
Spritzbeton in Schweden - Stand der Technik

SPRAYED CONCRETE IN SWEDEN - STATE OF THE ART

BO MALMBERG

Spritzbeton wird in Schweden seit den 60er Jahren zur Gebirgssicherung und Stabilisierung der Felsoberfläche in Tunnels und Kavernen verwendet, bis in die 90er Jahre vor allem bei Wasserkraftprojekten. Die 90er Jahre sind gekennzeichnet durch große Infrastrukturprojekte in Schweden, und Spritzbeton spielt nun eine wesentliche konstruktive Rolle bei der Errichtung von Straßen- und Eisenbahntunnels.

Daneben wird Spritzbeton auch zunehmend als Sicherungsmaßnahme im schwedischen Bergbau eingesetzt.

Bis in die 80er Jahre war das Trockenspritzverfahren die wichtigste Methode, doch heutzutage werden nahezu alle unterirdischen Spritzbetonbauwerke im Naßspritzverfahren hergestellt. Diese Entwicklung resultiert, wie in vielen anderen Ländern auch, aus den erhöhten Anforderungen hinsichtlich Arbeits- und Gesundheitsschutz, der Verwendung von Stahlfaserspritzbeton, sowie aus Produktivitätsüberlegungen, usw.

Durch eine Reihe derzeit laufender Infrastrukturprojekte im Straßenbau, vor allem in Stockholm, wuchs das Interesse an einer besseren Optimierung des Spritzbetoneinsatzes, an den Anforderungen an das Material in Abstimmung auf die tatsächlichen felsmechanischen Gegebenheiten, sowie an Überlegungen in punkto Beständigkeit. Dies fand auch seinen Niederschlag im schwedischen Beitrag zur laufenden Harmonisierung der Spritzbetonnormen auf europäischer Ebene und in diversen Forschungsprojekten an schwedischen Universitäten.

Die typischen Spezifikationen, häufig verwendete Materialien und die üblichen Aufbringungsverfahren werden vorgestellt und Materialeigenschaften, wie Arbeitsvermögen und Beständigkeit von Stahlfaserspritzbeton werden besprochen.

Sprayed concrete has been used in Sweden as rock support or rock surface protection in tunnels and rock caverns since the 60s, up to the 90s mainly in connection with investments in water power stations. The 90s have been characterized by large-scale investments in the Swedish infrastructure, and sprayed concrete has become an essential structural material in road and railway tunnels.

Besides, there has been an increasing utilization of sprayed concrete as structural support in the Swedish mining industry.

From the beginning up to the 80s the dry process was dominant but now nearly 100 % of all sprayed concrete in underground structures is produced by means of the wet mix method. This development is, as

in many other countries, a consequence of demands on the protection of health, the use of fibre reinforcement, productivity etc.

The recently started investments in the road infrastructure, especially in Stockholm, have raised an increased interest in better optimization of the use of sprayed concrete and the requirements on the material in accordance with the actual rock mechanical conditions as well as durability aspects. This has also influenced the Swedish activities in the ongoing European harmonization of sprayed concrete standards as well as research projects at Swedish universities.

Typical building specifications, frequently used materials and normal execution methods are presented as well as typical material properties such as toughness of fibre reinforced sprayed concrete and durability properties.

1. Historische Entwicklung

Spritzbeton wurde in Schweden schon in den 20er Jahren eingesetzt, zunächst und bis in die 50er und 60er Jahre für geringfügige Instandsetzungsarbeiten und bei Kavernen für militärische Zwecke. Mit der Erfindung der ersten Spritzroboter 1959 bzw. 1960 kam Spritzbeton in größeren Mengen zur Gebirgssicherung zum Einsatz. Damals verwendete man Trockenspritzbeton mit ziemlich geringen Spritzleistungen von 6 bis 8 m³ pro Schicht.

Durch die Entwicklung eines transportablen Mischsystems, Trixer genannt, stand laufend frisches Trockenmischgut zur Verfügung, und diese Technik - in Kombination mit Spritzrobotern - war bis in die Mitte der 90er Jahre die gebräuchlichste Methode der Spritzbetonaufbringung in großen Tunneln und Kavernen, vor allem bei Wasserkraftprojekten in Schweden, der Stockholmer U-Bahn, usw.

Ab dem Jahr 1985 wurde die Naßspritzmethode zum wichtigsten Verfahren bei großen unterirdischen Bauten. Diese Methode weist unserer Erfahrung nach folgende Vorteile gegenüber dem Trocken-spritzverfahren auf:

- bessere Kontrollierbarkeit des Wasser/Zement-Faktors
- Verringerung des Rückpralls um ca. 50 % und mehr, was besonders beim Einsatz von Stahlfasern als Bewehrung von Bedeutung ist
- geringere Staubentwicklung und somit bessere Arbeitsbedingungen

Durch den Einsatz ferngesteuerter Spritzroboter und elektrohydraulischer Kolbenpumpen können Spritzleistungen von 10 - 20 m³/h problemlos erzielt werden.

Die Verwendung von Spritzbeton zur Gebirgssicherung beschränkt sich nicht mehr in erster Linie auf die

1. The historical development

Sprayed concrete was first used in Sweden already in the 1920s and was then applied for small concrete repair works and in defence caverns for military purposes up to the 50s and 60s. When the first robots were invented in 1959-60 it meant that sprayed concrete began to be used in larger quantities for rock support. At that time the spraying was done by dry mix method with rather low capacities, 6 - 8 m³/shift.

The development of a transportable mixer system, the Trixer, made it possible to always have fresh dry mix available and this technique, in combination with robots, was the most common form for sprayed concrete until the middle of the 90s and was used for spraying in large tunnels and rock caverns, mainly in connection with investments in the Swedish hydro power industry, the subway of Stockholm etc.

From 1985 up to the present day, the wet mix process has become the most common method of applying sprayed concrete in large underground plants. The advantages over dry mix, according to Swedish experiences are well documented:

- better possibility to control the w/c ratio
- reduction of rebound by about 50 % or more when steel fibres were introduced as reinforcement
- less dust which means a better working environment.

By the use of remote controlled robots and electrohydraulic piston pumps capacities in the range of 10 - 20 m³/h can easily be reached.

The use of sprayed concrete for rock support is no longer primarily related to the hydro power industry but to the large investments that, since 1990, have started for the development of the Swedish infrastructure. The introduction of high speed trains on the

