auf den Rückprall. Durch eine Erhöhung des Zementgehalts erhöht sich das Zementleimvolumen. Damit steigt die Klebewirkung und der Rückprall reduziert sich. Die Erhöhung des Zementleimvolumens verschlechtert jedoch das Schwindverhalten. Die Erhöhung des Zementgehalts und die Verringerung des Rückpralls beinhaltet einen wirtschaftlichen Gegensatz. Die Kosteneinsparung durch Reduzierung des Rückpralls wird durch teuren zusätzlichen Zement erkauft. Hier muss ein Optimum gesucht werden. Die vorherig genannten Einflussfaktoren beziehen sich auf betontechnologische Faktoren wie Zementgehalt, Eigenfeuchte der Zuschläge und W/Z - Wert, die jedoch verfahrenstechnisch bedingt variieren. Im folgenden werden weitere, rein verfahrenstechnische Einflüsse betrachtet.

Die **Luftmenge** bzw. der Luftdruck bestimmen die kinetische Energie des Massenstroms. Die Kompressorkapazität ist von der zu treibenden Masse im Schlauchquerschnitt abhängig. Die Oberflächenreibung wird bei grösserem Querschnitt nichtlinear verringert. Mit steigender kinetischer Energie steigt die Stossintensität der einzelnen Massenpartikel beim Auftreffen auf die Wand bei gleichem Nettodüsenquerschnitt. Die Erhöhung der Luftmenge verbessert nicht nur die Verdichtung, sondern erhöht auch den Rückprall. Eine zu hohe Luftmenge löst die Bindung der Fein- mit den Grobbestandteilen in der Betonmatrix zum Teil auf. Dadurch kommt es zur Zerstäubung der Feianteile sowie zum impulsartigen Rückprall grösserer Bestandteile. Eine Erhöhung der Luftmenge bei gleichem Nettodüsenquerschnitt hat einen negativen Einfluss auf den Rückprall und die Staubentwicklung. Die fördertechnisch günstigen Luftmengen sind in Tabelle 3 angegeben und hängen von der Spritzbetonfördermenge ab.

Die **Wasserzugabestelle** beim Trockenspritzverfahren kann variiert werden. Mit zunehmendem Abstand von der Düse reduziert sich der Rückprall und erreicht im Abstand von ca. 2.50 m ein Minimum (Bild 43).

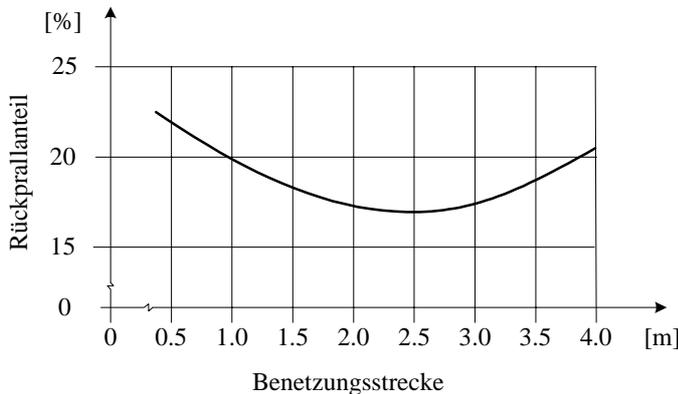


Bild 43: Rückprallanteil in Abhängigkeit der Benetzungsstrecke (Trockenspritzverfahren) [21]

Dies lässt sich phänomenologisch wie folgt erklären:

- Wird das Trockengemisch erst kurz vor dem Austritt aus der Düse mit hoher Fluggeschwindigkeit durch den Sprayvorhang der Wasserzugabe geschleust, erfolgt die Benetzung der Oberfläche auf einer sehr kurzen Einwirkstrecke / -zeit. Eine forcierte Durchmischung durch die turbulente Strömung erfolgt auf der verbleibenden Düsenstrecke nur begrenzt. Dadurch benötigt man meist einen höheren W/Z - Wert, um die Breiigkeit oder Konsistenz zu erhöhen und damit auch die Klebrigkeit.
- Wird das Trockengemisch etwas weiter vor der Düse durch den Sprühvorhang geschleust erfolgt anschliessend eine turbulente Vermischung auf der verbleibenden Rohrstrecke. Durch diese Massnahme wird eine verbesserte Befeuchtung der Aggregatsoberfläche erreicht. Damit ergibt sich eine optimal klebrige Konsistenz, was eine verbesserte Haftung und geringeren Rückprall zur Folge hat.

Ein wesentlicher verfahrenstechnischer Einfluss ergibt sich aus dem **Düsenabstand zur Wand**. Der optimale Düsenabstand zur Wand ist keine feste Grösse sondern von den folgenden Parametern abhängig:

- maximale Aggregatsgrösse
- Siebkurve
- Luftdruck und Geschwindigkeit des aus der Düse austretenden Materials

Beim Trockenspritzverfahren (Bild 47) liegt der optimale Abstand zwischen 1.30 und 1.80 m. In diesem Entfernungsbereich wird aus der kinetischen Energie ein Optimum zwischen Verdichtung und Rückprall gewonnen. Bei einem Abstand von mehr als 1.50 m ist die Energie wegen der Dissipation durch den Luftwiderstand zu gering, so dass sich die Masseteilchen nicht ausreichend in den frischen Spritzbeton einbetten. Ist der Abstand zu klein, wird die kinetische Energie zu gross, so dass das Korn durch den Impulsstoss zurückprallt.

### 3.6.5.4 Nassspritzverfahren

Beim Nassspritzverfahren vergrössert sich der Rückprall mit grösser werdendem **W/Z - Wert**. In Bezug auf diesen Parameter verhält sich das Nassspritzverfahren umgekehrt zum Trockenspritzverfahren. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass beim Nassspritzverfahren das Gemisch schon optimal als Transportbeton angeliefert wird. Der Transportbeton wird mit dem optimalen W/Z - Wert geliefert. Der Zementleim hat die Oberfläche der Aggregate benetzt und umhüllt. Bei einer Erhöhung des W/Z - Wertes wird die Konsistenz des Gemisches zu flüssig. Durch die Zugabe von Druckluft an der Düse werden dann die relativ flüssig - breiigen Feinsteilchen aus Wasser - Zement - Mehlkorn zerstäubt. Dadurch reduziert sich beim Aufprall an der Wand die Haftwirkung und das Gemisch spritzt von der Wand ab und der Rückprall erhöht sich.

Die **Luftmenge** bzw. der Luftdruck bestimmen die kinetische Energie des Massenstroms. Mit steigender kinetischer Energie steigt die Stossintensität der einzelnen Massenpartikel beim Auftreffen auf die Wand. Die Erhöhung der Luftmenge verbessert nicht nur die Verdichtung, sondern erhöht auch den Rückprall. Die förder technisch günstigen Bereiche der Luftmenge sind in Tabelle 3 angegeben.

Das **Dünnstromverfahren** verhält sich hinsichtlich der Luftmenge analog zum Trockenspritzverfahren. Hier wird nicht die angemischte Trockenmasse, sondern das Nassgemisch von der Maschine mit Druckluft durch Flugförderung aus der Düse gespritzt. Für dieses Verfahren eignet sich die Rotorspritzmaschine, die für das Trocken- sowie das Nassspritzverfahren verwendet werden kann. Beim Dünnstromverfahren ist der optimale Düsenabstand zwischen 1.30 - 1.60 m von der Wand (Bild 44). Mit dieser Entfernung wird ein Optimum der kinetischen Energie zwischen Verdichtung und Rückprall gewonnen. Bei grösseren Abständen ist die Energiedissipation durch den Luftwiderstand zu gross, so dass sich die Masseteilchen nicht ausreichend in den frischen Spritzbeton einbetten. Ist der Abstand zu gering, resultiert eine zu grosse kinetische Energie, so dass das Korn durch den Impulsstoss zurückprallt. Das Nassspritzverfahren mittels Dünnstromförderung ist vergleichbar mit dem Trockenspritzverfahren.

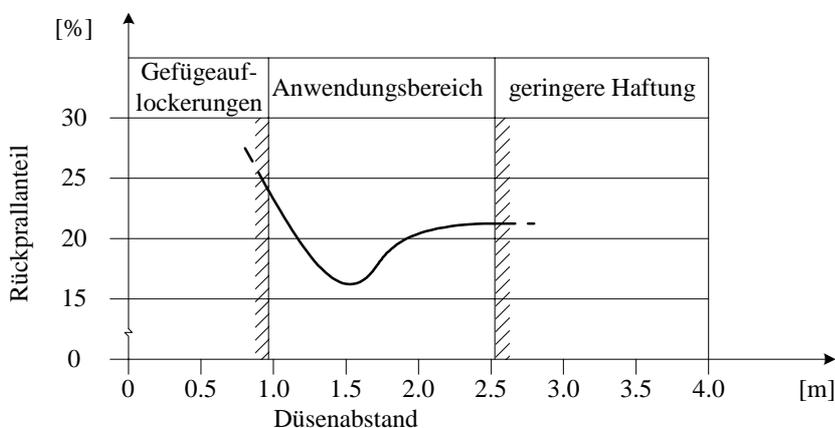


Bild 44: Rückprall in Abhängigkeit des Düsenabstandes (Nassspritzverfahren im Dünnstrom) [21]

Beim **Dichtstromverfahren** wird die Luft zur Beschleunigung des schubgeförderten Materials direkt an der Düse zugesetzt. Das Dichtstromverfahren ist sehr anfällig auf grosse Luftmengen bzw. hohe Luftdrücke. Beide zerreissen das homogene Dichtstromgemisch. Die erhöhte Luftmenge löst die Bindung der Fein- mit den Grobbestandteilen der Betonmatrix zum Teil auf. Dadurch kommt es zum Zerstäuben der Feianteile sowie zum impulsartigen Rückprall grösserer Bestandteile. Eine Erhöhung der Luftmenge hat einen negativen Einfluss auf den Rückprall. Die förderetechnisch günstigen Bereiche der Luftmenge sind in Tabelle 3 angegeben. Ein wesentlicher verfahrenstechnischer Einfluss ergibt sich aus dem **Düsenabstand zur Wand**. Der optimale Düsenabstand von der Wand beträgt beim Dichtstromverfahren ca. 1.50 m (Bild 45). Der Abstand ist geringer als bei den Dünnstromverfahren. Dies ist bedingt durch die etwas geringere Materialgeschwindigkeit des Dichtstromverfahrens, das den fertigen Transportbeton mittels hydraulischer Schubförderung bis zur Düse bewegt. Erst dort wird das Material durch Zugabe von Luft beschleunigt. Um die Reibungsverluste und damit die Verluste der kinetischen Energie gering zu halten, werden dem Spritzbeton im Dichtstromverfahren Verflüssiger zugegeben um den Spritzbeton mit einem geringen W/Z – Wert herzustellen. An der Düse wird dann der Beschleuniger zugegeben. Ohne die Zugabe solcher Lubrikatoren werden oft relativ hohe W/Z - Werte gefahren, die sich im allgemeinen durch starkes Schwinden mit Rissbildung im Beton negativ bemerkbar machen. Dies sollte vermieden werden.

