

---

# Spritzbeton in norwegischen Straßentunnels - Dauerhaftigkeit und langfristige Standsicherheit

---

## SHOTCRETE IN NORWEGIAN ROAD-TUNNELS - DURABILITY AND LONG-TERM STABILITY

**KJELL INGE DAVIK**

Schon seit den 60'er Jahren wird Spritzbeton in norwegischen Tunnel als temporär/permanent tragendes Element angewandt. Allerdings erst in den 80'ern hat diese Bauweise an weitverbreiteter Popularität gewonnen. Heute ist der Spritzbetonausbau das tragende Element der allermeisten Tunnel in Norwegen. Als solches ist dessen Dauerhaftigkeit eng mit der des Tunnels verknüpft. Dieser Artikel stellt ein unlängst abgeschlossenes Forschungsprojekt vor, welches die Wichtigkeit der Erkenntnisse über Spritzbeton und die Verbesserung seiner Dauerhaftigkeit unterstreicht.

*Sprayed concrete has been used as temporary/permanent support in Norwegian tunnels since the 1960s. However, it only gained widespread popularity in the 80s. Today, sprayed concrete is the major constructional element of most Norwegian tunnels. As such, its durability is intrinsically linked to that of the tunnel itself. This paper presents a recently finished research programme, highlighting the importance of understanding and ultimately improving the durability of sprayed concrete.*

### 1. Hintergrund

In den frühen 60'ern wurden in norwegischen Tunnels Schalenkonstruktionen aus Trockenspritzbeton getestet. Verglichen mit den damaligen Leistungserwartungen, welche man mit der heutigen Erkenntnis als äußerst unrealistisch bezeichnen würde, waren die Ergebnisse so unzufriedenstellend, daß diese trockengespritzten Schalenkonstruktionen in den folgenden 15 Jahren kaum mehr zur Anwendung kamen. Die Hauptgründe dafür waren auftretende Probleme mit Delamination, Wassereindringen, Frostschäden, als auch Betriebsschwierigkeiten mit Hinsicht auf Sicherheit und Tunnelwartung.

Anfang der 80'ger Jahre wurde das Naßspritzverfahren eingeführt, und diese Art der Spritzbetonanwendung ist seit damals sensationell gestiegen. Die Spritzbetonkosten sind seit damals beeindruckend gesunken, zu annähernd 35 % der anfänglichen Kosten. Zusätzlich stieg die Nachfrage nach privaten Fachunternehmen. 1977 waren es noch 0 % und bis 1995 wurden annähernd 50 % der Aufträge von privaten Fachunternehmen ausgeführt, wobei die direkten Arbeitskosten in der genannten Periode gleich geblieben sind.

Auf Grund des ausgedehnten und systematischen Gebrauches von Spritzbetonschalen als Felsstabilisierung

rung, begann die Staatliche Norwegische Strassenverwaltung 1995 ein umfassendes Forschungsprojekt um den allgemeinen Wissensstand über die Dauerhaftigkeitsaspekte von Spritzbeton zu erweitern. Das Projekt «Richtige Nutzung von Spritzbeton im Tunnel» stand unter der Leitung der Staatlichen Norwegischen Strassenverwaltung, und wurde in Zusammenarbeit mit der norwegischen Eisenbahn durchgeführt.

## 2. Einleitung

Norwegen hat insgesamt 600 km Tunnel, davon sind 55 km Unterseetunnel. Die Anwendung von Spritzbeton zur Tunnelsicherung ist in den letzten zwei Jahrzehnten enorm gestiegen und ist heute die überwiegend benutzte Standardsicherungsmethode norwegischer Tunnel. Allein 1995 wurden 20 km Tunnel fertiggestellt, unter Benutzung von 15 000 m<sup>3</sup> Spritzbeton zu Kosten von 50 mill NOK (etwa 12 Millionen Deutsche Mark). Diesem Design norwegischer Tunnel liegt eine Nutzung von 50 Jahren zugrunde, frei von Erhaltungs- oder Wiederherstellungskosten. Diese Anforderungen stehen trotz allem in starkem Kontrast zu Untersuchungen welche von Qualitätsverminderung, Schwächung und Bruch älterer Spritzbetonschalen berichten. Richtlinien für Spritzbeton zur Tunnelsicherung (Norwegischer Beton Verein 1993) wurden in den frühen 90'er überarbeitet und verschärft, aber es ist noch zu früh um Schlußfolgerungen über deren Auswirkung auf eine verbesserte Dauerhaftigkeit dieser Konstruktionen zu ziehen. Trotz dieser neuen Richtlinien gibt es immer noch Bedenken betreffend der Anwendung dieser Spritzbetonschalen als entgeltliche Tunnelsicherung. Die beste Art dieses Problem zu lösen, ist durch Erwerben besserer Kenntnisse über das wirkliche Verhalten von Spritzbetonschalen.