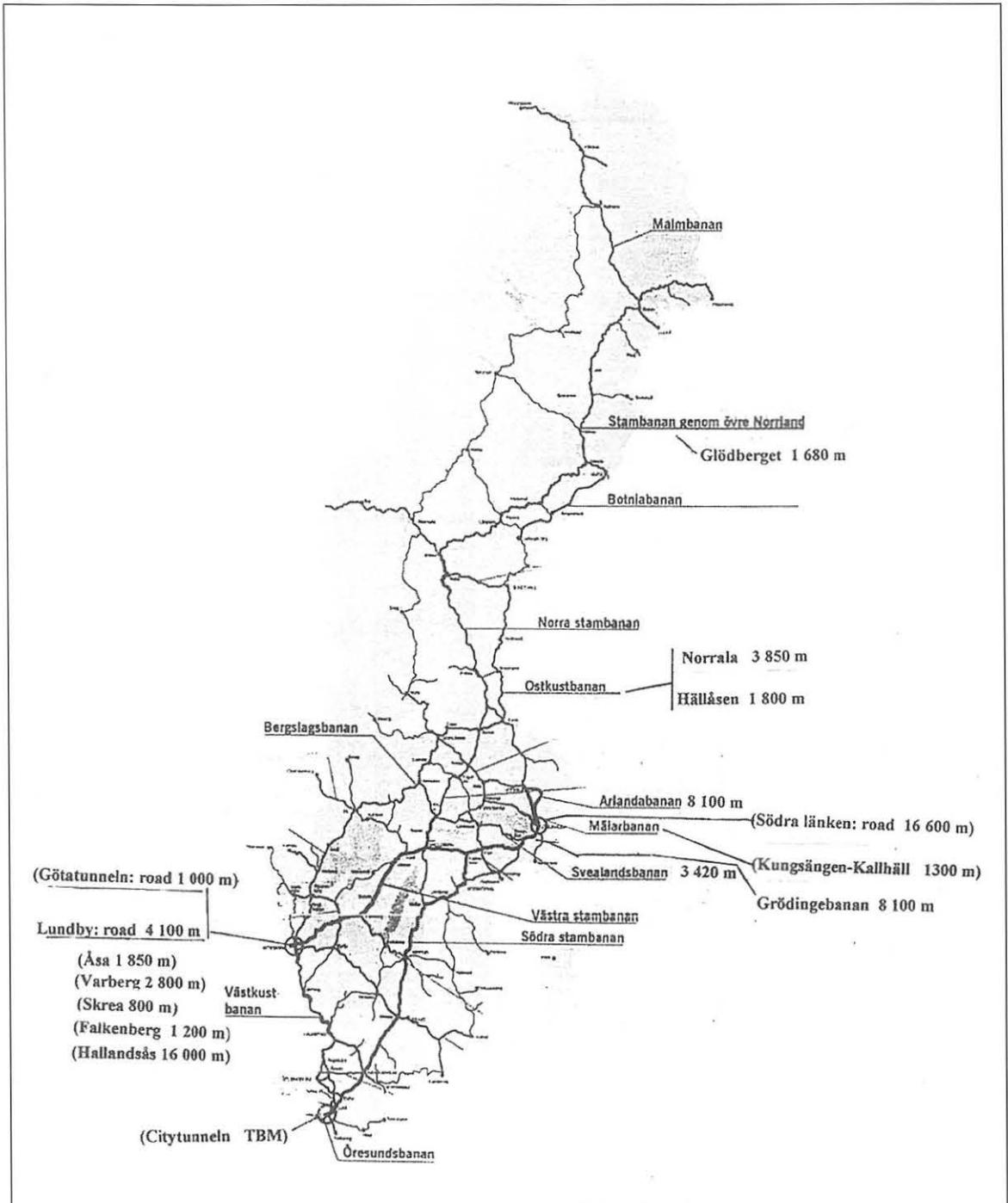


Bild 1: Das schwedische Eisenbahnnetz mit kürzlich errichteten Tunnels sowie Objekten in Planung oder in Bau. Die Karte zeigt auch kürzlich gebaute und geplante Straßentunnel

Fig. 1: The Swedish railroad network with recently built railroad tunnels as well as planned tunnels or tunnels under construction. The map shows also recently built and planned road tunnels

Wasserkraftindustrie, sondern wurde ab 1990 auch auf große Infrastrukturprojekte in Schweden ausgeweitet. Die Entwicklung von Hochleistungszügen erfordert gestrecktere Linienführungen und damit auch für schwedische Verhältnisse viele Tunnelbauten.

trunk lines calls for straighter alignment resulting in, from the normal Swedish point of view, many tunnel projects. After many years of planning and political discussions building activities have now started with the South link project as one part in the ring road system in Stockholm.

Nach vielen Jahren der Planung und der politischen Diskussion wurde nun das Projekt "Südtangente" als Teil des Umfahrungssystems von Stockholm in Angriff genommen.

Das schwedische Eisenbahnnetz und einige der Eisenbahn- und Straßentunnel, die im Laufe der vergangenen neun Jahre errichtet wurden, sowie einige geplante Bauvorhaben werden in *Bild 1* dargestellt. Insgesamt wurden mehr als 30 km Tunnel in den letzten Jahren fertiggestellt, über 40 km sind in Planung oder in Bau.

Kennzeichnend für diese Tunnelprojekte ist, daß sie alle in "gutem harten Gebirge" mit einer Überdeckung von weniger als 25 m liegen. Etwa 80 % der schwedischen Gebirgsmasse besteht aus hochwertigem Präkambrischen Gestein, wie z.B. Granit und Gneis.

Dieser Gebirgstyp bietet normalerweise gute Voraussetzungen für den Tunnel- und Stollenbau. Gelegentlich treten jedoch auch stark zerklüftete Strukturen auf, die besondere Aufmerksamkeit erfordern.

Eine Ausnahme bildet das bekannte Hallandsås-Projekt, bei dem sowohl Überdeckung als auch Gebirgsverhältnisse aus schwedischer Sicht außergewöhnlich sind.

Außerdem wird Spritzbeton zunehmend im schwedischen Bergbau eingesetzt. Etwa 30.000 m³ Spritzbeton werden jährlich verwendet, ca. 50 % davon ist Stahlfaserspritzbeton.

Die Bedingungen für Spritzbeton in diesen Fällen beinhalten Überdeckungen bis zu 1000 m, bei recht stabilen aber auch sehr instabilen, druckhaften Verhältnissen.

2. Gebirgssicherungssysteme

2.1 Allgemeine Philosophie und praktische Beispiele

Ganz grundsätzlich gilt für die verschiedenen Gebirgssicherungsmaßnahmen, sie nur dort, wo sie tatsächlich erforderlich sind, einzusetzen. Für all jene, die normalerweise in weichem Gestein arbeiten, kann das bedeuten, daß Gebirgssicherungsmaßnahmen unter Bedingungen wie in Schweden überhaupt nicht in Frage kommen.

Die Frage, was tatsächlich erforderlich ist, beinhaltet freilich vielerlei Aspekte, und aus schwedischer Sicht gehören dazu vorübergehende und permanente Gebirgssicherung sowie Überlegungen im Zusammenhang mit dem langfristigen Aussehen und

The Swedish railroad network and some of the railroad tunnels as well as road tunnels that were built during the last 9 years and some tunnels that are planned are shown in figure 1. In total over 30 km of tunnels were built during the past years and over 40 km are planned or under construction.

The typical characteristics for those tunnel projects are that they are situated in "good hard rock" with overburden of less than 25 m. About 80 % of the Swedish rock mass consists of high quality precambrian rocks such as granite and gneiss. Such type of rock is normally a good base for underground construction, although you will find joints and blocky structures which demand special attention.

An exception is the well-known Hallandsås project where both the overburden and the rock conditions are extraordinary from a Swedish point of view.

Besides, sprayed concrete has been increasingly used in the Swedish mining industry. Now nearly 30 000 m³ sprayed concrete are applied every year and approximately 50 % is reinforced with steel fibres.

The conditions for the sprayed concrete in those applications include overburdens, up to 1000 m, with both rather stable as well as highly stressed unstable conditions.

2. Rock support systems

2.1 The general philosophy and practical examples

A basic idea for all application of different rock support measures is to concentrate those only to situations where they are necessary. For people normally working in soft ground conditions this may mean that the use of any rock support at all could be questionable when the conditions are like in Sweden.

However, the meaning of what is necessary may include many aspects and from the Swedish point of view we may include both temporary and permanent rock support measures as well as aspects related to the long term appearance and operation of the tunnel facility, including aesthetic aspects. Thus, the use of sprayed concrete may be comprehensive despite the relatively stable rock conditions.

The now extensive use of rock support in public facilities such as railroad and road tunnels has called for a national norm for tunnel structures which was published by the Swedish Road Administration (Tunnel 95). In addition and especially for the tunnel

Betrieb des Tunnels, einschließlich ästhetischer Gesichtspunkte. Somit kann der Einsatz von Spritzbeton - auch bei den gegebenen stabilen Gebirgsverhältnissen - recht umfassend sein.

Der nun mehr intensive Einsatz von Gebirgssicherungseinbauten bei Investitionen der öffentlichen Hand wie Eisenbahn- und Straßentunnel erforderte die Erstellung einer nationalen Norm für Tunnelbauten. Diese wurde von der schwedischen Straßenverwaltung herausgegeben (Tunnel 95). Zusätzlich und vor allem für Tunnelprojekte in Stockholm wurden verschiedene Richtlinien veröffentlicht, welche auf die lokalen Bedingungen in Stockholm abgestimmte Planungsgrundsätze enthalten. Diese Bedingungen sind jedoch typisch für die Mehrzahl der Tunnelprojekte in Schweden und können somit als typisch schwedisches Beispiel herangezogen werden.

Für die felsmechanischen Bedingungen wurde eine Klassifizierung nach der Q-Methode gewählt und vier Bereiche identifiziert:

Q = 10 - 40:	gute Felsqualität
Q = 4 - 10:	relativ gute Felsqualität
Q = 1 - 4:	schlechte Felsqualität
Q = 0,1 - 1:	sehr schlechte Felsqualität

Je nach Gebirgsverhältnissen kommen unterschiedliche Sicherungssysteme zum Einsatz:

- Systeme, bei denen der Fels konstruktive Aufgaben übernimmt - Gestein mit gutem Verbund: Spritzbeton dient hier zur Sicherung der Gebirgsoberfläche in First und Ulmen. Die Oberflächensicherung besteht darin, lose Brocken und Steine zu sichern.
- Ähnliches Verhalten des Gesteins, jedoch Fels mit geringem Verbund.
Die Felsqualität kann örtlich variieren und es kann Bereiche geben, wo ein Verbund nicht erzielbar ist. Die Oberflächensicherung soll deshalb so gestaltet sein, daß eine Wechselwirkung zwischen Anker und Spritzbeton eintritt. Die Belastung stellt hohe Anforderungen an den Spritzbeton bezüglich Aufnahme von Biegemomenten und Arbeitsvermögen.
- Systeme, bei denen der Fels die Haupttragfunktion zusammen mit Sicherungsmaßnahmen übernimmt: Aufgrund der Felsqualität kann es zu mehr oder weniger gravierenden Stabilitätsproblemen kommen, wenn die Sicherungsmaßnahmen nicht entsprechend geplant werden. Spritzbeton in Kombination mit Anker hält die Gebirgsmasse zusammen und dadurch kann die Fähigkeit des Gesteins zur Gewölbbildung mobilisiert werden. Der Spritzbeton ist Druckkräften und Biegemomenten ausgesetzt.

projects in Stockholm, different types of guidelines have been published giving the design principles related to the local situations in Stockholm. Those conditions are, however, very typical for a majority of tunnel projects in Sweden and could serve as a typical Swedish example.