Bei der Wahl des optimalen Düsenabstandes muss man die Erfahrung aus der Praxis berücksichtigen, das bei einem Düsenabstand unter 1.5 m die Oberflächenstruktur, bei der Applikation mittels Manipulator, wellig wird.

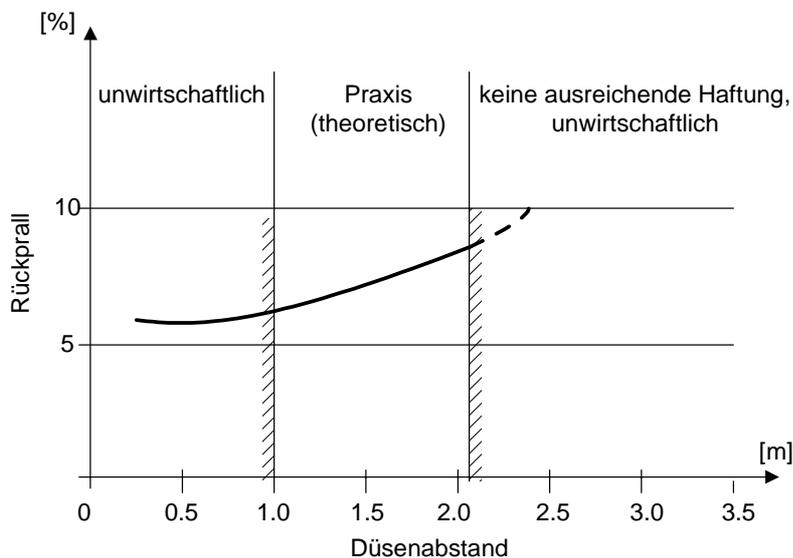


Bild 45: Rückprall in Abhängigkeit des Düsenabstandes (Nassspritzverfahren im Dichtstrom) [21]

### 3.6.5.5 Zusammenfassung

Der Rückprall liegt bei **günstiger Einstellung**, aufgrund von Baustellenuntersuchungen [22], aller wichtigen Einflussparameter in folgender Grössenordnung:

- Trockenspritzverfahren 15 - 25 %
- Nassspritzverfahren - Dünnstromförderung 12 - 15 %
- Nassspritzverfahren - Dichtstromförderung ca. 10 %

Der Rückprall erhöht sich durch Verwendung von Bewehrungsnetzen. Die Bewehrungsstäbe wirken wie Hindernisse in der Flugbahn der Teilchen. Durch die Netze wird der Beton hinter den Netzen in der Regel geringer verdichtet.

### 3.6.6 Staubentwicklung

Die mit der Anwendung des Spritzbetons einhergehende Staubentwicklung kann eine relativ starke **Gesundheitsgefährdung** hervorrufen. Die höchste Staubintensität geht vom Trockenspritzverfahren aus. Die Gefährdung, welche vom Nassspritzverfahren ausgeht, ist jedoch ebenfalls nicht zu vernachlässigen. Daher sind alle Optimierungsmassnahmen in einem ganzheitlichen Zusammenhang zu betrachten um die Belastungen möglichst gering zu halten. Bei der Staubentwicklung sind zwei Bereiche zu unterscheiden:

- Maschinen- bzw. Beschickungsbereich
- Spritzdüsenbereich

Die Staubentwicklung im Maschinen- bzw. Beschickungsbereich ist besonders signifikant beim Trockenspritzverfahren. Die neuen Trockenspritzsysteme (Mixomat, Rombold) beheben dieses Problem durch Einsatz von:

- naturfeuchten Zuschlägen sowie Mischung vor Ort mit Schnellbindeementen (Mixomat)
- trockenen Zuschlägen und Mischung in einem geschlossenen System (Rombold)

Beim Nassspritzverfahren mit angeliefertem Fertigbeton ist die Staubentwicklung im Maschinenbereich vernachlässigbar. Grund dafür ist, dass an der Maschine das fertig durchmischte, mit Anmachwasser versetzte Transportgut aufgegeben wird. Daher ist es notwendig, nicht nur betontechnologische und applikationstechnische Verbesserungen vorzunehmen, sondern auch maschinen- und verfahrenstechnische. Die in den Grafiken dieses Kapitels angegebenen Staubkonzentrationen sind als Relativwerte im Vergleich der Verfahren untereinander zu betrachten. Die Staubkonzentration hängt vom Ort und Abstand zur Düse ab. Die Staubkonzentrationsverteilung im Tunnel ist sehr unterschiedlich. Sie wird durch das Lüftungssystem und durch die Entfernung von der Ausblasöffnung der Lutte stark beeinflusst

### 3.6.6.1 Trockenspritzverfahren [1]

Ein grösserer **W/Z - Wert** verringert den Staubanfall im Düsenbereich, weil eine verstärkte Bindung des Staub- und Mehlanteils mit dem zugegebenen Wasser im Spritzdüsenbereich erreicht wird. Die verfahrenstechnischen Grenzen des W/Z - Wertes liegen zwischen 0.40 - 0.55.

Die **Eigenfeuchte der Zuschlagstoffe** hat beim konventionellen Trockenspritzverfahren einen wesentlichen Einfluss auf die Staubentwicklung im Maschinen- und Materialaufgabebereich. Die Staubentwicklung an der Düse wird nicht signifikant beeinflusst durch die Eigenfeuchte (Bild 46). Eine relativ geringe Eigenfeuchte bindet bereits einen Teil des Mehlkornanteils an die grösseren Körnungen. Dies verbessert die Effizienz der Spraybefeuchtung und Vermischung an der Düse. Die optimale Eigenfeuchte liegt zwischen 3 und 5 %. Bei höherer Eigenfeuchte ergeben sich verfahrenstechnische Probleme durch die Reaktion mit dem Zement im Förderschlauch. Dann kommt es in den Spritzpausen zu Verstopfungen in den Förderleitungen. Die Stärken des Trockenspritzverfahrens können dann verloren gehen. Die neuen Verfahren (konventionelles Trockenspritzsystem - Rombold sowie Neues Trockenspritzsystem - NATS) lösen aber dieses Problem weitgehend im Maschinenbereich.

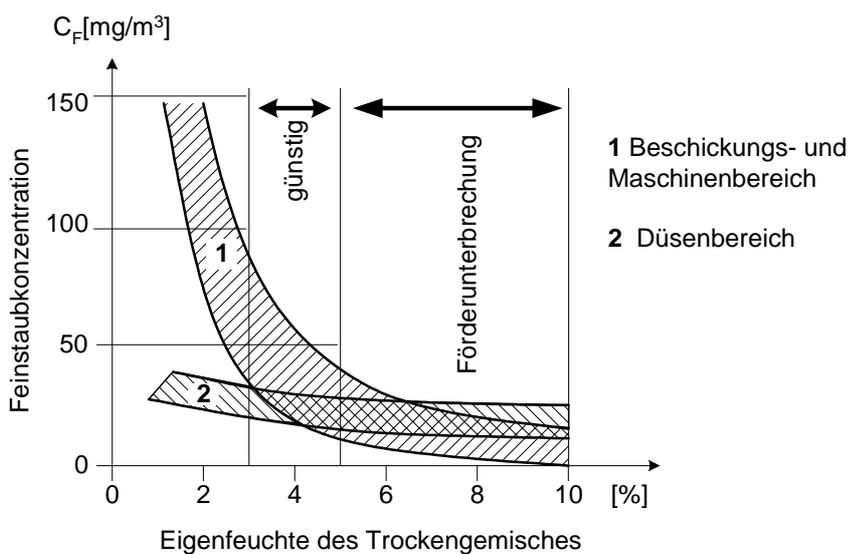


Bild 46: Feinstaubentwicklung in Abhängigkeit der Eigenfeuchte des Bereitstellungsgemisches beim konventionellen Trockenspritzverfahren [18]

Der **Zementgehalt** hat einen starken Einfluss auf die Staubentwicklung, besonders im Aufgabebereich der Maschine. Die Staubentwicklung im Maschinenbereich kann durch entsprechende technische Massnahmen, wie dies teilweise schon bei den neuen Systemen realisiert wurde, drastisch gesenkt werden.

Im Düsenbereich führt die Erhöhung des Zementgehaltes bei konstantem W/Z - Wert zu einer Verringerung des spezifischen Benetzungsgrades des Trockengemisches, da die Oberfläche durch die grössere Menge der Feianteile zunimmt. Dadurch erhöht sich die Staubentwicklung im Düsenbereich.

Die Wirkung der **Betonzusätze** kann sehr unterschiedlich sein. Eine eingehendere, systematische Forschung ist noch durchzuführen. Die verwendeten Abbindebeschleuniger haben meist eine klebende Wirkung. Diese klebende Wirkung müsste bereits auf der kurzen Durchmischungs- und Benetzungsstrecke im Düsenbereich wirksam werden. Bei ausreichender Durchmischungsstrecke ist diese Wirkung wegen der intensiven Kontaktreaktion während der Förderung möglich und kann die Staubkonzentration dadurch herabsetzen. Die verwendete **Luftmenge** hat einen entscheidenden Einfluss auf die gesamte Staubentwicklung. Je höher die Luftmenge, um so höher ist die Staubentwicklung. Sicherlich sind bis heute nicht alle maschinentechnischen und wirtschaftlichen Massnahmen ausgeschöpft worden, um eine ausgewogene Reduzierung zu ermöglichen. Im Maschinenbereich hat der Verschleiss von Dichtringen sowie das Fehlen von Filtern im Bereich der Ausblasöffnungen den grössten Einfluss auf die Staubentwicklung. Im Düsenbereich bedeutet eine grössere Luftmenge gleichzeitig eine höhere Fluggeschwindigkeit beim Passieren des Wassersprayvorhangs. Damit ergibt sich eine geringere Benetzungs- und Durchmischungszeit, und somit werden nach dem Austreten des Gemischs aus der Düse Feinanteile abgelöst, bedingt durch die Sogwirkung aus dem Massenstrahl. Diese treten letztlich als Staubbelastung in Erscheinung. Der fördertechnisch günstige Bereich liegt bei einer Luftmenge zwischen 7 - 12 m<sup>3</sup>/min bei einer Förderleistung von ca. 6 m<sup>3</sup>/h (Tabelle3).

