



"achieving the highest standards"

EFNARC RICHTLINIE FÜR SPRITZBETON

ANLEITUNGEN

FÜR PROJEKTANTEN UND UNTERNEHMER

DEFINITIVE AUSGABE JUNI 1999

Die in dieser Richtlinie veröffentlichten Daten und Informationen wurden sorgfältig und nach unserem besten Wissen auf ihre Richtigkeit geprüft, insofern sie sich auf zur Zeit der Veröffentlichung gültige Tatsachen oder anerkannte Praktiken oder Meinungen beziehen. Die EFNARC lehnt jedoch jede Haftung ab für Fehler oder falsche Darstellungen dieser Daten und/oder Informationen oder Verluste oder Schäden, die aus oder im Zusammenhang mit ihrem Gebrauch entstehen könnten.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungssystemen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

ISBN 0 9522483 8 7

© 2000 EFNARC

INHALT

VORWORT.....	3
G2 REFERENZNORMEN.....	3
G4 DIE EINZELBESTANDTEILE	3
G4.1 Zemente.....	4
G4.2 Zuschläge.....	4
G4.3 Zugabewasser.....	4
G4.4 Stahlbewehrung.....	4
G4.5 Fasern.....	4
G4.6 Zusatzmittel.....	6
G4.7 Zusatzstoffe	8
G4.8 Nachbehandlungsmittel.....	8
G5 ANFORDERUNGEN AN DIE BETONZUSAMMENSETZUNG	8
G5.1 Allgemeines	8
G5.2 Zement.....	8
G5.3 Zusatzstoffe	9
G5.4 Zuschläge.....	9
G.5.5 Zusatzmittel.....	10
G5.6 Fasern.....	11
G5.7 Konsistenz	11
G5.8 Arbeitstemperatur.....	12
G6 ANFORDERUNGEN AN DIE DAUERHAFTIGKEIT.....	12
G6.1 Allgemeines	12
G6.2 Chloridgehalt.....	12
G6.3 Alkaligehalt.....	13
G6.4 Anforderungen bezüglich Umweltbedingungen	13
G7 ZUSAMMENSETZUNG VON MISCHUNGEN	13
G7.1 Allgemeines	13
G7.2 Maßgeschneiderte Mischungen («Designed Mixes»).....	14
G7.3 Vorgeschriebene Mischungen («Prescribed Mixes»).....	14
G7.4 Kombinierte Mischvorschrift.....	14
G8 VORGEHEN BEIM EINBAU VON SPRITZBETON	14
G8.1 Vorbereitungsarbeiten	14
G8.2 Ausführung	16
G8.3 Ausrüstung	17
G8.4 Der Einbau von Naßspritzbeton zur Felssicherung	19
G8.5 Baugerüste.....	20
G9 ANFORDERUNGEN AN DAS ENDPRODUKT.....	21
G9.1 Druckfestigkeit	21
G9.2 Biegefestigkeit	22
G9.3 Arbeitsvermögen.....	22
G9.4 Elastizitätsmodul.....	22
G9.5 Haftfestigkeit.....	22
G9.6 Fasergehalt.....	23
G9.7 Permeabilität (Durchlässigkeit)	23
G9.8 Frostbeständigkeit.....	23
G10 PRÜFVERFAHREN.....	23
G10.1 Prüfplatten und Probekörper	24
G10.2 Druckfestigkeit und Dichte.....	24
G10.3 Biegefestigkeit und Restfestigkeit	25
G10.4 Energieabsorptionsklasse (Plattenversuch)	26
G10.5 Elastizitätsmodul.....	26
G10.6 Haftfestigkeit.....	26
G10.7 Permeabilität (Durchlässigkeit)	27
G10.8 Frostbeständigkeit.....	27

	G10.9	Bestimmung des Fasergehaltes von Spritzbeton	28
G11		QUALITÄTSKONTROLLE	28
	G11.1	Allgemeines	28
	G11.2	Vorversuche.....	28
	G11.3	Qualitätskontrolle	28
G12		UMWELT, GESUNDHEIT UND SICHERHEIT	28
	G12.1	Sicherheit der Mannschaft	29
	G12.2	Umweltschutz	30
		RICHTLINIE ZUM ANHANG 1: ZUSATZMITTEL FÜR SPRITZBETON	32
		ANHANG A Spritzbeton - Bestimmung des Energieabsorptionsvermögens von Plattenproben.....	34

VORWORT

Die «Europäische Richtlinie für Spritzbeton» wurde 1996 veröffentlicht, nachdem bereits drei Jahre zuvor eine Entwurfsfassung erschienen war. Die Kommentare, die zu den über 1000 in Umlauf gebrachten Exemplaren der provisorischen Version gemacht wurden, sind in der Schlußfassung berücksichtigt. Seitdem findet die 'Richtlinie' in der Bauindustrie weltweit eine breite Verwendung als Standardnachschlagewerk.

Die 'Richtlinie' beschreibt die grundlegenden Anforderungen für den erfolgreichen Einbau von Spritzbeton. Der Abschnitt der 'Richtlinie' zur Ausführung des Spritzvorgangs wurde nachträglich erweitert und ist in einer separaten Ausgabe erschienen.

Die hier vorgestellten Anleitungen stellen einen Kommentar zur 'Richtlinie' dar und erklären die darin beschriebenen Anforderungen. Zur Erleichterung der Querverweise zwischen den Anleitungen und der 'Richtlinie' wurde die Numerierung der Abschnitte aus der 'Richtlinie' übernommen; zusätzliche, in den Anleitungen gemachte Unterteilungen erscheinen in Kursivschrift (z.B. 8.2. 1).

G2 REFERENZNORMEN

Die nachfolgenden CEN Prüfverfahren beschreiben die neusten Anleitungen für Spritzbeton und ersetzen die in Abschnitt 2 der EFNARC Richtlinie aufgeführte Liste:

ISO 6784	Concrete - Determination of static modulus of elasticity in compression (1982)
prEN 12356	Testing concrete - Shape, dimensions and other requirements for test specimens and moulds
prEN 12359	Testing concrete - Determination of flexural strength of test specimens
prEN 12363	Testing concrete - Determination of density of hardened concrete
prEN 12364	Testing concrete - Determination of depth of water penetration under pressure
prEN 12378	Testing concrete - Sampling fresh concrete
prEN 12379	Testing concrete - Making and curing specimens for strength tests
prEN 12382	Testing concrete - Determination of consistency - slump test
prEN 12390	Testing concrete - Determination of compressive strength - specification for compression testing machines
prEN 12394	Testing concrete - Determination of compressive strength of test specimens
prEN 12399	Testing concrete - Determination of pull-out force
prEN 12504	Testing concrete - Cored samples - taking, examining and testing in compression
prEN 1542	Products and system for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Pull-off test
prEN 13057	Products and system for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of Capillary water absorption

Weitere Verweise auf veröffentlichte Arbeiten:

Austin S. A. and Robins P. J. (eds), 'Sprayed Concrete: properties, design and installation', Whittles Publishing, Latheronwheel, UK (ISBN 1-870325-01-X) and McGraw Hill, USA (ISBN 0-07-057148-1), 1995.

McLeish A., 'Standard tests for repair materials and coatings for concrete', CIRIA Technical Note 139, Construction Industry Research and Information Association, London, 1993.

Opsahl O. A., 'Steel fibre reinforced sprayed concrete for rock support', BML Report 82.205, Division of Building Materials, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, September 1983.

Melbye T., 'Sprayed concrete for rock support', 4th edition, January 1996.

G4 DIE EINZELBESTANDTEILE

Die Wahl der einzelnen Spritzbetonbestandteile sollte nach dem Kriterium der Sicherstellung von technischen, gesundheitlichen und Sicherheitsaspekten erfolgen. Festigkeitsanforderungen sowie Anforderungen an mechanische Eigenschaften, Schichtdicke, Form, Oberflächenbearbeitung usw. des Spritzbetons sollten in der Projektausschreibung deutlich beschrieben sein.

G4.1 Zemente

Je nach Zusammensetzung und Eigenschaften unterscheiden die Europäischen Normen verschiedene Sorten und Klassen von Zement. Wirtschaftliche Überlegungen mögen zwar bei der Wahl des Zementes ebenfalls eine Rolle spielen; dieser muß jedoch die technischen Anforderungen erfüllen. Bei einer Großzahl der Spritzbetonanwendungen wird herkömmlicher Portlandzement (CEM 1) verwendet.

Da jede einzelne Zementcharge je nach Zusammensetzung und spezifischer Oberfläche eine unterschiedliche Reaktivität aufweisen kann, werden Vorversuche empfohlen, um die Eigenschaften zu überprüfen. Allgemein gilt, daß mit steigendem C_3A -Gehalt, größerer spezifischer Oberfläche (Blaine) und höherer Zementklasse auch die Reaktivität zunimmt, was besonders bei der Verwendung von Beschleunigern eine raschere Abbindezeit und Frühfestigkeitszunahme bedeutet.

In bestimmten aggressiven Umgebungen, wie bei sulfathaltigem Grundwasser oder wenn die Gefahr einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion besteht, kann eine andere Zementsorte vorgeschrieben werden. Diese Zemente haben üblicherweise einen niedrigeren C_3A -Gehalt (meist unter 5%) and daher eine geringere Reaktivität.

Modifizierte Zemente oder andere Bindemittel können für Spritzbeton verwendet werden, nachdem ihre Eignung nachgewiesen wurde.

G4.2 Zuschläge

Die Zuschläge stellen nach Volumen wie nach Gewicht den Hauptbestandteil einer Betonmischung dar. Zusätzlich zur vorgeschriebenen Betonfestigkeit sollten bei der Auswahl Aspekte wie Rückprall und Haftung zwischen den Schichten in Betracht gezogen werden. Neben der maximalen Korngröße und der Kornverteilung sollten auch die Zusammensetzung, die Eigenfeuchte, das Waschverfahren und der Gehalt an organischen Stoffen berücksichtigt werden. Das Risiko einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion muß ebenfalls abgeklärt werden.

Die Pumpbarkeit ist bei der Verwendung von Naßspritzbeton ein wichtiger Aspekt und muß daher bei der Auswahl der Zuschläge berücksichtigt werden. In der Praxis wird die Verfügbarkeit von geeigneten Zuschlägen oft durch am Standort gültige Vorschriften und/oder besondere Baustellenbedingungen eingeschränkt.

Die Spritzbetonrezeptur unterscheidet sich von der eines normalen Betons durch das Größtkorn und die Verteilung der Korngrößen (siehe 5.4).

Unter extremen Witterungsbedingungen hat die Temperatur des Zuschlags einen starken Einfluß auf die Temperatur in der Betonmischung. Diesem Umstand muß bei der Planung der Baustellenlogistik Rechnung getragen werden.

G4.3 Zugabewasser

Für Spritzbetonmischungen eignet sich Trinkwasser. Anderes Wasser sollte zuerst auf seine Eignung geprüft werden (siehe Tabelle 1). Es sollte berücksichtigt werden, daß die Temperatur des Zugabewassers die Temperatur der Betonmischung beeinflusst.

G4.4 Stahlbewehrung

Stahlbewehrung wird zur Erhöhung der Biegefestigkeit und zur Verringerung der Rißbildung eingesetzt. Normalerweise werden Stahlgitter verwendet; ihr Einsatz empfiehlt sich bei großen Schichtdicken (50 mm). In den meisten Fällen werden Stahlgitter mit einer Maschenbreite von 100 bis 150 mm und einem Drahtdurchmesser von bis zu 10 mm zugelassen.

G4.5 Fasern

Im allgemeinen werden Fasern verwendet, um das Arbeitsvermögen von Beton zu erhöhen, welches als Restfestigkeit oder Energieaufnahmevermögen - abgeleitet aus dem Last-Durchbiegungsdiagramm aus einem Balken- bzw. Plattenversuch - vorgeschrieben wird, oder zur Verringerung oder Steuerung der Rißbildung.

Fasern werden normalerweise gebündelt - unter Verwendung eines wasserlöslichen, raschabbindenden Leims - oder lose geliefert.

Tabelle 1: Bewertung des Zugabewassers

		Bewertung		
Versuch	Prüfverfahren	Geeignet ohne Vergleichsbetonversuche	Nur in bestimmten Fällen geeignet ¹⁾	Nicht geeignet
1. Farbe	Visuelle Prüfung in Meßgefäß mit Gradeinteilung (warten, bis alle Partikel sedimentiert sind)	farblos bis gelblich	dunkel oder farbig (rot, grün, blau)	
2. Öl und Fett	Visuelle Prüfung	Spuren	Ölfilm, Ölemulsion	
3. Reinigungsmittel	Probe stark schütteln (Meßgefäß zur Hälfte füllen)	geringe Schaumentwicklung: Schaumfestigkeit ≤ 2 Min.	starke Schaumentwicklung: Schaumfestigkeit ≥ 2 Min.	
4. Suspendierte Teilchen	80 cm ³ -Meßgefäß	≤ 4 cm ³	> 4 cm ³	
5. Geruch	Zugabe von HCl	kein - gering	stark (z.B. Schwefelwasserstoff)	
6. pH-Wert	geeigneter Indikator	≥ 4	< 4	
7. Chloride ²⁾ (Cl ⁻)		≤ 500 mg/l		> 500 mg/l ³⁾
Beton mit Stahlbewehrung		≤ 1000 mg/l		> 1000 mg/l ³⁾
Unbewehrter Beton		≤ 4500 mg/l	> 4500 mg/l ³⁾	
8. Sulfat ²⁾ (SO ₄ ²⁻)		≤ 2000 mg/l	> 2000 mg/l	
9. Zucker, Glukose ²⁾		≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	
Saccharose		≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	
10. Phosphat (P ₂ O ₅) ²⁾		≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	
11. Nitrat (NO ₃) ²⁾		≤ 500 mg/l	> 500 mg/l	
12. Zink (Zn ²⁺) ²⁾		≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	
13. Sulfid (S ²⁻) ⁴⁾		≤ 100 mg/l	> 100 mg/l	
14. Natrium (Na ⁺) ⁵⁾ Kalium (K ⁺)		Total ≤ 1500 mg/l		Total > 1500 mg/l
15. Humusartige Substanzen	5 cm ³ 4-5% NaOH zu 5 cm ³ Zugabewasser geben. Gut schütteln. Visuelle Prüfung nach 3 Min.	heller als gelblich braun	dunkler als gelblich braun	

- 1) Verwendung des Schnellverfahrens gestattet.
- 2) «Nur in bestimmten Fällen geeignet»: Die endgültige Bewertung erfolgt aufgrund einer Fall zu Fall-Bewertung und/oder anhand von Vergleichsbetonversuchen.
- 3) In einzelnen Fällen kann die Bewertung positiv ausfallen. Wenn der Gesamtchloridgehalt aller Betonbestandteile die in ENV 206, Absatz 5.5 vorgeschriebenen Grenzwerte nicht überschreitet.
- 4) Nur für vorgespannten Beton/Verpreßmörtel erforderlich.
- 5) Nur erforderlich, wenn die Gefahr einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion besteht.

Diese Anforderungen entsprechen EN 1008.

G4.5.1 Stahlfasern

Stahlfasern sind aus geradem oder deformiertem, kaltgezogenem Stahldraht, im Blechschneideverfahren hergestellte, gerade oder deformierte Fasern, aus Stahlblöcken gefräste Fasern oder durch Schmelzextraktion gewonnene Fasern, die homogen mit Beton und Mörtel vermischt werden können. Aufgrund der für die Herstellung verwendeten Ausgangsmaterialien werden fünf Gruppen von Stahlfasern unterschieden:

Gruppe I	Fasern aus kaltgezogenem Stahldraht
Gruppe II	im Blechschneideverfahren hergestellte Fasern
Gruppe III	aus Stahlblöcken gefräste Fasern
Gruppe IV	schmelzextrahierte Fasern
Gruppe V	übrige Stahlfasern

G4.5.2 Synthetische Fasern

Synthetische Fasern werden hauptsächlich aus organischen Polymeren hergestellt und weisen unterschiedliche Querschnitte auf. Sie sind klein genug, um sich beim Mischen und Spritzen mit herkömmlichen Maschinen gleichmäßig in der Betonmischung zu verteilen.

G4.6 Zusatzmittel

Um gute Einbaueigenschaften zu erzielen und die Anforderungen an die Frühfestigkeit zu erfüllen, können den Spritzbetonmischungen Zusatzmittel wie Verflüssiger, Verzögerer usw. beigegeben werden (genauso wie sie im Normalbeton zur Verbesserung der Frisch- und Festbetoneigenschaften verwendet werden).

Die bei den Zusatzmitteln verwendete Bezeichnung 'chloridfrei' bedeutet, daß der Chloridionengehalt 0.1 Masse-% des Zusatzmittels nicht übersteigt.

Verflüssiger werden verwendet, um pumpbare Betonmischungen mit einem minimalen Wassergehalt zu erzeugen. Die Zugabe von großen Wassermengen sollte vermieden werden, da dies zu einer geringeren Kohäsion und Endfestigkeit führt sowie zu einer Beeinträchtigung der Betongüte (z.B. Wasserdurchlässigkeit) und der Rückprallmenge; auch die Abbindezeit kann dadurch verzögert werden, was zu einem größeren Bedarf an Beschleuniger führt, falls ein solcher verwendet wird. Es sollte berücksichtigt werden, daß Verflüssiger auf Ligninsulfonatbasis bei höheren Dosierungen eine Abbindeverzögerung verursachen können. Wegen dieser Nachteile werden Fließmittel häufig vorgezogen.

Fließmittel werden im Spritzbeton verwendet, um das Zugabewasser auf ein Minimum zu reduzieren und dadurch die Endqualität zu verbessern. Nach den Empfehlungen des Herstellers dosierte Fließmittel verzögern normalerweise die Abbindezeit nicht. Daher können sie höher dosiert werden als Verflüssiger, was zu einer bedeutenderen Wasserreduktion führt. Sie werden hauptsächlich verwendet, um die beim Spritzen erforderliche Konsistenz und Pumpbarkeit zu erzeugen.

