

---

# Spritzbetonentwicklungen in Finnland

---

## SHOTCRETE IN FINLAND

EERO PUITTINEN, ORION CORPORATION NORMET; PAULI SYRJÄNEN, HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY - LABORATORY OF ROCK ENGINEERING

Die üblichste Anwendung von Spritzbeton - auch in Finnland - ist die Gebirgsverstärkung. Ansonsten werden Hangsicherungen, Sanierungen und Neubauten von Betonbrücken, Betonmauern und Trennwänden in Felskavernen sowie Dämme beim Nachfüllen im Erzbergbau mit gespritztem Beton hergestellt. Dazu wird Spritzbeton, im industriellen Maßstab, für die Herstellung von Betonelementen und Lärmschutzwänden angewendet.

Im gegenwärtigen finnischen Untertagebau wird als Spritzmethode fast ausschließlich mechanisiertes Naßspritzen angewendet. Stahlfasern haben die Netzbewehrung als Betonverstärkung im Tunnelbau ganz und zur vollsten Zufriedenheit ersetzt; im Bergbau wird allerdings auch Netzbewehrung gebraucht.

Die ersten finnischen Vorschriften für Spritzbeton stammen aus dem Jahre 1972, deren neueste Fassung 1993 in Kraft getreten ist. Finnland ist auch im Komitee für die Vorbereitung des neuen europäischen Spritzbetonstandards CEN/TC 104/WG 10 vertreten.

Finnische Spritzbetonforschung konzentriert sich vor allem auf die Anwendungen für Gebirgsverstärkung in harten Gesteinsverhältnissen. Bei der Maschinenentwicklung werden jedoch auch die Herausforderungen der Anwendungstechnik in schlechten, felsmechanisch komplizierten Gesteinsverhältnissen wahrgenommen.

Das neueste, noch nicht abgeschlossene Forschungsprojekt "RUMA" widmet sich der Optimierung der Parameter des Spritzbetons in der Gebirgssicherung und beim Bau verschiedener Betonbauteile. Das Projekt ist vom Technischen Entwicklungsfond TEKES finanziert, vom Institut für Bergmechanik der Technischen Hochschule Helsinki koordiniert und sachverständige Experten aus der finnischen Zementindustrie, aus Bauunternehmen und dem Maschinenbau arbeiten daran mit.

Die hauptsächlichen Untersuchungsobjekte sind die Pumpfähigkeit und Spritzbarkeit des Betonmischguts sowie die durch Spritzverfahren vorgenommene Herstellung von Beton mit hoher Festigkeit. Auch die Brauchbarkeit von neuen BE-Mitteln zur Erzielung von hohen Frühfestigkeiten des Spritzbetons ist untersucht worden.

Die Zusammenfassung des Projekts liegt uns noch nicht vor aber wenn sie fertig ist, werden eindrucksvolle Beobachtungen bezüglich der rückprallvermindernden Wirkung von Mikrosilika und der Wirkung von Lufporenmitteln darin enthalten sein.

*As in other countries, shotcrete in Finland is most widely used as rock mass support. Moreover, shotcrete is applied as slope protection, for the repair and construction of concrete bridges, concrete walls and partition walls in rock caverns, as well as in ore-mining. In addition, shotcrete is used, on the industrial scale, for precast concrete compound units and sound-insulating walls.*

*The mechanized wet-mix shotcreting method is nowadays applied almost exclusively in underground construction in Finland. In tunneling, steel fibres have completely replaced wire-mesh; in mining, however, wire-mesh is still used.*

*The first Finnish standards regarding shotcrete were issued in 1972; the latest revision of these standards took effect in 1993. Finland is also a member of the Committee for the Preparation of a New European Shotcrete Standard CEN/TC 104/WG 10.*

Research on shotcrete in Finland focuses primarily on the application of shotcrete as a means of support in hard rock. In the development and design of equipment and machinery, however, we also meet the challenges posed by unfavorable and rock-mechanically complicated rock mass conditions.

RUMA, the latest and not yet completed research project, deals with optimizing the parameters of shotcrete as rock mass support and for precast concrete compound units. The project is financed by TEKES, the Technical Development Fund, and coordinated by the Institute for Rock Mechanics of Helsinki University. Leading experts from the Finnish cement industry, construction companies and suppliers of equipment are involved in it.

The research project concentrates on the pumpability and projection of the mix and the application of high-strength shotcrete. New accelerators to produce shotcrete showing high early strength have also been tested.

The final project report has not yet been completed, but once it is available it will present remarkable results with regard to the rebound-reducing effect of microsilica as well as the effect of air-entraining agents.

## 1. Die Rolle des Spritzbetons

### 1.1 Einleitung

Spritzbeton wird üblicherweise - so auch in Finnland - für den Ausbau unterirdischer Hohlräume angewandt. Weitere Anwendungsbereiche sind Hangsicherungen, Sanierungen von Betonbrücken, Bau von Straßenunterführungen, Betonmauern und Trennwänden in Felskavernen sowie Dämmen beim Nachfüllen im Erzbergbau. Dazu werden mit Spritzbeton industriell verschiedene Betonelemente und Lärmschutzwände hergestellt.

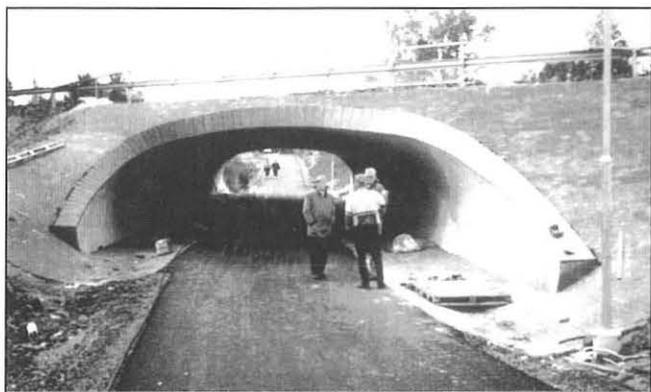


Bild 1: Eine im Spritzverfahren konstruierte Straßenunterführung in Kalajoki (Lemminkäinen Baugesellschaft)

Die Anwendung von Spritzbeton begann in Finnland in den 60er Jahren zuerst im Trockenspritzverfahren. Naßspritzen wurde in der Mitte der 70er Jahre im Erzbergbau eingeführt; im Tunnelbau wurde es systematisch ab 1988 eingesetzt. Das erste naßgespritzte Bauobjekt von Bedeutung war die Viikinmäki-Anlage (Bild 2), die für die Reinigung der Abwässer des Groß-Helsinki-Gebiets 1988-90 gebaut wurde. Die Anlage umfaßt Felskavernen mit einem Gesamtabbruchvolumen von 1,1 Mio. m<sup>3</sup>, das Gewölbe wurde mittels Systemankerung und insgesamt 15 000 m<sup>3</sup> gespritzten stahlfaserbewehrten Naßspritzbetons verstärkt.