Der Weg zur verbesserten Dauerhaftigkeit muss mit der Kenntnis über Spritzbeton übereinstimmen, Kenntnisse über:

- Materialeigenschaften von Beton
- Spritzbeton Produktion und Anwendungsart
- Geologische Verhältnisse
- Vorgeschriebene Ausführungskriterien
- Beschriebene und erreichte Material / Konstruktions Eigenschaften
- Lang-Zeit Verhalten der Spritzbetonschale

Dies bildet die Grundlage für eine zuverlässige Dokumentation des wirklichen Verhaltens von Spritzbeton als Tunnelsicherungsmethode / Tunnelschale. Hier endet aber nicht der Weg zur verbesserten Dauerhaftigkeit. Schon einmal im Besitz der Erkenntnis, muß diese auch allgemein verstanden werden,

und weiter zur Erarbeitung von Richtlinien und damit zur Anwendung führen. In gleicher Weise wurde seinerzeit das IDV Konzept für Brücken (Instrumentation, Documentation and Verification) von der Staatlichen Norwegischen Strassenverwaltung entwickelt (Østlid und Markey 1995).

## 3. Das Projekt: «Richtige Nutzung von Spritzbeton im Tunnel»

Innenschalen aus Spritzbeton können sehr aggressiven Umweltbelastungen ausgesetzt sein. Ist das Design, die Ausführung und die Materialwahl nicht der jeweiligen Umweltbelastung angepaßt, so ist das Risiko frühzeitiger Qualitätsverminderung groß.

Die Dauerhaftigkeit von Spritzbeton hängt wie erwähnt sehr von der Art der Umweltbelastung ab. Die Untersuchungen im Forschungsprojekt wurden somit in acht Themen geteilt:

1. Einfahrtszone
2. Untersee Tunnel
3. Frostzone
4. Felsdeformation
5. Feuerschutz
6. Trockener Fels
7. Fellsicherung hinter Wasser- und Frostschutz Innenschalen
8. Materialtechnologie und deren Anwendung

Das Forschungsprojekt wurde im Oktober 1997 beendet. Aufbauend auf u.a. den Erfahrungen dieses Forschungsprojektes, werden zur Zeit die Norwegischen Richtlinien für Spritzbeton überarbeitet. Im folgenden Kapitel sind die Erfahrungen dieses Forschungsprojektes kurz zusammengefaßt.

## 4. Erfahrungen

### 4.1 Einfahrtszone

Spritzbeton wird in vielen Tunnel als Innenschale verwendet, entweder direkt auf dem Fels oder als Feuerschutz auf den Polyethylenmatten (entflammbar), welche zum Schutz gegen Wassereindrang und Frost im Tunnel montiert sind. Besonders Tunnel Einfahrtszonen sind während den Wintermonaten der Belastung von Tausalzen ausgesetzt. Tausalze zusammen mit unvorteilhafter Luftfeuchtigkeit einerseits und Kohlendioxidbelastung andererseits erhöhen das darauffolgende Korrosionsrisiko der im Spritzbeton eingebauten Stahlmatten / Stahlfasern.

Ausgeführte Messungen an Spritzbetonschalen und an Ort gegossenen Betonelementen im Großraum

Oslo, haben gezeigt, daß die karbonatisierte Zone im Beton minimal ist (weniger als 10 mm). Der Chloridgehalt dagegen ist relativ hoch, mit Höchstwerten der Chloridkonzentration 0,2 - 1 Meter über der Fahrbahn.

#### 4.2 Unterseetunnel

Spritzbeton unter Salzwasserbeanspruchung in Unterseestraßentunnel bildete ein sehr zentrales Thema in diesem Bericht.

1995 und 1996 wurden umfassende Untersuchungen über die Dauerhaftigkeit von Spritzbeton durchgeführt, und diese Dokumentation diente als Grundlage für das nachfolgende Forschungsprojekt 1997.

Untersuchungen der Dauerhaftigkeit beiraten zuerst eine Zustandskontrolle der Spritzbetonschalen, mit darauffolgender Auswahl der Probeentnahmestellen für Laborversuche. Viele dieser Spritzbetonschalen waren schon vor 5 oder 10 Jahren in ähnlicher Weise untersucht worden.

Die Anzahl der Unterseestraßentunnel in Norwegen nähert sich bald 20, mit einer insgesamt Länge von 55 km. Dazu kommen noch etwa 30 km Unterseetunnel für Wasser-, Öl-, und Gastransport.