Verzögerer werden normalerweise verwendet, um den Abbindebeginn von Beton zu verzögern. Hohe Dosierungen von Verzögerern können ein starkes Ansteifen des Betons sowie ein «Flash Setting» verursachen und die Frühfestigkeit des Spritzbetons beeinträchtigen. Die Verwendung von Verzögerern kann eine höhere Beschleunigerdosierung erforderlich machen als bei unverzögerten Mischungen, um ein schnelles Abbinden und große Schichtdicken zu erzeugen. Wenn Verzögerer verwendet werden, sollten vor dem eigentlichen Einbau mit den bei der Ausführung verwendeten Materialien und Rezeptur auf der Baustelle Vorversuche durchgeführt werden, um die Dosierung des Beschleunigers zu ermitteln (Frühfestigkeit und Einbau großer Schichtdicken).

Von der Verwendung von herkömmlichen Verzögerern beim Spritzbeton wird allgemein abgeraten.

Zusatzmittel für die Hydratationssteuerung (im Handel erhältlich als Markenprodukte, bestehend aus einer geeigneten Mischung von Fließmitteln/Verzögerern/Stabilisatoren) werden dem Spritzbeton normalerweise beigegeben, um die Verarbeitbarkeit aufrechtzuerhalten und die Offenzeit während dem Transport und dem Einbau zu verlängern, ohne die Betonqualität zu beeinträchtigen (z.B. Konsistenz, Abbinden, Früh- und Endfestigkeit).

Sie können ohne Beeinträchtigung der Hydratation je nach Dosierung die Verarbeitbarkeit während einer Dauer von ein paar Stunden bis zu drei Tagen aufrechterhalten («Der Beton schläft.»). Zur Reaktivierung und Neutralisation der Hydratationssteuerung wird beim Spritzen ein geeigneter Spritzbetonbeschleuniger zugegeben.

Im allgemeinen haben Zusatzmittel für die Hydratationssteuerung keinen negativen Einfluß auf die Beschleunigerdosierung. Die Betonmischung kann jederzeit reaktiviert werden, bei identischer Beschleunigerdosierung, Abbindezeit sowie Früh- und Endfestigkeitsentwicklung. Die gelagerte Spritzbetonmischung sollte vor der Verwendung gründlich durchmischt und zum Schutz vor Wasserverdunstung abgedeckt werden, um Veränderungen der Frischbetoneigenschaften und der Konsistenz zu vermeiden.

Thixotropierende Zusatzmittel können verwendet werden, um den Rückprall zu verringern und das Durchhängen von frisch eingebautem Spritzbeton zu verhindern. Unter gewissen Umständen, wenn keine frühzeitige Lastaufnahme durch den Spritzbeton erforderlich ist, können sie auch zur Herabsetzung der Beschleunigerdosierung verwendet werden, und es können größere Schichtdicken aufgebracht werden. Thixotropierende Zusatzmittel können das Setzmaß der Betonmischung herabsetzen oder in einer Kombination von thixotropierendem/beschleunigendem Zusatzmittel eingesetzt werden.

Beschleuniger werden dem Beton beim Spritzen zugegeben, um das Ansteifen zu beschleunigen und ein schnelleres Abbinden sowie eine ausreichende Frühfestigkeitsentwicklung zu erzeugen. Ein schnell abbindender Beton kann nötig sein, um die für die Auskleidung erforderliche Schichtdicke aufzubringen und die Sicherheit beim Überkopfeinbau zu gewährleisten. Die Dosierung sollte so eingestellt werden, daß zwischen den einzelnen Lagen, aus denen eine Spritzbetonschicht besteht, eine gute Kohäsion sichergestellt wird.

Am Markt werden vier verschiedene Beschleunigersorten angeboten:

- alkalifreie Beschleuniger
- Aluminate
- Wasserglas (Silikate)
- modifizierte Silikate

Alkalifreie Beschleuniger werden bevorzugt, da sie eine bessere Arbeitsumgebung schaffen: keine gefährlichen Substanzen, keine Gefahr von Hautverätzungen; sie verursachen eine geringere Beeinträchtigung der Umwelt und erhöhen die Dauerhaftigkeit des Betons. Alkalifreie Beschleuniger wirken sich nur gering auf die Endfestigkeit von Beton aus. Für die Herstellung von permanentem Spritzbeton wird die Verwendung von gering alkalischen oder alkalifreien Beschleunigern empfohlen.

Aluminate nehmen an den hydraulischen Reaktionen des Zementes teil und wirken sich gut auf das Ansteifen und die Erhärtung des Betons aus. Bei Überdosierungen entsteht eine beträchtliche Verminderung der Endfestigkeit und der Dauerhaftigkeit. Der Umgang mit den ätzenden Aluminaten (pH-Wert >12) erfordert besondere Vorsichtsmaßnahmen als Schutz vor Verbrennungen an Augen und Haut und vor dem Einatmen. Die Verwendung von Produkten auf Aluminatbasis sollte daher eingeschränkt werden.

Wasserglas (Silikate) hat im allgemeinen einen pH-Wert von über 12 und einen Alkaligehalt ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv.}}$) von 10% bis 18%. Wasserglas bewirkt zwar ein sehr rasches Ansteifen, hat aber besonders bei einer Überdosierung Nebenwirkungen wie starker Endfestigkeitsabfall sowie erhöhte Porosität und Effloreszenz. Um diese Nebenwirkungen möglichst gering zu halten, muß die Dosierung eingeschränkt werden.

Modifizierte Silikate sind besondere Silikate mit einem pH-Wert von <11.5 und einem geringen $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äquiv.}}$ -Gehalt von <8.5%. Dank dem niedrigeren pH-Wert bewirken sie eine bessere Arbeitsumgebung und verursachen einen geringeren Endfestigkeitsabfall als Produkte, die auf Aluminaten und herkömmlichem Wasserglas basieren. Die Dosierung muß innerhalb der in den Anforderungen festgelegten Grenzwerte liegen.

Zusatzmittel für die Haftverbesserung/interne Nachbehandlung sind spezielle Zusatzmittel, die der Ausgangsmischung oder an der Düse zugegeben werden, um die Haftung zwischen den Spritzbetonschichten und/oder den Verbund des Spritzbetons mit der Untergrundoberfläche zu verbessern.

Sie werden anstelle von externen Nachbehandlungsmitteln oder anderen Nachbehandlungsverfahren verwendet. Die Wirkung sollte anhand von Vorversuchen auf der Baustelle mit den bei der Ausführung verwendeten Materialien, Betonrezeptur und besonderen Bedingungen bestimmt werden. Für die Dosierung (Menge, Zugabeort) sollten die Empfehlungen des Herstellers befolgt werden. Beim Naßspritzverfahren werden sie normalerweise zur Ausgangsmischung gegeben.

G4.7 Zusatzstoffe

Die in den Abschnitten 4.7.2 bis 4.7.4 beschriebenen Zusatzstoffe können direkt zur Spritzbetonmischung gegeben werden. Sie können zur Optimierung der Korngrößenverteilung und damit der Kompaktheit des Betons verwendet werden und/oder zur Verbesserung der Frisch- und Festbetoneigenschaften.

Viele Produkte, die als Zusatzstoffe verwendet werden, fördern die Bildung von hydratisierenden Calciumsilikaten im Zement, durch deren Wachstum die mechanischen und physikalischen Eigenschaften verbessert werden. Die Verwendung von pulverisierter Flugasche (PFA) und/oder Siliziumstaub erhöht die Kohäsion im Frischbeton und führt zu einer geringeren Rückprallmenge und einer besseren Pumpbarkeit. Einige Schlackenarten haben eine gegenteilige Wirkung, welche unter Umständen kompensiert werden muß.

Zusatzstoffe wie PFA und Siliziumstaub gehen eine puzzolanische Reaktion mit dem Calciumhydroxid im Zement ein. So entstehen zusätzliche Calciumsilikate, die zur Festigkeitsentwicklung und einer größeren Dichte beitragen. Die puzzolanische Reaktion und die Reaktionen mit Schlacken dauern länger als die normale Zementhydratation und tragen so zur langfristigen Festigkeit und Dauerhaftigkeit bei.

Anorganische Pigmente können vorgeschrieben werden, wenn besondere ästhetische Anforderungen erfüllt werden müssen. Dabei ist auf eine gleichmäßige Dosierung und gründliche Durchmischung zu achten, um starke Farbabweichungen zwischen den einzelnen Chargen zu vermeiden. Pigmente sind im allgemeinen inert und leisten keinen Beitrag zur langfristigen Festigkeit und Dauerhaftigkeit.

G4.8 Nachbehandlungsmittel

Nachbehandlungsmittel sollten vorgeschrieben werden, um durch die Verringerung der unkontrollierten Wasserverdunstung eine möglichst vollständige Zementhydratation zu erzeugen.

Es gibt zwei Arten von Nachbehandlungsmitteln: *Externe Nachbehandlungsmittel* und *Zusatzmittel für die interne Nachbehandlung*. Beide sollten gemäß den technischen Richtlinien des Herstellers verarbeitet werden.

Externe Nachbehandlungsmittel werden kurz nach dem Einbau des Spritzbetons auf dessen Oberfläche aufgespritzt. Wenn Beschleuniger verwendet werden, sollte innerhalb von 15 Minuten nach dem Einbau ein externes Nachbehandlungsmittel aufgespritzt werden. Ohne Verwendung von Beschleunigern, sollte dies innerhalb von 30 Minuten geschehen.

Die Verwendung von lösemittelhaltigen Nachbehandlungsmitteln sollte besonders in geschlossenen Räumen wie bei Tunneln vermieden werden. Das gewählte Nachbehandlungsmittel sollte die Haftung von nachfolgenden Schichten/Beschichtungen nicht beeinträchtigen oder sollte leicht zu entfernen sein.

Zusatzmittel für die interne Nachbehandlung werden der Ausgangsmischung beigegeben (siehe 4.6). Die Verträglichkeit von Nachbehandlungsmitteln mit dem Zement, den hydraulischen Bindemitteln, Beschleunigern und anderen Zusatzmitteln sollte anhand von Baustellenversuchen nachgewiesen werden. Besondere Beachtung erfordert die korrekte Durchmischung bei der Verwendung mit dem Trockenspritzverfahren.

G5 ANFORDERUNGEN AN DIE BETONZUSAMMENSETZUNG

G5.1 Allgemeines

Die Betonmischung, und damit alle ihre Bestandteile, sollte die Kriterien bezüglich der Eigenschaften sowie der Gesundheit und der Sicherheit erfüllen.

G5.2 Zement

Zementsorte und -gehalt sollten so ausgewählt werden, daß die vorgeschriebenen Anforderungen an Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons erfüllt werden. Jedes Material, welches als Bindemittel vorgeschlagen wird und in EN 197 nicht aufgeführt ist, muß zuerst auf seine Eignung hin geprüft werden und sollte die Mindestanforderungen für herkömmlichen Zement erfüllen.

Normalerweise sollte der Zementgehalt beim Trockenspritzverfahren zwischen 350 und 450 kg/m³ und beim Naßspritzverfahren zwischen 400 und 500 kg/m³ liegen.

Die Zeit bis zum Abbindebeginn sollte eine ausreichend lange Verarbeitbarkeit ermöglichen, ohne andererseits die für eine zuverlässige Sicherung erforderliche Frühfestigkeitsentwicklung zu verhindern. Normalerweise dauert die Zeit bis zum Abbindebeginn bei einem Zement mit einer spezifischen Oberfläche von über 350 m²/kg zwischen 1.5 und 3.5 Stunden.

Die Eigenschaften des Zementes sollten anhand von Vorversuchen zusammen mit den übrigen Betonbestandteilen, die bei der Ausführung verwendet werden sollen, untersucht werden. Seine Verträglichkeit und Reaktivität mit den Zusatzmitteln sollte während der Vorversuche und bei jeder neuen Lieferung geprüft werden.

Die Höchsttemperatur des Zementes in den Silos der Mischanlage sollte 70°C nicht übersteigen und beim Mischen nicht mehr als 50°C betragen. Der Zement sollte frisch sein und an einem trockenen Ort und/oder in einem geeigneten Silo gelagert werden.

Wenn die Gefahr eines Sulfatangriffes oder einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion besteht, sollten spezielle Zementsorten (sulfatbeständiger Zement) verwendet werden. Diese Zemente haben einen niedrigen C₃A-Gehalt, wodurch der chemische Angriff auf ein Mindestmaß reduziert wird; andererseits können sie jedoch lange Abbinde- und Erhärtungszeiten bewirken. Trotzdem wird durch die Verwendung von sulfatbeständigen Zementen nicht automatisch eine gute Dauerhaftigkeit des Betons sichergestellt, da physikalische Eigenschaften wie Porosität und Durchlässigkeit der Zementmatrix die Dauerhaftigkeit von Spritzbeton ebenfalls beeinflussen. Die Zugabe von Siliziumstaub kann ebenfalls zu einer Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Spritzbeton führen.

G5.3 Zusatzstoffe

Es sollten nur Zusatzstoffe verwendet werden, deren Eignung nachgewiesen wurde. Zusatzstoffe, die in der Mischanlage als Einzelkomponente zugegeben werden, sollten mit den übrigen Materialien homogen vermischt werden.

Bei der Verwendung von Zusatzstoffen muß besonders auf ihre Verträglichkeit mit den Zusatzmitteln geachtet werden, insbesondere mit den Beschleunigern. Im Zweifelsfalle muß die Verträglichkeit anhand von Baustellenversuchen nachgewiesen werden.

Zusatzstoffe, die mit dem Zement chemische Reaktionen eingehen, können den Zementgehalt teilweise ersetzen. Art und Menge eines Zusatzstoffes sollten anhand von Vorversuchen sorgfältig ermittelt werden und sollten den nationalen Normen und Vorschriften entsprechen, die am Verwendungsort des Spritzbetons gültig sind.

Pigmente können wie beim Normalbeton vorgeschrieben werden und sollten den Europäischen Normen oder den lokalen Vorschriften entsprechen. Sie sollten ebenfalls mit den auf der Baustelle verwendeten Materialien geprüft werden.

Flugasche (pulverisierte Brennstoffasche, PFA): Die Herkunft von PFA sollte sorgfältig abgeklärt werden, um einen zu hohen Anteil an freiem Alkali zu vermeiden.

Gemahlene, granuliert Hochofenschlacke Die spezifische Oberfläche (Blaine) sollte mindestens 450 ± 25 m²/kg betragen.

Siliziumstaub: kann als Pulver oder dünnflüssiger Brei zugegeben werden. Die normale Dosierung liegt bei 3-8% (bezogen auf die Trockenmasse von Portlandzement), sofern vom Bauherrn oder seinem Stellvertreter nicht anders angeordnet. Höhere Dosierungen können zusätzliche Maßnahmen zur Verringerung des Schwindmaßes erforderlich machen.

Folgende zusätzliche Anforderungen sollten erfüllt werden:

- | | | |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|
| - | Gehalt an amorphem SiO ₂ | ≥85% (bezogen auf die Masse) |
| - | MgO | ≤5% |
| - | Glühverlust | ≤4% |
| - | Spezifische Oberfläche (BET) | >2.10 ⁴ m ² /kg |

G5.4 Zuschläge

Die Qualität der Zuschläge ist für den Spritzbeton sowohl in bezug auf die Frisch- wie auf die Festbetoneigenschaften von großer Bedeutung.

Der Anteil der Zuschläge mit einer Größe von über 8 mm sollte 10% nicht überschreiten, damit der Rückprall möglichst gering bleibt und ein Eindringen in den bereits eingebauten Spritzbeton vermieden

wird. Korngrößen von über 12 mm sollten vermieden werden, da sie die Düse blockieren und einen gefährlichen Rückprall verursachen können.

Die Auswahl von gebrochenen Zuschlägen sollte mit Sorgfalt erfolgen. Ihre kantige Form kann die Pumpbarkeit der Betonmischung oder den Rückprall des Spritzbetons beeinträchtigen.

Zuschläge sollten sauber sein und auf mögliche chemische Reaktionen (wie Alkali-Kieselsäure-Reaktion) und zerstörerische organische Substanzen geprüft werden. Wenn die Analyse auf mögliche Probleme hinweist, sollten andere Zuschläge gewählt werden. Falls dies nicht möglich ist, muß ihre Verwendung von der Bauleitung genehmigt werden, nachdem ihr Einfluß auf Qualität und Dauerhaftigkeit des Betons nachgewiesen wurde.

Abbildung 5.4.1 dient zur Orientierung. Die Siebkurven der verwendeten Zuschläge sollten trotzdem aufgezeichnet werden, um sicherzustellen, daß die Anforderungen an Festigkeit, Pumpbarkeit und Rückprall des Spritzbetons erfüllt werden.

Die Eigenfeuchte der Zuschläge sollte bei der Berechnung des Zugabewassers berücksichtigt werden. Jede Zuschlagsorte sollte separat und wenn möglich überdeckt gelagert werden. Als Hauptbestandteile des Betons haben die Zuschläge einen großen Einfluß auf die Temperatur der Mischung. Bei sehr hohen oder niedrigen Umgebungstemperaturen sollten die Zuschläge entsprechend geschützt gelagert werden. Sie sollten gekühlt, resp. erwärmt werden, damit die Betontemperatur im vorgeschriebenen Bereich gehalten werden kann.

G.5.5 Zusatzmittel

G5.5.1 Allgemeines

Die Verwendung von Zusatzmitteln zu Zwecken, die in dieser EFNARC Richtlinie nicht beschrieben werden, sollte nur mit der schriftlichen Genehmigung der verantwortlichen Stelle erfolgen. Der Unternehmer muß vollständige und ausreichende Daten liefern können, die die Verwendung solcher Zusatzmittel rechtfertigen.

Die erforderlichen Eigenschaften und die Lieferkonsistenz sollten vor Einbaubeginn mit dem Hersteller jedes Zusatzmittels schriftlich abgemacht werden.