Heutzutage wird bei den größeren Tunnel- und Kavernenbauobjekten fast ausschließlich das mechanisierte Naßspritzenverfahren benutzt. Trockenspritzen wird nur mehr in

Fällen kleiner Spritzvolumen bzw. für Spritzen an schwer zugänglichen Stellen, beim Schachtbau und dgl. gebraucht. Stahlfasern ersetzen die Betonstahlmatten im Tunnelbau nahezu zur Gänze. Im Bergbau hingegen werden neben den Fasern auch noch Stahlmatten verwendet.

### 1.2 Richtlinien und Vorschriften für Spritzbeton

Die mit Spritzbeton hergestellten Konstruktionen unterscheiden sich im Grunde genommen nicht von denjenigen, die mit s.g. Normalbeton hergestellt werden. Jede Betonkonstruktion, die eine Baugenehmigung erfordert, sei sie mit Spritz- oder Normalbeton hergestellt, unterliegt also den gleichen Vorschriften, d.h. der finnischen Betonnorm (RakMK B4, 1993). Für Spritzbeton gelten außerdem spezifische Richtlinien (VTT Mitteilung Nr. 20/1972). Jene Richtlinien wurden im Jahr 1975 überarbeitet, 1988 vom Finnischen Betonverband erneuert (Richtlinie BY 29) und 1993 erneut überarbeitet. Derzeit werden sie durch die von der europäischen Arbeitsgruppe CEN/TC104/WG 10 vorbereiteten, gesamteuropäischen Spritzbetonnorm ersetzt, an deren Entwicklung auch Finnland beteiligt ist.

Laut der gültigen Spritzbetonrichtlinie (BY 29) wird der Spritzbeton je nach Verwendungszweck in vier gestaffelte, Festigkeitsklassen eingestuft (Tabelle 1).

Festigkeitsklasse	Richtwert für Mindestdruckfestigkeit	Beispiele für Anwendungsbereiche
I	K30	Auskleidungen mit hohen Anforderungen; andere Objekte, deren Herstellung in Bezug auf deren konstruktive Funktionsfähigkeit besondere Sorgfalt voraussetzt.
II	K30	Normale Gebirgsverstärkungen, Verkleidungen und allgemeine Betonkonstruktionen; Sanierungen der Betonkonstruktionen mit hohen Anforderungen.
III	K20	Sanierungen. Nachfüllen mit Spritzgut.
IV	K20	Temporäre Sofortsicherung

Tab. 1: Spritzbeton Festigkeitsklassen, Richtwerte der Mindestdruckfestigkeit und Anwendungsbeispiele (laut BY 29)

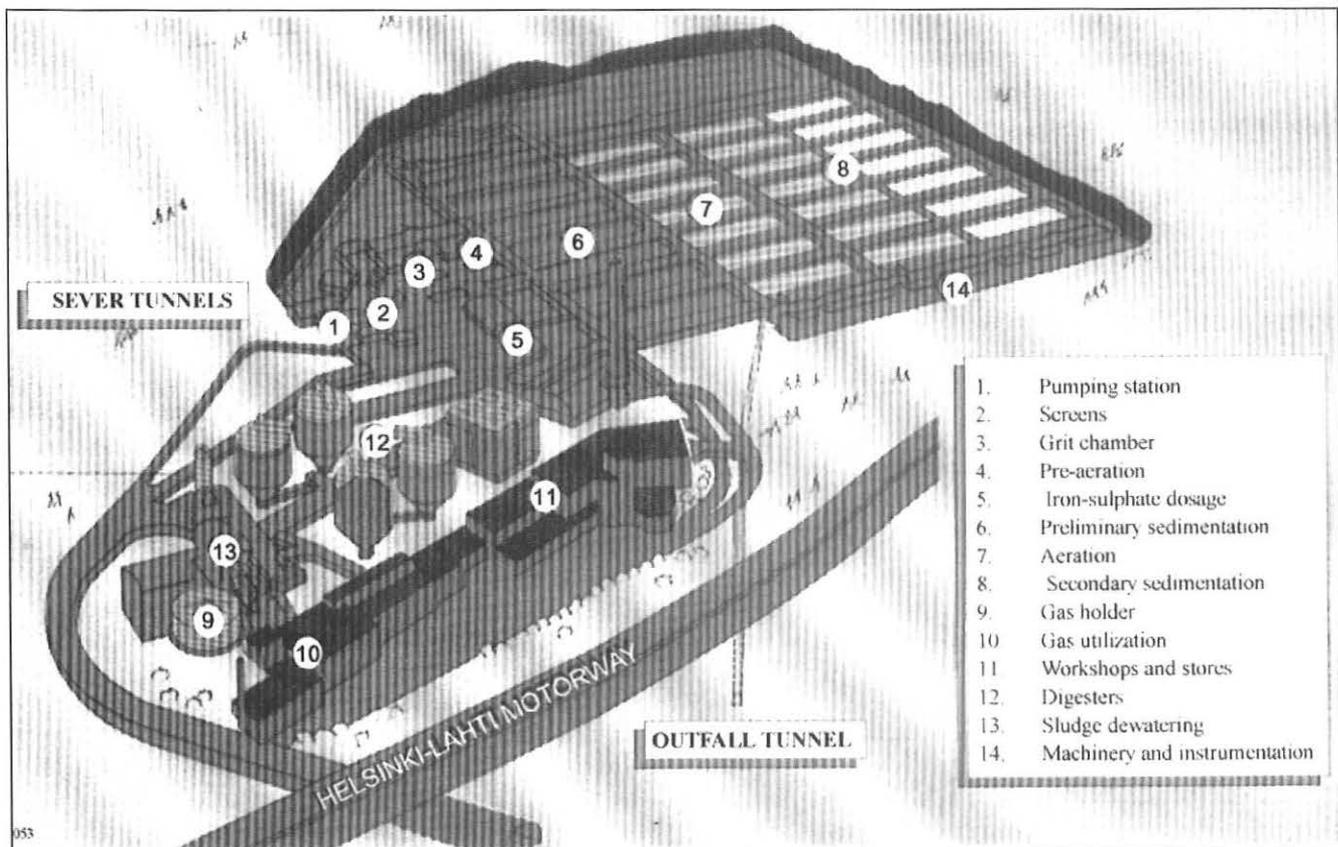


Bild 2: Viikinmäki Reinigungsanlage (Stadt Helsinki)

Für die Herstellung von tragenden Betonkonstruktionen definiert die Richtlinie Qualifikationsanforderungen an das ausführende und überwachende Personal. Die entsprechenden Empfehlungen für die jeweiligen Spritzbeton-Festigkeitsklassen werden in **Tabelle 2** vorgestellt.