For the rock mechanical conditions a classification according to the Q-method was chosen and four intervals identified:

Q = 10 - 40:	good rock quality
Q = 4 - 10:	rather good rock quality
Q = 1 - 4:	poor rock quality
Q = 0.1 - 1:	very poor rock quality

To meet the rock conditions different principal support systems can be identified:

- *Systems where rock acts as the main structural system - rock with good bond: Sprayed concrete is used here to support the surface of the rock in ceiling and walls. Surface support consists in securing any loose blocks and stones.*
- *Similar action by the rock but rock with poor bond. The quality of the rock may vary locally and there may be zones or sections in the rock where adhesion is not obtainable. Surface support should therefore be designed so that interaction is achieved between bolts and sprayed concrete. The load case imposes demands on the sprayed concrete in an ultimate limit state with regard to moment capacity and toughness.*
- *Systems where rock acts as main structural system in combination with support: The quality of the rock is such that more or less serious stability problems may arise if the support is not designed in a satisfactory way. The sprayed concrete in combination with the bolts shall have the effect of holding the rock mass together so that the capacity of the rock to form arches can be mobilised. The sprayed concrete will be subjected to both compressive forces and moments.*
- *Special systems: Support systems that allow a greater degree of toughness in special conditions such as swelling clay, rock burst etc.*

Those principles have been transformed into four main expected support classes for the South link project in Stockholm [2].

An example from the project shows how different support systems are related to different alternatives for expected rock mass conditions, figure 2.

- Spezialexsysteme:
Sicherungssysteme, die höhere Festigkeit unter besonderen Bedingungen, wie z.B. quellender Ton, Gebirgschlag usw. erzielen.

Diese Grundsätze wurden in vier Sicherungsklassen für das Projekt "Südtangente" in Stockholm eingebracht:

Klasse	Eigenschaften
1	Gebirgsanker Ø 25 mm bei Bedarf, 40 mm Stahlfaserspritzbeton im Verbund mit dem Untergrund in Firste und Firstübergang
2	Selektive Gebirgsanker Ø 25 mm + 40 mm Stahlfaserspritzbeton in Kombination mit systematischer Gebirgsankerung Ø 25 mm 1/3 - 5 m ² in Firste und Firstübergang
3	Selektive Gebirgsanker Ø 25 mm + 70 mm Stahlfaserspritzbeton in Firste und Firstübergang, 40 mm Stahlfaserspritzbeton an den Ulmen in Kombination mit systematischer Gebirgsankerung Ø 25 mm 1/3 - 5 m ²
4	50 - 70 mm Stahlfaserspritzbeton in Kombination mit systematischer Gebirgsankerung Ø 25 mm 1/1,7 - 2,6 m ² + Anker Ausbau in den angrenzenden instabilen Bereichen

Ein Beispiel aus dem Projekt zeigt, wie die verschiedenen Sicherungssysteme auf die erwarteten Gebirgsverhältnisse abgestimmt sind (Bild 2).

Die wesentlichen Eigenschaften von Spritzbeton sind somit:

- Verbund mit der Felsoberfläche
- Tragfähigkeit unter Biegebeanspruchung und Arbeitsvermögen

Es ist zu beachten, daß die Eigenschaften sich bei normalen, ziemlich stabilen Gebirgsverhältnissen, z.B. Klasse 1 - 3 (siehe oben) auf ein Alter von einigen Tagen bis ein paar Wochen beziehen, und nur in schwachen Bereichen diese Anforderungen auch in einem frühen Alter gelten.

2.2 Problem Verbundverhalten

Obwohl der Verbund zwischen Spritzbeton und Fels aus statischer Sicht sehr wichtig ist, ist nach wie vor

Class	Characteristics
1	Selective rock bolts Ø 25 mm 40 mm fibre reinforced sprayed concrete bonded to substrate in roof and abutment
2	Selective rock bolts Ø 25 mm + 40 mm fibre reinforced sprayed concrete in combination with systematic rock bolts Ø 25 mm 1/3 - 5 m ² in roof and abutment
3	Selective rock bolts Ø 25 mm + 70 mm fibre reinforced sprayed concrete in roof and abutment. 40 mm fibre reinforced sprayed concrete on walls in combination with systematic rock bolts Ø 25 mm 1/3 - 5 m ² .
4	50 - 70 mm fibre reinforced sprayed concrete in combination with systematic rock bolts Ø 25 mm 1/1.7 - 2.6 m ² + rock bolting of adjacent instability zones.

From the supposed structural behaviour of the sprayed concrete constructions it turns out that the most essential properties of the sprayed concrete are:

- the bond to the rock surface
- the flexural bearing capacity and the toughness

It should be noted that the properties for normal rather stable rock conditions, for instance class 1-3 above, refer to concrete ages of some days to some weeks and only weak zones call for these requirements in early age.

2.2 The bond problem

Even though the bond between the sprayed concrete layer and the rock has a major structural importance there is still very much uncertainty regarding the required degree of bond to meet the structural function. Many efforts have been made to study which degree of bond can be achieved in different situations. However, the conclusion is often that the measurement of bond is a problem itself and that the evaluation of test results shall not be based on some single values but on a mean value of several samples.

In other countries with similar rock conditions, such as Norway, the verification of the bond has been omitted in the project specifications and instead the