### 3.6.6.2 Nassspritzverfahren

Beim Nassspritzverfahren ist zwischen der Dünn- und der Dichtstromförderung zu unterscheiden. Bedingt durch die fertige Betonmischung [1] ergeben sich die wesentlichen Parameter aus der Konsistenz des Ausgangsgemischs (beeinflusst hauptsächlich durch den W/Z - Faktor), der Luftmenge sowie dem Abstand der Düse von der Wand. Zwischen Rückprall- und Staubentwicklung besteht ein analoges Verhältnis. Mit steigendem **W/Z - Wert** nimmt auch die Staubentwicklung zu. Die Staubentwicklung und der Rückprall an der Düse stehen im ursächlichen Zusammenhang und wurden bereits im Abschnitt über den Rückprall erläutert. Der günstige W/Z - Bereich für das Nassspritzen im Dünnstrom liegt bei 0.50 - 0.55. Dünn- bzw. Dichtstromförderung des Nassspritzverfahrens verhalten sich affin in Bezug auf die **Luftmenge** und die Staubentwicklung. Im Maschinenbereich des Dichtstromverfahrens tritt durch die Verwendung von fertigem Transportbeton und durch die Kolbenpumpenförderung sozusagen keine Staubentwicklung auf. Im Maschinenbereich des Dünnstromverfahrens kommt es durch die Verwendung von Druckluft als Fördermedium im Bereich von verschlissenen Dichtungen und von Ausblasöffnungen zu einer geringen Staubentwicklung. Durch die Verwendung von fertigem Transportbeton bleibt jedoch die Staubentwicklung wegen der Bindung der Feinstanteile im Zementleim gering. Im Düsenbereich nimmt die Staubentwicklung mit der Luftmenge zu. Durch die hohe Geschwindigkeit des Düsenstrahls entstehen Verwirbelungen mit der umgebenden Luft. Dadurch werden Feinpartikel aus dem Strahl herausgerissen und in der Umgebungsluft verteilt. Zusätzlich entsteht Staub durch den Rückprall. Der fördertechnisch günstige Bereich liegt bei einer Luftmenge zwischen 3 - 4.5 m<sup>3</sup>/min bei ca. 10 m<sup>3</sup>/h Fördermenge (Tabelle 3).

### 3.6.7 Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit

Festigkeit, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit des fertigen Spritzbetons hängen von beton-technologischen, material- und verfahrenstechnischen Parametern ab. Die beton-technologischen und materialtechnischen Parameter wurden bereits diskutiert, im besonderen die Wirkung der Zuschläge. Der Dichtigkeit und der Dauerhaftigkeit wird man in Zukunft eine immer grössere Bedeutung beimessen. Die Wirkung einiger verfahrenstechnischer Parameter für das **Trockenspritzverfahren** soll hier exemplarisch aufgezeigt werden. Der Düsenabstand von 1.50 m stellt nicht nur ein Optimum hinsichtlich der Rückprallreduzierung, sondern auch der Druckfestigkeit dar (Bild 47).

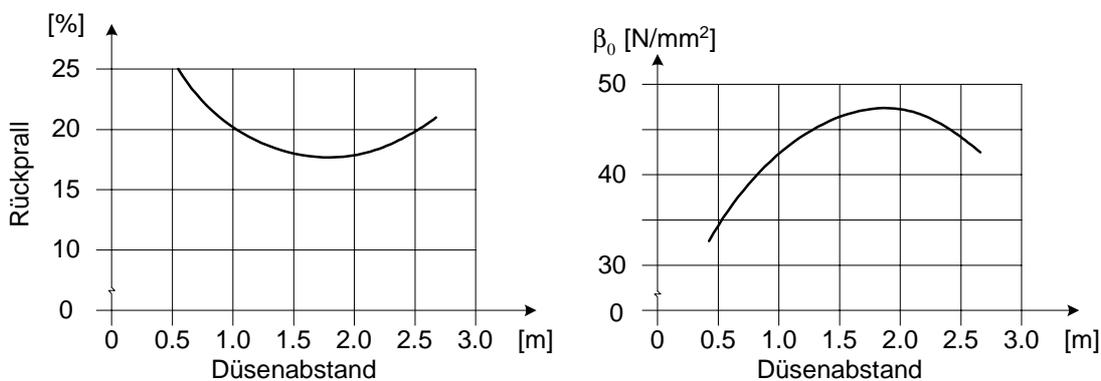


Bild 47: : Rückprall und Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Düsenabstandes (Trockenspritzverfahren) [17]

Die Druckluft liefert die kinetische Energie zur Verdichtung des Spritzbetons. Mit steigender Luftmenge verringern sich jedoch (innerhalb des günstigen Förderbereichs) die Druckfestigkeit und die Festbetonrohddichte durch die verstärkte rückstossende Impulswirkung leicht, dies trotz erhöhter Verdichtungsenergie. Die optimale wirtschaftliche Luftmenge ergibt sich aus der gesamtheitlichen Betrachtung aller Einflüsse, wie z. B. Rückprall, Staubentwicklung, etc. [23].

Diese Überlegungen lassen sich auf das **Nassspritzverfahren** übertragen. Da der Spritzbeton wesentlich von verfahrenstechnischen Parametern abhängt, die durch individuelle Handhabung sehr starken Streuungen unterworfen sind, unterliegt die **Qualität** starken statistischen Schwankungen (Bild 48). Dies drückt sich durch einen wesentlich höheren Variationskoeffizienten gegenüber Normalbeton hinsichtlich der Festigkeit aus. Die weiten Streuungen müssen aus heutiger Sicht, besonders wenn der Spritzbeton eine permanente Funktion übernimmt, auf die Grössenordnung des Normalbetons reduziert werden. Dazu ist es notwendig, einen wesentlichen Anteil der subjektiven, individuellen Beeinflussung zu reduzieren. Dies kann durch eine **Teilrobotisierung** der wesentlichen verfahrenstechnischen Vorgänge erreicht werden. Zur Zeit wird in einem gemeinsamen Forschungsprogramm zwischen Industrie und ETH ein solches Applikationssystem für den Einsatz in Grossprojekten entwickelt (NEAT, etc.).

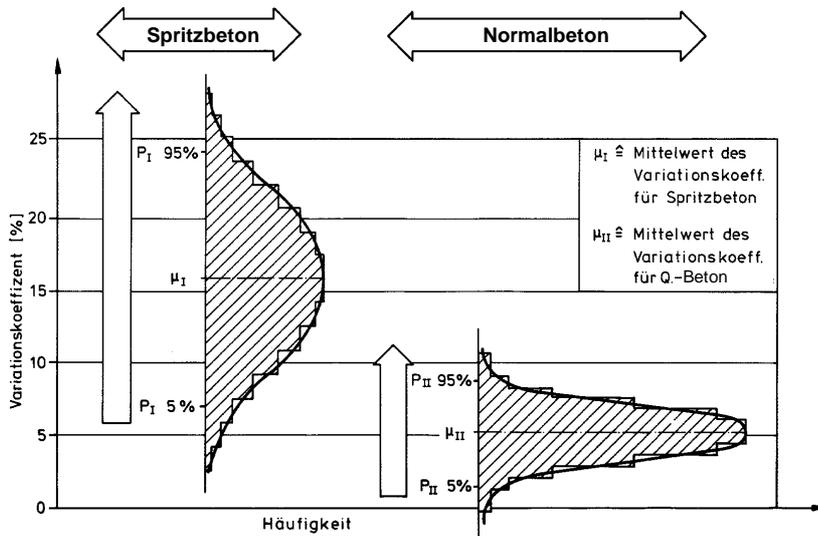


Bild 48: Verbesserung des Streuungsverhaltens bei der Herstellung von Spritzbeton unter definierten Bedingungen [23]

### 3.6.7.1 Festigkeit des jungen Spritzbetons

Die Frühfestigkeit des Spritzbetons hat für die Arbeitssicherheit im Untertagebau eine zentrale Bedeutung. Daher unterteilt man die jungen Spritzbetone hinsichtlich ihrer Festigkeitsentwicklung [13] (Bild 49).

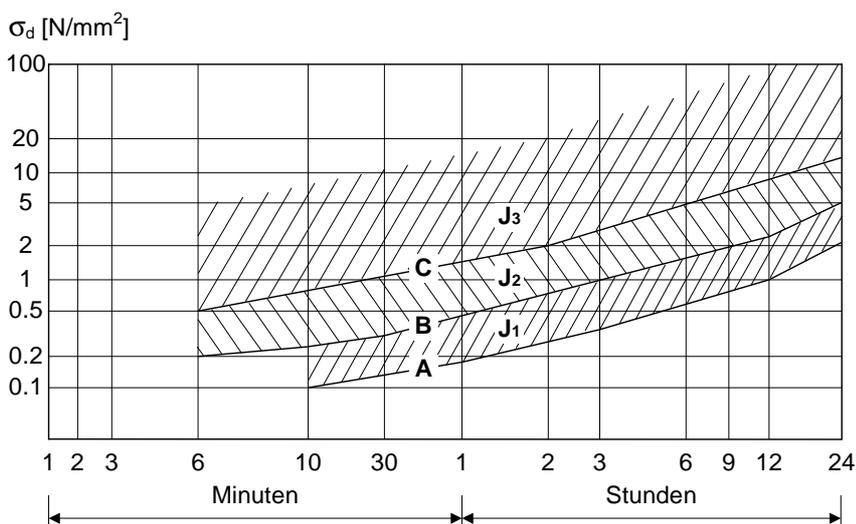


Bild 49: Frühfestigkeit des jungen Spritzbetons [13]

Die drei Bereiche J1, J2 und J3 (Bild 49), werden wie folgt unterschieden:



- Spritzbeton J1 eignet sich für den Auftrag in dünnen Lagen auf trockenem Untergrund. Es werden keine besonderen statischen Anforderungen in den ersten Stunden gestellt. Da die Erhärtung nicht plötzlich voranschreitet, ist der Rückprall und die Staubentwicklung meist geringer.
- Spritzbeton J2 eignet sich, wenn der Auftrag möglichst schnell in dicken Lagen und auch über Kopf erfolgen soll. Er eignet sich bei Wasserandrang und direkt folgenden Arbeitsgängen, wie Bohren und Sprengen. Ferner gilt diese Anforderung auch in Fällen, in denen die schnelle Entwicklung des Ausbauwiderstands erforderlich ist.

Spritzbeton J3 eignet sich zum Einsatz in stark nachbrüchigem Gebirge und bei stärkerem Wasserandrang. Wegen der sofort einsetzenden Erstarrung und Festigkeitsentwicklung entsteht mehr Staub und Rückprall. Daher sollte Spritzbeton J3 nur in Sonderfällen eingesetzt werden.