Lagerbedingungen und Verwendung von Zusatzmitteln sollten den Empfehlungen des Herstellers vollständig entsprechen. Bei vielen Zusatzmitteln entstehen Probleme bei Frost, was zu einer Beeinträchtigung ihrer Eigenschaften führen kann. Vor Beginn der Baustellenversuche sollte der Unternehmer beim Hersteller schriftliche Bestätigungen über die Stabilität der Zusatzmittel mit dem Zugabewasser einholen.

Wasserlöslicher Leim oder andere Zusatzstoffe, die zur Bündelung von Stahlfasern benutzt werden, müssen mit den übrigen Spritzbetonbestandteilen, einschließlich der Zusatzmittel, verträglich sein.

Anhand von Versuchen sollten alle Zusatzmittel in bezug auf Eigenschaften, Verträglichkeit zwischen den verschiedenen Zusatzmitteln und ihren allgemeinen Einfluß auf Qualität und Dauerhaftigkeit von Beton geprüft werden.

Die Sulfatbeständigkeit von Spritzbeton sollte, falls erforderlich, anhand von Vergleichsbetonversuchen nachgewiesen werden.

Die Auswirkungen von Zusatzmitteln auf die Gesundheit und Sicherheit der Mannschaft sowie auf die Umwelt sollten sorgfältig abgeklärt werden. Zulieferer von Zusatzmitteln sollten aufgefordert werden, alle nötigen Informationen und Daten über Dosierung, Eignung, Auswirkung im eingebauten Spritzbeton, einschließlich früherer Erfahrungen, Referenzen und umfangreicher Sicherheitsdaten, zur Verfügung zu stellen.

G5.5.2 Fließmittel, Verflüssiger, Verzögerer, Zusatzmittel für die Hydratationssteuerung, Haftverbesserung und interne Nachbehandlung sowie thixotropierende Zusatzmittel

Die Auswirkungen und optimalen Dosierungen dieser Zusatzmittel sollten anhand von Baustellenversuchen und in Übereinstimmung mit den Anforderungen bestimmt werden. Sie sollten die vom Hersteller empfohlenen Grenzwerte nicht überschreiten. Verflüssiger und Verzögerer sollten regelmäßig, bzw. nach Bedarf, auf Abbindezeit, Wasserreduktion und Festigkeitsentwicklung im Vergleich zum Nullbeton überprüft werden.

Die Verträglichkeit der Zusatzmittel mit dem Zement, den Bindemitteln und den Beschleunigern sollte anhand von Baustellenversuchen nachgewiesen werden.

G5.5.3 Beschleuniger

Wie bereits erwähnt, ist der Gebrauch sowohl von alkalihaltigen wie auch von alkalifreien Beschleunigern weit verbreitet. Im allgemeinen sollten alle Beschleuniger in den vom Hersteller empfohlenen Dosierungen verwendet werden.

Bei der Verwendung von *alkalifreien Beschleunigern* müssen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Der Höchstwert des Na₂O-Äquivalentes der Beschleuniger liegt bei 1 Masse-%.
- Die Dosierung (bezogen auf die Bindemittelmasse) beträgt vorzugsweise:
 - für Pulverbeschleuniger: 4-8%
 - für Flüssigbeschleuniger: 4-10%
- Der pH-Wert von Beschleunigern in Flüssigform liegt vorzugsweise zwischen 2.5 und 8.

Alkalihaltige Beschleuniger müssen ausdrücklich folgende Grenzwerte einhalten:

- Pulverbeschleuniger: 4-8% (bezogen auf die Bindemittelmasse)
- Flüssigbeschleuniger: 4-8% (bezogen auf die Bindemittelmasse)

Der Druckfestigkeitsabfall (nach 7, resp. nach 28 Tagen) von beschleunigtem Spritzbeton sollte sowohl bei Beschleunigern in Pulver- als auch in Flüssigform 25% nicht überschreiten.

Wenn Beschleuniger auf Aluminatbasis in Kombination mit Wasser mit einem SO₄²⁻-Gehalt von über 600 mg/l verwendet werden, sollte unter Einhaltung der korrekten Dosierung der Gehalt an wasserlöslichem Al₂O₃ den Wert von 0.6% bezogen auf das Zement- und/oder Bindemittelgewicht nicht überschreiten. Andernfalls müssen mit der höchstzulässigen Baustellendosierung Versuche mit Vergleichsspritzbeton durchgeführt werden.

G5.6 Fasern

Fasern können im Spritzbeton vorgeschrieben werden, um Menge und Abstände der herkömmlichen Bewehrung zu reduzieren oder diese völlig zu eliminieren. Im Falle einer ausschließlichen Faserbewehrung muß die Anordnung der Arbeitsfugen bei der Planung vorgeschrieben werden, da ein Überlappen von Stahlfasern an den Arbeitsfugen nicht möglich ist.

Die Leistungsanforderungen an faserbewehrten Spritzbeton sollten von der Bauleitung genau vorgeschrieben werden.

Fasern unterscheiden sich nach Material, Länge und Form. Unterschiedliche Fasersorten erfordern normalerweise unterschiedliche Dosierungen. Diese sollten vom Zulieferer empfohlen und anschließend anhand von Baustellenversuchen bestätigt werden.

Veränderungen im Frischbeton beeinflussen die Menge des Faserrückpralls und damit den Endgehalt der Fasern im eingebauten Spritzbeton.

Die Faserzugabe zum Beton erfolgt normalerweise mit einem geeigneten Dosiergerät in der Mischanlage. Sie sollten nach den Angaben des Herstellers gründlich durchmischt werden.

Am häufigsten werden Stahlfasern verwendet; bisher sind Fasern mit einer Länge von 12 bis 50 mm gespritzt und geprüft worden. Die kürzeren sind einfacher zu mischen und zu spritzen, und sie prallen weniger zurück; mit den längeren werden bessere Ergebnisse in Bezug auf das Arbeitsvermögen des Betons und die Tragfähigkeit nach der Frührißbildung erreicht. Meist wird eine Faserlänge von 25 bis 35 mm vorgeschrieben. Als allgemeine Regel gilt, daß die Faserlänge normalerweise 50 mm nicht übersteigen sollte.

Stahlfasern sollten bis zur Verwendung trocken und in verschlossenen Behältern aufbewahrt werden, um sie vor Korrosion, Öl, Fett, Chloriden und schädlichen Substanzen zu schützen, welche ein effizientes Mischen und Verarbeiten oder die Haftung zwischen Fasern und Spritzbeton beeinträchtigen. Fasern, die beim Mischen zur Igelbildung neigen, können nicht verwendet werden.

G5.7 Konsistenz

Die erforderliche Betonkonsistenz beim Naßspritzverfahren ist von praktischen Aspekten wie der Pumpbarkeit abhängig. Um bessere Frisch- und Festbetoneigenschaften zu erzeugen, sollte das

Setzmaß zwischen 80 und 200 mm liegen. Das Setzmaß der verschiedenen Chargen sollte jeweils gemessen werden, wobei die Abweichungen ± 30 mm nicht überschreiten sollten. Als Alternative zur Bestimmung des Setzmaßes kann das Verfahren zur Prüfung des Betonausbreitmaßes nach EN 206 verwendet werden.

Prüfwerte von faserhaltigem Beton können sich von jenen von Normalbeton unterscheiden. Wasserreduzierende Zusatzmittel werden verwendet, um den Wassergehalt zu verringern und die erforderliche Konsistenz zu erreichen. Bluten und Entmischen müssen stets vermieden werden.

G5.8 Arbeitstemperatur

Niedrige Temperaturen verzögern das Abbinden und Erhärten, und der Beton wird die Anforderungen an die Frühfestigkeit nicht erfüllen, es sei denn, die Beschleunigerdosierung wird erhöht, was jedoch normalerweise zu einem Endfestigkeitsabfall führt. Hohe Temperaturen verkürzen die Dauer der Verarbeitbarkeit und beschleunigen das Ansteifen und Abbinden des Betons, wodurch die für eine gute Haftung und Kohäsion des Spritzbetons erforderliche «Plastizität» verloren geht.

Die Mischtemperatur sollte wenn möglich im Bereich von $+10$ bis $+25^{\circ}\text{C}$ liegen. Außerhalb dieses Bereiches sollten geeignete Maßnahmen getroffen werden, wie zum Beispiel eine andere Lagerung der Zuschläge sowie Erwärmen, resp. Kühlen der Zuschläge und/oder des Zugabewassers.

G6 ANFORDERUNGEN AN DIE DAUERHAFTIGKEIT

G6.1 Allgemeines

Ein dauerhafter Beton hält den Bedingungen, aufgrund derer er hergestellt wurde, während seiner geplanten Lebensdauer ohne Schaden zu erleiden stand. Zu diesen Bedingungen gehören die Umwelt, welcher der Beton ausgesetzt ist, und die Aktivitäten innerhalb des Betons.

Die wichtigsten Umwelteinflüsse sind in Tabelle 1: Umwelteinflußklassen von prEN 206: 1997 als Karbonatation, Chloride, Frost-Tauwechsel und chemischer Angriff aufgeführt. Andere Schadensursachen sind Verwitterung, Abrasion und Angriff durch aggressive Flüssigkeiten.

Die Dauerhaftigkeit des Betons ist in hohem Maße davon abhängig, daß das Eindringen von schädlichen Flüssigkeiten und Gasen möglichst vermieden wird und chemische Reaktionen, die mit dem Zement und bestimmten Kieselsäuren in den Zuschlägen (Alkali-Kieselsäure-Reaktion) stattfinden, verlangsamt werden. Eine hohe Dichte wird hauptsächlich durch einen geringen Wassergehalt und eine gute Verdichtung erzeugt. Spritzbeton hat gewöhnlich einen hohen Zementgehalt, was zu einem hohen Gehalt an Wasser führt; daher sollte der Wasserzementwert möglichst niedrig sein.

Die Durchlässigkeit von Beton bestimmt auch die Geschwindigkeit der Karbonatation. Sobald die oberste Schicht karbonisiert ist, ist der Bewehrungsstahl nicht mehr vor der Korrosion durch Sauerstoff und Wasser geschützt. Ein dichter Beton verhindert auch den Eintritt von Chloriden, sollte das Betonbauwerk mit Salzen in Berührung kommen, wie zum Beispiel bei Brücken, wo Tausalze verwendet werden, oder in Meeresnähe. Chloride bewirken eine elektrochemische Korrosion der Stahlbewehrung.

- a) Geeignete Bestandteile werden in Abschnitt 4 der 'Richtlinie' besprochen. Wird eine Kombination von verschiedenen Zusatzmitteln vorgeschrieben, ist Vorsicht geboten, da sich ihre Interaktion schädigend auf Frisch- oder Festbetoneigenschaften auswirken könnte. Sollte dies der Fall sein, verfügt der Zulieferer der Zusatzmittel normalerweise über die nötigen Informationen, die als Orientierung für den Betonhersteller verwendet werden sollten.
- b) Anforderungen an die Eigenschaften des Endproduktes werden in Abschnitt 9 der 'Richtlinie' besprochen. Die Eigenschaften beziehen sich ebenfalls auf alle Aktivitäten im Zusammenhang mit dem Einbauverfahren, vom Mischen bis zur Verarbeitung. Der Planer sollte anhand von Tabelle 1 in prEN 206 die Klassenbezeichnung bestimmen und anschließend bei der Festlegung des maximalen Wasserzementwertes und des Mindestzementgehaltes die Anleitungen von Tabelle D1 befolgen, unter Berücksichtigung der in Absatz 6.4 dieser 'Richtlinie' aufgeführten Vorbehalte.

G6.2 Chloridgehalt

Wie bereits erwähnt, sind Chloridionen wegen ihrer elektrochemischen Aktivität die Hauptursache für die Korrosion des Bewehrungsstahls. Salz kann in den ausgehärteten Beton eindringen; es kann aber bereits über das Zugabewasser, den Sand und die Zuschläge, falls diese aus dem Meer stammen, in den Frischbeton gelangen. Tabelle 11 in prEN 206: 1997 gibt die Grenzwerte für die Chloridionen(Cl^-)

)konzentration im eingebauten Beton an, und zwar für den unbewehrten, den bewehrten und den vorgespannten Beton. Der Hersteller sollte sich davon überzeugen, daß der gesamte Chloridgehalt aus allen übrigen Bestandteilen wie Wasser, Zuschläge (inkl. Sand) und Zusatzmittel diese Grenzwerte nicht überschreitet.

Die in Tabelle 11 aufgeführten Grenzwerte mögen jenen als hoch erscheinen, die mit den Nachforschungen bei Schäden und der Ausführung von Instandsetzungsprogrammen vertraut sind, wo Werte für die Cl⁻-Konzentration von über 0.2% bezogen auf die Zementmasse bereits als inakzeptabel gelten. Es muß aber bedacht werden, daß die Kristalle, die im Frischbeton bei der Reaktion von Zement mit salzhaltigem Wasser gebildet werden, einen Teil der Chloride der Ausgangsmischung einschließen.

G6.3 Alkaligehalt

Im Festbeton können Alkali-Kieselsäure-Reaktionen stattfinden, wenn die Zuschläge eine bestimmte Art von (reaktiven) Kieselsäuren enthalten, wenn in der Mischung aus dem Zement genügend Alkali (meist Natrium- und Kaliumoxide) vorhanden ist und wenn ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Der einfachste Weg, dieses Problem in Fällen, in denen der verwendete Zuschlag reaktive Kieselsäuren enthält, zu vermeiden, ist die Verwendung von Zement mit einem geringen Alkaligehalt wie sulfatbeständigem Portlandzement oder Mischzement aus Portlandzement und GGBS oder PFA. Spritzbeton hat im allgemeinen einen hohen Zementgehalt, welcher zu einer hohen Alkalikonzentration beitragen kann.

Während beim Normalbeton auf langfristige, vor Ort gemachte Erfahrungen zurückgegriffen werden kann, ist dies beim Spritzbeton, der nur einen geringen Anteil am Gesamtbetonvolumen hat, kaum möglich.

G6.4 Anforderungen bezüglich Umweltbedingungen

(ANMERKUNG: Der Verweis auf die Europäische Norm sollte lauten: «Abschnitt 4 von prEN 206: 1997)

- (i) Bei Wasserzementwerten, die über dem genannten Wert liegen, nimmt das Porenvolumen im Festbeton rasch zu, und die Festigkeit nimmt im gleichen Maße ab, was zu einem immer weniger dauerhaften Beton führt. Bei der Bestimmung des Wasserzementwertes muß der Wassergehalt jedes Zusatzmittels berücksichtigt werden. Dieser Absatz trifft nur auf das Naßspritzverfahren zu. Beim Trockenspritzverfahren wird das Wasserzementverhältnis durch die Methode selbst bestimmt und liegt daher fast immer unter diesem Wert.
- (ii) Der hier genannte Mindestzementgehalt soll zusammen mit der Beschränkung des Wasserzementwertes die Dauerhaftigkeit sicherstellen. Sollte durch die in Tabelle 1 im Abschnitt 4 von prEN 206 aufgeführten Umweltbedingungen ein höherer Mindestwert erforderlich sein, muß jene Richtlinie befolgt werden. Mindestzementgehalte werden in Tabelle D1 im Anhang D von prEN 206 oder in der jeweiligen nationalen Ergänzungsnorm vorgeschrieben. Die genannten Grenzwerte beziehen sich auf den eingebauten Beton, nicht auf die Ausgangsmischungen. Dadurch daß diese Grenzwerte etwas über dem absoluten Minimum liegen, wird den beim Spritzbetoneinbau unvermeidlichen Abweichungen Rechnung getragen.
- (iii) Im Falle von Spritzbeton sind physikalische Prüfungen der Frost-Tauwechselbeständigkeit geeignet. Messungen des Luftgehaltes sind oft irreführend, da das Gefrieren sowohl in den Zwischenräumen der Betonmatrix wie auch in den Luftporen stattfindet.
- (iv) Es wird angenommen, daß keine elektrochemische Korrosion zwischen den Fasern der obersten Schicht stattfindet und daß ihre Gegenwart die Aktivität von Korrosionsprodukten einschränkt, wenn sie sich in karbonisiertem Beton befinden.

G7 ZUSAMMENSETZUNG VON MISCHUNGEN

G7.1 Allgemeines

Beim «Designed Mix» ist der Käufer oder der Ausschreiber verantwortlich für die Bestimmung der erforderlichen Betoneigenschaften, und der Hersteller (beim Trockenspritzverfahren der Unternehmer) trägt die Verantwortung für die Auswahl der Rezeptur, um die erforderlichen Eigenschaften zu erreichen. Ein «Prescribed Mix», bei dem die Betonrezeptur vom Käufer festgelegt wird, ist für das Trockenspritzverfahren ungeeignet; der Anteil des Rückprallmaterials ist zu groß und seine Zusammensetzung zu unterschiedlich, so daß das Verhältnis der Bestandteile stets erst im vor Ort

eingebauten Beton feststeht. Auch beim Naßspritzverfahren entsteht oft eine gewisse Rückprallmenge, so daß wenn möglich der «Designed Mix»-Ansatz verwendet werden sollte.

G7.2 Maßgeschneiderte Mischungen («Designed Mixes»)

Die Rezeptur des Spritzbetons ist völlig dem Unternehmer überlassen; einzige Voraussetzung ist, daß er die vorgeschriebenen Leistungsanforderungen erfüllt. Gemäß diesem Absatz kann der Ausschreiber verschiedene physikalische Eigenschaften des Festbetons verlangen, welche anhand der geeigneten Prüfverfahren, die in Abschnitt 9 dieser 'Richtlinie' beschrieben sind, überprüft werden.