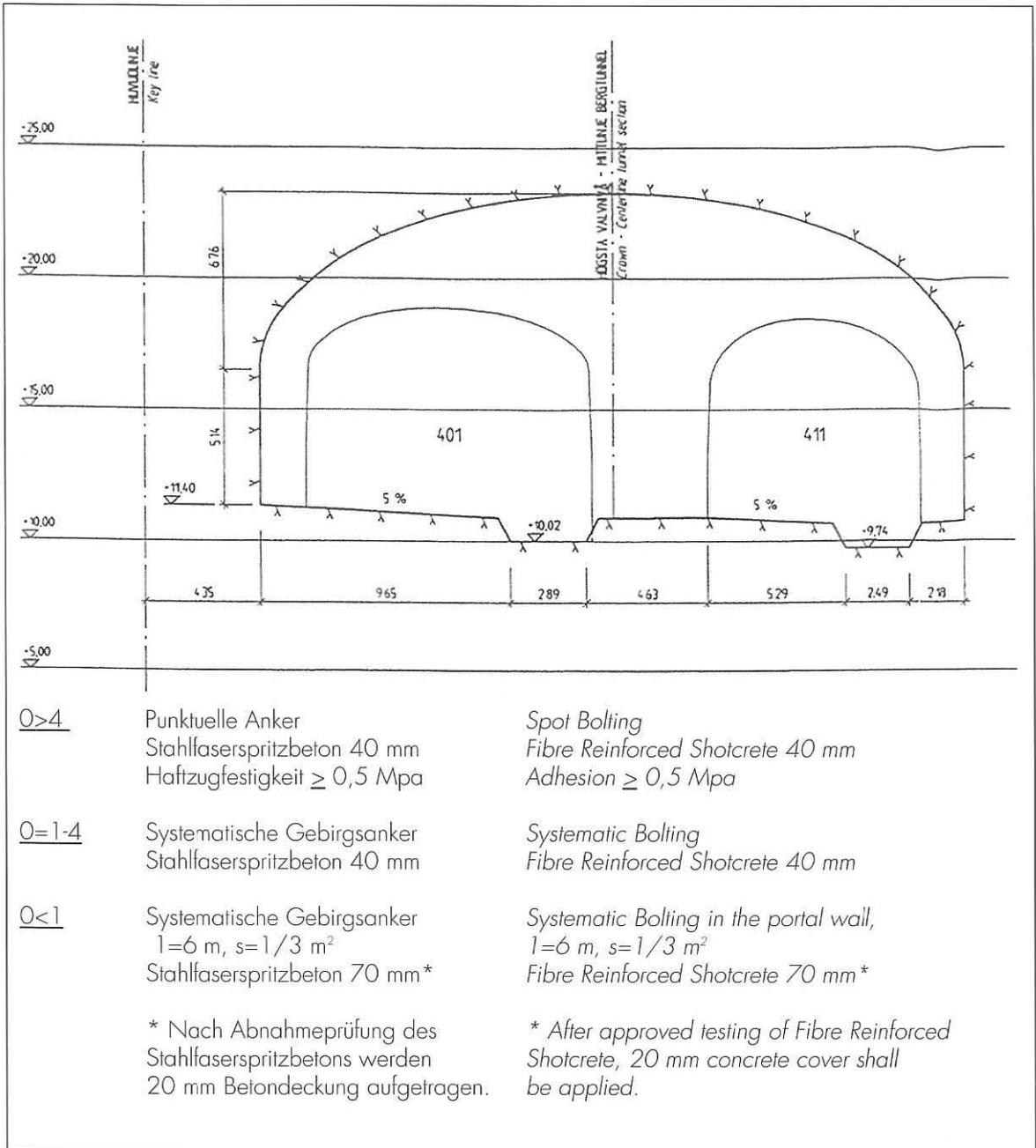


Bild 2: Beispiel eines Planes für das "Südtangente"-Projekt in Stockholm [2]

Fig. 2: Example from construction document for the "South link" project in Stockholm [2]

unklar, wie stark dieser Verbund sein soll, um die konstruktiven Aufgaben zu erfüllen. In zahlreichen Studien wurde untersucht, welches Maß an Verbund in verschiedenen Situationen erzielt werden kann. Es stellte sich jedoch heraus, daß in vielen Fällen das Messen des Verbunds an sich ein Problem darstellt und daß die Auswertung der Testergebnisse nicht auf einzelnen Werten basieren soll, sondern auf dem aus mehreren Proben errechneten Mittelwert.

In anderen Ländern mit ähnlichen Gebirgsverhältnissen, wie etwa in Norwegen, ist keine Beurteilung

need of efficient cleaning of the rock surface has been stressed. This principle is important even in Sweden but we still prescribe a quantified value for the bond, normally at least 0.5 MPa.

In the beginning of the wet mix process it was sometimes difficult to fulfil this requirement with sufficient safety margin due to the effect of high cement content, large additions of silica fume and high dosages of both superplasticizers and accelerators. Nowadays the problem has been eliminated by contractors who have learned how to better optimise the concrete composition and by the use of effective pi-

des Verbunds in den Spezifikationen vorgesehen, und es wird stattdessen die Notwendigkeit der gründlichen Reinigung der Felsoberfläche betont. Dieser Grundsatz ist auch in Schweden wichtig, doch wir schreiben nach wie vor einen bestimmten Wert für den Verbund vor, normalerweise mindestens $0,5 \text{ N/mm}^2$.

In der Anfangszeit des Naßspritzverfahrens war es manchmal nicht leicht, diese Anforderung mit ausreichender Sicherheit zu erfüllen, dies aufgrund des hohen Zementanteils, beträchtlicher Zugaben von Silicafume und hoher Dosierungen an Betonverflüssigern und Beschleunigern. Dieses Problem besteht heute nicht mehr, weil die Baufirmen gelernt haben, die Betonzusammensetzung besser zu optimieren, und leistungsfähige Kolbenpumpen einsetzen, die eine ziemlich steife Konsistenz beim Spritzvorgang erlauben.

Derzeit laufen Forschungsprojekte mit dem Ziel, die statische Funktion des Verbunds besser zu verstehen und zu quantifizieren sowie den Einfluß von Felsprengungen in der Nähe von zuvor aufgetragenen Spritzbetonlagen auf die Haftung und die Eigenschaften des jungen Betons zu untersuchen. Ein typisches Ergebnis aus der Anfangszeit der Studie ist in Bild 3 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, daß sich die Belastung in der Betonschale mit der Stärke der Schale erhöht.

ston pumps, which allow a rather stiff consistency to be sprayed.

At the moment research projects are under way with the objective to better understand and to quantify the structural function of bond as well as to study the influence on the adhesion and on the young concrete properties by rock blasting near the earlier applied sprayed concrete layer. A typical result from the beginning of this study is presented in figure 3 showing that the stress level in the concrete lining increases with the thickness of the lining.

Some other conclusions are that

- there is a critical age of approximately 6-12 hours in the sprayed concrete;
- young sprayed concrete is able to tolerate dynamic loading better than a comparable static load.

2.3 Flexural bearing capacity and toughness

In situations where the flexural capacity of the sprayed concrete is utilised the structural element is regarded as a plate or a strip suspended by the rock bolts. The load is the weight of the block between the bolts, the stiffness of which can vary due to the configuration of joints etc. Deformations in the supports will also give rise to compressive forces in combination with moments.

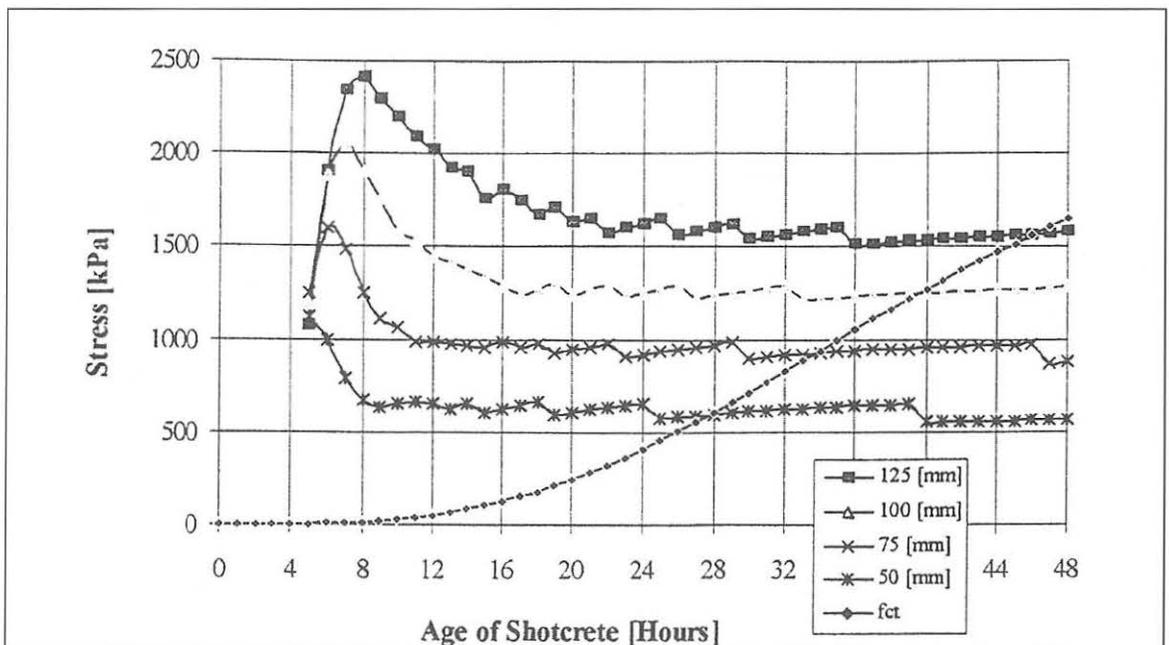


Bild 3: Maximale Zugspannung im Spritzbeton in Gegenüberstellung zum Alter des Betons für die auftretende Spannungswelle Nr. 1. Der Zuwachs an einachsialer Zugfestigkeit wird als f_{ct} dargestellt [1].

Fig. 3: Maximum tensile stresses in the sprayed concrete versus the age of the concrete for the incident stress wave no 1. The growth of the uniaxial tensile strength is also shown as f_{ct} . [1].

Weitere Schlußfolgerungen:

- Für Spritzbeton besteht ein kritisches Alter von ca. 6 - 12 Stunden.
- Junger Spritzbeton kann dynamischer Belastung besser standhalten als einer vergleichbaren statischen Belastung.

2.3 Tragfähigkeit unter Biegebeanspruchung und Arbeitsvermögen

In Situationen, in denen die Biegezugkapazität des Spritzbetons gefordert ist, wird das statische Element als eine durch die Gebirgsanker gehaltene Platte oder Streifen betrachtet. Die Last ist das Gewicht des Blocks zwischen den Anker, die Steifigkeit des geklüfteten Gefüges wird durch die Art der Klüftung bestimmt. Verformungen in den Anker haben auch Druckkräfte in Kombination mit Momenten zur Folge.