### 3.6.7.2 Schwindverhalten und Nachbehandlung von Spritzbeton

In der Forschungsarbeit "Schwinden von Spritzbeton" [24] wurde das Schwindverhalten von Spritzbeton untersucht und mit dem Schwinden von konventionellem Beton verglichen. Dabei wurde der Spritzbeton sowohl im Trocken- als auch im Nassspritzverfahren hergestellt. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit werden nachstehend zusammengefasst:

- In den durchgeführten Trocken- und Nassspritzversuchen konnte der gleiche Schwindverlauf wie bei herkömmlichem Beton festgestellt werden.
- Das Schwindmass von Spritzbeton ist deutlich höher als beim herkömmlichen Beton. Die Ursache liegt einerseits am höheren Mehlkorngelalt, andererseits wird der Spritzbeton im Regelfall dünnflächiger aufgetragen und erfährt somit eine intensivere Austrocknung.
- Eine beschleunigte Trocknung des Spritzbetons infolge der Lüftungssysteme im Untertagebau hat ein grösseres Schwinden und damit die Gefahr der Rissebildung zur Folge.
- Beim Spritzbetonauftrag auf Altbeton ergeben sich Probleme des Verbundes zwischen altem und neuem Beton. Diese Probleme sind einerseits Haftprobleme und andererseits Druckspannungsübertragungsprobleme durch das unterschiedliche Kriechverhalten zwischen Alt- und Neubeton. In der Anschlussfuge zwischen Alt- und Neuspritzbeton entstehen wegen der unterschiedlichen Schwindmasse Scherspannungen. Wird die Haftzugfestigkeit in den Anschlussfugen überschritten, entstehen Ablösungen bzw. Hohlstellen und die Kraftübertragung zwischen Spritzbeton und Unterlage ist nicht ausreichend gewährleistet.
- Die Nachbehandlung wirkte sich auf das Schwindverhalten positiv aus. Ständiges Feuchthalten des Spritzbetons während der ersten 7 Tage verursacht eine Verringerung des Schwindens, wobei der Schwindvorgang so lange hinausgezögert wird, bis der Zementstein ausreichend erhärtet ist, um die Spannungen infolge Schwindens aufnehmen zu können.

Für Spritzbeton gelten im Prinzip die gleichen Nachbehandlungsregeln wie für Normalbeton. Die Nachbehandlung im Tunnel, falls sie erforderlich ist, ist wesentlich

schwieriger. Spritzbeton sollte wie Beton unter optimalen ambienten Verhältnissen erhärten, um die volle Festigkeit und Dauerhaftigkeit zu entwickeln. Besondere Beachtung ist dünnen Spritzbetonschichten zu schenken, da diese sehr schnell austrocknen. Wichtig ist dabei die schon erwähnte Vorbenetzung des Untergrundes. Meist ist keine Nachbehandlung bei einem Tunnelklima von über 70 % Luftfeuchtigkeit erforderlich [25]. Beachtung sollte jedoch der permanenten Lüftung gewidmet werden, die dem frischen Spritzbeton die notwendige Feuchtigkeit teilweise entziehen kann. Werden diese Regeln nicht beachtet, treten vermehrt Schwindrisse auf, welche die Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit beeinträchtigen, oder dem Spritzbeton fehlt in der Hydratationsphase Wasser um die volle Festigkeit zu entwickeln. Ist eine Nachbehandlung aufgrund des Tunnelklimas erforderlich, so kann dies einerseits mit einem Feinst - Wassersprühnebel während der Hydratationsphase erfolgen oder durch Versiegelung der Oberfläche mittels Wachs oder Film. Bei den letztgenannten Materialien ist darauf zu achten, dass sie bei mehrlagigen Spritzbetonschichten nicht angewendet werden können, da sie eine Trennschicht verursachen falls diese nicht entfernt wird.

### **3.6.7.3 Verhalten von Spritzbeton unter hohen und tiefen Temperatureinwirkungen**

Zum Thema "Einfluss von tiefen Temperaturen auf die Qualität des Spritzbetons" wurden am IBB an der ETH Zürich in Kooperation mit dem Versuchsstollen Hagerbach zwei Forschungsarbeiten durchgeführt. In der ersten Untersuchung [26] wurde der Einfluss von Temperaturschwankungen bis unter den Gefrierpunkt unmittelbar nach der Applikation des Spritzbetons auf die Eigenschaften des Spritzbetons untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bei andauernd tiefen Temperaturen während 8-40 Stunden, die zum einmaligen Gefrieren des frisch applizierten Spritzbetons führen, wird die Betonfestigkeit bleibend um 20-50% im Vergleich zur Nullprobe (d.h. unter normalen Bedingungen abgebundener Spritzbeton) verringert.
- Tritt der Frost zyklisch ein zweites oder drittes Mal unmittelbar danach auf, wird die Druckfestigkeit jeweils um weitere 5-10% vermindert.
- Der Festigkeitsanstieg zwischen dem 28. und dem 90. Tag ist bei gefrorenem Beton deutlich grösser als beim Nullbeton, d.h. eine Erholung resp. Nacherhärtung ist feststellbar.

In einer zweiten Untersuchung [27] wurde der Einfluss einer unterschiedlich langen Abkühlung auf verschiedene Temperaturstufen im Bereich des Gefrierpunktes auf frisch applizierten Spritzbeton untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind wie folgt:

- Gefriert frisch applizierter Spritzbeton auf Temperaturen von  $-2,5\text{ °C}$  und tiefer, wird dessen Gefüge gravierend geschädigt, was zu einer Festigkeitseinbusse von 20-50% führt.
- Je länger die Gefrierdauer innerhalb der ersten drei Tage und je grösser die Anzahl Frostzyklen, desto grösser fällt die Schädigung aus.
- Bei einer Abkühlung, die  $0\text{ °C}$  nicht unterschreitet, erfolgt eine eindeutig positive Beeinflussung des Spritzbetons, die zu Festigkeitssteigerungen führt.
- Die Temperaturgrenze zwischen negativem und positivem Einfluss liegt zwischen  $0\text{ °C}$  und  $-2.5\text{ °C}$ .

Im Rahmen eines Forschungsprojektes [28] wurde im Hinblick auf die geplanten Basistunnel der neuen Alpentransversale der Einfluss von Gesteinstemperaturen von bis zu 50 °C auf das Abbindeverhalten und die Qualität des Spritzbetons untersucht. Dabei stand eine umfangreiche Ermittlung der Festbetoneigenschaften im Vordergrund. Um die Versuche möglichst realitätsnah durchzuführen, wurden diese im Versuchsstollen Hagerbach durchgeführt. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Wärmebehandlung im Temperaturmedium 60 °C hat einen positiven Einfluss auf die Frühfestigkeiten des Spritzbetons; sie erhöht die Frühfestigkeit in der Größenordnung von 5-10% gegenüber von Spritzbeton der bei ca. 15 °C abhärtet. Die Abbindezeit von Spritzbetons mit Beschleuniger setzen bei 15 °C wie bei 60 °C gleichzeitig ein.
- Im Temperaturmedium von 60 °C liegen die Endfestigkeiten rund 25% niedriger.

### 3.6.8 Stahlfaserspritzbeton

Als Stahlfaserspritzbeton bezeichnet man einen Beton, in welchem die Bewehrung durch einzelne „Fasern“ ersetzt werden. Im Gegensatz zur regelmässigen Netzgeometrie ist die Verteilung der Stahlfasern zufällig. Durch die Verwendung von Stahlfasern im Spritzbeton (Bild 50) werden folgende Verbesserungen erreicht:

- die Duktilität wird erhöht
- die Druck- und Zugfestigkeit wird erhöht
- die Rissbildung wird reduziert
- Einsparung der Bewehrung und dadurch Reduzierung des Rückpralls infolge der Bewehrung.

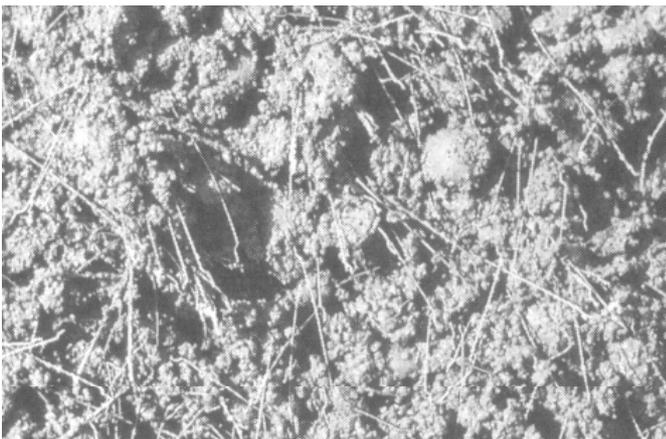


Bild 50: : Im Beton „gleichmässig“ verteilte Stahlfasern [29]

Dem Spritzbeton können verschiedene Arten von Stahlfasern zugegeben werden. Die brauchbarsten Parameter zur Beschreibung der Fasern sind (Bild 51):

- Zugfestigkeit der Faser

- Form der Faser
- Länge und Durchmesser

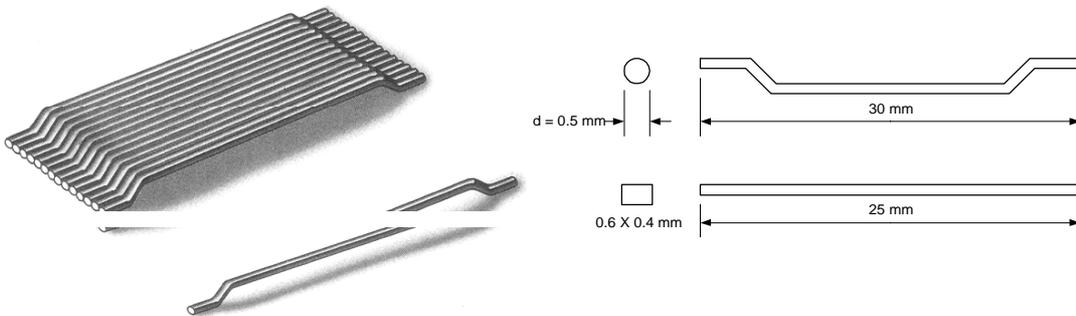


Bild 51: Beispiele von Stahlfasern aus kaltgezogenem Stahldraht [29]

Um die Applizierbarkeit des Stahlfaserspritzbetons sicherzustellen, liegt die optimale Menge der Faserzugabe bei 40 - 90 kg/m<sup>3</sup> Beton. Die gleichmässige Verteilung der Fasern im Beton ist eine Grundbedingung für qualitativ hochstehenden Spritzbeton. Das l/d – Verhältnis der Fasern ist verarbeitungstechnisch sehr ungünstig weshalb heute meistens geklebte Bündel mit 30 - 50 Fasern (Dramix Stahlfasern) zugegeben werden. Diese Stahlfaserbündelchen sind wasserlöslich verklebt, welche sich ohne Probleme mit den Zuschlagstoffen mischen lassen. Dies erfordert weder für Trocken- noch für Nassspritzbetonmischungen ein Spezialequipment. Sobald der mechanische Mischvorgang beginnt, verteilen sich die Bündelchen in der Mischung und lösen sich durch die Feuchtigkeit und den Reibungseffekt (scheuern) zwischen den Zuschlagsaggregaten und den Bündelchen in einzelne Stahlfasern auf. Nach dem sorgfältigen Durchmischen (Mischzeit und ausreichende Mischenergie) ist die Spritzbetonmischung homogen mit Stahlfasern durchsetzt.