Salzwassereindringung bedarf besonderer Dauerhaftigkeitsvorschriften für die Felssicherungsmethode.

Die relativ neuesten Spritzbetonschalen (max. 7 Jahre alt) der Betonqualität C45 MA (Wasser/ Zement + Silica Wert  $\leq 0,45$ ) zeigen kaum Zeichen an Qualitätsverminderung. Untersuchungen älterer Schalen zeigen ausschließlich Qualitätsverschlechterungen in Zonen mit großem Wassereintritt, in trockenen Zonen dagegen wurden nur bescheidene Qualitätsverschlechterungen beobachtet.

Stahlfaserkorrosion scheint nur eine Oberflächenerscheinung zu sein. Allerdings hat eine der untersuchten Proben, mit sehr poröser Porenstruktur und niedrigerer Druckfestigkeit, Anzeichen von Depassivierung und Stahlfaserkorrosion durch den ganzen Probenlängsschnitt hindurch gezeigt.

Die Spritzbetonschalen der meisten Untersee-Tunnel können nicht als frostsicher bezeichnet werden. Obgleich ein niedriger Wasser/Zement + Silica Wert das Frostschadensrisiko höchstwahrscheinlich sehr reduziert, bleibt dies eine Tatsache welche besonders für die Dauerhaftigkeit der Einfahrtszonen von Unterseetunnel bedacht werden muß.

Spritzbetonschalen verschiedenster Tunnel haben verschiedenartige Permeabilität. Der größte Anteil allerdings hat einen 2 bis 3 mal höheren Wassereindringwert als der vorgeschlagene Maximumwert für Wasserdichten Beton, d.h. 25 mm Wassereindringtiefe gemessen an Bohrzylinder (NS 3420).

Einige der untersuchten Tunnel zeigen Anzeichen von Qualitätsverschlechterung, angezeigt durch Eluation und Anreicherung von sekundären Mineralen.

#### 4.3 Frostzonen

Qualitätsverschlechterung von Spritzbeton in Frostzonen ist bisher nur in Nähe von wasserführendem Fels, in Form von Delamination zwischen Fels und Beton beobachtet worden. Diese Delamination tritt vorwiegend bei dünn aufgetragenen Spritzbetonschichten in älteren Tunnel auf (> 20 Jahre).

Erhöhte Dosierung von Beschleuniger (Wasserglas) führt einerseits zu Reduzierung der Druckfestigkeit, andererseits aber auch zu reduziertem Rückprall.

Frost/Tau-Laborversuche haben gezeigt, daß Spritzbeton mit erhöhter Wasserglas Dosierung erhöhte Delaminationen aufweist (Diplomarbeit, Løken und Mørch 1994).



Bild 1: Typischer Frostschaden einer dünnen Spritzbetonschicht eines 30 Jahre alten Tunnels

#### 4.4 Felsdeformation

Probleme verbunden mit Felsspannung und Absplitterung, welche in hochbelastetem Fels auftreten, sind in Norwegischen Tunnel zufriedenstellend mit Felsanker/Stahlnetz, oder Felsanker/Stahlfaser-spritzbeton gelöst.

Druckmessungen wurden 1996 in zwei Tunnel vorgenommen, an genau der selben Stelle wie zum

Bauzeitpunkt, 10 bis 15 Jahre zuvor. Die Ergebnisse zeigten, daß das Druckniveau im Stahlfaserspritzbeton annähernd Null betrug, und die Hauptaufgabe des Spritzbetons war es den Fels zu stabilisieren, um die Eigentragkapazität des Tunnels zu bewahren.

Der Verbund zwischen Fels und Spritzbeton ist zum größten Teil schwach.

Die Spritzbetondicke kann sehr variabel sein, und Stellen mit Delamination fallen normalerweise mit dünnen Spritzbetonschichten (1 - 3 cm) zusammen. Daher ist es sehr wichtig, daß die Spritzbetonschicht die notwendige Dicke hat (6 - 7 cm).

Felsabsplitterung scheint ein Oberflächenphänomen zu sein, aktiv bei einer Tiefe von 0-0,5 m und einer Druckkonzentration bis zu einer Tiefe von 2 -2,5 m (Alnæs, Hansen und Myrvang 1996).

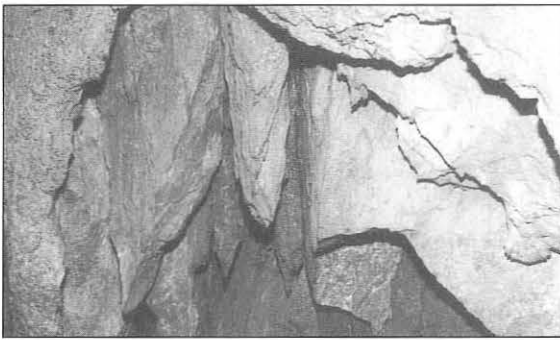


Bild 2: Ablösungen von Spritzbeton infolge hoher Gebirgsspannungen

#### 4.5 Allgemeines

Die Herstellung von Spritzbeton und die angewandte Spritztechnik haben großen Einfluß auf die Dauerhaftigkeit des Materials und dessen Struktur, und verdienen daher besondere Aufmerksamkeit.