Festigkeitsklasse	Ausführendes Personal	Überwachendes Personal
I	Düsenführer mit mindestens 1-jähriger Spritzerfahrung	Berufsausbildung zum Techniker sowie mindestens 1-jährige Erfahrung auf dem Gebiet Betonspritzen.
II	Düsenführer mit mindestens 1/2-jähriger Spritzerfahrung	Berufsausbildung zum Techniker sowie mindestens 1/2-jährige Erfahrung auf dem Gebiet Betonspritzen.
III	keine speziellen Anforderungen	keine speziellen Anforderungen
IV	keine speziellen Anforderungen	keine speziellen Anforderungen

Tab. 2: Qualifikationsanforderungen für das Personal beim Betonspritzen (laut BY 29).

Die Güte von Betonkonstruktionen aus Spritzbeton wird mindestens durch Druckfestigkeitsprüfungen sowie durch Prüfungen der Schichtstärke festgestellt. Sonstige Eigenschaften werden geprüft, falls die vorgesehene Funktion der

Konstruktion sie erfordern (**Tabelle 3 und 4**).

Festigkeitsklasse	Prüfungen und Prüfkörper	
	Naßspritzverfahren	Trockenspritzverfahren
I	Standardprüfkörper lt. Betonnorm, Zylinder aus der gespritzten Prüfkiste, Zylinder aus der gespritzten Konstruktion	Zylinder aus der gespritzten Prüfkiste, Zylinder aus der gespritzten Konstruktion
II	Standardprüfkörper lt. Betonnorm, Zylinder aus der gespritzten Prüfkiste (Zylinder aus der gespritzten Konstruktion)	Zylinder aus der gespritzten Prüfplatte (Zylinder aus der gespritzten Konstruktion)
III ... IV	Standardprüfkörper lt. Betonnorm (Zylinder aus der gespritzten Prüfkiste)	(Zylinder aus der gespritzten Prüfkiste) (Zylinder aus der gespritzten Konstruktion)

Tab. 3: Prüfungen und Prüfkörper laut Spritzbeton-Festigkeitsklassen. Die in Klammern angegebenen Prüfungen werden nur dann durchgeführt, wenn sie in der Ausschreibung vorgeschrieben sind (laut BY 29).

Die im Spritzbeton verwendeten Stahlfasern müssen einer vom Finnischen Betonverband herausgegebene Gebrauchsrichtlinie (BY8B) entsprechen. Diese Richtlinie beruht auf der Biegezugprüfung laut ASTM C 1018, mit deren Hilfe mittels mindestens drei verschiedener Faserdosierun-

gen (kg/m<sup>3</sup>) die Zähigkeitsindexe  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{50}$  und  $I_{50}$  für die zutreffenden Stahlfasern bestimmt werden. Außerdem definiert die Richtlinie, daß die Fasern den Anforderungen von ASTM A 820 entsprechen müssen.

Festigkeitsklasse	Prüfung der Betonanlage	Betonvolumen eines Prüfpostens V [m <sup>3</sup> ]	Prüfkörpermenge pro Prüfposten [St.]
≤ K30	Geprüfte Betonanlage	< 900	6
		> 900	V/150
	Nicht geprüfte Betonanlage	< 75	6
		75 .... 675	9
> 675	V/75		
≥ K35	Geprüfte Betonanlage	< 600	6
		> 600	V/100
	Nicht geprüfte Betonanlage	< 50	6
		50 .... 450	9
> 450	V/50		

Tab. 4: Die Mindestmengen der an der Baustelle herzustellenden Prüfkörper (gespritzte Prüfkisten) für Druckfestigkeitsprüfungen. Das Betonvolumen eines Prüfpostens entspricht beim Naßspritzverfahren der gespritzten Betonmenge und beim Trockenspritzverfahren der Menge an Trockenmischgut. Die Prüfkörpermengen entsprechend der nicht geprüften Betonanlage werden für die Gütekontrolle beim Trockenspritzverfahren angewandt (laut BY 29).

## 2. Ausbau von Hohlräumen mit Spritzbeton

### 2.1 Der finnische Baugrund

Der präkambrische Grundfels Finnlands gehört zu dem einheitlichen Gebiet von Skandinavien, Finnland und dem die Halbinsel Kola umfassenden Baltischen Schild (Fennoskandia), der den nordwestlichen, nach der Eiszeit zutage getretenen Teil des großen europäischen Kontinentalkernstücks Fennosarmatia bildet. Die finnischen Gesteinsarten sind kristallin, hart und fest; mit einaxialischen Druckfestigkeiten von normalerweise 120 bis 200 MPa. Für den Abbau sind sie sehr günstig. In den meisten Fällen hält das Gestein allein den durch den Abbau entstandenen Randspannungen stand. Der Felsgrund ist jedoch häufig geklüftet und setzt eine Sicherung des Gewölbes voraus. Das typische finnische Gestein entspricht nach der Q-Wert-Einstufung der Klasse Q = 1 bis 40 (schwach bis gut).

### 2.2 Die typische Sicherungsstruktur

In diesen Gesteinverhältnissen wird die Sicherung der Hohlräume allgemein durch Systemanker und Spritzbeton durchgeführt. Die Anker sind unverspannte Mörtelanker, welche die Aufgabe haben, die Schlüsselblöcke im Profil festzuhalten. Eine verhältnismäßig dünne Spritzbetonschicht, von 6 bis 8 cm wird aufgetragen um die kleineren Blöcke und Spalten im Gewölbe festzumauern. Spritzbeton soll der Festigkeitsklasse K35 entsprechen. Ist das Gestein von einer mittleren oder besseren Güteklasse, wird Spritzbeton ohne Stahlmatten bzw. -fasern verwendet. Ausgenommen sind lediglich Luftschutzräume, deren Ausbau immer mit stahlfaserbewehrtem Spritzbeton herzustellen ist.