Bild 4 zeigt das Prinzip, nach dem die lose Gebirgsmasse in einer schwachen Zone berechnet wird. Für das Straßenprojekt in Stockholm war ein Wert von 25 Grad für den inneren Reibungswinkel bei Gebirgsqualität $Q=0,1$ angegeben.

Zusätzlich zu der vom Block ausgehenden Belastung muß der Spritzbeton einem gewissen Maß an Verformungen in bestimmte Richtungen standhalten, um das Risiko eines warnungslosen Versagens auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Bei den zuvor erwähnten Tunnelprojekten in Stockholm wurde versucht, einen Bezug herzustellen zwischen einigen relevanten Verformungsbereichen und den beschriebenen Sicherungssystemen.

Hinsichtlich der Winkeländerungen wurden zwei Bereiche identifiziert. Da in Schweden bislang das ASTM-Prinzip bei Tests für Faserspritzbeton zur Anwendung kam, wurden diese Winkeländerungen in die entsprechenden Verformungsbereiche bei der Prüfung der Restfestigkeiten umgewandelt. Folgende Winkeländerungsbereiche und entsprechende Verformungsniveaus wurden hinsichtlich der Restspannungsfaktoren R ermittelt:

Winkeländerung	Restspannungsfaktor
1/250	$R_{10,20}$
1/125	$R_{20,40}$

Bei einem Straßenprojekt in Stockholm waren die Anforderungen an den Faserspritzbeton wie folgt spezifiziert:

- $f_{flcrk} \times R_{10,20} = 2,8 \text{ N/mm}^2$: für Situationen, in denen hauptsächlich der Fels konstruktive Aufgaben übernimmt, der Verbund jedoch gering oder ungewiß ist

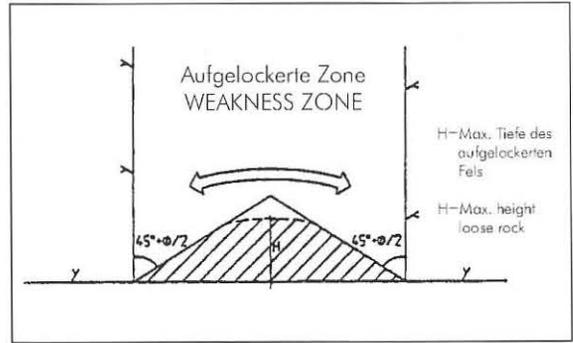


Bild 4: Loses Gebirge in einer schwachen Zone

Fig. 4: Loose rock mass in a weak zone [2]

Figure 4 shows the principle for calculating the loose rock mass in a weak zone. For the road project in Stockholm the value 25° was given for the inner friction angle related to the rock mass quality $Q=0,1$.

In addition to the load from the block, the sprayed concrete must tolerate a certain amount of deformation restricted in certain directions in order to minimise the risk of progressive failure. For the above mentioned tunnel projects in Stockholm considerations were made in order to find some relevant deformation levels linked to the different principal support systems mentioned above.

In terms of angular deformation two levels were identified, and since we in Sweden, so far, have adopted the ASTM principle for testing fibre reinforced concrete those angular deformations were transformed to correspondent deformation levels when testing for residual strength.

The identified angular deformation levels and the correspondent deformation level in terms of residual strength factor R were:

Angular deformation	Residual strength factor
1/250	$R_{10,20}$
1/125	$R_{20,40}$

For one road project in Stockholm the requirements on the fibre reinforced sprayed concrete were prescribed as:

- $f_{flcrk} \times R_{10,20} = 2.8 \text{ MPa}$: For situations where the rock acts as main support but the degree of bond is low or uncertain.
- $f_{flcrk} \times R_{20,40} = 2.8 \text{ MPa}$: For situations where the rock acts as the main structural system in combination with support.

Those principles are also reflected in proposals from Sweden in the ongoing harmonisation of European standards for sprayed concrete. In this context, however, the general opinion is that evaluation of resi-

- $f_{flerk} \times R_{20,40} = 2,8 \text{ N/mm}^2$: für Situationen, in denen der Fels in Kombination mit den Sicherungsmaßnahmen die wesentlichen konstruktiven Aufgaben übernimmt.

Diese Grundsätze fanden auch ihren Niederschlag in den von Schweden im Zuge der laufenden Harmonisierung der europäischen Normen für Spritzbeton eingebrachten Vorschlägen. Dabei herrscht jedoch allgemein die Meinung vor, daß die Beurteilung der Restspannung nicht mit Hilfe des Biege­zähigkeitsfaktors, wie in der ASTM-Methode vorge­sehen, erfolgen soll, sondern daß stattdessen gewisse absolute Verformungsbereiche zu definieren sind. Deshalb wurden die oben genannten Winkelän­derungsbereiche in die entsprechenden Verformungs­bereiche bei Tests von Biegebalken transformiert.

Ein höherer Grad an Verformung wurde festgelegt für Situationen, in denen höhere Verformbarkeit ge­fordert war. Es ergeben sich folgende vorgeschla­gene Verformungsbereiche, oder Verformungsklas­sen, und Festigkeitsklassen (Tabelle 1).

Eine andere Möglichkeit, das Verhalten der mit Gebirgsankern gehaltenen Spritzbetonkonstruktion zu beschreiben, bietet der Plattentest. Vorschläge für eine europäische Norm beinhalten auch die Alter­native eines Plattentests, bei dem die Energieab­sorptionskapazität erfaßt wird. Diese Art von Test mag zwar ausführungsorientierter sein als der Bal­kentest, doch in Schweden vertritt man die Mei­nung, daß ein Balkentest besser definiert sei und Daten liefere, die für Berechnungen gemäß der oben beschriebenen Planungsmodelle geeignet ist.

Wir sind uns jedoch bewußt, daß der Bezug zum tatsächlichen Verhalten im Bauwerk sehr wichtig ist. Deshalb werden derzeit Untersuchungen durchge­führt, um ein Planungsmodell zu finden, das am besten das Verhalten und seine Überprüfung in Ein­klang bringt. Dabei werden parallel Tests an Balken und Platten mit unterschiedlicher Geometrie, Aufla-

... dual strength should not be done by using toughness index formulation as in the ASTM method but instead by defining certain absolute deformation levels. Therefore, the angular deformation levels above have been transformed to correspondent deflection levels when testing beams in flexure.

In addition a larger degree of deformation was identified related to situations where even higher deformation capacities were demanded. Thus the proposed deformation levels, or deformation classes, and strength classes are (table 1).

Another way of characterising the behaviour of a sprayed concrete structure suspended with rock bolts is by plate test. The proposals for the European standard give also the alternative to relate the specifications on the sprayed concrete to a plate test in terms of energy absorption capacity. This way of characterisation may be more performance related than the beam test but the Swedish opinion is that a beam test is more well defined and gives data for use in calculations according to the design models described above.

However, we are aware that the link to the real performance in the structure is essential and research efforts are now under way with the objective to find the design model that gives the best correspondence between the performance and the way of verification. This research includes parallel tests on beams and plates with different geometries and clamping as well as different reinforcements, both mesh and fibres. One example of such a plate test is shown in figure 5. The test was performed on a sprayed concrete plate with dimensions

1900 x 1900 x 100 mm rigid supported round the periphery by steel profiles and loaded by a point load, Ø 200 mm, in the mid point. Tests were done with different types and amounts of steel fibres as well as with frequently used mesh reinforcement.

Restfestigkeitsklassen <i>Residual strength classes</i>		Verformungsklasse <i>Deformation class</i>		
Festigkeitsklasse <i>Strength class</i>	Mindestfestigkeit <i>Min stress</i> (N/mm ²)	D1	D2	D4
1	1			
2	2	0,5 bis	0,5 bis	0,5 bis
3	3	1 mm	2 mm	4 mm
4	4			

Tab. 1: Einteilung der Winkeländerungsbereiche in die entsprechenden Verformungsklassen

Tab. 1: Restfestigkeitsklasse (Vorschlag CEN WG10/Sprayed Concrete)