G7.3 Vorgeschriebene Mischungen («Prescribed Mixes»)

Das übliche Vorgehen bei den vorgeschriebenen Mischungen ist, daß die Betonrezeptur vom Käufer festgelegt wird. Ein erfahrener Unternehmer weiß über das Verfahren sowie die Materialien, deren Interaktionen und über das zu erwartende Endprodukt bei jedem Spritzbeton Bescheid. Da die Rückprallmenge wie bereits erwähnt unterschiedlich und doch von ausschlaggebender Bedeutung ist, ist einer der Hauptgründe, weshalb eine vorgeschriebene Mischung beim Trockenspritzverfahren nicht verwendet werden sollte, die Unsicherheit der Mischverhältnisse im Endprodukt. Daher wird empfohlen, daß der Ausschreiber diesen Umstand berücksichtigt und sich vom Unternehmer bei der Festlegung der Rezeptur für eine bestimmte Applikation beraten läßt. Die Festigkeit ist bisher noch nicht erwähnt worden: Es ist gefährlich, zu hohe Anforderungen an den Beton zu stellen; um eine bestimmte Mindestbetonfestigkeit sicherzustellen, reicht es aus, wenn eine Mindestbetonfestigkeitsklasse in Verbindung mit einem maximalen Wasserzementwert vorgeschrieben wird.

Bei der Erstellung von tragenden Bauwerken sollten vorgeschriebene Mischungen vermieden werden, oder es müssen häufig Versuche durchgeführt werden, um den Nachweis über die tatsächliche Leistung des Spritzbetons zu erbringen.

G7.4 Kombinierte Mischvorschrift

Wie bereits erwähnt, ist es gefährlich, zu hohe Anforderungen an den Beton zu stellen. Auf die in diesem Absatz ermöglichte Flexibilität sollte daher nur selten zurückgegriffen werden.

G8 VORGEHEN BEIM EINBAU VON SPRITZBETON

Die folgenden Anleitungen beziehen sich auf den erweiterten Abschnitt, der nachträglich als separater Teil der 'Richtlinie' herausgegeben wurde.

G8.1 Vorbereitungsarbeiten

Eine gute Vorbereitung ist unerlässlich beim Einbau von Spritzbeton. Die Absätze dieses Abschnittes sind daher von besonderer Wichtigkeit und müssen befolgt werden.

G8.1.1 Untergrund

Anders als Normalbeton wird Spritzbeton in dünnen Schichten eingebaut; dadurch ist er heikler gegenüber Wärmeverlusten. Ist der Untergrund beim Einbau des Spritzbetons kalt, wird diesem rasch Wärme entzogen, was zu einer Verzögerung oder Verhinderung der Zementhydratation führt. Durch starke Winde verdunstet Wasser an der Betonoberfläche. Der Wassergehalt von Spritzbeton ist meist niedrig und bietet daher nur eine geringe Toleranz gegenüber Wasserverlusten an die Atmosphäre. Da die Oberfläche von Spritzbeton in Vergleich zu seinem Volumen sehr groß ist und wegen seines schichtweisen Aufbaus, wirkt sich starker Regen schädlich aus.

G8.1.2 Für die Gebirgssicherung

Beim Einbau von Spritzbeton im Tunnelvortrieb und beim Bau von Kavernen durch Fels ist die Oberfläche im allgemeinen frisch ausgebrochen und hart. Problematisch wird die Haftung bei bröckligem, flockigem oder schieferartigem Gestein und bei Felsoberflächen, die bei der Berührung mit Luft oder Feuchtigkeit verwittern. Im Freien weisen Felsoberflächen meist starke Verschmutzungen und bis in unterschiedliche Tiefen reichende Verwitterungen auf. Solche Oberflächen müssen gründlich und gewissenhaft gereinigt werden, wenn eine gute Haftung des Spritzbetons erzeugt werden soll. Sie sollten gewaschen werden, mitunter auch unter Einsatz von Hochdruckwasserreinigern, durch Dampf- oder Sandstrahlen.

Es gibt viele Verfahren, um den Eintritt von Wasser zu verhindern; dazu gehören die Injektion, Bohrlöcher, Ablaufrinnen und Rohrleitungen. Falls das Wasser nicht abgedichtet wird, wird es normalerweise in die Sohle oder in das Entwässerungssystem für das Grundwasser geleitet.

G8.1.3 Für die Betoninstandsetzung

Entfernung von Beton

Die Kanten eines Ausschnittes müssen einen Winkel von 45° aufweisen, um den bei rechtwinkligen Kanten unvermeidlichen Einschluß von Rückprallmaterial zu vermeiden und einen korrekten Aufbau des Spritzbetons sicherzustellen.

In der Praxis hat sich erwiesen, daß der Zwischenraum hinter den Bewehrungsstäben mindestens 20 mm tief sein muß, damit diese beim Spritzen vollständig eingebettet werden. Natürlich ist dies abhängig vom Durchmesser der Bewehrungsstäbe und der Technik des Düsenführers.

Wird der Beton durch Abmeißeln entfernt, können die Bewehrungsstäbe, da sie unsichtbar sind, leicht beschädigt werden, so daß ihr Durchmesser verringert wird. Die Verwendung von Meißeln in der Nähe von oder direkt über Bewehrungsstäben sollte deshalb nicht gestattet sein. Der Abbruch mit Wasserhochdruck (*hydrodemolition*) ist vorzuziehen, da bei jedem mechanischen Abbruchverfahren die Gefahr von Mikrorißbildungen im Untergrund und Beschädigungen an der Bewehrung besteht.

In den Anleitungen für den Abbruch sollte aufgeführt sein, ob die *hydrodemolition* in bestimmten Abschnitten und bis zu einer gewissen Tiefe erfolgen soll oder ob der schlechte Beton selektiv entfernt werden soll. Bei der selektiven *hydrodemolition* werden vorzugsweise vollautomatische Roboter eingesetzt. Die Geräte sollten an einer Vergleichsfläche kalibriert werden. Die Kalibrierung sollte die Durchflußmenge und den Druck des Wassers sowie die Größe der Düse und deren Bewegungsmuster umfassen und sollte bei der vorgeschriebenen Abbruchtiefe ausgeführt werden. Die Ergebnisse aus der Vergleichsfläche sollten von der Bauleitung genehmigt werden, bevor mit dem Abbruch begonnen wird.

Nach der *hydrodemolition* sollte die neue Betonoberfläche keine losen Teile aufweisen, und die groben Zuschlagkörner sollten gut eingebettet sein (wenn mit dem Hammer dagegengeschlagen wird, sollten sie eher entzweibrechen als sich zu lösen). Nadelförmige Lunker sollten nicht mehr als 5% der Fläche bedecken.

Bewehrungsstäbe

Nach der *hydrodemolition* sollten die Bewehrungsstäbe die erforderliche Sauberkeit aufweisen, so daß keine zusätzliche Reinigung benötigt wird, sofern der Spritzbeton innerhalb des mit der Bauleitung abgemachten oder von dieser vorgeschriebenen Zeitraums eingebaut wird, wobei Schmutz und Rost die beiden Hauptkriterien sind. Andernfalls sollten die Bewehrungsstäbe vor dem Spritzbetoneinbau durch Sandstrahlen oder mit dem Hochdruckwasserreiniger gereinigt werden. In Meeresnähe oder anderen Umgebungen, in denen der Beton einem Chloridangriff ausgesetzt ist, müssen besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden.

Wenn die Bewehrungsstäbe einen verminderten Durchmesser aufweisen, werden normalerweise zusätzliche Stäbe je nach Bedarf und gemäß den Bestimmungen der Bauleitung eingeschweißt oder mit Draht befestigt.

G8.1.4 Mengen

Die Gesteinsqualität wird bewertet und aufgezeichnet; sie dient als Basis für die Abschätzung der zur Felssicherung benötigten Gesamtmenge an Beton.

Abschnitte, auf denen Spritzbeton eingebaut werden soll, sollten profilbezogen nummeriert und die Lage innerhalb des Profils gekennzeichnet werden. Eine Mengenschätzung sollte auf der Größe der Fläche, der vorgeschriebenen durchschnittlichen Schichtdicke und dem Rauheitswert basieren. Der Rauheitsfaktor ist empirisch und vermittelt ein Gesamtbild von:

- der eigentlichen Gesteinsoberfläche, geteilt durch die theoretische Oberfläche, und
- dem Volumen, welches benötigt wird, um Hohlstellen und Risse aufzufüllen versus dem Volumen für eine gleichmäßige Verteilung.

Der Rauheitswert variiert von 1.0 beim Vortrieb mit Vollschnittmaschinen bis 1.3-1.8 beim Bohr- und Sprengvortrieb. Der Faktor kann ferner auch von der Schichtdicke beeinflusst werden. (Siehe dazu die 'Norwegischen Richtlinien für Spritzbeton', Bericht Nr. 7.)

G8.2 Ausführung

G8.2.1 Handhabung der Düse

Einziges Ziel des Einbaus von Spritzbeton ist es, mit dem geringstmöglichen Rückprallverlust eine kompakte, dichte und gut haftende Schicht zu erzeugen. Der Rückprall hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem von der Wucht und dem Winkel, in dem der Spritzstrahl auf die Oberfläche prallt. Da die Geschwindigkeit, mit der das Spritzgut aus der Düse tritt, meist vorgegeben ist, wird die Aufprallstärke vom Abstand der Düse zur Untergrundoberfläche und vom Aufprallwinkel bestimmt. Bei einem zu kurzen Abstand ist es unmöglich, auf der Oberfläche eine Schicht aufzubauen, da das aufgebrachte Spritzgut durch die Wucht des auftreffenden Strahls fortlaufend weggewaschen wird. Bei einem zu großen Abstand ist der Aufprall zu schwach, um eine gute Haftung und Verdichtung des Betons zu bewirken. In beiden Fällen entsteht ein übermäßiger Rückprall, da nur geringe Mengen des Spritzgutes an der Oberfläche haften bleiben. Ein möglichst geringer Rückprall wird erreicht, indem der Abstand zwischen der Düse und der Untergrundoberfläche im richtigen Verhältnis zur Austrittsgeschwindigkeit des Spritzgutes steht. Es ist sehr wichtig, daß der Düsenführer diesen Abstand exakt beibehält.

Empfohlene Spritzabstände:

	Trockenspritzen	Naßspritzen
Instandsetzungen	0.5-1.0 m	0.5-1.0 m
Felssicherung, manuell	---	0.5-1.5 m
Felssicherung, Roboter	---	1.0-2.0 m

Der Winkel, in dem das Spritzgut von der Untergrundoberfläche zurückprallt, ist derselbe wie der Winkel, in dem es auftrifft. Je flacher der Winkel des auftreffenden Materials, desto größer ist der Materialverlust. Daher sollte die Düse stets in einem rechten Winkel zur bespritzten Oberfläche gehalten werden, außer beim korrekten Einbetten von Stahlbewehrungen wie Gitterträgern und Bewehrungsstäben.

Festigkeit, Verdichtung und Haftung des Spritzbetons werden durch Hohlräume und poröse Stellen stark beeinträchtigt. Mängel dieser Art entstehen beispielsweise, wenn sich Rückprallgut auf Felsvorsprüngen oder in Spalten ansammelt oder bei einer mangelhaften Ummantelung der Bewehrungsstäbe. Solche Hohlräume hinter Bewehrungsstäben werden als «Spritzschatten» bezeichnet. Es liegt in der Hand des Düsenführers, durch eine geschickte Handhabung der Düse Rückprallnester und Ansammlungen von Rückprallgut zu verhindern. Da es nicht immer möglich ist, das Rückprallmaterial kompakt einzuspritzen oder es mit dem Strahl wegzublasen, muß der Schlauchträger oft mithelfen und das Rückprallmaterial mit einer Blaspistole laufend entfernen.

G8.2.1.1 Schichtdicke

Ist eine gute Haftung des frischen Spritzbetons am Untergrund erforderlich, sollte sein Eigengewicht weder die innere Bindekraft noch die Haftfestigkeit am Untergrund übersteigen. Wenn die frisch aufgebrachte Spritzbetonschicht zu dick und daher zu schwer ist, bricht sie unter ihrem eigenen Gewicht von der Oberfläche weg. Beim Überkopfeinbau fällt jede schlecht haftende Betonschicht herunter. Ein gutes Urteilsvermögen ist jedoch bei senkrechten und stark geneigten Flächen gefragt. Wird eine dicke und somit übermäßig schwere Spritzbetonschicht auf eine solche Fläche aufgebracht, macht sich oft nur ein leichtes Durchhängen bemerkbar, jedoch ohne daß die Schicht wegbricht, da in dieser Situation eine Eigentragswirkung entsteht. Schwerwiegende Mängel können so unbemerkt bleiben und erst zum Vorschein kommen, wenn der Spritzbeton nach der Erhärtung mit dem Hammer auf Hohlstellen und schlechte Haftung überprüft wird.

Die Verwendung von Spritzbetonschleunigern ermöglicht den Einbau von größeren Schichtdicken mit jeder Lage.

G8.2.1.2 Spritzbeton mit Stahlfaserbewehrung

Je nach vorgeschriebener Endschichtdicke kann der Einbau von stahlfaserbewehrtem Spritzbeton zur Verringerung des Rückpralls in zwei Arbeitsgängen erfolgen. Die Schichtdicke beim ersten Arbeitsgang beträgt dabei 50 mm. Für das Verfahren bei Betoninstandsetzungen wird auf 8.2.6 verwiesen.

G8.2.1.3 Messung des Rückpralls

Falls erforderlich, kann der Rückprall gemessen werden, indem ein festgelegtes Volumen von mindestens 0.75 m^3 gespritzt und der entstandene Rückprall eingesammelt wird. Dazu muß eine Fläche von etwa $40\text{-}50 \text{ m}^2$ mit Plastikfolie abgedeckt werden. Eine Schicht von $40\text{-}60 \text{ mm}$, bestehend aus zwei Lagen von je $20\text{-}30 \text{ mm}$, sollte ohne Unterbruch aufgespritzt werden. Bei Spritzbeginn müssen die Pumpe bzw. der Beschickungstrichter an der Pumpe voll sein; letzterer muß auch bei Spritzende denselben Füllgrad aufweisen. Das Rückprallmaterial wird von der Plastikfolie eingesammelt und gewogen. Die Menge wird in Masse-% bezogen auf die Gesamtmenge der gespritzten Betonmischung ausgedrückt.

G8.2.6 Spritzbetoneinbau bei Instandsetzungen

Empfohlene Schichtdicken, ohne Verwendung von Abbindebeschleunigern:

- Hinter und rund um die Bewehrungsstäbe:

Überkopf:	10 mm hinter den Stäben
Senkrecht:	20 mm hinter den Stäben
- Zusätzliche Schichten, wenn keine Bewehrungsstäbe vorhanden sind:

Überkopf:	max. 30 mm
Senkrecht:	max. 50 mm

Vor dem Einbau von weiteren Schichten sollte der Spritzbeton der vorhergehenden Schicht eine ausreichende Festigkeit erreicht haben. Bei einer Temperatur von etwa 20°C und ohne Verwendung eines Abbindebeschleunigers beträgt die Wartezeit etwa 3-5 Stunden.

Wegen des erhöhten Risikos, daß die Bewehrung nicht vollständig umschlossen und der Beton ungenügend verdichtet wird, sollten Stahlfasern beim Spritzen hinter Bewehrungsstäbe nicht verwendet werden. Bei der Verwendung von anderen Fasern sollten spezielle Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden. Stahlfasern können außerhalb der Bewehrungsstäbe eingesetzt werden.

Die Überdeckung der Bewehrung sollte überwacht werden, indem entweder vor Spritzbeginn eine Bezugsebene erstellt wird oder nach dem Spritzen Messungen mit dem Überdeckungsmesser durchgeführt werden. Das Verfahren sollte mit der Bauleitung abgesprochen werden.

Wenn eine Oberflächenbearbeitung oder die Kontrolle der Ausrichtung erforderlich sind, sollte dies mit Hilfe einer Abziehbohle bzw. von Führungsdrähten geschehen.

Bei Bauwerken, die einem Chloridangriff ausgesetzt sind, z.B. durch Meerwasser oder Tausalze, sollte das Nachbehandlungsmittel imstande sein, das Eindringen der Chloride zu verhindern.

G8.2.7 Eignung der Düsenführer

Die Düsenführer müssen im Besitze eines vom Unternehmer ausgestellten Fähigkeitsausweises oder einer anderen schriftlichen Bestätigung sein, die bescheinigt, daß sie unter Zustimmung der Bauleitung gemäß dem CITB-NVQ-Programm (Großbritannien), ACI 506.3R-82 (USA) bzw. ähnlichen nationalen Normen zufriedenstellend gearbeitet haben.

G8.3 Ausrüstung

G8.3.2 Für das Naßspritzverfahren

Die Pumpeinrichtung sollte eine kontinuierliche und möglichst pulsationsfreie Förderung der Ausgangsmischungen ermöglichen. Dazu werden folgende Pumpentypen empfohlen:

- Kolbenpumpe
- Monopumpe
- Schlauchquetschpumpe

Als Faustregel gilt, daß der Luftkompressor je $\text{m}^3/\text{Std.}$ Spritzleistung eine Leistung von $1 \text{ m}^3/\text{Min.}$ bei 7 bar haben sollte; dies sollte vom Düsenführer überwacht werden.

Je nach Eignung von Förderleitungen und Spritzdüse für die jeweilige Spritzleistung kann der Bedarf an Druckluft bis zu 50% höher ausfallen. Zu geringe Druckluftmengen führen zu einer niedrigen Geschwindigkeit des Spritzstrahls und damit zu einer geringen Verdichtung, einer geringen Dichte und niedrigen Festigkeiten.

G8.3.3 Für das Trockenspritzverfahren

Die empfohlenen Trockenspritzmaschinen sind:

- Taschenrad-Fördermaschine

Die Fülleinrichtung der Taschenrad-Fördermaschine befindet sich innerhalb der Druckkammer, in welche die Trockenmischung gefüllt wird. Der Durchsatz wird durch die Veränderung der Umdrehungsgeschwindigkeit des Taschenrades eingestellt.