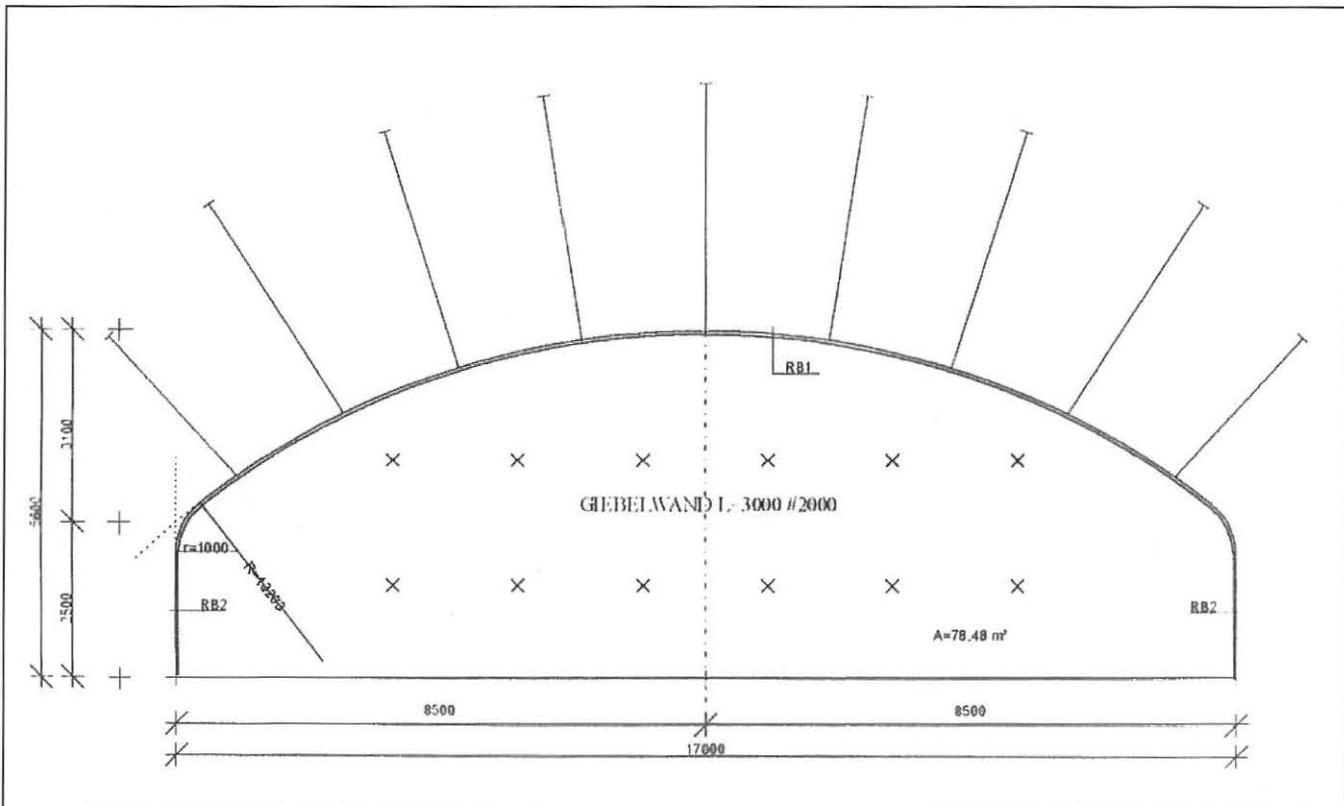


Bild 3: Querschnitt von Luftschutzraum/Parkhalle Herttoniemenranta in Helsinki

Ein typisches Beispiel für die Sicherung mit Systemankerung und Spritzbeton ist der Luftschutzraum/Parkhalle Herttoniemenranta in Helsinki. Die Firne wurde mit Spritzbeton, Schichtstärke 6 cm (RB 1) gesichert. Die Ulmen wurden mittels 2 Betonschichten, zuerst mit 6 cm Stahlfaserbeton, danach mit unbewehrtem Beton von 2 cm Schichtstärke ausgebaut; Der Spritzbeton sollte der Festigkeitsklasse K 40 entsprechen.

Dank der guten Gesteinsqualität braucht man den temporären Ausbau sehr selten. Aus diesem Grund wurden an den Spritzbeton keine großen Anforderungen bezüglich seiner Frühfestigkeit gestellt. Deshalb und wegen der verhältnismäßig kleinen Schichtstärken werden an den Erstarrungsbeschleuniger ganz andere Anforderungen gestellt, als es der Fall wäre, würden große Schichtstärken mit hoher Frühfestigkeit gefordert. Beschleuniger auf Wasserglasbasis und mit relativ niedriger Dosierung, d.h. 3 bis 5% vom Bindemittelgewicht werden angewendet. Beim Trockenspritzverfahren braucht man normalerweise keine Beschleuniger, außer im Falle von starkem Wasserandrang.

### 3. Spritzbetonausrüstung

Trockenspritzbeton wird mit Rotorspritzmaschinen händisch oder mechanisch gespritzt, während das Naßspritzen immer mechanisch mit Spritzmobilen durchgeführt wird. Schweizer Firmen waren die erfolgreichsten Lieferanten von Trockenspritzmaschinen und beherrschten den Markt von Spritzroboots bis in die 80-er Jahre. Inspiriert vom finnischen Erzbergbau, begann unsere Firma die Entwicklung von Spritz-

armen und -mobilen 1975, zuerst für das Trockenspritzverfahren, dann 1982 für das Naßspritzen. Die Anwendung im Tunnelbau läßt sich bis zu Beginn der Bauarbeiten der Viikinkäki-Anlage (Bild 2) 1987 zurückverfolgen, danach sind unsere Naßspritzeinrichtungen (Bild 4) im Tunnelbau weltweit eingesetzt worden.

Als Betonpumpen fürs Naßspritzen wurden früher meistens Rotorpumpen gebraucht. Um Spritzbeton erzeugen zu können, der den Qualitätsanforderungen der im Jahr 1988 erneuerten Betonnorm entspricht und mit einer wesentlich höheren Leistung gespritzt werden konnte, begann man für Spritzbeton besonders konzipierte Doppelkolbenpumpen (PMW, Reed, Morgon, Schwing) einzusetzen.

Schneckenpumpen wurden früher für die Dosierung von BE-Mittel verwendet. Weil sie aber zur Ungenauigkeit der Dosierung neigten, wurden sie durch Kolbendosiergeräte ersetzt. In unserem Dosiergerät ist die Dosierpumpe hydraulisch mit der Betonpumpe synchronisiert worden. Die Dosierung ist mittels der mechanischen oder elektronischen Einstellung des stufenlos regelbaren, an der Dosierpumpe angeschlossenen, Variators bestimmt. Der Dosierbereich des Gerätes beträgt 2 bis 15 % und erfahrungsgemäß können alle bekannten flüssigen, auch die alkalifreien BE-Mittel, mit ihm störungsfrei dosiert werden.