Untersuchungen haben gezeigt, daß Abweichungen von der beschriebenen Ausführungsmethode oft der Grund für reduzierte Dauerhaftigkeit sind. Diese Sachverhalte sollten besonders vom Eigentümer der Baukonstruktionen (dem Staat) mehr hervorgehoben werden, damit zukünftige Richtlinien zu mehr beständigen Konstruktionen führen.

#### 5. Schlußfolgerung

Untersuchungen bezüglich Spritzbetonschalen in norwegischen Straßentunnels der letzten zehn Jahre, haben uns folgende Erkenntnisse über die Herstellung dauerhafter Spritzbetonkonstruktionen gegeben:

- Spritzbeton schützt nicht vor Wassereintritt - Wasserleckagen müssen vor dem Spritzen dräniert werden.
- Der Spritzbeton muß für die zu erwartenden Belastungen und Deformationen konstruiert sein.
- Permanent tragende Spritzbetonschalen sollten im Verbund mit Felsanker wirken.
- Eine minimale Spritzbetondicke von 6 cm ist nicht zu unterschreiten
- Die Dosierung des Wasserglasbeschleuniger sollte auf einem Minimum gehalten werden
- Spritzbeton sollte eine niedrige Permeabilität und einen niedrigen Wasser/Zement Wert aufweisen.

Die Untersuchungen norwegischer Tunnel hat gezeigt, daß der generelle Zustand der Spritzbetonschalen als zufriedenstellend zu betrachten ist, mit Ausnahme zu dünn aufgetragener Schichten (< 3 cm).

Die Konstruktionsgrundlage für Spritzbeton sollte in Zukunft sowohl geologische als auch geometrische Aspekte mit einbeziehen. Spritzbetontechnologie bedarf fortlaufender Weiterentwicklung. Eine tieferes Kenntnis über Betonqualität und wie die beeinflussenden Parameter gesteuert werden können, ist wichtig, um die bedeutende Stellung der Spritzbetonkonstruktionen im modernen Tunnelbau beizubehalten.

#### 6. Literatur

- [1] Alnæs, L.; Hansen, S.E.; Myrvang, A.: Streß measurements in Heggura and Kobbskaret tunnels (Norwegian language). SINTEF report STF22 F96060. 1996.
- [2] Davik, K. I.: Proper use of sprayed concrete in tunnels. Final report (Norwegian language). Norwegian Public Roads Administration. 1997.
- [3] Davik, K. I.: Durability of sprayed concrete in subsea road tunnels. Proceedings, Second international symposium on sprayed concrete - Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support. Gol, Norway: 333-444. 1996.
- [4] Franzén, T.: Shotcrete for underground support: A state-of-the-art report with focus on steel fibre reinforcement. Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 7, no 4. 383-391. 1992.
- [5] Grimstad, E.: Stability in hard rock affected by high stress and supported by sprayed concrete and rock bolts.

- Proceedings, Second international symposium on sprayed concrete - Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support. Gol, Norway: 75-84. 1996.
- [6] Holmgren, J.:  
Shotcrete as rock support (Swedish language). Vattenfall. 1992.
- [7] Kompen, R.:  
Shotcrete as rock support (Norwegian language). Norwegian Road Research Laboratory, report no. 1695. 1994.
- [8] Løken, J.; Mørch, A.:  
Durability of sprayed concrete (Norwegian language). Narvik Institute of Technology. 1994.
- [9] Markey, I.; Østlid, H.; Davik, K.I.:  
Improving and controlling the durability of sprayed concrete. Proceedings, Second international symposium on sprayed concrete, Gol, Norway. Norwegian Concrete Association. 1996.
- [10] Norwegian Concrete Association: Publication No 7:  
Sprayed concrete for underground support. 1993.
- [11] Øvstedal, E.; Kompen, R.:  
Durability of sprayed concrete exposed to saline water in subsea tunnels. International symposium on sprayed concrete. Proceedings, Norwegian Concrete Association, Fagernes, Norway. 1993.
- [12] Østlid, H.; Markey, I.:  
Reliable documentation through high quality instrumentation. Field measurements in geomechanics. Proceeding 4<sup>th</sup> International Symposium, Bergamo, Italy. 10-12 April 1995.