Für Trockenspritzbetonmischungen wird ein Spezialkleber verwendet, der sich bereits bei 3 - 6 % Zuschlagstofffeuchtigkeit auflöst. Stahlfasern mit aufgebogenen Enden ergeben einen verbesserten Verbund bzw. eine verstärkte Verankerung. Beim Stahlfaserspritzbeton wird die Rezeptur nach den gleichen Grundsätzen wie beim normalen Spritzbeton aufgebaut. Folgende baubetriebliche Möglichkeiten können zur Herstellung des Stahlfaserspritzbetons ausgewählt werden:

- Herstellung des Stahlfaserbetons in einem Betonwerk mittels Zwangsmischer und anschliessendem Transport in einem Fahrmischer oder LKW zur.
- Zugabe der Stahlfasern in die Betonmischung im Fahrmischer als letzte Komponente auf der Baustelle.
- fertige Trockenmischung einschliesslich Stahlfasern und möglichen anderen Zusatzstoffen wird auf der Baustelle direkt in die Trockenspritzmaschine oder beim Nassspritzverfahren in einen Mischer gegeben.

Diese Prozesse sind bei Trocken- sowie bei Nassspritzbeton möglich. Der Vorteil der geklebten Stahlfaserbündelchen ist, dass sie direkt ins Gemisch gegeben werden können, ohne dass die befürchtete Igelbildung (Zusammenballung) der Stahlfasern zu erwarten ist. Durch die Zugabe wird das Stahlfaserspritzbetongemisch gegenüber konventionellem Spritzbeton sehr steif. Die visuelle Erscheinung sowie der Ausbreittest (slump) sind keine

guten Indikatoren für die Verarbeitbarkeit beim Stahlfaserspritzbeton. Mischungen, die steif erscheinen und ein niedriges Ausbreitmass aufweisen, lassen sich trotzdem gut verarbeiten. Daher sollte man das Ausbreitmass mit und ohne Stahlfasern messen. Eine exzessive Zugabe von Wasser hat wie bei jedem Beton eine Herabsetzung der Festigkeit zur Folge. Wenn es erforderlich wird, die Verarbeitbarkeit bei Nassspritzbeton zu verbessern, sind Plastifizierungszusätze angezeigt, die den Wassergehalt reduzieren. Die Applikation kann nach den gleichen Regeln wie bei normalem Spritzbeton erfolgen. Mit steigender Faserzugabe ( $> 60 \text{ kg/m}^3$ ) nimmt der Verschleiss der Geräteteile (Dichtungen, Leitungen, Düse), die mit dem Stahlfaserspritzbeton in Berührung kommen, nichtlinear zu. Mit Stahlfaserspritzbeton (Bild 64) kann man im Tunnelbau wirtschaftliche Vorteile gegenüber einer Spritzbetonschale mit einlagiger oder mehrlagiger Bewehrung erreichen, falls die erforderlichen projektspezifischen statischen Werte der Stahl- und Spritzbetonschale äquivalent sind. Muss Bewehrung verlegt werden, ist dies meist aufwendiger, falls nicht Billiglohnsunternehmen eingesetzt werden - als eine Stahlfaserspritzbetonschale aufzuspritzen. Der Kubikmeterpreis des Stahlfaserausgangsgemischs ist wesentlich teurer als Normalbeton. Die betriebswirtschaftlichen Ersparnisse ergeben sich durch:

- geringeren Rückprall (bei der Bewehrung erhöht sich der Rückprall),
- die Stahlfaserspritzbetonschale kann man je nach Stärke in einem Arbeitsgang auftragen, gegenüber drei Arbeitsgängen bei der Bewehrung.

Dadurch kann möglicherweise die Zykluszeit reduziert und damit das Gesamtprogramm gestrafft werden, einhergehend mit den Kostenersparnissen aus den Allgemeynkosten der Baustelle. Stahlfaserspritzbeton lässt sich auch zur Instandsetzung und Verstärkung von Bauwerken wirtschaftlich einsetzen.

## 4. Ausführung von Spritzbeton in druckhaftem Gebirge

Bei der Anwendung von Spritzbeton in druckhaftem Gebirge besteht die Gefahr des Abplatzens der Schale. Der Grund für dieses Phänomen liegt im allmählichen Druckaufbau in der Schale durch deren Ausbauwiderstand infolge der Verformung des Gebirges. Dadurch kann die Membrankraft so anwachsen, dass es zum Ausbeulen der Schale verbunden mit einem plötzlichen Abplatzen grosser Schalenteile kommt. In der Praxis versucht man diesem Problem zu begegnen, indem man die Spritzbetonschale in Längsrichtung durch Deformationsstreifen schwächt und so die Schale an definierten Punkten im Querschnitt verformbar macht. Dies kann konstruktiv durch Schwächungen in Längsrichtung wie folgt erreicht werden:

- Streifenweiser Einbau von Dilatationsrohrelementen, die eine definierte Verformbarkeit durch Beulen aufweisen (Bild 52).
- Einen 15 - 30 cm breiten, dünneren Spritzbetonstreifen (Bild 53, Bild 54).



Bild 52: Dilatationsrohrelemente

Diese Schwachstellenstreifen (Dilatationsschlitz) werden je nach den Deformations-  
 erfordernissen in den Fünftelpunkten eingebaut. Die zwischen den Dilatationsschlitz-  
 liegenden Spritzbetonschalenelemente werden mit Ankern kraftschlüssig mit dem Gebirge  
 verbunden.

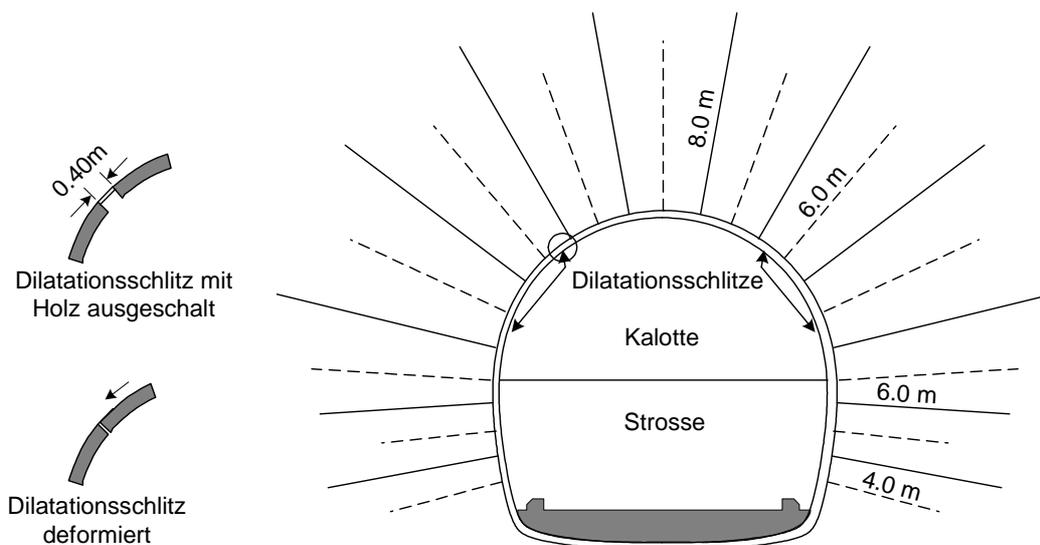


Bild 53: Spritzbeton – Dilatationsschlitz [30]

Dadurch erhält das Gebirge eine Bewehrung. Durch die Gebirgsverformung tritt in den  
 Ankern eine Vorspannung auf, die graduell die Festigkeit des Gebirges um den  
 Ausbruchrand erhöht. Aufgrund von Deformations- und Dehnungsmessungen an den  
 Ankern und der daraus abgeleiteten Deformationskonvergenz muss frühzeitig das  
 Nachankern angeordnet werden, um ein Versagen der Anker möglichst zu vermeiden.  
 Nachdem die Deformationen soweit abgeklungen sind, dass der Ausbauwiderstand den  
 verbleibenden Gebirgsdruck aufzunehmen vermag, können die Dilatationsschlitz  
 kraftschlüssig geschlossen werden.

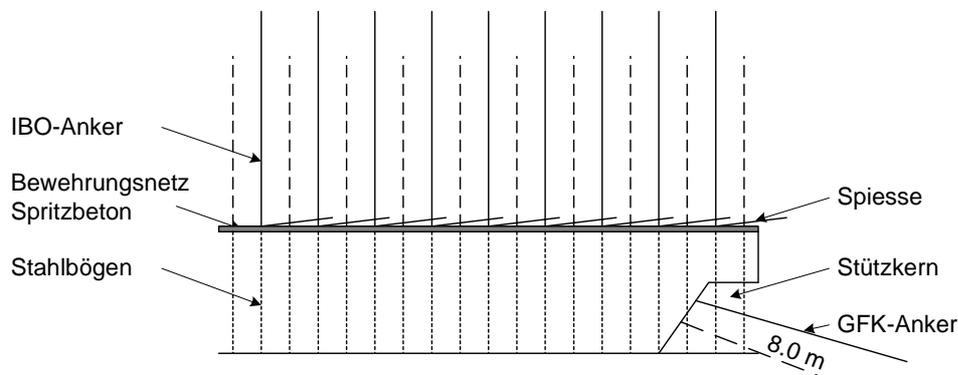


Bild 54: Spritzbeton – Dilatationsstreifen [30]

Bei druckhaftem Gebirge mit grossen Deformationen werden jedoch oft duktile Stahlbögen eingesetzt. Diese müssen jedoch seitlich aufgrund der hohen Normalkraftbelastung gegen Knicken gesichert werden. Dies erfolgt durch seitliche Streben (Holz, Stahl) in Tunnelängsrichtung zwischen den Ausbaubögen um die Knicklänge der elastisch gelagerten Bögen zu reduzieren. Diese seitliche Stützung kann relativ einfach auch durch Spritzbeton erfolgen mit den beschriebenen offenen Dilatationsschlitten. Beide Methoden wurden erfolgreich von österreichischen Tunnelbauern angewandt.