Die konventionellen, von unten gesteuerten Spritzarme werden heute durch Kombiausleger ersetzt, die den Steuerstand auf der Spritzbühne haben. Diese Ausführung ermöglicht eine bessere Kontrolle über den Spritzvorgang, speziell beim Spritzen großer Hohlräume sowie eine verbesserte

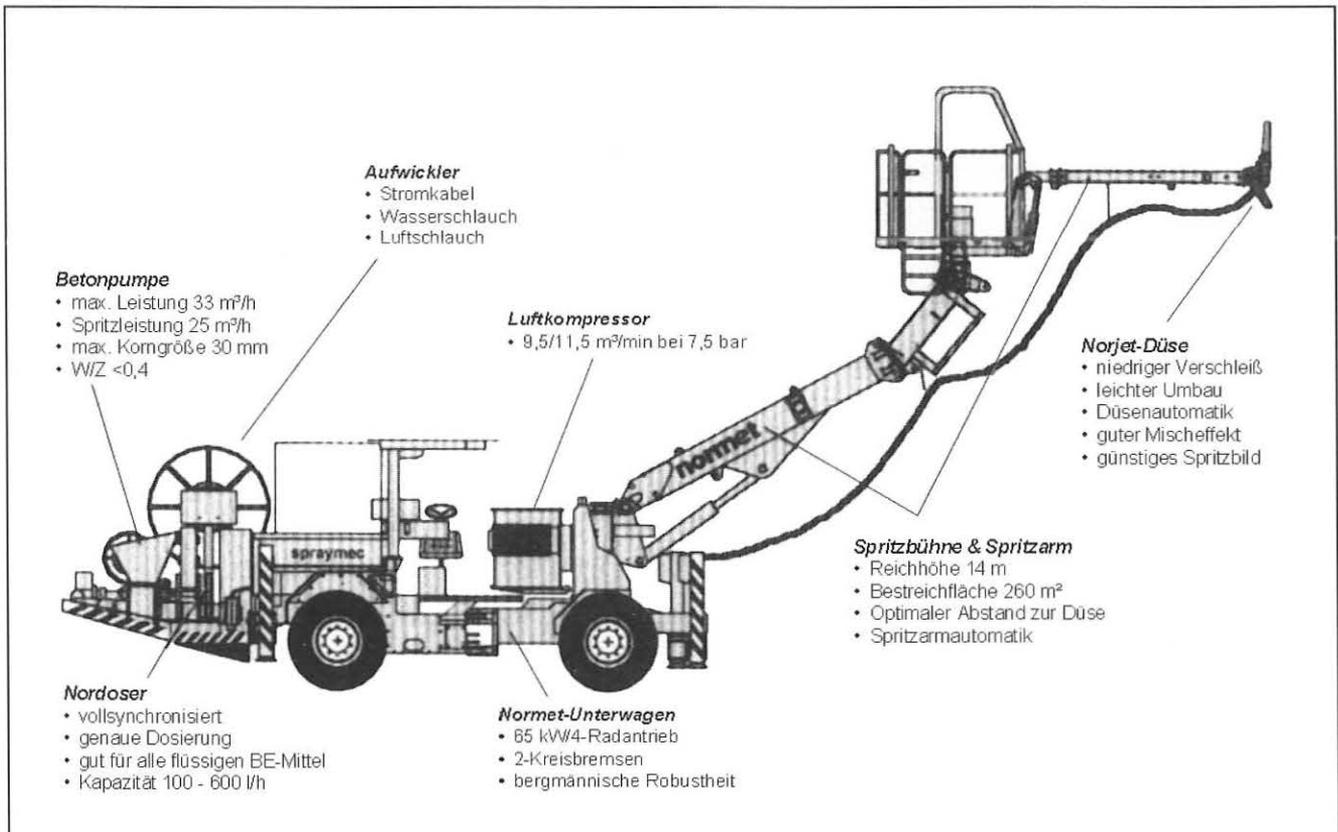


Bild 4: Spraymec 9140 WPC, das finnische Spritzmobil

Arbeitssicherheit für den Düsenführer. Einer der Vorteile dieser Zusammenstellung ist, daß jeder Punkt innerhalb der von der Düse bestrichenen Fläche von allen Richtungen angespritzt werden kann, ohne das ganze Spritzmobil verstellen zu müssen. Das ist besonders beim Spritzen von schwer zugänglichen Auftragsflächen sowie beim Spritzen in schmale Spalten des Spritzobjekts von Vorteil (z.B. zwischen Tunnelbogen und Firste). Die robuste Konstruktion dieser Art Bühne ermöglicht außerdem die Montage von Zusatzeinrichtungen zum erleichtern des Einbaus von Ausbaubögen und Stahlmatten.

Bei den Spritzdüsen konnte der Verschleiß durch eine Spezialhärtung von Düsenkörper und Mundstück um 60 bis 90% gesenkt werden. Die symmetrische Luftzufuhr und die dabei verursachte Turbulenz in der Mischkammer resultieren in einem besseren Mischeffekt der Düse. Die Düsen können mit einem Mundstück aus Stahl oder Kunststoff ausgestattet werden.

Lastwagen werden als Unterwagen eines Kompaktgeräts für mechanisches Spritzen nicht mehr eingesetzt, außer für Spritzaufgaben im Freien (vgl. 1.1). Sonst sind die Spritzmobile mit bergmännisch konstruierten Spezialunterwägen bestückt, die durch Sicherheitsvorkehrungen für den unterirdischen Einsatz gekennzeichnet sind. Sie bieten der dem Kompaktgerät zugehörigen Mehrausrüstung (Luftkompressor, Aufwickler für Stromkabel, Elektrokasten, usw.) optimalen Platz, genügende Tragkraft und gute Wartungsfähigkeit an.

## 4. Die Entwicklung

### 4.1 Entwicklungsvorhaben, RUMA-Projekt

Im Zusammenhang mit der Erneuerung der Richtlinie für Spritzbeton wurde von der Staatlichen Technischen Forschungsanstalt (VTT) der Spritzversuch von Kauniainen (Orantie 1988) durchgeführt. Eines der Ziele war, die Tauglichkeit des Naßspritzverfahrens für den Ausbau unterirdischer Hohlräume zu untersuchen. Zur gleichen Zeit wurden die Pläne für die Reinigungsanlage von Viikinmäki (**Bild 2**) fertiggestellt. Die allgemeine Meinung der Planungingenieure war zunächst gegen das Naßspritzen, weil man befürchtete, daß es nicht die ausgeschriebenen Qualitätskriterien erfüllen könne. Andererseits konnte jedoch das klar leistungsfähigere Naßspritzverfahren wegen des Umfangs des geplanten Projekts nicht mehr außer Acht gelassen werden. Der Bauherr, das Städtische Wasserwerk von Helsinki, ließ den Spritzversuch im Luftschutzraum Laakso durchführen [**11**], wobei die Ergebnisse unmittelbar dazu beitrugen, daß das Naßspritzen für dieses Projekt und ziemlich bald auch für andere unterirdischen Bauprojekte vorgezogen wurde. Neben den o.g. Versuchen haben auch finnische Bauunternehmen und Bergbaugesellschaften Naßspritzen in Rahmen ihrer Forschungsvorhaben untersucht.