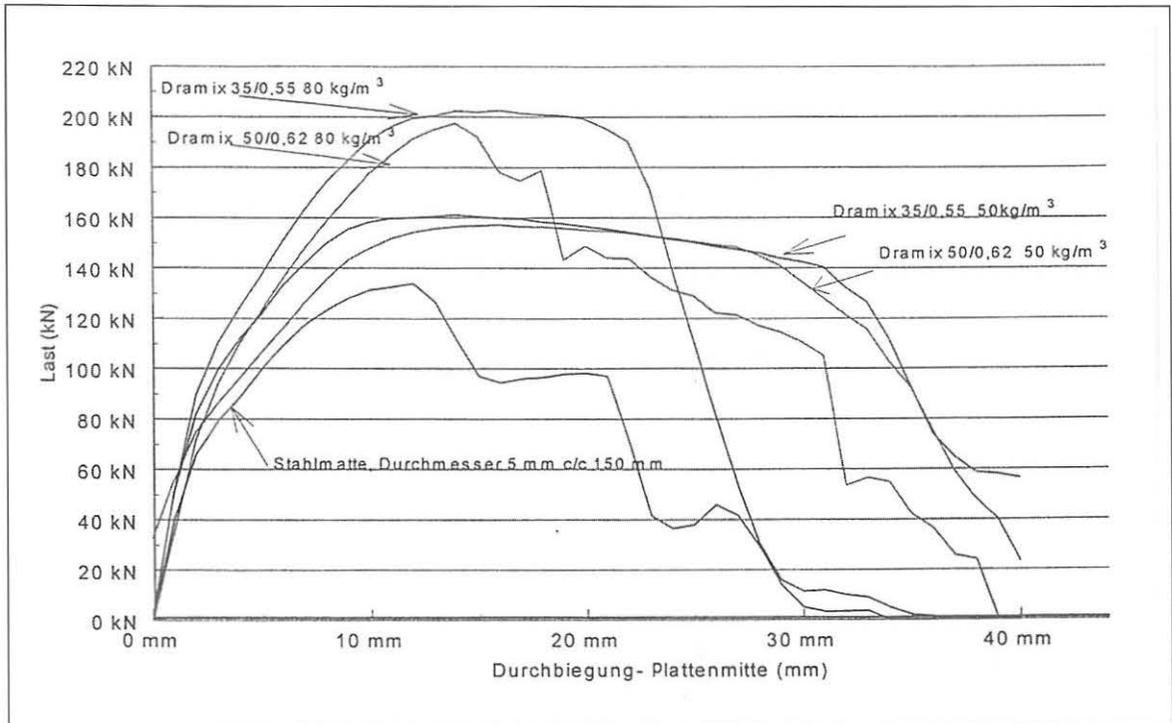


Bild 5: In Plattentests an Spritzbeton ermittelte Last-Verformungskurven [3]

Fig. 5: Load-deflection curves from tests on sprayed concrete plates. [3]

gerbedingungen und verschiedener Bewehrung, sowohl Bewehrungsmatten als auch Fasern, durchgeführt. Ein Beispiel für einen solchen Plattentest ist in Bild 5 dargestellt.

Der Test wurde an einer Spritzbetonplatte mit den Abmessungen 1900 x 1900 x 100 mm durchgeführt, mit steifer Lagerung entlang der Ränder auf Stahlprofilen und einer mittigen Punktbelastung, Ø 200 mm. Die Tests wurden mit verschiedenen Arten und Mengen von Stahlfasern und auch mit häufig verwendeten Bewehrungsmatten durchgeführt.

- Bei den Tests konnte folgendes festgestellt werden:
- Die Verwendung von Faserbewehrung ist Bewehrungsmatten vorzuziehen.
 - 50 kg Faser/m³ scheinen eine bessere Verformungsfähigkeit zu ergeben als Proben mit einem höheren Fasergehalt von 80 kg/m³, während die Festigkeit etwas geringer ausfällt.
 - Längere Fasern, 50mm, ergeben weder einen Festigkeitszuwachs noch höhere Verformbarkeit.

Parallel dazu wurden auch Tests an Balken durchgeführt, doch ein Vergleich der Ergebnisse zeigte keinerlei Übereinstimmung. Eine Erklärung dafür lautet, daß der Schereinfluß bei den Plattentests stärker war wegen der Auflagerbedingungen, wobei eine

Conclusions are :

- that the fibre-reinforced alternatives generally are advantageous in comparison with the mesh reinforced one;
- that 50 kg fibre/m³ seems to give better deformation capacity than samples with the higher fibre content of 80 kg/m³ but somewhat lower strength capacity;
- that the longer fibres, 50 mm, do not produce any increase in strength nor deformation capacity.

Parallel tests were also performed on standard test beams, but the comparison between those results and the results from plate tests showed no consistency. One explanation is that the shear influence was more pronounced in the panel tests due to the support conditions in which case a larger number of shorter fibres may be more favourable than fewer but longer fibres.

The interest in matters concerning toughness, residual strength capacity, energy absorption capacity etc is a consequence of the fact that now nearly all reinforced sprayed concrete is reinforced by steel fibres. It is interesting to notice that the tender documents for the tunnel projects in Stockholm prescribe that the contractor, if he wants to use steel bars as reinforcement, has to verify by calculation that the same bearing capacity can be reached as with the fibre reinforced alternative.

höhere Anzahl an kurzen Fasern günstiger sein könnte als einige wenige lange Fasern.

Das Interesse an Fragen wie Arbeitsvermögen, Resttragvermögen, Energieabsorptionskapazität usw. ist darauf zurückzuführen, daß nun Spritzbeton in nahezu allen Fällen mit Stahlfasern verstärkt wird. In den Ausschreibungsunterlagen für die Tunnelprojekte in Stockholm ist interessanterweise festzustellen, daß die Baufirma, wenn sie Stabbewehrung verwenden will, durch Berechnungen nachweisen muß, daß damit dasselbe Tragvermögen wie bei der Stahlfaservariante erzielt werden kann.

Der Faseranteil liegt normalerweise bei 50 - 70 kg/m³, es kommen vor allem 35 mm lange Fasern mit Endhaken zum Einsatz.

2.4 Entwässerungsmaßnahmen

Ein Detail, dem besondere Aufmerksamkeit zukommt, sind Entwässerungsmaßnahmen mit Stahlfaserspritzbeton.

Dabei wurde untersucht, wie sich die Einbauten im Falle dynamischer Belastungen, wie etwa in Eisenbahntunneln während der Durchfahrt von Zügen, verhalten.

Es wurde auch festgestellt, daß Risse häufig bei Entwässerungseinbauten auftreten und daß die Entwässerungsrohre leicht verstopft werden aufgrund der Oxydation von Mineralien im Wasser, was zu Problemen bei Frost führt, weil sich das Wasser dann andere Wege neben dem Entwässerungssystem sucht.

Das letztere Problem hängt vor allem damit zusammen, ob die Entwässerungsrohre gelegentlich gereinigt werden können oder nicht.

Untersuchungen der dynamischen Funktion der Bauwerke haben gezeigt, daß die zu erwartende Belastung harmlos für das Funktionieren der Bauwerke sein dürfte. Das Auftreten von Rissen ist vor allem darauf zurückzuführen, daß nicht ausreichend rißmindernde Bewehrung eingesetzt wurde, d.h. ein entsprechend hoher Faseranteil eventuell zusammen mit Stabbewehrung.

3. Beständigkeit von Spritzbeton

3.1 Allgemeine Anforderungen

Die Planung eines Tunnels sollte nicht nur das kurzfristige statische Verhalten beachten, sondern auch die dauerhafte Leistungsfähigkeit während der gesamten Betriebsdauer des Objekts sicherstellen. Bei der Planung der Straßentunnel in Stockholm und

The normal fibre contents are in the range of 50 - 70 kg/m³ and the dominant fibre type is a 35-mm-long hooked-end fibre.

2.4 Drainage constructions

A detail that has been paid special attention to is the drainage constructions made of steel fibre reinforced sprayed concrete.

One concern has been to study how the constructions perform when subjected to dynamic load situations that may occur in a railway tunnel when trains are passing through.

It has also been noticed that cracks often occur at the locations for drainage constructions and that the drainage pipes tend to be blocked by oxidation of minerals in the water which ends up in freezing problems when the water has to find other ways along the drainage construction.

The latter problem is mainly a matter of having the possibility to clean the drainage pipes now and then. The studies of the dynamic function of the constructions have shown that the expected load situations should be harmless for the functioning of the constructions. The occurrence of cracks is mainly a question of applying enough crack-reducing reinforcement, that is to say sufficient fibre content possibly in combination with steel bar reinforcement.

3. Durability of sprayed concrete

3.1 General requirements

The design of a tunnel should not only pay attention to the short term structural behaviour but also guarantee that the performance is sustained during the expected working time of the structure. In the planning of the road tunnel projects in Stockholm and in the new Swedish tunnel standard, the demands concerning durability of sprayed concrete structures have got more pronounced than was the case before.