## 5. Arbeitssicherheit

Neben den vielfältigen unternehmerischen und technischen Aufgaben und Verantwortung im Rahmen der Ausführung und Herstellung eines Bauprojektes ist der Bauingenieur für die Arbeitssicherheit seiner Mitarbeiter zuständig. Die projektbezogenen Wirtschaftlichkeitskriterien müssen ausreichend die humanitären Anforderungen der Arbeitssicherheit berücksichtigen. Die berufsbedingten gesundheitsschädigenden Einwirkungen müssen so reduziert werden, dass keine Kurz- und/oder Langzeitschäden bei den Arbeitnehmern entstehen. Zur Sicherstellung dieser Grundanforderung sind die in der EU sowie in den jeweiligen Ländern gültigen Arbeitssicherheitsvorschriften zu beachten.

Die wesentlichen Gefahren bei der Spritzbetonherstellung sowie deren Auswirkungen und Risiken sind in Tabelle 10 dargestellt.

Bereich	Gefährdung oder Belastung durch	Ursache Entstehungsort	Gefährdungsgrad Gefährdungsdauer Wirkungsbereich
<b>Maschine</b>	Mineral- und Zementstaub	Beschickung am Einfülltrichter Auspuff der Rotorkammer Reinigung der Maschine mit Druckluft	leichte Gefährdung, ständig im Umkreis von 10 m
	Staub von ätzenden Chemikalien	Umschlag des Erstarrungsbeschleunigers	leichte Gefährdung, dauernd im Umkreis von 2 m
	Lärm	Abblasen der Druckluft aus den Rotorkammern am Auspuff	in geschlossenen Räumen mittlere Gefährdung im Umkreis von 10 m
<b>Leitung</b>	„verirrte“ Schlauchenden und Kupplungen	Ausblasen der Leitungen, ohne diese zu fixieren	Mittlere bis schwere Gefährdung, selten
	ausgeschossene Stopfer	Ausblasen von Stopfern	Mittlere bis schwere Gefährdung, selten
	Platzen von Schlauch und Leitungsverbindungen	Öffnen der Kupplungen unter Druck	Mittlere Gefährdung, selten
<b>Spritzdüse</b>	Mineral und Zementstaub	in der ausströmenden Transportluft fein verteilter Mineral- und Zementstaub	leichte bis mittlere Gefährdung, dauernd im Umkreis von 10 m
	Staub und ätzende Chemikalien	in der ausströmenden Transportluft fein verteilter Staub von pulverförmigem Erstarrungsbeschleuniger	Mittlere Gefährdung, dauernd im Umkreis von 10 m
	Lärm	expandierende Luft an der Düse	Mittlere Gefährdung, dauernd im Umkreis von 10 m
	Rückprall	rückprallendes Material	leichte Gefährdung, dauernd im Umkreis von 10 m
	herabfallende Steine	verschiedene	starke Gefährdung
	Sturz vom Gerüst bzw. von der Schaufel	ungesicherter Standort	Mittlere bis schwere Gefährdung

Tabelle 10: Gefahren bei der Spritzbetonherstellung [31]

Im Rahmen dieser Gefahren sind verfahrenstypisch besonders hervorzuheben:

- mechanische Schäden (platzende Leitungen, etc.)
- Ätzwirkung der meisten Abbindebeschleuniger (basisch, pH 12 - 13)
- Staubentwicklung
- Schallbelastung durch die Druckluft, diese liegt bei ca. 90 dB(A) im Düsenbereich und bei ca. 110 dB(A) im Maschinenbereich beim Trockenspritzverfahren wenn keine besonderen Massnahmen getroffen werden.

Die notwendigen passiven Massnahmen sind:

- Regelmässige Kontrolle des ganzen Druckbereichs und sachgerechte Wartung von Geräten und Leitungen.
- Gehörschutz
- Schutzhandschuhe und -brille
- Staubschutzhelm (Bild 55) oder Mundschutz und Brille

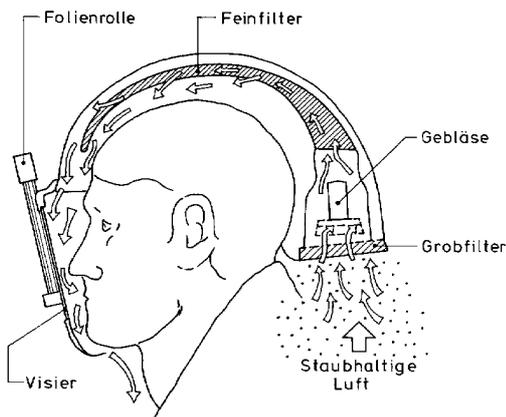


Bild 55: Spritzbetonschutzhelm (Firma Optac W. Welttin)

Der sicherste Schutz ist jedoch der aktive, d.h. die Schadstoffe an Ort und Stelle, wo sie freigesetzt werden, zu vermeiden oder abzufangen.

## 6. Maschinentechnik

Unter den angegebenen, ausgewählten Links sind die neusten Maschinen und Geräte einiger namhafter Anbieter zu finden:

[www.aliva.com/bau/index.html](http://www.aliva.com/bau/index.html)

[www.ugc.mbt.com](http://www.ugc.mbt.com)

[www.pmw.de/d/produkte/cpd/default.asp](http://www.pmw.de/d/produkte/cpd/default.asp)

[www.cifa.com](http://www.cifa.com)

[www.normet.fi/main.html](http://www.normet.fi/main.html)

Die Applikation von Spritzbeton mittels Hand - Manipulation, d.h. die Spritzdüse wird von einem Spritzdüsenführer von Hand geführt, ist auf eine Leistung von 6 - 8 m<sup>3</sup>/h begrenzt. Der notwendige Kraftaufwand für den Düsenführer übersteigt dessen körperliche Dauerleistungsfähigkeit - bedingt durch das Gewicht der Düse, die mit Beton gefüllt ist und dem dynamischen Rückstoss - mit der Folge von Applikationsfehlern und Qualitätseinbussen. Aufgrund der erforderlichen grossen Leistungen von über 6 - 8 m<sup>3</sup>/h werden heute im Tunnelbau häufig Spritzmanipulatoren eingesetzt. Der Arbeitsbereich

eines Spritzarms (meyco) ist in Bild 55 dargestellt. Diese Spritzmanipulatoren, die hauptsächlich beim Nassspritzverfahren verwendet werden, haben folgende Vorteile:

- Erhöhung der Leistung und der Wirtschaftlichkeit
  - Steigerung der Spritzleistung
  - Schnelleres, grossflächiges Auftragen
  - Entfallen von Gerüsten
  - Steigerung der Leistung des Düsenführers durch höheres Sicherheitsgefühl
- Verbesserung der Arbeitssicherheit
  - Düsenführer ausserhalb des direkten Gefahrenbereichs (Staub und Gesteinsablösung)
  - Gewichtsentlastung des Düsenführers
- Steigerung der Ausbausicherungeffizienz
  - Schnelle, grossflächige Versiegelung und Randverstärkung des Verbundtragwerks Gebirge
  - Verringerung der Gebirgsauflockerung durch schnelles und ausreichend starkes Aufspritzen der Spritzbetonschale
- Qualitätsverbesserung durch optimalere Düsenführung.

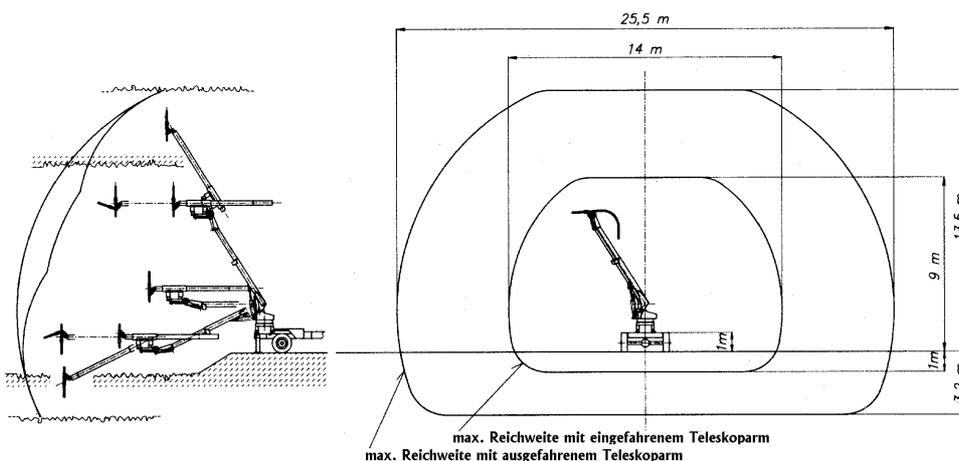


Bild 56: Arbeitsbereich des Spritzroboterarms Meyco Robojet

Die Verwendung von programmierbaren Spritzrobotern (Bild 56) ist heute prinzipiell möglich, jedoch haben sie den Weg in die Praxis noch nicht gefunden. Mit Hilfe sensorgesteuerter, programmierbarer Geräte könnte man gezielt die subjektiven individuellen Nachteile des Spritzbetonverfahrens weitgehend eliminieren. Dadurch wäre eine erhöhte Gleichmässigkeit und verbesserte Qualität zu erreichen. An der ETH Zürich wird zur Zeit ein praxistaugliches Gerät mit der Industrie entwickelt. Spritzroboter als Hochleistungsapplikationssysteme sollten in den folgenden Hauptbetriebsmodi einsetzbar sein:

- Manuelle Führung mittels Spacemouse (Joystick) und rechnergesteuerte Bewegung des achtgelenkigen Spritzarmes durch die Hydraulikzylinder.
- Automatische Führung durch prozessgesteuerte Abläufe der baubetrieblichen Arbeitstechniken mittels Menüführung.