- Rotormaschine

Bei der Rotormaschine wird die Trockenmischung in den Einfülltrichter gegeben. Durch sein Eigengewicht fällt das Gemisch durch eine Beschickungsöffnung in die sich durch die Rotorumdrehung abwechselnd öffnenden Rotorkammern. Während sich die eine Kammer füllt, wird das Gemisch in der anderen (vollen) Kammer mit einem Druckluftstrom und einem Druck von 3-6 bar durch die Austrittsöffnung in die Förderleitung und zur Düse gefördert, wo die Zugabe von Wasser erfolgt. Der Rotor ist oben und unten mit Dichtungsplatten aus Gummi abgedichtet.

Die Pulsation in der Betonförderung, die beim Rotorprinzip entsteht, ist unerwünscht. Sie kann durch eine Verlängerung der Förderleitung und die Wahl des geeigneten Rotortyps (Rotorkammervolumen) verringert werden. Der Durchsatz wird durch die Veränderung der Umdrehungsgeschwindigkeit und des Volumens der Rotorkammern gesteuert. Wie beim Taschenradförderer muß der Durchmesser von Förderleitungen und Spritzdüse an die Spritzleistung angepaßt sein.

- Doppelkammermaschine

Das Doppelkammersystem beruht auf zwei miteinander verbundenen, übereinanderliegenden Kammern mit einer Austrittsöffnung am Boden der unteren Kammer. Die Trockenmischung wird in die obere Kammer gefüllt, wobei das Glockenventil zwischen den beiden Kammern geschlossen ist. Danach wird die Einwurföffnung dicht verschlossen und der Druck der oberen Kammer dem der unteren angeglichen. Nun wird das Ventil zwischen den Kammern geöffnet, so daß das Gemisch von der oberen in die untere Kammer fällt. Danach wird das Ventil zwischen den beiden Kammern wieder geschlossen und der Druck in der oberen Kammer abgelassen, so daß die Einfüllöffnung wieder geöffnet werden kann. In der Zwischenzeit wird das Trockengemisch mit einem mit Druckluft angetriebenen Förderrad aus der unteren Kammer in den Luftstrom der Förderleitung geschleust.

Druckluft

Die erforderliche Druckluftmenge wird durch die Fördermenge und die Förderdistanz (Länge der Förderleitung) bestimmt. Als Faustregel gilt, daß jeweils 2 m³/Min. Druckluft je 1 m³/Std. Förderleistung benötigt werden. Die Geschwindigkeit des Luftstroms in der Förderleitung sollte bei 40-60 m/Sek. liegen.

Um einen gleichmäßigen Materialfluß zu erhalten, sollte die Förderleitung eine Länge von mindestens etwa 30 Metern aufweisen.

Bei der Taschenradförderung sollte der Luftdruck in der Druckkammer bei freiem Luftstrom durch die leere Förderleitung etwa 60 kPa betragen. Bei der Förderung von Trockengemischen steigt der Druck auf etwa 230 kPa (2.3 bar) an. Für die Luftdruckerhöhung sollte folgende Faustregel gelten:

- 2.2 kPa (0.022 bar) je m bei horizontaler Förderung
- 4.5 kPa (0.045 bar) je m bei vertikaler Förderung

Die maximale horizontale Förderdistanz beträgt etwa 500 Meter, und die maximale vertikale Förderdistanz liegt bei 100 Metern.

Zugabewasser

Das Wasser wird mit einem Druck von 4-40 bar an der Düse zugegeben. Es wird etwas höher dosiert als für den für die Hydratation des Zementes erforderlichen minimalen Wasserzementwert.

Empfohlene Dimensionen von Förderleitung und Düse

Spritzbetondurchsatz [m ³ /h]	Schlauch- und Düsen- durchmesser [mm]	Benötigte Druckluft [m ³ /Min.]
1	25	3
2	32	4-5
4	40	8
6	50	12

G8.3.4 Spritzen mit Fernbedienung

Sämtlicher Spritzbeton für die Felssicherung sollte wann immer möglich mit einer für die jeweilige Anwendung geeigneten ferngesteuerten Ausrüstung aufgebracht werden.

Die ferngesteuerte Spritzausrüstung sollte eine möglichst große Reichweite haben und es dem Düsenführer ermöglichen, die Düse während des gesamten Spritzvorgangs von einer sicheren Stelle aus zu beobachten, wobei er jederzeit die volle Kontrolle über die Düsenbewegungen und die übrigen Funktionen haben muß.

G8.4 Der Einbau von Naßspritzbeton zur Felssicherung

G8.4.1 Allgemeines

- Wenn das Spritzgut vor Ort ankommt, sollten das Setzmaß und die Temperatur gemessen und im Lieferschein sowie im Spritzprotokoll eingetragen werden. Nach Unterbrechungen von mehr als 15 Minuten sollte das Setzmaß vor der Wiederaufnahme des Spritzvorgangs erneut geprüft werden.
- Im Spritzprotokoll sollten auch der Standort und Name des Düsenführers eingetragen werden.
- Das empfohlene Setzmaß sollte zwischen 100 und 200 mm liegen.
- Vor Spritzbeginn sollte eine Zementschlämme aufbereitet und in den Betonschlauch gegeben werden.
- Das Spritzen sollte immer von unten nach oben erfolgen, um den Einschluß von Rückprall zu verhindern.
- Bei der Felssicherung sollten immer zuerst Löcher und Risse in der Oberfläche verfüllt werden. In der Praxis ist dies sehr wichtig, da dadurch die Bewegungen im Fels aufgehalten werden.
- Für den Abstand zwischen der Düse und der bespritzten Oberfläche sollten die Empfehlungen von G8.2.1 befolgt werden. Wird der Spritzabstand verkürzt, sollte die Düse schneller bewegt werden.
- Zum Erreichen einer optimalen Verdichtung und Faserausrichtung sollte die Düse stets in einem rechten Winkel zur Oberfläche gehalten werden. Andernfalls entsteht ein schlechterer Beton mit einer geringen Dichte.
- Das Verhältnis zwischen Luftdruck, Beschleuniger und Betonstrom sollte stets im Auge behalten werden. Bei hohen Beschleunigerdosierungen ist die Oberfläche des eingebauten Spritzbetons «tot» (Starrheit infolge Schnellabbindens). Die grobkörnigen Zuschläge dringen nicht in die Spritzbetonoberfläche ein und prallen ab; es entsteht mehr Staub als sonst. Durch eine hohe Überdosierung des Beschleunigers kann die Oberfläche zwar ein feuchtes Aussehen erhalten, aber das Abbinden erfolgt sehr schnell, und die Oberfläche sieht aus wie Glas. Starkes Erschüttern der Düse entsteht durch zuviel Beschleuniger. Die Beschleunigerdosierung sollte tief gehalten werden, im Bereich der vom Zulieferer angegebenen Werte. Bei senkrechten Flächen kann eine geringere Dosierung verwendet werden als überkopf.
- Die erste Schicht sollte dünn sein, wenn möglich etwa 60 mm (max. 100 mm), um ein Durchhängen des frischen Betons zu verhindern. Die folgenden Schichten sollten 50-200 mm dick sein, je nach verwendetem Beschleuniger und vorgeschriebener Gesamtschichtdicke.

G8.4.2 Schichten aus Lehm

(Siehe 'Norwegische Richtlinien für Spritzbeton', Bericht Nr. 7)

Kleinere Lehmschichten können mit stahlfaserbewehrtem Spritzbeton sowie Felsankern und Stahlbändern zuverlässig gesichert werden. Der Spritzbeton bildet eine mit Bändern bewehrte Brücke über die Lehmschicht, die auf beiden Seiten im festen Fels verankert ist.

Die Breite der Lehmschicht und das eventuelle Vorhandensein von Quellmineralien entscheiden über die Verwendung von Spritzbeton oder Ortsbeton. Wenn die Lehmschicht einen Meter überschreitet oder in einem spitzen Winkel verläuft, sollte ein Spezialist beigezogen werden. Wenn größere Quellungen erwartet werden, kann zwischen dem Lehm und dem Spritzbeton ein zusammenpreßbares Material (z.B. Steinwolle) als Puffer eingebaut werden.

Weist die Lehmschicht nur einen beschränkten Quelldruck auf oder besteht sie zur Hauptsache aus zerklüftetem Fels, kann sich der Einbau von bewehrten Spritzbetonbögen anstelle von Ortsbeton als geeigneter erweisen. Für die Bewehrungsstäbe können verschiedene Durchmesser gewählt werden, meist wird jedoch ein Durchmesser von 20 mm verwendet.

Breite, Dicke und Abstand der Bögen sind abhängig vom erwarteten Stützdruck. Die erste Spritzbetonschicht ist normalerweise 100 bis 150 mm dick, wobei als Armierung Stahlfasern verwendet werden können. Sie kann auch als Ausgleichsschicht eingesetzt werden. Die nächste Schicht kann ebenfalls aus stahlfaservergütetem Spritzbeton bestehen, sofern nicht auf eine nach dem Aufbringen der ersten Schicht eingebaute Stahlarmierung gespritzt wird.

Beim Aufbringen von faservergütetem Spritzbeton auf eingebauter Stahlarmierung ist besondere Vorsicht geboten, da ein größeres Risiko besteht, daß die Bewehrung nicht vollständig umschlossen und der Beton ungenügend verdichtet wird.

G8.4.3 Spritzen bei hohem Gebirgsdruck

(Siehe 'Norwegische Richtlinien für Spritzbeton', Bericht Nr. 7)

Bei Felsabplatzungen infolge hohem Gebirgsdruck wird häufig stahlfaserbewehrter Spritzbeton in Kombination mit Felsankern eingesetzt. Wichtig ist, daß die Stahlplatten der Anker auf die Spritzbetonoberfläche zu liegen kommen und daß große Platten verwendet werden, um den Druck zu verteilen und so Risse im Spritzbeton zu vermeiden. Meist werden dreieckige Platten mit einer Seitenlänge von 400 - 500 mm verwendet. Die Haftung von Spritzbeton auf Stahlplatten ist gering.

Es ist wichtig, daß der Spritzbetoneinbau in regelmäßigen Schichten erfolgt, um Scherbrüche und Abplatzungen zu verhindern. Unter solchen Umständen ist die Verformungsenergie und die plastische Verformungsfähigkeit des Betons ausschlaggebender als seine Druckfestigkeit.

G8.4.4 Schichtdickenkontrolle bei der Felssicherung

Sofern in den Plänen vorgeschrieben, sollte die Mindestschichtdicke mittels patentierten, fluoreszierenden Kunststoff-Markern, die in die erste Spritzbetonschicht gestoßen werden, kontrolliert werden. Je 2 m² gespritzter Oberfläche sollte mindestens ein Marker gesetzt werden. Die Marker sollten an den Stellen in der ausgebrochenen Oberfläche plaziert werden, die am weitesten in den Tunnelhohlraum hineinragen.

Die Marker sollten unmittelbar nach Abschluß des Spritzbetoneinbaus entfernt werden, wobei die kleinen Öffnungen, die durch die gesamte Schichtdicke reichen, bestehen bleiben und zur permanenten Spannungsentlastung dienen. Der Unternehmer sollte der Bauleitung detaillierte Angaben über Art, Material und Verwendung der Marker zur Genehmigung vorlegen.

Der Unternehmer sollte auf Anordnung der Bauleitung die Schichtdicke jeder beliebigen Spritzbetonschicht an jedem Standort und zu jedem vereinbarten Zeitpunkt durch Sondenbohrung von Löchern mit einem Durchmesser von 25 mm überprüfen. Der Unternehmer sollte der Bauleitung alle für die Überprüfung der Kontrollöffnungen erforderlichen Vorrichtungen zur Verfügung stellen. Die Kontrollöffnungen können unter Zustimmung der Bauleitung offengelassen werden.

G8.4.5 Ausgleichen von Kanten und Ecken bei der Felssicherung

Der Einbau von Spritzbeton darf den Umrissen der Felsoberfläche folgen und dabei Kanten und Ecken nach Bedarf abrunden, wenn die herausragenden Blöcke, die aus gesundem Fels bestehen und eine feste Verbindung zum übrigen Gestein haben müssen, eine ausreichende Überdeckung mit Spritzbeton aufweisen.

G8.5 Baugerüste

Die Baugerüste sollten breit genug sein, um einen korrekten Standort des Düsenführers zu ermöglichen.

G9 ANFORDERUNGEN AN DAS ENDPRODUKT

G9.1 Druckfestigkeit

G9.1.1 Festigkeitsklassen von Beton

Durch Spritzverfahren eingebauter Beton kann anders als nach den in EN 206 beschriebenen Vorschriften klassifiziert werden, sollte der Norm jedoch möglichst nahe kommen. Eine vollständige Übereinstimmung kann wegen der besonderen Anforderungen des Einbauverfahrens nicht erreicht werden.

Neben der Frühfestigkeitsentwicklung wird bei der Verwendung von abbindebeschleunigenden Zusatzmitteln auch die Endfestigkeit beeinflusst. Auch der Einbau selbst sowie der Verdichtungsgrad haben beträchtliche Auswirkungen.

Die geforderte Mindestfestigkeit sollte gemäß dieser 'Richtlinie', Abschnitt 9.1 sowie Tabellen 9.1.1 und 9.1.2 wie folgt sein:

$$40 \text{ MPa} \times 0.8 \times 0.84 = 27 \text{ MPa} \text{ (siehe 'Richtlinie', Tabelle 9.1.2)}$$

		_Umrechnungsfaktor für die Vor-Ort-Entnahme von Proben
		_Umrechnungsfaktor für Würfel-/Bohrkernproben
		_Anforderung für Würfelproben aus Ortsbeton

Die charakteristische Festigkeit von Ortsbetonproben kann berechnet und ausgewertet werden. Bei den Bohrkernen gilt der verlangte Mindestwert (gemäß der 'Richtlinie', Tabelle 9.1.1) für jede Probeentnahme, bestehend aus mindestens 3 Proben.

Es kann gewünscht werden, daß die Festigkeitskontrolle anhand von Prüfungen nach 7 Tagen statt nach 28 Tagen durchgeführt wird. Die Frühfestigkeit ist abhängig von der Temperatur, der Zementsorte, den Zusatzstoffen sowie der Verwendung von Siliziumstaub. Das Verhältnis zwischen 7-Tage- und 28-Tage-Festigkeit sollte in jedem Fall nachgewiesen werden. Dem durch die Verwendung von Beschleunigern verursachten Endfestigkeitsabfall sollte bei der Planung Rechnung getragen werden.

Falls keine andere Abmachung zwischen dem Spritzbetonunternehmer und dem Betonzulieferer besteht, sollte der auf der Baustelle angelieferte Beton die Anforderungen an eine Mindestfestigkeitsklasse gemäß dieser 'Richtlinie', Tabellen 9.1.1 und 9.1.2 erfüllen.

G9.1.2 Ausführung von Druckfestigkeitsprüfungen

Druckfestigkeitsprüfungen sollten gemäß dieser 'Richtlinie', Abschnitte 10.1 und 10.2 durchgeführt werden.

24-Stunden-Prüfungen sollten nur gemacht werden, wenn Spritzbetonbeschleuniger verwendet wurden (Felssicherung). Bei Betoninstandsetzungen und ohne Verwendung von Beschleunigern sollte mit den Prüfungen frühestens nach 3 Tagen begonnen werden.

Prüfungen der 1-Tage-Festigkeit sollten nach 24 Stunden ± 2 Stunden erfolgen. Bohrkern zur Ermittlung der 28-Tage-Festigkeit sollten zusammen mit jenen für die 1-Tage- und/oder 7-Tage-Festigkeitsprüfungen entnommen und im Labor gemäß dieser 'Richtlinie', Abschnitte 10.1 und 10.2 aufbewahrt werden.

Zur Ermittlung der 1-, 3-, 7- und 28-Tage-Festigkeit sollten je 3 Bohrkern entnommen werden. Die Prüfintervalle richten sich nach dem Verwendungszweck des Spritzbetons und müssen von der Bauleitung genehmigt, bzw. vorgeschrieben werden. Je nachdem wie die Anforderungen dieser 'Richtlinie' durch die Versuchsergebnisse erfüllt werden, sowie entsprechend der Verhältnisse beim Einbau und der Wichtigkeit des eingebauten Spritzbetons, kann die Häufigkeit der Probeentnahme unter Zustimmung oder auf Anordnung der Bauleitung gesenkt oder erhöht werden. Die Kerne sollten durch die gesamte Schichtdicke des Spritzbetons gebohrt und visuell überprüft werden, um sicherzustellen, daß es sich um einen dichten, homogenen Spritzbeton ohne entmischte Zuschläge und/oder Fasern handelt und der auch keine anderen sichtbaren Mängel aufweist.

Bei Betoninstandsetzungen wird empfohlen, die Druckfestigkeit nur an Bohrkernen zu messen, die aus Prüfplatten entnommen wurden. Falls die Anforderungen nicht erfüllt werden, kann die Bauleitung als Nachweis eine Probeentnahme aus dem vor Ort eingebauten Spritzbeton verlangen. Dabei müssen

Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, um beim Bohren Beschädigungen an der Bewehrung zu vermeiden.

G9.2 Biegefestigkeit

Sofern vorgeschrieben, muß die Biegefestigkeit gemäß 10.3.2 bestimmt werden. Falls nicht anders angeordnet, müssen die Prüfungen normalerweise nach 28 Tagen erfolgen. Ist die Biegefestigkeit für faservergüteten Beton vorgeschrieben, muß sie aus dem ersten Höchstwert des Last-Verformungsdiagramms ermittelt werden.

Die Biegefestigkeit muß normalerweise aus dem Mittelwert von drei Probekörpern bestimmt werden. Die Prüfintervalle richten sich nach dem Verwendungszweck des Spritzbetons und sollten von der Bauleitung genehmigt, bzw. vorgeschrieben werden.

G9.3 Arbeitsvermögen

Das Arbeitsvermögen eines stahlfaserbewehrten Betons erlaubt es diesem, auch nach der Rißbildung im Beton Lasten zu halten. Dies ist die wichtigste Eigenschaft von stahlfaserbewehrtem Beton, und sie wird entweder als Restfestigkeit (Balkenprüfung) oder als Energieaufnahmevermögen (Plattenprüfung) vorgeschrieben.