Während der Abfassung des vorliegenden Berichtes werden im Rahmen eines Forschungsprojekts bestimmte, auf die

Mischungszusammenstellung des Spritzbetons wirkende Faktoren, untersucht. Das Projekt namens "RUMA" wird vom Finnischen Technischen Entwicklungsfonds TEKES finanziert, vom Labor für Felstechnik der Technischen Hochschule Helsinki bearbeitet und von Sachverständigen und Experten der finnischen Zementindustrie, Bauunternehmen und Maschinenbau betrieben. Das Projekt begann im Februar 1995 und die Phase 1 konnte im Februar 1996 beendet werden.

Das Hauptaugenmerk wird dabei auf

- Faktoren für Spritzbarkeit und Rückprall
- Mikrokornverteilung vom Spritzbetongemisch
- Herstellung von Hochfestigkeitsbeton im Spritzverfahren
- PC-Programm für Ausarbeitung der Mischungszusammenstellung (Proportionierung) des Spritzbetons gelegt.

Das Projekt ist noch unvollendet und weder die endgültigen Ergebnisse der Labor- und Baustellenuntersuchungen noch deren Analysen liegen vor. Allerdings gibt es bereits einige Zwischenergebnisse und entsprechende Folgerungen, welche im folgenden vorgestellt werden.

## 4.2 Einige Untersuchungsergebnisse

### 4.2.1 Pumpbarkeit

Die Pumpbarkeit wird vor allem von der Konsistenz und dem W/Z-Faktor des Betongemisches beeinflusst. Laut Empfehlung des ACI Komite 304 sollte die Konsistenz (Slump-Maß) des zu pumpenden Betons zwischen 50 und 150 mm liegen. Je mehr das Betongemisch mit Wasser gesättigt ist, desto besser ist seine Pumpbarkeit. Da die Zugabe von Wasser einerseits die Festigkeit des Betons verringert und andererseits das zwischen den Festkörnern vom Betongemisch entstandene Lückenvolumen mit dem zugegebenen Wasser gefüllt wird, hat der Spritzbeton die äußerst wichtige Aufgabe jenes Lückenvolumen möglichst zu minimieren. Die theoretisch optimale Proportionierung des Betongemisches kann mit der Gleichung (**1**) gerechnet werden, die der amerikanische Forscher Funk [**4**] entwickelt hat:

$$Y = \frac{D^n - D_s^n}{D_L^n - D_s^n} \quad (1)$$

- wobei:
- Y = Kumulativer Volumenanteil
  - D = Korngröße
  - D<sub>L</sub> = Max. Korngröße
  - D<sub>s</sub> = Min. Korngröße
  - n = Formkoeffizient

Diese s.g. Mikroproportionierung von Beton ist u.a. noch in den Quellen [**6**], [**7**] und [**9**] insbesondere behandelt worden.

Primäre Schwierigkeit der theoretischen Untersuchungen sind die Formabweichungen der Körner des Betongemisches von der theoretischen Kugelform. In Gleichung (**1**) werden sie durch den Formkoeffizient n berücksichtigt, der

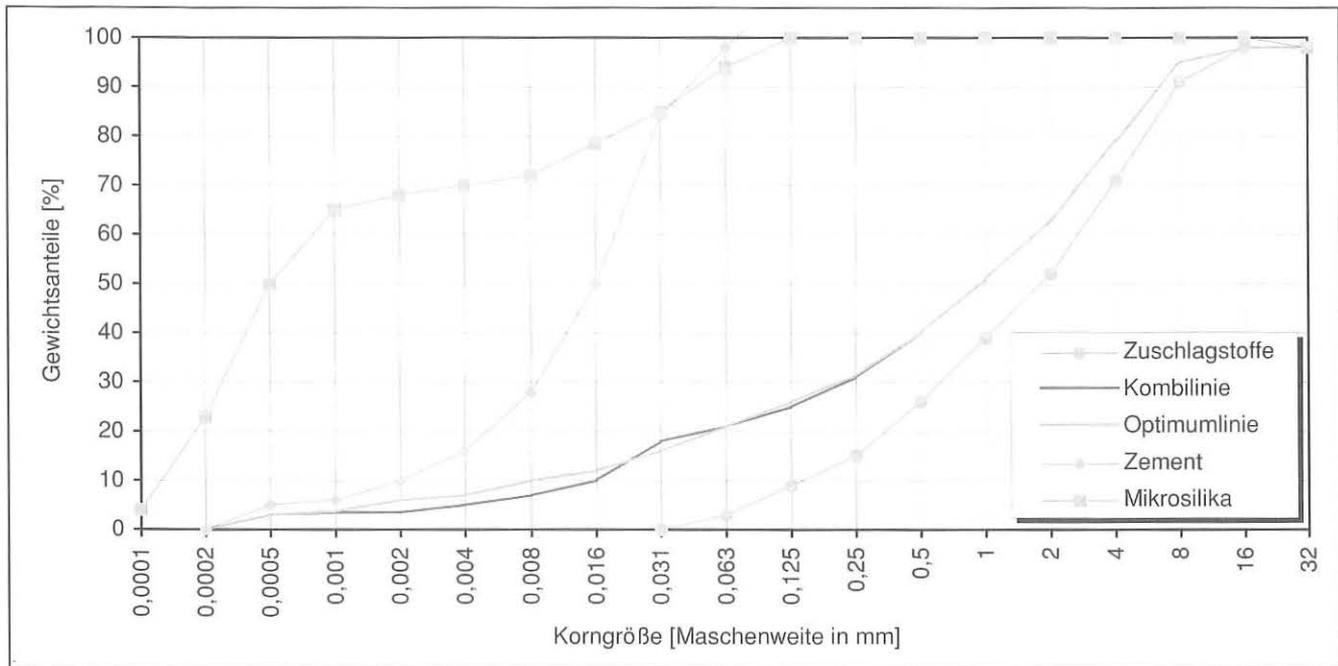


Bild 5: Mikroproportionierungskurve für Spritzbetongemisch mit Kornverteilung lt. Sieblinie B8, 400 kg/m<sup>3</sup> Portlandzement (CEM I 52,2) sowie 40 kg/m<sup>3</sup> Mikrosilika

für runde Körner immer 0,36 und für Körner unregelmäßiger Form 0,2 bis 0,3 ist; als ein "Optimalwert" wird häufig 0,27 verwendet. Da die Körner verschiedener Größen unterschiedlich von der Kugelform abweichen, müßte man mehrere n-Werte anwenden, um eine theoretisch optimale Siebkurve der Mikroproportionierung herstellen zu können.