The requirements on the sprayed concrete are related to the specific environment the concrete is exposed to and which can vary between different areas of a tunnel. The requirements are classified mainly in two classes, base requirements and requirements for road environment. In addition some lower requirements are given for secondary constructions and parts of constructions directly protected from the road environment. The classification is then related to requirements on w/c ratio, and thaw-frost resistance for different expected working lives (figure 6). The working life classes L0, L1, and L2 correspond to

Construction location Lage der Konstruktion	Working time class Nutzungsdauer-Klasse	W/C W/Z	Frostresistance Frostwiderstand
1 Base requirement Grundanforderung	LO L1, L2	0,55 0,45	Yes Yes
Road environment Strassenumgebung	LO L1, L2	0,45 0,40	Yes (salt, Salz) Yes (salt, Salz)
2	LO L1, L2	0,55 0,45	Yes Yes
3	LO, L1, L2	0,55	Yes
4	LO, L1, L2	0,55	Yes
5	LO L1, L2	0,55 0,45	Yes Yes
6	LO L1, L2	0,55 0,45	Yes Yes
7	LO, L1, L2	0,55	Yes
8 Base requirements marine environment Seewasserumgebung	LO, L1, L2 LO L1, L2	0,55 0,45 0,40	Yes Yes (salt, Salz) Yes (salt, Salz)

gemäß der neuen schwedischen Tunnelbaunorm sind die Anforderungen hinsichtlich der Beständigkeit von Spritzbeton nun viel höher als in der Vergangenheit.

Die Anforderungen an den Spritzbeton hängen zusammen mit der spezifischen Umgebung, welcher der Beton ausgesetzt ist und die sich in den verschiedenen Abschnitten des Tunnels ändern kann. Die Anforderungen gliedern sich in zwei Hauptklassen: grundlegende Anforderungen und Anforderungen für Straßenumgebung. Daneben gibt es einige nachrangige Anforderungen für Sekundärbauten und Teile von Konstruktionen, die direkt vor der Straßenumgebung geschützt sind. Die Einteilung bezieht sich auf Anforderungen hinsichtlich des Wasser-Zement-Faktors und der Frost-Tau-Beständigkeit bei unterschiedlicher Nutzungsdauer (Bild 6). Die Klassen LO, L1 und L2 entsprechen einer technischen Lebensdauer von jeweils 40, 80 und 120 Jahren.

Um diesen Anforderungen, insbesondere hinsichtlich dem Wasser-Zement-Faktor, gerecht zu werden, wird die Qualität in Bezug auf die Druckfestigkeit natürlich sehr hoch sein. Während die normale statische Anforderung bezüglich der Druckfestigkeit ca. 40 N/mm² beträgt, ergeben sich aus den Anforderungen in puncto Beständigkeit oft Druckfestigkeiten von über 60 N/mm². Diese hohe Qualität ist vorteilhaft aus Sicht der Materialbeständigkeit, kann sich jedoch nachteilig auf die statische Dauerhaftigkeit auswirken, da sich das Risiko von Schwindrissen erhöht und somit mehr rißmindernde Bewehrung vorgesehen werden muß.

Zur Herstellung von Naßspritzbeton mit niedrigem Wasser-Zement-Faktor werden Betonverflüssiger, normalerweise auf Melamin- oder Naphtalinbasis, verwendet. Die neuen speziell für selbstverdichtenden Beton entwickelten Typen von Betonverflüssigern kommen nun erfolgreich zum Einsatz.

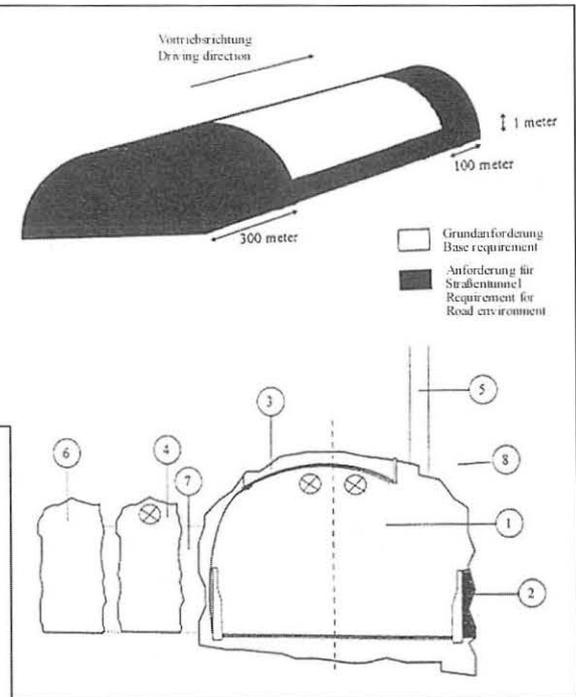


Bild 6: Anforderungen hinsichtlich der Beständigkeit des Spritzbetons in verschiedenen Abschnitten von Tunnelobjekten [4]

Fig. 6: Requirements related to durability on sprayed concrete in different locations in tunnel constructions. [4]

technical life times 40, 80 and 120 years respectively.

To meet those requirements, in particular the w/c ratio, it is obvious that the quality, in terms of compressive strength will be rather high. Though the normal static requirement on compressive strength is about 40 MPa the durability requirements often result in compressive strengths well above 60 MPa. This high quality is advantageous from the material durability point of view but may be a disadvantage for the structural durability since it increases the risk of shrinkage cracking and, thus, heightens the demand for crack reducing reinforcement.

To produce wet mix sprayed concrete with low w/c ratios, superplasticizing agents are used, normally melamine or naphthalene based. However, the new types of effective superplasticizers especially developed for self-compacting concrete have now successfully begun to be used.

3.2 Corrosion of fibres

It is a general opinion, based on practical experience of several years, that steel fibres perform very

3.2 Korrosion der Fasern

Aufgrund der langjährigen praktischen Erfahrung wird allgemein die Meinung vertreten, daß in einem korrosivem Umfeld sich Stahlfasern im Beton sehr gut bewähren. Die Erklärung dafür lautet, daß die Fasern zu dünn sind, um einen Druck aufbauen zu können, der im umliegenden Beton Risse erzeugen könnte. Eine andere Erklärung geht dahin, daß die Fasern zu klein sind, um als galvanisches Element im Beton wirken zu können. Somit gilt die Faserkorrosion bislang nur als ästhetisches Problem, das normalerweise dadurch gelöst wird, indem man eine ca. 20 - 25 mm starke nichtbewehrte Schicht aufträgt.

Angesichts des intensiven Einsatzes von Stahlfasern zur Verstärkung des Spritzbetons erschien es wichtig, quantitativere Informationen darüber zu erhalten, wie sich Konstruktionen mit Stahlfaserspritzbeton langfristig in einem korrosiven Umfeld verhalten. Zu diesem Zweck wurde ein Forschungsprogramm ins Leben gerufen, welches sowohl Feldversuche an Testplatten aus Stahlfaserspritzbeton als auch Laboruntersuchungen bezüglich des Korrosionsmodells umfaßt. Das Forschungsprogramm beinhaltet die Untersuchung von Beton mit und ohne Rissen. Die Testplatten im Feldversuch sind nun schon seit einem Jahr den verschiedenen Lagerungsbedingungen ausgesetzt:

- ungeschützte Straßenumgebung mit Tausalzbelastung
- geschützte Straßenumgebung (Tunnel) mit Tausalzbelastung
- Belastung durch Süßwasser
- Belastung im Labor

3.3 Frost-Tau-Beständigkeit

Maßnahmen, um die Anforderungen bezüglich Frostbeständigkeit zu erfüllen, wurden nicht nur in Schweden ausführlich diskutiert. Das Problem betrifft in erster Linie die Belastung durch Tausalz und die Art der Überprüfung dieses Umstands durch Abwitterungstests. Es wurde versucht, mit Hilfe von Zusatzmitteln Luftporen im Beton zu erzeugen, doch liegen derzeit noch keine Baustellenerfahrungen vor. Um den Anforderungen in diesem Punkt gerecht zu werden, wird deshalb ein möglichst dichter Beton mit einem niedrigen Wasser-Zement-Faktor unter Beigabe von Silicafume erzeugt.

3.4 Weitere Anforderungen hinsichtlich der Beständigkeit

In einigen Teilen Schwedens, so z.B. in Bergwerken, enthält das Grundwasser Schwefelverbindungen. In

well in concrete exposed to corrosive environments. One explanation to this is that the fibres are too thin to be able to build up a pressure that causes cracks in the surrounding concrete. Another explanation is that the fibres are too small to be able to act as a galvanic element in the concrete.

Thus, the fibre corrosion is, so far, only regarded as an aesthetic surface problem, which normally is solved by applying an outer 20 - 25 mm thick non-reinforced layer.

Due to the extensive use of steel fibres as reinforcement in sprayed concrete it has been considered important to get more quantitative information on how steel fibre reinforced sprayed concrete constructions perform in the long run when exposed to corrosive environments. For this reason a research programme has started which includes both field exposition studies of steel fibre reinforced sprayed concrete panels and laboratory studies regarding the corrosion model. The research programme covers the study of noncracked as well as cracked concrete.