G9.3.2 Restfestigkeitsklasse

Die Restfestigkeit muß gemäß 10.3.3 ermittelt werden. Wenn die Restfestigkeitsklasse von faservergütetem Beton vorgeschrieben ist, muß sie für einen festgelegten Verformungsgrad gemessen werden, der aus einer festgelegten Balkenverformung entsteht (siehe Abbildung 9.3.1 und Tabelle 9.3.1). Das Last-Durchbiegungsdiagramm muß anhand von drei Proben bestimmt werden. Die Prüfintervalle richten sich nach dem Verwendungszweck des Spritzbetons und sollten von der Bauleitung genehmigt, bzw. vorgeschrieben werden. Falls nicht anders angeordnet, müssen die Prüfungen normalerweise nach 28 Tagen erfolgen.

G9.3.3 Energieabsorptionsklasse

Die Energieaufnahme muß gemäß 10.4 bestimmt werden. Die Energieaufnahme muß anhand von drei Probekörpern ermittelt werden, wobei der Mittelwert die vorgeschriebene Energieaufnahme der geforderten Klasse erreichen muß. Die Prüfintervalle richten sich nach dem Verwendungszweck des Spritzbetons und sollten von der Bauleitung genehmigt, bzw. vorgeschrieben werden. Falls nicht anders angeordnet, müssen die Prüfungen normalerweise nach 28 Tagen erfolgen.

G9.4 Elastizitätsmodul

Vor allem bei Instandsetzungsarbeiten, wo eine möglichst genaue Angleichung an den Elastizitätsmodul des Untergrunds erwünscht ist, kann der Elastizitätsmodul von der Bauleitung vorgeschrieben werden. In der 'Richtlinie' wird auf ISO 6789 für Beton verwiesen; es sind jedoch auch Standardprüfungen für Instandsetzungsmaterialien vorhanden.

G9.5 Haftfestigkeit

Die stichprobenartige Prüfung der Spritzbetonoberfläche mit einem Hammer, einer Brechstange oder ähnlichem ist ein einfaches und praktisches Vorgehen, um die Haftung am Untergrund zu überprüfen. Die eigentlichen Haftfestigkeitswerte müssen jedoch anhand von Bohrkernen bestimmt werden.

Das Prüfverfahren sollte aus einem Versuch bestehen, dessen Ergebnis aus dem Mittelwert der Prüfung von 6 Probekörpern ermittelt wird, die aus demselben Bereich unter Zustimmung der Bauleitung entnommen wurden. Die Prüfintervalle richten sich nach dem Verwendungszweck des Spritzbetons und sollten von der Bauleitung genehmigt, bzw. vorgeschrieben werden.

Das Prüfen der Haftfestigkeit zwischen dem Spritzbeton und dem Fels sollte anhand von Bohrkernen aus Untergrund/Spritzbeton vor Ort (anhand des Ausziehverfahrens) oder im Labor (mittels eines Zugversuchs) durchgeführt werden.

Die Versuchsanordnung und die detaillierten Prüfverfahren sollten von der Bauleitung genehmigt werden. Der Bohrkerndurchmesser sollte im Bereich von >50 mm und **60 mm liegen. Bei den in situ-Versuchen** muß das Bohrloch mindestens 15 mm in den Untergrund eindringen. Um eine Axialbelastung sicherzustellen, sollten besondere Maßnahmen getroffen werden, damit der Kern in einem 90 Grad-

Winkel zur Einbaufläche des Spritzbetons gebohrt wird. Bei Instandsetzungsarbeiten muß darauf geachtet werden, daß die Bewehrung beim Bohren nicht beschädigt wird.

Für Laborversuche entnommene Bohrkernsollten so nachbehandelt werden, daß es den Bedingungen auf der Baustelle entspricht (keine Wasserlagerung), und bis zu den Versuchen geschützt aufbewahrt werden.

G9.6 Fasergehalt

Die Zugabe von Stahlfasern verbessert das Arbeitsvermögen von Beton in bedeutender Weise und kann sich auch positiv auf die Haftung zwischen dem Beton und dem Fels auswirken (siehe Opsahl). Die anhand von Laborprüfungen gemessenen Biege-, Zug- und Druckfestigkeiten werden nur geringfügig beeinflusst, sofern die Massenverhältnisse nicht verändert wurden. Im Vergleich zu den Laborversuchen zeigen die Baustellenversuche ähnliche Werte für die Biege- und Zugfestigkeit von faservergütetem Beton, während sie beim unbewehrten Beton beträchtlich geringer ausfallen. Die Stahlfasern sollten zum Schutz vor Korrosion und Igelbildung trocken gelagert werden.

Für Spritzbeton in Untermeerestunneln oder anderen Bauwerken in Meeresnähe werden in einigen Fällen verzinkte oder rostfreie Stahlfasern verwendet, um einen zusätzlichen Korrosionsschutz zu erzielen. Es besteht jedoch die Gefahr, daß sich infolge der chemischen Reaktion zwischen dem Zink und dem entchromatisierten Zementleim Gase entwickeln. Verzinkte Stahlfasern können auch zur temporären Sicherung im Kohlenabbau verwendet werden.

Die Bewehrungswirkung von Stahlfasern unterscheidet sich von jener der Bewehrungsstäbe und -gitter. Die Stahlfaserbewehrung verbessert hauptsächlich folgendes:

- Die Haftung zwischen dem Beton und dem Untergrund
- Das Arbeitsvermögen, d.h. das Lastaufnahmevermögen nach der Frührißbildung.

Fasern aus Polypropylen werden bei der Felssicherung mit Spritzbeton wenig verwendet. Dagegen werden sie allgemein bei Instandsetzungen mit Spritzbeton, hauptsächlich zur Vermeidung von Rißbildungen, eingesetzt. Es sind verschiedene Sorten von Polypropylenfasern erhältlich. Die übliche Dosierung beträgt 0.75-1 kg/m³; höhere Dosierungen erschweren das Spritzen der Mischungen, da sie zur Igelbildung und einer schlechten Verdichtung führen.

G9.7 Permeabilität (Durchlässigkeit)

Drei Bohrkerns mit einem Durchmesser von je 150 mm müssen gemäß dieser 'Richtlinie', Abschnitt 9.7 bei jedem Baustellenversuch anhand des trockenen Rotationsbohrverfahrens mit einer Diamantbohrkrone entnommen werden.

Für jeden Bohrkern sollten folgende Informationen aufgezeichnet werden:

- Datum der Entnahme
- Bohrkernnummer
- Spritzrichtung

Bei Instandsetzungsarbeiten muß darauf geachtet werden, daß die Bewehrung beim Bohren nicht beschädigt wird.

G9.8 Frostbeständigkeit

Wenn eine Frostbeständigkeit vorgeschrieben ist, sollten die Prüfverfahren und Anforderungen gemäß dieser 'Richtlinie', Abschnitt 9.8 befolgt werden.

G10 PRÜFVERFAHREN

Obwohl die Beschaffenheit und das Einbauverfahren des Spritzbetons besondere Prüfverfahren erforderlich machen, kann die Mehrheit seiner wichtigen Eigenschaften anhand von gut fundierten Verfahren für Normalbeton geprüft werden. Der entscheidende Unterschied besteht hauptsächlich in der Herstellung und der Vorbereitung der Proben. Bei allen Prüfverfahren können die Proben einer während der Ausführung gespritzten Prüfplatte entnommen werden. Einige Versuche können wahlweise auch anhand von Proben aus dem vor Ort eingebauten Spritzbeton durchgeführt werden, die den Vorteil besitzen, daß sie repräsentativer sind. Die Option, die der Bauleitung kaum geboten werden kann, ist das Herstellen von Proben in Stahlmulden, da es schwierig ist, beim Spritzen in eine Form einen korrekt

verdichteten Beton zu erzeugen. Die Proben müssen daher durch Sägen oder Bohren aus Prüfplatten oder dem vor Ort eingebrachten Material entnommen werden.

Für das Prüfen von Spritzbeton werden zur Zeit Europäische Normverfahren entwickelt, auf die in dieser 'Richtlinie' jeweils hingewiesen wird. Für Projekte außerhalb Europas können unter Zustimmung bzw. auf Anweisung der Bauleitung die vor Ort gültigen Normen angewendet werden.

G10.1 Prüfplatten und Probekörper

Die Proben können entweder aus dem Frisch- oder dem Festmörtel/-beton entnommen werden, je nach der zu messenden Eigenschaft und dem dazugehörigen Prüfverfahren.

Frischproben können aus der Ausgangsmischung, dem in situ-Material oder einer Prüfplatte entnommen werden. Festbetonproben können aus dem in situ-Material oder einer Prüfplatte gesägt werden. Es sollte darauf Rücksicht genommen werden, daß die Eigenschaften wegen des Einbauverfahrens je nach Herkunftsort verschieden sein können. Die geeignetste Probeart und Entnahmestelle sollte aufgrund des Zweckes der Qualitätskontrolle und der zu messenden Eigenschaft(en) ausgewählt werden.

Wichtig ist, daß sowohl die Prüfplatten wie auch die daraus entnommenen Proben sorgfältig gekennzeichnet werden und daß alle wichtigen Informationen wie Entnahmestelle und Zeitpunkt des Spritzbetoneinbaus, Name des Düsenführers, Art der Mischung und Spritzrichtung aufgeschrieben werden. Zudem müssen die Proben korrekt nachbehandelt werden, da sie wegen ihrer geringen Größe rasch austrocknen können.

G10.2 Druckfestigkeit und Dichte

Die Druckfestigkeit von Spritzbeton wird normalerweise anhand von Druckversuchen an Bohrkernen gemessen. Im allgemeinen müssen dazu keine besonderen Methoden gefunden werden, da geeignete EN-Prüfverfahren bereits bestehen.

Beim Naßspritzverfahren sollte Frischbeton aus der Ausgangsmischung gemäß prEN 12394 geprüft werden.

Die Bohrkernkerne werden gemäß prEN 12504 (welche sich auf prEN 12356, 12390 und 12394 bezieht) entnommen, untersucht und geprüft. Dieses Verfahren könnte durch Untersuchungsanforderungen, die der besonderen Beschaffenheit und dem Einbauverfahren von Spritzbeton Rechnung tragen, erweitert werden. Die Bohrkernkerne können vorzugsweise aus dem eingebauten Beton (repräsentativer) oder aus Prüfplatten entnommen werden. Es sollte beachtet werden, daß die prEN 12504-Norm nicht mehr Umrechnungsfaktoren von 1 bis 2 für die Höhe/Durchmesser-Werte vorschreibt (wie in Tabelle 10.2.1 angegeben), sondern bestimmt, daß die Höhe/Durchmesser-Werte wenn möglich bei 1.0 (für den Vergleich mit Würfelfestigkeiten) oder bei 2.0 (für den Vergleich mit Bohrkernfestigkeiten) liegen sollten. Dies wird durch die Schwierigkeiten beim Umrechnen von Würfel- und Bohrkernfestigkeiten begründet, die sich aus den komplexen Auswirkungen von Probengröße, Höhe/Durchmesser-Wert, Korngröße und Festigkeitsgrad ergeben. Deshalb wird empfohlen, daß bereits bei Baubeginn über die Art des Vergleiches (d.h. Würfel- oder Bohrkernfestigkeit) entschieden werden soll und daß die Bohrkernkerne auf die entsprechenden Dimensionen (Höhe/Durchmesser-Wert von 1.0 bzw. von 2.0) zugeschnitten werden. Es muß beachtet werden, daß sich die Auswahl bei relativ geringen Schichtdicken je nach gewähltem Probendurchmesser auf den Würfelvergleich beschränkt. In einigen Situationen kann es sich als wünschenswert erweisen, daß gesägte Proben, die die Anforderungen von prEN 12356 erfüllen, zugelassen werden.

Frühfestigkeiten (30 Min. bis 12 Stunden) werden im Tunnel- und Bergbau sowie bei tiefen Baugruben wegen unstabilem Gestein häufig vorgeschrieben. Frühfestigkeitsmessungen sind beim beschleunigten Spritzbeton oft von Nutzen. Es werden zwei Verfahren verwendet: Mit der Penetrationsnadel (z.B. Meyco) können Festigkeiten bis zu 1.0 MPa gemessen werden, während das Bolzensetzverfahren (z.B. Hilti) für den Bereich von 1-15 MPa geeignet ist. Zwischen der gemessenen Penetration, resp. der aufgewendeten Kraft, und der Druckfestigkeit kann eine Beziehung gefunden werden. Diese kann jedoch mischungsabhängig sein und muß bei den Vorversuchen bestimmt werden.

Die Dichte sollte stets routinemäßig anhand der ausgehärteten Proben für die Druckfestigkeit gemessen werden. Die Bohrkernkerne sollten immer einer eingehenden Untersuchung unterzogen werden, um die Qualität der Ausführung zu überprüfen.

G10.3 Biegefestigkeit und Restfestigkeit

Spritzbeton wird während der Nutzung oft einer Biegebelastung ausgesetzt. Daher werden die Biegefestigkeiten häufig anhand von Standardbalkenversuchen an Proben, die aus einer Prüfplatte entnommen wurden, bestimmt. Die Biegefestigkeit ist ein indirektes Maß für die Zugfestigkeit des Betons. (Die direkte Messung der Zugfestigkeit von Beton ist schwierig, obwohl ein Bohrkern-Auszugsversuch vor Ort durchgeführt werden kann.)

Stahlfaservergüteter Spritzbeton wird im allgemeinen - zusätzlich zur Biegefestigkeit - auf sein Arbeitsvermögen hin geprüft. Das EFNARC Prüfverfahren deckt beide Eigenschaften ab. Die Bestimmung der letzteren basiert auf einem Restfestigkeitskonzept, d.h. auf der Belastung nach Rißaufretung und auf im voraus definierten Durchbiegungswerten in Balkenmitte.

G10.3.1 Versuchsanordnung

Eine faserbewehrte Prismenprobe, die gemäß Abschnitt 10.1 aus einer Prüfplatte gesägt wurde, wird einem Biegemoment ausgesetzt, indem unter Überwachung der Durchbiegung eine Last über Walzen an Ober- und Unterseite eingeleitet wird, um ihre Last-Durchbiegungsreaktion (ausschließlich der nicht aus der Durchbiegung entstandenen Verformungen) zu erhalten. Die Biegefestigkeit und die Restfestigkeitsklasse werden aus dem Last-Durchbiegungsdiagramm bestimmt.

Die Prüfkörper sind gemäß Abbildung 10.3.1 aus Spritzbetonplatten gesägte Prismen und sollten gemäß den Anforderungen von prEN 12356 vorbereitet werden. Die der Form zugekehrte, ungesägte Unterseite der Probe sollte gekennzeichnet werden (unter Angabe der Spritzrichtung). Die Prüfung von Balken erfolgt, sofern nicht anders verlangt, indem die der Form zugekehrte, ungesägte Unterseite unter Spannung gehalten wird.

Die Durchbiegung, ausschließlich jeglicher Verformungen und Drehungen der Auflage, wird mit einem elektronischen Meßwertaufnehmer ermittelt. Dieser ist in der Mitte der Balkenspannweite an einem Joch montiert, welches in der mittleren Höhe des Balkens (neutrale Achse) direkt über den Abstützungen am Balken festgehalten wird. Die Prüfmaschine wird vom Meßwertaufnehmer gesteuert, um den Prüfkörper in der Mitte der Balkenspannweite mit einer konstanten Durchbiegungsrate zu belasten. Das Lastverformungsdiagramm wird laufend aufgezeichnet. Falls zwei Meßwertaufnehmer verwendet werden, kann die durchschnittliche Durchbiegung in der Mitte der Balkenspannweite bestimmt werden.

G10.3.2 Bestimmung der Biegefestigkeit

Das EFNARC Prüfverfahren umfaßt die Bestimmung der Biegefestigkeit sowohl von faservergütetem wie auch von unbewehrtem Spritzbeton. Dabei kommen die Versuchsanordnung und das Prüfverfahren zur Bestimmung der Restfestigkeit bei kontrollierter Durchbiegung zur Anwendung. Im Gegensatz zu ASTM C1018 wird kein Unterschied zwischen erstem Riß und Biegezughöchstwert gemacht. Das EFNARC Prüfverfahren identifiziert eine "erste Höchstfestigkeit" (innerhalb eines Durchbiegungsbereichs von 0.1 mm, welcher beim faservergüteten Spritzbeton, der eine hohe Streckgrenze aufweist, den Höchstwert der ersten Höchstbelastung (P_{Q1}) begrenzt). Dabei wird vorausgesetzt, daß sich die Planer auf diesen ersten Höchstwert abstützen, unter Einbeziehung eines angemessenen Sicherheitsfaktors, sei es für die Belastung (äußerster Grenzzustand) oder für die Biegefestigkeit (Grenzzustand der Funktionstüchtigkeit unter Nutzlast).

Beim unbewehrten Spritzbeton kann es sich als angebrachter erweisen, eine Prüfung gemäß dem Standardverfahren zur Ermittlung der Bruchgrenze von unbewehrtem Beton, prEN 12359 "Testing Concrete - Determination of flexural strength of test specimens", durchzuführen. Dieses Verfahren liefert Biegefestigkeitswerte, die mit denen von konventionell eingebauten Betonen vergleichbar sind, während die anhand des EFNARC Prüfverfahrens ermittelten Werte wegen des ungleichen Spannweite/Durchmesserverhältnisses und der unterschiedlichen Belastungssteuerung, von denen man weiß, daß sie das Prüfkörperverhalten beeinflussen, nicht direkt verglichen werden können. Es sollte beachtet werden, daß prEN 12359 gesägte Proben, welche innerhalb der Abweichungen von prEN 12356 liegen, zuläßt. Es existiert jedoch hierzu noch keine Verfahrensbeschreibung. Außerdem könnten sich diese Normen als zu aufwendig erweisen für Spritzbeton.