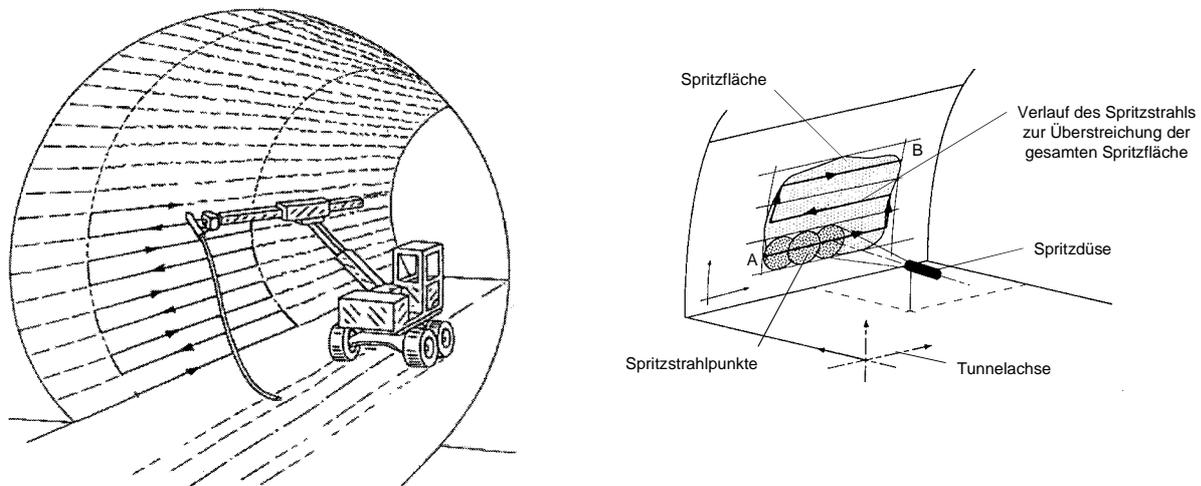


Bild 57: Führungsbahnen der Spritzroboterdüse [7]

Dazu ist es notwendig, der entwickelten Steuerungssoftware die baubetriebliche Intelligenz der Applikationstechnik zu implementieren. Die verschiedenen leistungselevanten Betriebsmodi, die vom Düsen- bzw. Spritzenführer aufgrund der lokalen Bedingungen gewählt werden können, sollten die optimierten Spritztechnikerfahrungen als systemimmanente Prozesssteuerung enthalten. Folgende Problemkreise müssen optimiert und in das Steuerungsprogramm integriert werden:

### Ressourcenoptimierung

- Rückprallreduzierung durch Optimierung der programmgesteuerten Bahn- und Düsenführung.
- Rückprallreduzierung durch interaktive Überprüfung des Auftrags und der prozessgesteuerten Zusatzmitteldosierung.
- Konzentration des Spritzroboterführers auf die Beurteilung der geologischen Verhältnisse vor Ort zur Eingabe von Grundparametern.

### Leistungs- und Qualitätsoptimierung

- Ausbau des Spritzsystems zur schnellen Sicherung und zum Ausbau von grossen bis sehr grossen Tunnelquerschnitten.
- Homogene, konstante Spritzbetonqualität mit geringer Qualitätsstreuung und der damit verbundenen Erhöhung der Dauerhaftigkeit.

### Baubetriebliche Roboteroptimierung

- Interaktive Entwicklung der baubetrieblichen Prozessparameter in Zusammenarbeit mit dem Maschinenhersteller und Baustellen, mit dem Ziel der weitestgehenden Automatisierung des Spritzroboters.
- Definition und Begründung der baubetrieblichen Prozessparameter für verschiedene Auftragsflächen, gegliedert nach Rauigkeits- und Ebenheitskriterien etc.

- Analyse und Elimination von Eigen- und Fremdkollisionen.
- Benutzerführung einzelner Betriebsmodi.
- Optimierung der Schichtauftragsflächen auf der Basis folgender Parameter:
  - Differenz Ausbau- und Ausbruchsquerschnitt (Bild 58)
  - Hafteigenschaften des Spritzbetons an der Auftragsfläche.

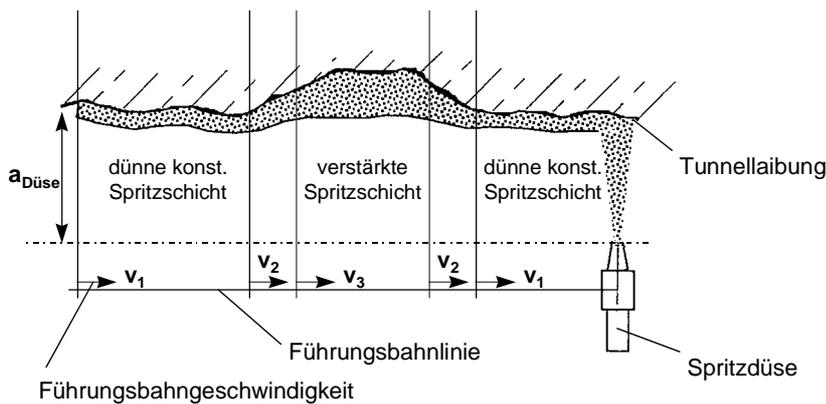


Bild 58: Änderung der Düsenführungsgeschwindigkeit eines Spritzroboters zur Optimierung der Schichtauftragsflächen [32]

Im Regelfall wird unmittelbar nach dem Ausbruch des Hohlraums eine ca. 5 cm dicke Versiegelungsschicht aufgespritzt. Anschliessend werden eine Bewehrungslage und die Anker eingebaut. Danach kann die eigentliche Spritzbetonschale hergestellt werden, eventuell mit einer zweiten Bewehrungslage. Dieser Arbeitsablauf weist für den Einsatz des Spritzroboters folgende Probleme auf:

- schattenfreies Einspritzen von Bögen und Gitterträgern sowie der Bewehrung
- mehrere Arbeitsgänge mit Unterbrechungen sind erforderlich, welche die Effizienz des Spritzroboters reduzieren, z.B.:
  - Versiegelungsschicht aufbringen
  - Unterbrechung und Umstellung des Spritzroboters zum Einbau der ersten Bewehrungslage und der Gitterträger
  - Traggewölbe einspritzen.

Zur vollständigen Nutzung des Produktionspotentials des Spritzroboters muss die maximale Auslastung am Einsatzort erreicht werden, ohne mehrmaliges Umsetzen des Gerätes zur Erstellung der Schale (Bild 59). Zur Nutzung des Rationalisierungspotentials ist es unbedingt notwendig, dass die Konstruktion sowie der Arbeitsablauf für das jeweilige Bauwerk robotergerecht gestaltet sind. Gerade die Spritzbetonverarbeitung im Tunnelbau verlangt eine Produktivitäts- und Qualitätssteigerung. Daher erscheint es sinnvoll, die Tragschalen als biegeeweiche Membranschalen auszulegen und aus Faserspritzbeton herzustellen. Dabei entfällt der arbeitsunterbrechende Schritt des Bewehrens sowie die Probleme von Spritzschatten und erhöhtem Rückprall. Die gesamtheitliche, robotergerechte Gestaltung könnte die Bauzeit und die Baukosten reduzieren, dabei muss zur Anpassung an geologische und geometrische Veränderungen

gleichzeitig eine sinnvolle Bandbreite an konstruktiver und baubetrieblicher Flexibilität möglich sein.

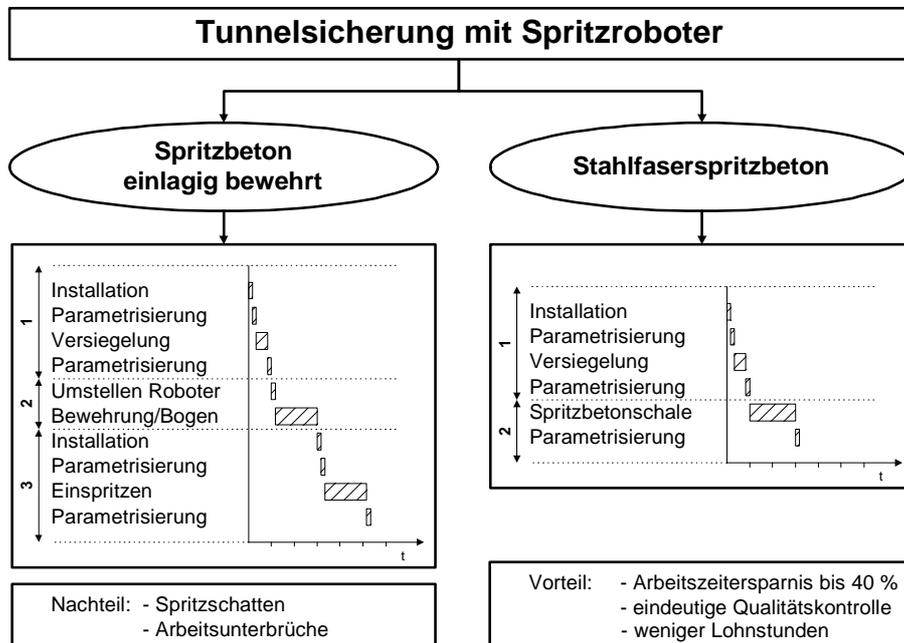


Bild 59: : Tunnelsicherung mit Spritzroboter [33]

## 7. Herstellungsbedingte Fehler im Spritzbeton

Die Ursachen unzulänglichen Spritzbetons können konstruktive Fehler, ungeeignete Bestandteile oder mangelnde Sorgfalt bei der Herstellung sein. Die weitaus meisten Schäden und Mängel sind vermutlich der unsorgfältigen Ausführung anzulasten. Wegen mangelnder Erfahrung oder aus Unachtsamkeit werden oft die Regeln der Spritztechnik missachtet. Der Gesamteindruck einer Spritzbetonfläche wird weitgehend vom Können des Düsenführers, von seiner "Handschrift" geprägt. War ein erfahrener Mann am Werk, so ist der Spritzbeton überall gleichmässig verteilt und hat eine einheitliche Oberflächenstruktur. Schwankende Rauigkeit, Höcker und "Überzähne" zeugen von unsachgemässer Handhabung der Düse. Bei den konstruktiven Fehlern stehen zu dünn aufgetragener Spritzbeton und die Vernachlässigung der Vorabdichtung an erster Stelle (eine im Bauzustand scheinbar trockene Felsoberfläche kann in anderen Jahreszeiten trotzdem wasserführend sein!). Die häufigsten Schadensbilder sind in Tabelle 11 bis Tabelle 14 aufgelistet:

### Optische Unzulänglichkeiten:



<b>Schaden</b>	<b>Erläuterung</b>	<b>Ursachen</b>	<b>Abhilfe</b>	<b>Bemerkung</b>
<b>Wolkung</b>	unterschiedlicher Grauton, wodurch sich Spritzbetonflächen voneinander abheben	in zeitlichen Abständen entstanden, Unterschiede in der Betonzusammensetzung (vor allem der Wasserverteilung, unterschiedlicher Gehalt der Eigenfeuchtigkeit der Zuschlagstoffe, Abweichungen bei der Zement- und Zusatzmittelbeigabe)	gleichmässige Wasserzuführung an der Düse, zusammenhängende Flächen ohne Unterbruch spritzen	beim Trockenspritzen stärker ausgeprägt, weil die Dosierung des Zugabewassers naturgemäss etwas schwankt, gänzlich verhindern kann man die Wolkung nicht; sie ist eine Eigenart des Spritzbetons und nicht ein Mangel oder Fehler, es sei denn, sie überschreitet das unvermeidliche Mass; verblasst mit der Zeit nur wenig
<b>Leopardenfell</b>	punktförmige, dunkle Flecken	ungleichmässige Durchmischung von Spritzgut und Zugabewasser Unterschiede im W/Z-Wert bei langen Förderleitungen, bei denen sich Feinbestandteile des zu feuchten oder zu feinkörnigen Trockengemisches stellenweise festsetzen und sich periodisch lösen	Kontrolle der Wasserzugabe in der Düse	Nachlässigkeit des Düsenführers, wenn er nicht merkt, dass die Bohrungen des Wasserringes seiner Düse teils verstopft sind und deshalb das Spritzgut nicht gleichmässig benetzt wird
<b>Ausblühung</b>	weisse Ränder	Übermässiger Gebrauch von Schnellbinder, Sickerwasser	Entwässerung der einzuspritzenden Oberfläche, Drains	
<b>Unebenheiten</b>	linienförmige Wülste an der Spritzbetonoberfläche	Arbeiten mit unzweckmässigen Gerüsten, wenn der Abstand zwischen den Gerüstständern und der Auftragsfläche zu klein ist, oder wenn die Gerüstgänge zu schmal sind	Platzverhältnisse beachten	normalerweise ist Spritzbeton nicht eben, sondern mehr oder weniger gewellt; es gibt aber auch andere Unebenheiten, die eindeutig als vermeidbare Mängel zu betrachten sind

Tabelle 11: Zusammenstellung Schadensbilder Aussehen

### Mangelhafte Haftung:



Schaden	Erläuterung	Ursachen	Abhilfe	Bemerkung
Wellenmuster	Die Struktur des Untergrundes bleibt sichtbar	abstehend befestigte Bewehrung	Armierung befestigen, dass sie beim Auftreffen des Spritzstrahls nicht vibriert, genügende Überdeckung	schlechtes Zeugnis für das Können des Düsenführers bei ungenügender Überdeckung zeigen sich wie beim üblichen Beton bald die Folgen der Karbonatisierung
“Blätterteig“	mangelnder Verbund zwischen Spritzbeton und seinem Traggrund, mangelnder Verbund zwischen den einzelnen Spritzbetonschichten	unsaubere Auftragsflächen, welche durch Staub und Rückprallgut verschmutzt sind, zu dicke, und deshalb zu schwere Schichten zu rasche Aufeinanderfolge der Schichten (die vorgehende Schicht scheint ausreichend fest zu sein, um die folgende zu tragen, kann aber dem Aufprall des Spritzgutes nicht schadlos widerstehen; das Gefüge wird an der Oberfläche aufgelockert und zermürbt)	konsequente Reinigung der Oberflächen, Rückprallgut vor allem am Wandfuss entfernen	Zwei Kräfte wirken gegeneinander: das nach unten gerichtete Eigengewicht und in entgegengesetzter Richtung das Haftvermögen, also die Adhäsion und die Kohäsion; dieser Mangel offenbart sich deutlich beim Abklopfen mit dem Hammer, es klingt hohl, tiefe Temperaturen in den kälteren Jahreszeiten verzögern den Abbinde- und Erhärtungsprozess
Abplatzungen	lokal fehlende Spritzbetonschichten	ungenügend fester, schlecht haftender oder zu dünner Spritzbeton reißt und platzt ab	konstante Schichtstärken von Spritzbeton applizieren	zusätzlich kann Wasser sehr ungünstig wirken

Tabelle 12: Zusammenstellung Schadensbilder Haftung



### Probleme mit Schwinden:

Schaden	Erläuterung	Ursachen	Abhilfe	Bemerkung
Hohlstellen	stellenweise kein Verbund zwischen Untergrund oder Spritzbetonschichten	ungenügende oder fehlende Nachbehandlung (die Schwindspannungen übersteigen die Zugfestigkeit des Spritzbetons)	Gehalt an Mehlkorn und Zement reduzieren, niedriger Wasserzementwert	durch saugenden Untergrund oder Verdunstung an der Oberfläche wird vorzeitig Wasser entzogen, der Spritzbeton schwindet; ungünstig ist vor allem die überaus grosse Oberfläche im Vergleich zur Masse

Tabelle 13: Zusammenstellung Schadensbilder Schwinden

### Probleme Wasser / Frost:

Schaden	Erläuterung	Ursachen	Abhilfe	Bemerkung
Abplatzungen	ungenügend fester, schlecht haftender oder zu dünner Spritzbeton	der Beton reisst, platzt ab und wird undicht (Eisdruck kann solchen Spritzbeton rasch zerstören) ungenügende Vorabdichtung der Auftragsfläche (drückendes Wasser verhindert ein einwandfreies Abbinden und Aushärten des Spritzbetons, Zement wird ausgespült) Korrosion der Armierung und der Anker Drains (zu geringe Überdeckung)	Vorreinigung Untergrund, Nachbehandlung, Drainage	undichte Stellen im Spritzbeton verschliessen sich mit der Zeit von selbst, sofern sie nicht zu ausgedehnt sind und wenn das durchsickernde Wasser Schwebstoffe mit sich führt, vor allem aus dem Beton ausgewaschenen Kalk; Drains sind genügend gross zu bemessen (Versinterung mit der Zeit), sie sind ausserdem eine Schwachstelle, über der bevorzugt Risse im Beton entstehen

Tabelle 14: Zusammenstellung Schadensbilder Durchlässigkeit / Frostbeständigkeit



## 8. Literaturverzeichnis

- [1] *Maidl B.*: Handbuch für Spritzbeton. Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1992.
- [2] *SIKA AG, Zürich (CH)*: Technische Unterlagen.
- [3] *Rombold & Gröhrer GmbH, Hirschlanden (D)*: Technische Unterlagen Spritzbeton.
- [4] *Porr Tunnelbau, Sika & al.* New Austrian Torkret System (NATS). Brochure Edition 04.1997. Wien.
- [5] *Torkrete, Essen (D)*: Technische Unterlagen.
- [6] *Schürenberg GmbH, Essen Weidkamp (D)*: Technische Unterlagen.
- [7] *Meyco Equipment MBT AG, Winterthur (CH)*: Technische Unterlagen.
- [8] *DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung GmbH, Essen (D)*: Technische Unterlagen.
- [9] *Eckardstein K. E.*: Das Nassspritzen von Beton im Dichtstromverfahren. Tunnel (1991), Heft 6, S. 302-308.
- [10] *Maidl B.*: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band I. Konstruktionen und Verfahren. Verlag Glückauf GmbH, Essen 1984.
- [11] *Lancy Mix Jet, Latresne (F)*: Technische Unterlagen – Tubaflo V6.65.
- [12] *Laich SA, Avegno (CH)*: Technische Unterlagen.
- [13] *Oesterreicherischer Betonverein*: Richtlinie Spritzbeton. Wien, 1997.
- [14] *Sika Chemie, Zürich*: Sika in Tunnelbau – Informationsschrift. 1991.
- [15] *N.N.*: ASTM C403 test method: American Society for testing material, Philadelphia (USA).
- [16] *MBT-Master Builder Technologie, Zürich (CH)*: Technische Unterlagen.
- [17] *Guthoff K.*: Einflüsse automatischer Düsenführung auf die Herstellung von Spritzbeton. Dissertation. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum 1991, Heft 7.
- [18] *Handke D.*: Kriterien zur Beurteilung und Verminderung der Staubentwicklung bei Spritzbetonarbeiten im Tunnelbau. Dissertation. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum 1987, Heft 3.
- [19] *G. Brux, R. Linder, G. Ruffert*: Spritzbeton, Spritzmörtel, Spritzputz : Herstellung, Prüfung und Ausführung. Verlag Rudolf Müller, Köln-Braunsfeld, 1981.
- [20] *Ammon C.*: Spritzbeton und seine Eigenschaften. Vertiefte Untersuchungen von speziellen Eigenschaften; Wiederverwendung von Rückprall: Einfluss der Liegezeit des Trockengemisches auf die Qualität des Spritzbetons. Arbeitsbericht Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Zürich, 1985.
- [21] *Dieckmann U. v.*: Möglichkeiten zur Reduktion des Rückpralls von Spritzbeton aus verfahrenstechnischer und betontechnologischer Sicht. Dissertation. Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen des Institutes für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum 1990, Heft 2.
- [22] *Stecher A., Girmscheid G.*: Spritzbetonmanagement. Leistung- und Kostenevaluation. Forschungsbericht, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Zürich, 1999.
- [23] *Hahlhege R.*: Zur Sicherstellung der Qualität von Spritzbeton im Trockenspritzverfahren. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1986.
- [24] *Cornejo G.*: Spritzbeton und seine Eigenschaften. Schwinden von Spritzbeton. Forschungsbericht Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Zürich, 1995.
- [25] *Hefti R.*: Spritzbeton und seine Eigenschaften. Einfluss der Nachbehandlung auf die Spritzbetonqualität. Arbeitsbericht Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Zürich, 1988.
- [26] *Hodel N.*: Spritzbeton und seine Eigenschaften. Vertiefte Untersuchungen von speziellen Eigenschaften: Einfluss von tiefen Temperaturen auf die Qualität des Spritzbetons. Arbeitsbericht Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Zürich, 1986.
- [27] *Müller T.*: Spritzbeton und seine Eigenschaften. Vertiefte Untersuchungen von speziellen Eigenschaften: Einfluss von tiefen Temperaturen auf die Qualität des Spritzbetons Teil II. Arbeitsbericht Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Zürich, 1988.
- [28] *Seith O.*: Spritzbeton und seine Eigenschaften. Spritzbeton bei hohen Temperaturen: Einfluss von hohen Temperaturen auf die Qualität des Spritzbetons. Arbeitsbericht Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, Zürich, 1995.
- [29] *Dramix*: Tunneling the world. N.V. Bekaert S.A., Zwevegem, Belgien, 1996.
- [30] *Schubert W., Woitz B.*: Controllable Ductile Support System for Tunnels in Squeezing Rock. Felsbau 16 (1998), Nr. 4, S. 224-227.
- [31] *Egger H.R.*: Einsatz von Spritzbetonmaschinen. Sonderdruck Spritzbetonbauweise auf Baustellen unter Tage. Tiefbau-Berufsgenossenschaft, München, 1979.
- [32] *Nagamani Siaken G.*: Die Automatisierung der Düsenführung zur Auftragung von Spritzbeton. Mitteilung der Ruhr Universität, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bochum, Nr. 96-8, 1996.
- [33] *Girmscheid G.*: Tunnelbau im Sprengvortrieb. Rationalisierung durch Teilrobotisierung und Innovation. MBT Equipment, Winterthur, 1997.
- [34] *Aliva*: Technische Unterlagen und Innovationen