Im Anhang von RUMA (Bild 5) wurde festgestellt, daß die Mikroproportionierung eines Betongemisches mit einer maximalen Korngröße von 8 mm in etwa mit der Sieblinie B8 lt. DIN 1045 übereinstimmt. Die Mikroproportionierung erweist sich also als geeignetes Kalkulationsverfahren für die Gesamtkornverteilung von Spritzbeton, weil B8 weit und breit als eine optimale Sieblinie für Spritzbeton anerkannt wird. Eine detaillierte Analyse über Wirkung von Kornverteilung und Mikroproportionierung auf die Pumpbarkeit des Spritzbetons ist noch nicht abgeschlossen, wird aber demnächst ausgearbeitet.

#### 4.2.2 Spritzbarkeit, Rückprallverluste

Eine optimale Spritzbarkeit setzt voraus, daß das Spritzgut als eine dicke Schicht, mit möglichst wenig Rückprall auf das Spritzobjekt gespritzt werden kann. Die Betonpartikel brauchen eine ausreichende Geschwindigkeit, um an die gewünschte Stelle fliegen zu können und dort ordentlich verdichtet zu werden. Auf der anderen Seite bewirkt die kinetische Energie das Zurückprallen einiger Partikel. Je größer die kinetische Energie, desto wahrscheinlicher ist es, daß die Partikel zurückprallen, diese nehmen aber auch kleinere, schon auf dem Spritzobjekt befindliche Körner mit. Jene beiden Phänomene können zu einem großen Teil durch Verminderung der max. Korngröße vermieden werden. Gleichzeitig wird die Menge der Feinkörner zunehmen (vgl. Optimalsieblinie), was noch weitere Vorteile, doch auch einen Nachteil mit sich bringt. Verminderte Korngröße ver-

mindert die Betonkonsistenz, welches beim Spritzbeton weniger problematisch als beim Normalbeton ist. Beim Naßspritzen werden nämlich immer Verflüssiger gebraucht, deren Wirkung noch durch den erhöhten Feinkornanteil verbessert wird. Durch Verkleinerung der Korngröße wird noch die Betonfestigkeit verbessert, wenn der Wasser/Zement-Faktor unverändert bleibt.

In der Anfangsphase des Spritzvorgangs prallen die größeren Körner mehr zurück, als die kleineren, wodurch sich auf der Spritzfläche eine aus Feinkörner bestehende Schicht bildet. Auf dieser Schicht bleiben später auch die größeren Körner haften. Je schneller diese Schicht entsteht, desto mehr verringert sich der Rückprall. Mikrosilika hat sich als einer der besten Feinkornstoffe erwiesen. Bild 6 zeigt seine empirisch festgestellte Wirkung auf den Rückprall.

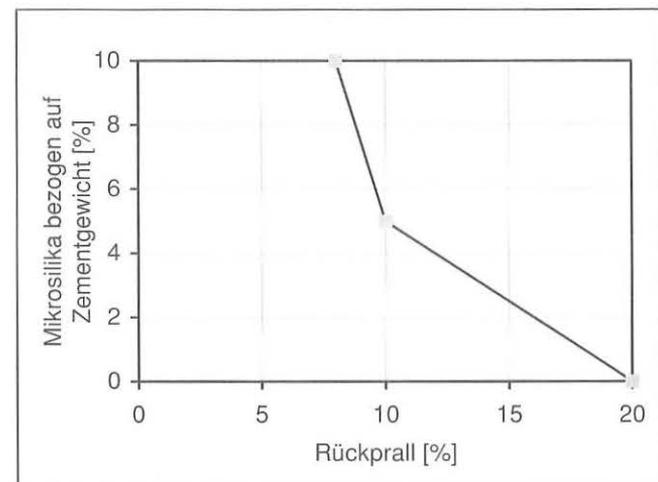


Bild 6: Wirkung von Mikrosilika auf den Rückprall von Spritzbeton mit W/Z-Faktor 0,37 ... 0,4. Ergebnisse des RUMA-Projekts.

Die Erstarrungsbeschleuniger beeinflussen die Spritzbarkeit auf eine inkonsequente Art und Weise. Ihre Anwendung verbessert auf der einen Seite die Spritzbarkeit, indem sie das Verspritzen größerer Schichtstärken ermöglichen, erhöhen jedoch auf der anderen Seite den Rückprallanteil. Beim Spitzversuch im Laakso Luftschutzraum (vgl. 4.1.) mit Spritzgut, dessen W/Z-Faktor 0,55 war, betrug der Rückprall 4 % ohne Beschleuniger und 9 % mit Wasserglas (Dosierung 5 % vom Bindemittelgewicht).

Luftporen im Spritzgut verbesserten die Spritzbarkeit. Eine Erklärung hierfür liegt darin, daß die Luftporen als eine Art Stoßdämpfer funktionieren und so die kinetische Energie des gespritzten Betons beim Auftreffen auf die Spritzfläche abgefangen wird. Bei den RUMA-Spritzversuchen wurde der Rückprall von 12 % bis auf 7 % gesenkt, wenn dem Beton ein luftporenbildender Zusatz beigelegt wurde.

Der Wasser/Bindemittel-Faktor beeinflusst stark den Rückprall. Beim Spritzversuch von Laakso mit W/Z von 0,55 lag der Rückprall bei 9 %, während er bei einer RUMA Versuchsserie mit W/Z von 0,4 (jedoch ohne Mikrosilika aber mit BE-Mittel) bis auf 20 % anstieg.

### 4.2.3 Endfestigkeit

Primäres Ziel des RUMA-Projekts ist es, die optimalen Voraussetzungen zur Herstellung von Hochfestigkeitsbeton im Spritzverfahren zu finden. Betonspritzen ist geeignet zur Herstellung dünner und schalenförmiger Betonkonstruktionen, deren Anwendung aber üblicherweise hohe Festigkeiten voraussetzt.