G10.3.3 Bestimmung der Restfestigkeitsklasse

Bei diesem Prüfverfahren muß der Probekörper in Balkenmitte bei konstanter Durchbiegungsgeschwindigkeit belastet werden; dies bedingt eine Rückkopplung zum Überwachungssystem. Es ist wichtig, daß dies so ausgeführt wird, denn wenn anstelle der mittigen

Durchbiegungskontrolle eine Querhauptkontrolle stattfindet, ist es möglich, daß das Prüfgerät die gespeicherte Formänderungsarbeit in den Probekörper ableitet, während dieser frei Risse bildet und sich verbiegt, so daß der Verlauf des Last-Durchbiegungsdiagramms abhängig ist von der Steifheit des Prüfgerätes.

Für Spritzbeton gibt es fünf Restfestigkeitsklassen, die nach dem Verlauf des Balken-Lastdurchbiegungsdiagramms definiert werden. Mindestens zwei der drei Balken müssen bis zu der für die jeweilige Verformungsklasse geforderten Durchbiegung einer Biegebelastung standhalten, die auf oder oberhalb der Klassenbegrenzung liegt, und der dritte darf die Anforderungen der nächstniedereren Klasse nicht unterschreiten.

G10.4 Energieabsorptionsklasse (Plattenversuch)

Die EFNARC Richtlinie beschreibt den Plattenversuch zur Bestimmung der absorbierten Energie aus dem Last-Durchbiegungsdiagramm, aus der das Arbeitsvermögen abgeleitet wird. Der Versuch ist dazu vorgesehen, die biaxiale Durchbiegung, die besonders bei der Felssicherung entstehen kann, realistischer darzustellen. Die Mittelpunktbelastung kann auch als Darstellung einer Gebirgsverankerung betrachtet werden. Dieser Versuch hat sich als sehr nützlich erwiesen; das Verfahren ist im Anhang A näher beschrieben.

Es ist ganz offensichtlich sehr wichtig, daß alle Ränder gleich abgestützt werden müssen. Bevor die Plattenprobe auf den Prüfraumen gelegt wird, muß die Unterlage mit einem Zementmörtel oder einer Kunststoffschicht ausgeglichen werden.

Im Rahmen des vor der Ausführung durchgeführten Versuchsprogrammes eignet sich der Plattenversuch zur Überprüfung aller Parameter, die die in den Projektunterlagen vorgeschriebenen Qualitätsanforderungen an den stahlfaservergüteten Spritzbeton beeinflussen können. Die routinemäßige Qualitätskontrolle sollte Würfelversuche zur Bestimmung der Festigkeit sowie Auswaschversuche zur Ermittlung des Fasergehaltes im vor Ort eingebauten Spritzbeton beinhalten. Der Plattenversuch eignet sich auch zum Vergleich von verschiedenen Fasertypen und -dosierungen und zum Vergleich zwischen gitterbewehrtem und faserbewehrtem Beton.

G10.5 Elastizitätsmodul

Die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Spritzbeton kann sich als notwendig erweisen; zum Beispiel bei der Planung der Felssicherung oder bei Instandsetzungen, wo für Reparaturschicht und Untergrund ähnliche Werte erwünscht sind, um die Auswirkungen von Spannungskonzentrationen zu vermeiden.

Die Probekörper müssen aus einer Prüfplatte mit geeigneten Abmessungen geschnitten werden. In der EFNARC Richtlinie wird eine Prüfung gemäß ISO 6784 verlangt, welche sich besonders beim Einbau von großen Schichtdicken mit grobkörnigen Mörteln oder Betonen eignet. Bei Reparaturmörteln können sich auch kleinere Probekörper (160 x 40 x 40 mm) eignen.

Es wird vorausgesetzt, daß der Elastizitätsmodul normalerweise während der Vorversuche und nicht bei der routinemäßigen Qualitätskontrolle berechnet wird. Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul stehen in einer gewissen Beziehung zueinander; daher gilt es als akzeptabel, daß bei der routinemäßigen Qualitätskontrolle die Druckfestigkeitsversuche normalerweise ausreichen.

G10.6 Haftfestigkeit

Eine routinemäßige Überprüfung der Haftfestigkeit von Spritzbeton ist üblich, da beim Einbau eine Verbundwirkung mit dem Untergrund entstehen soll.

Die Haftfestigkeiten von Spritzbeton sind abhängig von den örtlichen Gebirgsverhältnissen und müssen in jedem Fall definiert werden. Das Prüfverfahren und die erforderliche Haftung müssen vor Ort festgelegt werden.

Das üblichste Verfahren ist ein beschränkter Bohrkernversuch. Dazu wird ein Bohrkern durch die Betonschicht bis in den Untergrund gebohrt. Auf seine Oberfläche wird ein Stahlstempel geklebt, in den eine Zugkraft eingeleitet wird. Es stehen mehrere geeignete Prüfgeräte zur Verfügung, und von CIRIA sind Anleitungen zu Standardprüfverfahren für Instandsetzungsmaterialien, einschließlich von Ausziehversuchen, veröffentlicht worden (McLeish, 1993).

Die ausführlichste Beschreibung von Ausziehversuchen befindet sich in prEN 1542, welche für Instandsetzungen gilt, sich aber auch auf andere Anwendungen anwenden läßt. Die wichtigsten Aspekte

des Versuches sind: die Vermeidung einer außermittigen Lasteinleitung, welche zu einem zu tiefen Meßwert für die Haftfestigkeit führt; eine Mindestbohrtiefe von 15 mm in den Untergrund, um Spannungskonzentrationen zu vermeiden, welche die Haftebene beeinträchtigen; eine sorgfältige Identifikation der Art des Bruches.

Bei einem Ausziehversuch sind drei verschiedene Brucharten möglich: Bruch im Untergrund; Bruch an der Haftoberfläche; und Bruch in der Spritzbetonschicht. Genau genommen gibt nur der Bruch an der Haftoberfläche Auskunft über die Haftfestigkeit. Leider stammen die aufgezeichneten Haftfestigkeiten oft auch von anderen Bruchursachen (besonders Bruch im Untergrund), so daß sinnvolle Vergleiche der Ergebnisse problematisch sind.

Die Haftfestigkeit kann auch im Labor an einem Bohrkern aus einem Verbund von Spritzbeton und Untergrund geprüft werden, siehe Abbildung 10.6.1. Dadurch werden die oft schwierigen Bedingungen vermieden, welche die in situ-Ausziehversuche erschweren. Auch hier ist der wichtigste Aspekt, daß die Belastung mittig in Achsenrichtung erfolgt. Für einen solchen Versuch existiert jedoch bisher noch keine detaillierte Verfahrensbeschreibung und auch kein Entwurf dazu.

Die typischen Haftfestigkeiten von Spritzbeton liegen im Bereiche von 0.5 - 2.5 MPa; sie werden anhand von Ausziehversuchen an Bohrkernen mit einem Durchmesser von 60 - 100 mm ermittelt. Man würde erwarten, daß durch das Vorhandensein von Bewehrungsgittern, die das Auftreffen des Spritzstrahls auf der Oberfläche behindern und zur Bildung von Sandnestern hinter den Bewehrungsstäben führen, die Haftung des Spritzbetons am Untergrund verringert wird. Es wird auch von niedrigeren Haftfestigkeiten berichtet, wenn Beschleuniger in hohen Dosierungen verwendet wurden; dies überrascht nicht, wenn man bedenkt, daß dadurch auch andere Eigenschaften wie die Druckfestigkeit beeinträchtigt werden.

G10.7 Permeabilität (Durchlässigkeit)

Es gibt eine Reihe von Versuchen, anhand derer man zu Messungen eines Transportmechanismus innerhalb des Betons gelangt; dazu gehören die Absorption durch die Kapillarwirkung, die Permeation und die Diffusion. Die Wahl der zu messenden Eigenschaft und damit des Prüfverfahrens ist abhängig vom Klima, von den Verhältnissen vor Ort, von der Porenstruktur, vom Sättigungsgrad und den möglichen aggressiven Einwirkungen.

Wenn der Beton einem hohen Wasserdruck ausgesetzt sein wird (z.B. bei Stauanlagen oder Unterwasserbauwerken), wäre es angebracht, die Wasserdurchlässigkeit zu messen. Dies kann durch die Bestimmung des Permeabilitätseigenwertes bzw. des Wasserdurchlässigkeitskoeffizienten anhand einer Zelle mit einem festen Wasserdruck geschehen; dazu wird üblicherweise die empirische Formel von D'Arcy verwendet. Es gibt keine allgemein genehmigten Standardprüfverfahren, aber viele Labors können solche Versuche an zylindrischen Bohrkernen bei kontrolliertem Dauerzustand durchführen und reproduzierbare Ergebnisse liefern. Als Alternative bietet sich die in der EFNARC Richtlinie verwiesene prEN 12364-Norm, welche auf ISO 7031 basiert. Bei diesem Versuch wird ebenfalls ein zylindrischer Bohrkern einem Wasserdruck (von 500 kPa während 72 Stunden) ausgesetzt; dabei wird jedoch die maximale Eindringtiefe gemessen, die indirekt Aufschluß über die Wasserdurchlässigkeit gibt.

Bei geringen Druckverhältnissen wie etwa bei der natürlichen Beanspruchung in der Atmosphäre kann es angebracht sein, die kapillare Saugwirkung der Spritzbetonoberfläche gemäß prEN 13057 zu messen. Dazu werden Scheiben (mit einer Mindestdicke von 20 mm) aus Bohrkernen mit einem Durchmesser von 100 mm geschnitten; anschließend wird eine Seite während 24 Stunden 2 mm tief in Wasser getaucht und die resultierende Gewichtszunahme laufend gemessen. Aus diesen Daten kann unter Verwendung einer empirischen Gleichung, welche eine vereinfachte Form des modifizierten D'Arcy Gesetzes für einen nicht gesättigten Wasserfluß darstellt, der Sorptionskoeffizient bestimmt werden (in $\text{kg}/\text{mm}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$).

G10.8 Frostbeständigkeit

Das von EFNARC bevorzugte Prüfverfahren ist in der schwedischen Norm SS 137244 beschrieben. Es handelt sich um einen Abschälversuch, der mit einer Salzlösung (3% NaCl) oder mit Wasser durchgeführt werden kann. Würfel- oder Bohrkernproben werden dazu in einem Gummituch dicht verpackt, wobei die Prüffläche freibleibt. Diese wird mit der Testlösung 3 mm tief bedeckt und während 24 Stunden einem Temperaturwechsel zwischen 16 - 24°C und -14 - -20°C ausgesetzt. Das sich abschälende Material wird nach 7, 14, 28, 42 und 56 (manchmal auch nach bis zu 112) Zyklen vom Probekörper entfernt und gewogen. Aufgrund des Gewichtsverlustes wird die Frostbeständigkeitsklasse bestimmt (z.B. nach 56 Zyklen: $<0.1 \text{ kg}/\text{m}^2$ sehr gut; $<0.5 \text{ kg}/\text{m}^2$ gut; und $<1.0 \text{ kg}/\text{m}^2$ akzeptabel).

G10.9 Bestimmung des Fasergehaltes von Spritzbeton

Die EFNARC Richtlinie enthält umfangreiche Details zur Berechnung des Fasergehaltes (in kg/m^3) sowohl anhand von Fest- als auch von Frischbetonproben. Aus den Festbetonproben können nur Stahlfasern entfernt werden, während aus den Frischbetonproben auch Fasern aus Kunststoff und andere Fasern entfernt werden können. Die Verfahren beinhalten die separate Bestimmung der Fasermasse und des Volumens der Betonprobe (einschließlich der Fasern).

Es wird nicht empfohlen, den Fasergehalt in bezug auf die Ausgangsmischung (d.h. vor dem Spritzbetoneinbau) vorzuschreiben, da der Fasergehalt im vor Ort eingebauten Beton normalerweise erheblich geringer ist als vor dem Spritzen. Auch die Berechnung eines äquivalenten Faservolumens je kg/m^3 ist problematisch bei aus Trockenmischungen entnommenen Proben.

G11 QUALITÄTSKONTROLLE

G11.1 Allgemeines

Versuche sollten routinemäßig an Bohrkernen oder anderen aus dem vor Ort eingebauten Spritzbeton entnommenen Proben durchgeführt werden. Prüfplatten oder -balken für Testzwecke sollten nur für gewisse Versuche, die in den folgenden Absätzen speziell erwähnt werden, hergestellt werden.

Wenn während der Ausführung die Herkunft oder die Qualität irgendeines der verwendeten Materialien oder wenn die Betonrezeptur geändert werden muß, sollten die Baustellenversuche wiederholt werden.

Die genehmigten Versuche sollten routinemäßig durchgeführt werden.

Die Probekörper sollten gemäß dieser 'Richtlinie', Abschnitte 11.1-11.3 geprüft werden. Die Versuche sollten anhand der folgenden Verfahren durchgeführt werden:

<i>Versuch</i>	<i>Prüfverfahren</i>
Druckfestigkeit	'Richtlinie', Abschnitt 10.2
Biegefestigkeit	'Richtlinie', Abschnitt 10.3
Restfestigkeitswert	'Richtlinie', Abschnitt 10.3
Haftfestigkeit	'Richtlinie', Abschnitt 10.6
Dauerhaftigkeit/Durchlässigkeit	'Richtlinie', Abschnitt 10.7
Abbindezeit	Anhang 1, Abschnitt 6.3
Fasergehalt	'Richtlinie', Abschnitt 10.9.3

G11.2 Vorversuche

Die Häufigkeit, mit der jeder Versuch für die Mischungskontrolle durchgeführt wird, sollte sich nach dieser 'Richtlinie', Abschnitt 11.3.1 richten.

G11.3 Qualitätskontrolle

Der Standort für die Probeentnahme aus dem bei der Ausführung eingebauten Spritzbeton muß vom Unternehmer vorgeschlagen und von der Bauleitung genehmigt werden.

Jeder Bohrkern, bzw. Balken sollte mit einer geeigneten Markierung sowie dem Datum und dem Zeitpunkt des Spritzbetoneinbaus gekennzeichnet werden.

G12 UMWELT, GESUNDHEIT UND SICHERHEIT

Eine geringere Beeinträchtigung der Umwelt sowie ein besserer Arbeits- und Gesundheitsschutz haben bei der Weiterentwicklung der Spritzbetontechnologie im Vordergrund gestanden. Spritzbeton mit alkalifreien Beschleunigern bietet dabei beträchtliche Vorteile sowohl bezüglich dem Umweltschutz wie auch dem Arbeits- und Gesundheitsschutz.

Beim Einbau von Spritzbeton sollten alle vor Ort gültigen Vorschriften in Bezug auf Umwelt, Gesundheit und Sicherheit erfüllt werden. Vor Baubeginn sollte eine vollständige Risikoanalyse durchgeführt sowie ein Sicherheitsplan aufgestellt und genehmigt werden. Für Empfehlungen zu den zu verwendenden Formularen wird auf den Anhang verwiesen.

G12.1 Sicherheit der Mannschaft

G12.1.1 Staubkonzentration

Beim Einbau von Spritzbeton ist die Mannschaft Gefahren durch Staubentwicklung und Luftverschmutzung ausgesetzt. Die beim Spritzen entstehenden Aerosole können ein Gesundheitsrisiko darstellen und müssen daher möglichst gering gehalten werden. Staub wird ebenso wie Rauch und Sprühnebel als Aerosol klassifiziert.

Die Staubkonzentration beim Spritzbetoneinbau unterliegt je nach Standort und Zeitpunkt starken Schwankungen, welche bei der Interpretation der Meßergebnisse berücksichtigt werden müssen. Die Feinstaubkonzentration wird aufgrund der höchstzulässigen Schadstoffkonzentration am Arbeitsplatz geschätzt, welche gemäß den 'Österreichischen Richtlinien für Spritzbeton', Abschnitt 12.5.3 gemessen wird. Als Feinstaub werden Teilchen definiert, die bis in die Lungenbläschen vordringen können.

Die maximale zulässige Schadstoffkonzentration am Arbeitsplatz entspricht der höchstzulässigen Staubkonzentration, durch die normalerweise die Gesundheit der Mannschaft bei wiederholter und langfristiger Belastung (meist während 8 Stunden, aber nicht mehr als 40 Stunden je Woche) ohne Verwendung von persönlichen Schutzmaßnahmen (Feinstaubmasken) nicht beeinträchtigt wird.

Tabelle 12.2.1 Zulässige Staubkonzentration basierend auf der höchstzulässigen Schadstoffkonzentration (HZK) am Arbeitsplatz

<i>Quarzgehalt (nach Gewichts-%)</i>	<i>HZK-Wert c[mg/m³]</i>	<i>Beschaffenheit des Staubs</i>	<i>Staubart</i>
Q < 1	6	Feinstaub	inert
1 < Q < 3.75	4	Feinstaub	siliziumhaltig
Q > 3.75	0.15	feiner Quarzstaub	siliziumhaltig

(Siehe 'Österreichische Richtlinien für Spritzbeton', Abschnitt 12.5.3)

Angesichts der Tatsache, daß beim Tunnelvortrieb eine ganze Reihe von Aktivitäten stattfinden, bei denen Staub in unterschiedlichen Mengen entsteht, sollte die Schätzung den gesamten Arbeitsablauf berücksichtigen. Während des Spritzbetoneinbaus sollte im Stundenmittel eine Feinstaubkonzentration von weniger als der doppelten jeweiligen höchstzulässigen Schadstoffkonzentration am Arbeitsplatz angestrebt werden. Unter Verwendung von persönlichen Schutzmaßnahmen sind je nach deren Effizienz höhere Grenzwerte zulässig. Um die Staubbelastung während des gesamten Arbeitsablaufes zu verringern, werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Trockenspritzverfahren: Verwendung von feuchten Zuschlägen, Abdichtung der Maschinen, geeigneter Düsentyp, Düsenabstand und Wassergehalt
- Naßspritzverfahren mit alkalifreien Beschleunigern
- Mechanische Spritzlanzen
- Ausreichende Ventilation

Gesundheitliche Risiken für die Baustellenmannschaft, insbesondere die Gefahr von Haut- und Augenverletzungen, können durch den Verzicht auf stark alkalische und reizende Zusatzmittel wie Produkte auf Aluminatbasis oder Wasserglas vermieden werden.

G12.1.2 Persönliche Schutzmaßnahmen

Eine persönliche Schutzausrüstung sollte immer getragen werden:

- Helm
- Schutzbrille, Visier
- Staubmaske (mit Atmungsgerät, je nach Einbauverfahren und Verhältnissen)
- Overall
- Handschuhe
- Gehörschützer
- Verstärkte Zehenkappen

Beim Überkopfeinbau von Spritzbeton ist es nicht gestattet, sich unter dem frisch aufgebrachteten Beton aufzuhalten, bevor dieser nicht eine ausreichende Festigkeit erreicht hat. Die erforderliche Wartezeit muß sich nach den Frühfestigkeitsmessungen und den Bedingungen vor Ort richten (Temperatur, Zementsorte, Dosierung und Typ des Spritzbetonbeschleunigers).

G12.1.3 Schutzmaßnahmen bei Verstopfungen von Förderleitung und Düse

- Beim Auftreten einer Verstopfung müssen folgende Funktionen unterbrochen werden:
 - Hauptluftzufuhr: abschalten
 - Spritzmaschine: entleeren und/oder abschalten
 - Beschleunigerpumpe: abschalten
 - Luftzufuhr an der Düse: abschalten
 - Naßspritzmaschine: Betondruck durch Pumpumkehr ablassen
- Vor der Demontage der Förderleitung: Leitungen und Düse sichern, um ein unkontrolliertes Zurückschnellen zu verhindern
- Niemand steht während der Demontage oder bis der Druck in der Förderleitung abgelassen wurde, vor dem Schlauch.

G12.1.4 Sicherheit von Schläuchen und Kupplungen

- Es sollten nur speziell verstärkte und zugelassene Betonschläuche und -kupplungen verwendet werden. Als Faustregel gilt, daß sie für einen Berstdruck zugelassen sein sollten, der dem doppelten normalen Betriebsdruck entspricht.
- Alle Anschlüsse und Kupplungen (bei Beton-, Wasser-, Beschleuniger- und Luftschläuchen) sollten zusätzlich gesichert sein.
- Alle Kupplungen/Schläuche sollten regelmäßig kontrolliert und überprüft werden.

G12.2 Umweltschutz

Lokale Richtlinien und Normen bezüglich Umweltschutz sollten implementiert und befolgt werden. Folgende Beeinträchtigungen der Umwelt sollten berücksichtigt werden:

G12.2.1 Beeinträchtigung des Bodens

Beim Spritzen fällt ein Teil der Mischung als Rückprall zu Boden und wird zusammen mit dem Ausbruchmaterial entfernt.

Angesichts der Tatsache, daß eine Durchmischung von Rückprallgut mit dem Ausbruchmaterial und damit eine Beeinträchtigung der Umwelt nicht vollständig ausgeschlossen werden kann, ist eine Verminderung des Rückprallanteils (auf weniger als 25% bei normalen Verkehrstunneln, für welche große Mengen Spritzbeton benötigt werden) wünschenswert.

G12.2.2 Beeinträchtigung des Wassers

Bei der Verwendung im Tunnelbau kann der Spritzbeton mit Berg- und Grundwasser in Berührung kommen. Eine erhöhte Auslaugbarkeit von Spritzbeton kann zur Entmischung und damit zu einer langfristigen Beeinträchtigung des Dränagewassers führen.

Da die Auslaugbarkeit von Normalbeton nach einer kurzen Erhärtungszeit bereits sehr gering ist, sind bisher noch keine negativen Auswirkungen auf die Wasserqualität beobachtet worden. Daher gilt Beton als ein umweltfreundliches Baumaterial. Dasselbe gilt für Spritzbeton mit alkalifreien Beschleunigern.

Die Verwendung von alkalischen Beschleunigern auf Aluminat- und/oder Silikatbasis erhöht den Anteil von auslaugbaren Stoffen im Spritzbeton. Die Auslaugbarkeit des Rückpralls wird ebenfalls beeinträchtigt.

Neben der Verwendung von alkalifreien Beschleunigern tragen auch eine sorgfältige Ausführung verbunden mit einem niedrigen Wasserzementwert (<0.5) zu einem Auslaugverhalten des Spritzbetons ähnlich dem von Normalbeton bei. Die Zugabe von Siliziumstaub kann das Auslaugverhalten ebenfalls günstig beeinflussen.

Für die Auswertung der Spritzbetoneluat gemäß den 'Österreichischen Richtlinien für Spritzbeton', Abschnitt 12.4.5 sollten die in Tabelle 1 aufgeführten Grenzwerte gelten.

Tabelle 12.2.2 Grenzwerte für Spritzbetoneluat

<i>Parameter</i>	<i>Einheit</i>	<i>Grenzwert</i>
pH-Wert		≤12
Elektrische Leitfähigkeit	mS/m	≤100
Calcium	mg/l	≤25
Kalium	mg/l	≤25

Natrium	mg/l	≤10
Aluminium	mg/l	≤1.0

G12.2.3 Entsorgung des Rückprallmaterials

Das Rückprallmaterial sollte gemäß den nationalen Vorschriften oder den von der Bauleitung gestellten Anforderungen entsorgt werden.

RICHTLINIE ZUM ANHANG 1: ZUSATZMITTEL FÜR SPRITZBETON

GA1 ANWENDUNGSBEREICH

Der Anhang 1 bezieht sich nur auf Versuche und Anforderungen bei besonderen Zusatzmitteln, die beim Spritzbeton verwendet werden und die in keiner anderen EN-Norm vorgeschrieben werden. Zweck der Versuche ist es, eine allgemeine Genehmigung der geprüften Produkte für die Verwendung im Spritzbeton zu erhalten. Alle Versuche und Anforderungen sind für Laborbedingungen beschrieben und haben mit den Anforderungen bei der Ausführung oder den Baustellenversuchen nichts zu tun.

GA3.2 Zusatzmittel für Spritzbeton

Zusatzmittel für Spritzbeton können in anderen Dosierbereichen verwendet werden als Zusatzmittel für den Normalbeton (was normalerweise auch der Fall ist). Spritzbetonzusatzmittel gibt es sowohl in Flüssig- als auch in Pulverform.

GA3.3 Beschleunigende Zusatzmittel für Spritzbeton

Beschleunigende Zusatzmittel für Spritzbeton bewirken eine sehr frühe Abbindebeschleunigung und/oder eine sehr frühe Erhärtung des Betons, die mit normalen Betonzusatzmitteln nicht erreicht werden können. Zudem ermöglichen sie den Aufbau von Schichtdicken - auf senkrechten Oberflächen und überkopf -, die ohne die Verwendung dieser Zusatzmittel nicht möglich wären.

Spritzbetonbeschleuniger können bezüglich Eigenschaften und Anforderungen nicht mit den üblichen Erhärtungsbeschleunigern verglichen werden, die beim Normalbeton verwendet werden.

Bei den Spritzbetonbeschleunigern können verschiedenen Typen unterschieden werden, welche sich in Bezug auf Eigenschaften sowie Menge und Art der Dosierung unterscheiden. Am häufigsten werden Flüssigprodukte verwendet.

Die am meisten verwendeten Beschleunigertypen für Spritzbeton sind:

- Natriumaluminat
- Kaliumaluminat
- Silikate
- Modifizierte Silikate
- Alkalifreie Produkte
- Andere spezielle Spritzbetonbeschleuniger

BEMERKUNG: Spritzbetonbeschleuniger sollten chloridfrei sein.

GA3.4 Thixotropierende Zusatzmittel

Ein thixotropierendes Spritzbetonzusatzmittel kann aus einem einzigen oder mehreren miteinander reagierenden Produkten bestehen. Das Zusatzmittel, bzw. Zusatzmittelsystem, wird der Spritzbetonmischung zugegeben, um größere Schichtdicken (50 - 100 mm) zu erzeugen - auf senkrechten Flächen und überkopf - als mit Spritzbetonmischungen ohne Zusatzmittel oder ohne Beschleuniger, ohne daß der Spritzbeton durchhängt oder wegbricht.

GA3.5 Zusatzmittel für die Hydratationssteuerung

Ein Hydratationssteuerungssystem erleichtert die Lagerung und Handhabung von Spritzbetonmischungen weit über die Grenzen der üblichen Betonoffenzeiten (1-2 Stunden) hinaus, ohne negative Auswirkungen auf die Hydratation. Die Zugabe der ersten Komponente verhindert die Vorhydratation. Durch die Zugabe der zweiten Komponente, welche ein gewöhnlicher Beschleuniger sein kann, wird der Beton reaktiviert, und das Abbinden erfolgt ebenso wie beim frisch gemischten Beton.

Zusatzmittel für die Hydratationssteuerung können sowohl beim Naß- als auch beim Trockenspritzverfahren verwendet werden.

GA3.6 Zusatzmittel für die Haftverbesserung von Spritzbeton

Ein spezielles Zusatzmittel, welches der Ausgangsmischung oder an der Düse zugeführt wird, um die Haftung zwischen den Spritzbetonschichten und/oder die Zughaftung an der Spritzbetonoberfläche zu verbessern.

Zusatzmittel für die Haftverbesserung haben keine negativen Auswirkungen auf die Haftung zwischen den Schichten und erfordern keine besonderen Maßnahmen bezüglich Reinigen/Entfernen.

Einige Haftverbesserer können auch als Ersatz für die externe Nachbehandlung dienen. Diese sogenannten internen Nachbehandlungsmittel bewirken eine geringere Schwindung und Rißbildung und eine vollständigere Hydratation. Dadurch verringert sich die Durchlässigkeit, und es entsteht eine bessere Sulfat- und Frostbeständigkeit des Spritzbetons.

Zur Bestätigung der Ergebnisse sollten Vorversuche durchgeführt werden. Die Anleitungen des Herstellers bezüglich Dosierung usw. sollten befolgt werden.

GA3.9 Für die Erfüllung der Anforderungen erforderliche Dosierungen

Als hydraulische Bindemittel gelten nicht nur Zement, sondern auch Siliziumstaub, Flugasche und GGBS (siehe 'Richtlinie', Abschnitt 4.7 und Tabelle 5.3.1).

Der K-Faktor (Bindungsfähigkeit) ist jedoch nicht derselbe bei allen hydraulischen Bindemitteln und muß daher bei der Berechnung der Dosierung von Spritzbetonzusatzmitteln berücksichtigt werden:

<i>Bindemittel</i>	<i>K-Faktor</i>
Zement	1
Siliziumstaub	2 (Dosierung <8%); 1 (Dosierung 8-15%)
Flugasche	0.5
GGBS	0.5

Beispiel:

Betonrezeptur mit Zement, Flugasche und Siliziumstaub; Beschleunigerdosierung: 5%

300 kg Zement (K-Faktor: 1) = 15.0 kg Beschleuniger

100 kg Flugasche (K-Faktor: 0.5) = 2.5 kg Beschleuniger

20 kg Siliziumstaub (K-Faktor: 2) = 2.0 kg Beschleuniger

Damit beläuft sich die Gesamtdosiermenge des Beschleunigers auf 19.5 kg je m³ Spritzbetonmischung.

GA4 ANFORDERUNGEN

Diese Anforderungen dienen für die Zulassung von Produkten und beziehen sich nur auf unter streng definierten Bedingungen durchgeführte Laborversuche.

GA5.1.2 Vergleichszuschlagsstoffe

Wenn möglich sollten ofengetrocknete Zuschläge verwendet werden.

GA5.5.2.2 Spritzverfahren für die Kontrollplatte, und

GA5.5.2.3 Spritzverfahren für die Probeplatte

Die Formen dürfen nicht überkopf bespritzt werden. Nur waagerechtes Spritzen (Nullmischung) und senkrecht Spritzen (Prüfmischung) sind gestattet.

GA6.3.2.2 Herstellung des Vergleichsbetonleims

Das Verfahren ist eine modifizierte Version von EN 480-2 (siehe Anhang 1, 6.3.2 - 6.3.2.4).

Folgenden Schritten sollte besondere Beachtung geschenkt werden:

- Der Zement wird vor dem Wasser zugegeben.
- Kürzere Mischzeiten nach der Zugabe des Spritzbetonbeschleunigers: maximal 15-30 Sek. Zu langes oder mangelhaftes Mischen führt zu falschen Abbindezeiten.

ANHANG A

SPRITZBETON - BESTIMMUNG DES ENERGIEABSORPTIONSVERMÖGENS VON PLATTENPROBEN

(Die Verweise beziehen sich auf Abbildungen in der 'Richtlinie'.)

1 ANWENDUNGSBEREICH

Diese 'Richtlinie' bezieht sich auf ein Verfahren zur Bestimmung des Last-Verformungsverhaltens einer Plattenprobe zur Berechnung des Energieaufnahmevermögens bis zu einer vorgeschriebenen Durchbiegung.

2 PRINZIP

In eine gespritzte Plattenprobe wird bei kontrollierter Durchbiegung eine Last durch einen starren Stahlblock in Plattenmitte eingeleitet.

Das Last-Durchbiegungsdiagramm wird aufgezeichnet und der Versuch fortgeführt, bis im Mittelpunkt der Platte eine Durchbiegung von 30 mm erreicht wird.

Aus dem Last-Durchbiegungsdiagramm wird ein zweites Diagramm abgeleitet, welches die aufgenommene Energie als Funktion der Plattendurchbiegung zeigt.

3 VERSUCHSANORDNUNG

3.1 Prüfgerät

Der Versuch wird mit einem Prüfgerät gemäß EN 12390, Abschnitte 4.2 und 4.3 durchgeführt. Die Starrheit und das Kontrollsystem des Prüfgerätes müssen eine kontrollierte Durchbiegung erlauben.

Ein kalibrierter elektronischer Meßwertaufnehmer.

Ein elektronischer Meßwertschreiber oder ein zweidimensionaler Plotter.

3.2 Lasteinleitung

Die Vorrichtung zur Kraftereinleitung muß aus folgenden Elementen bestehen:

- Ein auf zwei starren, quadratischen Stützen (Seitenlänge 100 mm) aufgelegter Rahmen mit einer inneren Seitenlänge von 500 mm, auf welchem die Platte aufliegt.
- Ein starrer, quadratischer Stahlblock für die Belastung, der eine Kontaktfläche von 100 mm x 100 mm und eine Dicke von 20 mm hat und in der Mitte der Oberseite der Platte aufliegt (Abb. 10.4.1)
- Ein geeignetes Bettungsmaterial auf Mörtelbasis für den Einbau zwischen der quadratischen Auflage und der Probe sowie zwischen der Probe und dem Belastungsstahlblock.

3.3 Messung und Kontrolle der Durchbiegung

Die Durchbiegung (ohne Verformung der Auflage) muß mit einem elektronischen Meßwertaufnehmer gemessen werden.

Das Prüfgerät muß vom Meßwertaufnehmer überwacht werden, um eine mittige Belastung der Probe bei konstanter Durchbiegungsgeschwindigkeit sicherzustellen.

4 PRÜFKÖRPER

4.1 Eine quadratische Probe muß in eine Form mit einer Seitenlänge von 600 mm gespritzt und nachbehandelt werden, wobei die Dicke unmittelbar nach dem Spritzen auf 100 mm (-0/+10 mm) abgeglichen werden muß.

4.2 Die so vorbereitete Probe muß während mindestens 3 Tagen unter Wasser gelagert und während der Versuche feucht gehalten werden.

4.3 Falls nicht anders vorgeschrieben, müssen die Prüfungen nach 28 Tagen erfolgen.

4.4 Die Probekörper müssen vor und nach dem Versuch überprüft werden, und alle Unregelmäßigkeiten müssen gemeldet werden.

5 VERFAHREN

5.1 Vorbereitung und Anordnung der Proben

Die Last muß senkrecht zur Spritzfläche eingeleitet werden; die glatte, der Form zugekehrte Seite muß während des Versuchs nach unten gerichtet sein.

Die glatte Seite muß an der Berührungsfläche mit der Auflage fest in einer geeigneten Bettungsschicht auf Mörtelbasis eingebettet sein. Auch der Belastungsblock muß auf der Platte eingebettet sein, um sicherzustellen, daß diese senkrecht zur eingeleiteten Last liegt.

5.2 Belastung

Das Prüfgerät muß vom Meßwertaufnehmer überwacht werden, um sicherzustellen, daß die Lasteinleitung in die Probe bei einer konstanten Durchbiegungsgeschwindigkeit von 1 mm je Minute und in Plattenmitte erfolgt.

Die Belastung und die Durchbiegung müssen mit dem Meßwertschreiber oder dem zweidimensionalen Plotter laufend aufgezeichnet werden, bis eine Durchbiegung von mindestens 30 mm erreicht ist (Abb. 10.4.2).

Die Lasteinleitung muß gestoppt werden, wenn die mittige Durchbiegung 30 mm überschreitet.

6 DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Aus dem Last-Durchbiegungsdiagramm muß ein zweites Diagramm abgeleitet werden, welches die aufgenommene Energie als Funktion der Plattenverformung zeigt (Abb. 10.4.3).

Die aufgenommene Energie (in Joules), welche der Fläche unter dem Last-Durchbiegungsdiagramm zwischen der Durchbiegung von 0 bis 25 mm entspricht, muß bestimmt werden.

7 PRÜFBERICHT

Der Prüfbericht muß folgendes enthalten:

- Identifizierung des Probekörpers
- Durchschnittliche Plattendicke im Bereich der Lasteinleitung, auf 1 cm genau
- Art und Starrheit des Prüfgerätes
- Nachbehandlungsbedingungen und Prüfalter
- Last-Durchbiegungsdiagramm
- Berechnetes Energie-Durchbiegungsdiagramm
- Energieaufnahme bei einer Durchbiegung von 25 mm, auf 10 Joules genau