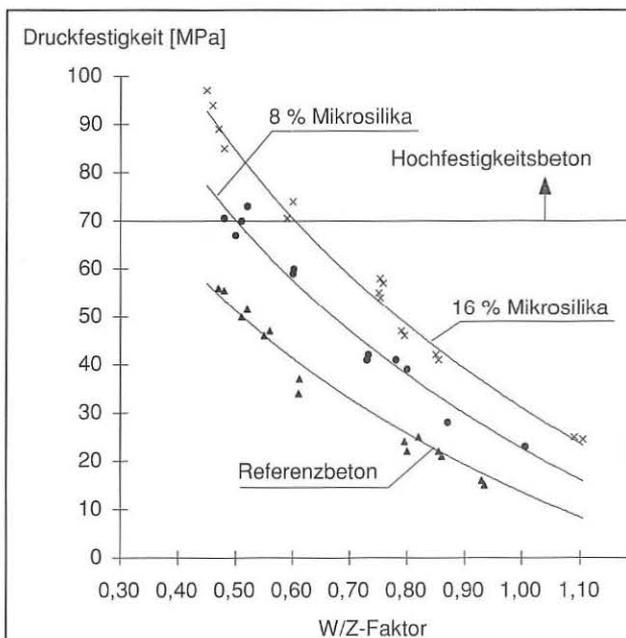


Bild 7: Einfluß von W/Z-Faktor und Mikrosilika auf die 28-Tage-Festigkeit von Beton (Shah, Ahmad 1994).

Um einen Spritzbeton mit genügender Druckfestigkeit erzeugen zu können, muß der W/Z-Faktor auf einem ausreichend niedrigen Niveau gehalten werden (Bild 7). Andererseits fordert die Spritztechnik an sich eine gewisse Pumpbarkeit sowie die Anwendung von BE-Mittel, was die End-

festigkeit etwas reduziert. Aufgrund der Spritzversuche des RUMA-Projekts scheint der praktische Mindestwert für den W/Z-Faktor mit heutiger Spritztechnik bei 0,38 zu liegen. Das Spritzen gelingt jedoch noch bei einem W/Z von 0,35, erfordert aber ein äußerst kompetentes Spritzpersonal.

Der Spitzversuch für den Hochfestigkeitsbeton wurde mit folgendem Betonrezept durchgeführt:

Zement CEM I 52,5	400 kg/m <sup>3</sup>
Mikrosilika	10 % v. Z.
Zuschlagsstoffe	1780 kg/m <sup>3</sup>
Wasser/Bindemittel	0,38
Verflüssiger	3 % v. B. (Bindemittelgewicht)
BE-Mittel (XA140)	4 % v. B.

Der Durchschnittswert der aus der gespritzten Betonkonstruktion kerngebohrten Prüfcylinder, Ø 50 mm, Länge 50 mm betrug 68,3 MPa, wobei der höchste Einzelwert 71,0 MPa war. Laut der neusten Ausgabe (1995) der Richtlinien für Spritzbeton von EN 206 und EFNARC erfüllt dieser Mittelwert die Kriterien von Festigkeitsklasse C 70/85. Gefühlmäßig ist aufgrund der Resultate dieser Versuchsreihe festzustellen, daß mit der heutigen Spritzbetontechnik ein Hochfestigkeitsbeton der Festigkeitsklasse C 60/75 erzeugt werden kann. Nur wird sie - betrachtet man die Baupläne - kaum verlangt.

### 4.2.4 Frühfestigkeit, BE-Mittel

Innerhalb des RUMA-Projekts wurde weiters der Einfluß einiger BE-Mittel auf folgende Betonparameter untersucht:

- E-Modul des Betons
- maximale auf einmal gespritzte Schichtstärke
- erzielte Frühfestigkeit
- Anwendbarkeit mit verschiedenen Zementen

Folgende BE-Mittel wurden bei den Versuchen verwendet:

- Pika-Parmix
- Frescon Sprut
- MBT TCC 765
- MBT TCC 766
- Sigunit L20
- MBT SA 140
- Sigunit AF 49

Die Ergebnisse dieser Versuche werden im März 1997 vorliegen.

## 5. Zusammenfassung

Spritzbeton ist ein in den nordischen Ländern relativ gut untersuchtes Fachgebiet. In Finnland hat man zweckbewußt die Entwicklungsvorhaben und Betriebsanwendungen auf die Sicherung unterirdischer Hohlräume im Hartgestein konzentriert. RUMA ist unser umfangreichstes Vorhaben aller Zeiten auf diesem Fachgebiet. Durch die Phase 2 des Vorhabens werden die vorhandenen Kenntnisse auf die Methoden- und Maschinenentwicklung projiziert. Dabei werden noch Anforderungen bedingt durch felsmechanisch kompli-

zierte Bauverhältnisse wahrgenommen. Die gemeinsamen Erfahrungen in Ihren Bauprojekten werden uns diesbezüglich den Weg ebnen.

## 6. Literatur

- [1] **Österreichischer Betonverein:**  
Richtlinie Spritzbeton, Wien 1990.
- [2] **Browne, R.D.; Bamforth, P.B.:**  
Test to Establish Concrete Pumpability. Journal of American Concrete Institute, Proceedings, 74, 193...207, 1977.
- [3] **EFNARC Technical Committee Sprayed Concrete:**  
Specification for Sprayed Concrete, Final Version. 8 September 1995.
- [4] **Funk, J.E.; Dinger, D.R.:**  
Coal Grinding and Particle Size Distribution Studies for Coal-Water Slurries at High Solids Content, Final Report Empire State Electric Energy Research Corporation, J.E. Funk nuorempi. 1980.
- [5] **Heikkilä, E.:**  
Chemical Admixtures for Shotcrete. Diplomityön luonnos, Teknillinen korkeakoulu, Kallio- ja materiaalitekniikan laitos, Kalliotekniikan laboratorio, Otaniemi, 1995.
- [6] **Heikkinen, A.; von Thorborg, K.:**  
Betonin Mikrosuhteitus. by 301, Suomen Betonitieto Oy, 1992.
- [7] **Kronlöf, A.:**  
Runkoaineen ja sementtikiven yhteistoiminta betonisä. Lisensiaatintyö, TKK. Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Betonitekniikan professuuri, Otaniemi. 1991.
- [8] **Orantie, K.:**  
Ruiskubetoniohjeen laatimiseen liittyvät työmaakoheet, Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Betoni- ja silikaattitekniikan laboratorio, Espoo, 1988.
- [9] **Penttala, V.; Hannonen, P.; Järvinen M. und Komonen, J.:**  
Effects of aggregates and microfillers on the flexural properties of concrete, TKK. Betonitekniikka, Report 5, Espoo, 1995.
- [10] **Shah, S.P.; Ahmad, S.H.:**  
High Performance Concretes and Applications. Edward Arnold, Lontoo, 1994.
- [11] **Syrjänen, P.:**  
Kalliotilojen lujitus märkäseosruiskubetonilla, Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto, Materiaali- ja kalliotekniikan laitos. Kalliotekniikan laboratorio, Otaniemi, 1988.
- [12] **Melbye, T. A.:**  
Shotcrete for Rock Support. MBT Europe (MAC Spa), Treviso, Italia, 1994.
- [13] **Melbye, T. A.:**  
New Advanced Admixtures. MBT International Underground Construction Group, Zürich, 1995.