The field test panels have now been exposed for one year to the different environments:

- unprotected road environment with exposure to de-icing salts
- protected road environment (tunnel) with exposure to de-icing salts
- exposure to lake water
- exposure in laboratory

3.3 Thaw-frost resistance

The measures to fulfil requirements on frost resistance have been very much discussed not only in Sweden. The problem is mainly related to the environment with exposure to de-icing salts and the way of verifying this by scaling test. Attempts have been made to introduce air pores into the concrete by admixtures, but experience in running production of this method is still missing. The general way of meeting the requirements seems to be to make the concrete dense enough by a low w/c ratio and the use of silica fume.

3.4 Other durability requirements.

In some parts of Sweden, as in some mines, the ground water contains sulphuric compounds. This calls for the use of sulphate resistant cement. This type of cement is also used to reduce the heat development in thick constructions such as bridges, hydro power plants etc. Since tunnel constructions typically have

diesen Fällen muß sulfatbeständiger Zement verwendet werden. Diese Art von Zement wird auch eingesetzt, um die Wärmeentwicklung in Bauwerken, wie Brücken, Wasserkraftwerken usw. zu vermindern. Da Tunnel schon immer ein Teil von Wasserkraftwerken waren und da Straßentunnel ähnlich wie Straßenbrücken zu sehen sind, ist es üblich, die Verwendung von sulfatbeständigem Zement für nahezu alle Tunnelbauten in Schweden vorzuschreiben. Dies obwohl Tunnelbauten selten Bauwerke mit dicken Querschnitten sind und auch sulfathaltiges Grundwasser recht selten auftritt.

4. Herstellung von Spritzbeton

Der für Spritzbeton verwendete Beton kommt normalerweise aus dem Transportbetonwerk, obwohl auch gute Ergebnisse mit an Ort und Stelle in speziellen mobilen Mischanlagen hergestelltem Beton erzielt wurden.

Der Zementgehalt bewegt sich zwischen 440 und 500 kg/m³. Daneben wird auch häufig Silicafume aus folgenden Gründen verwendet: Verbesserung der Pumpfähigkeit des Mischguts, Rückprallminderung und bessere Nutzung der Fasern durch ihren stärkeren Verbund mit der Betonmatrix. Der optimale Silicafume-Anteil liegt bei ca. 5 Gewichtsprozent vom Zement.

Die einzig häufig verwendeten Zusatzmittel, die der Ausgangsmischung beigegeben werden, sind Betonverflüssiger, obwohl auch gute Erfahrungen z.B. mit hydratationsregelnden Zusatzmitteln gemacht wurden.

Es werden nach wie vor hauptsächlich Beschleuniger auf Natriumsilikat-Basis verwendet, denen aus Kostengründen der Vorzug gegenüber alkalifreien Beschleunigern gegeben wird. Die derzeit geltenden Gesundheits- und Arbeitsschutzbestimmungen verbieten ihren Einsatz noch nicht.

Es gibt jedoch Anzeichen, daß die Verwendung alkalifreier Beschleuniger die Erfüllung der Frostbeständigkeitsanforderungen erleichtern und auch die Druckfestigkeit positiv beeinflussen könnte, was die Bauunternehmer in Zukunft für diese Variante überzeugen könnte.

Der Anteil an Natriumsilikatbeschleuniger beträgt normalerweise 1,5 - 20 kg/m³.

Obwohl in Schweden recht stabile Gebirgsverhältnisse vorherrschen, wird es dennoch für wichtig erachtet, die Felsoberfläche mit einer Lage Spritzbeton so bald als möglich nach dem Sprengen zu versiegeln und zu stabilisieren. Auf diese Primär-

been part of constructions for hydro power plants and since road tunnels may be regarded as a similar construction as a road bridge it has been common to require the use of sulphate resistant cement for most tunnels in Sweden. That is, in spite of the fact that tunnel constructions seldom are thick structures and that the occurrence of sulphate containing ground water is rather rare.

4. Production of sprayed concrete.

The concrete for the sprayed concrete is normally supplied from a ready mix concrete factory although good results have been achieved even when the mixing was done on site by special mobile mixers.

In addition to the cement content in the range of 440 - 500 kg/m³, silica fume is frequently used to improve the pumpability of the mix, to reduce the rebound and also to enhance the utilisation of fibres by improved bond to the concrete matrix. An optimal dosage of silica fume is about 5 % by the weight of cement.

The only frequently used admixtures added to the base mix are superplasticizers although some good experience was also gained by using such admixtures as hydration controlling admixtures.

The dominant type of accelerator used is still sodium silicate based which is less expensive than alkali free accelerator, and the legislation on workers' protection does not yet forbid their use.

However, there are indications that the use of alkali free accelerators may facilitate the possibility to fulfil requirements on frost resistance and that they even are advantageous in terms of the compressive strength, which may encourage contractors to use more of those types in the future.

Sodium silicate accelerators are normally dosed in the range of 1,5 - 20 kg/m³.

Even though we normally work under rather stable rock conditions we find it important to "seal and stabilise" the rock surface with a primary sprayed concrete layer as soon as possible after blasting. This primary support is followed by one or more successive layers and rock bolt installation to build up the final construction. All sprayed concrete layers are normally done with the same concrete mix and all layers can be regarded as parts of the final permanent construction.

When working under more unstable conditions like in the Hallandsås project more active design methods have to be used, including:

sicherung folgen eine oder mehrere Lagen Spritzbeton und Gebirgsanker. Alle Spritzbetonlagen werden normalerweise mit demselben Mischgut hergestellt und können als Teil der endgültigen permanenten Konstruktion angesehen werden.

Unter weniger stabilen Bedingungen, etwa beim Hallandsås-Projekt, müssen auf das jeweilige Gebirge abgestimmte Methoden zum Einsatz kommen, inklusive

- Prognose über die zu erwartende Felsqualität
- Beobachtung von Verformungen nach dem Ausbruch
- Anpassung der Stützmaßnahmen auf Grundlage der Prognosen und Beobachtungen.

Für die Spritzbetonkonstruktion kann dies resultieren in:

- Konstruktionen mit Spießen und Ausbaubögen
- Ausbruch in Teilquerschnitten (Firststollen, Strosse)

5. Schlußbemerkungen

Ich hoffe, durch meinen Beitrag gezeigt zu haben, daß Spritzbeton, und insbesondere Stahlfaser-Naßspritzbeton, im Untertagebau in Schweden eine wichtige Rolle spielt. Wir sehen darin ein ausgezeichnetes Material, das jedoch eingehendes Wissen über Methode, Material und Aufbringungstechniken erfordert, um auch die erwarteten Ergebnisse zu erzielen.

Materialkenntnis spielt eine wesentliche Rolle in punkto Wirtschaftlichkeit und Betriebsverhalten des Spritzbetons, während die Ausrüstung und Geräte über Spritzleistung und Produktivität entscheiden.

Das Personal muß die Methode und die mechanischen Abläufe verstehen und über Erfahrung mit Spritzbetonarbeiten verfügen, um ein Produkt mit den geforderten Eigenschaften zu liefern. Zur Verbesserung der Fähigkeiten ist ein Ausbildungskurs für Mineure, der Injektionsarbeiten, Anker Ausbau und Spritzbetontechnik umfaßt, in Zusammenarbeit mit den technischen Universitäten, Forschungsinstituten und Laboratorien sowie mit auf diesen Bereich spezialisierten Bauunternehmen geplant.

6. Literatur

[1] James, G.:

Modelling of young shotcrete on rock subjected to shock waves. Master Thesis 106. Concrete Structures 1998. Royal Institute of Technology. Stockholm.

- forecast of the expected rock quality
- observation of deformations after excavation
- adjusting the support method based on the forecast and the observations.

For the sprayed concrete construction those considerations may end up in

- constructions with spiling bolts and sprayed concrete arches
- excavation in sequences (top heading, bench)

5. Concluding remarks

I hope it has become obvious from this paper that sprayed concrete, and in particular wet mix steel fibre reinforced sprayed concrete, is frequently used as construction material in underground structures in Sweden.

We regard it as an excellent material but it requires in-depth knowledge of the method, material and application techniques to get the expected properties.

Material knowledge is most difficult to manage as it plays a major role in achieving the right economy and performance of the sprayed concrete. Still, the equipment is the single factor that has the biggest influence on capacity and productivity.

Personnel must have an understanding of the method and the mechanics behind the technique, as well as experience, in order to supply a product with the required properties. In order to improve this competence a training course for "support technicians", including grouting, bolting and sprayed concrete technique is planned in co-operation with technical universities, research institutes and laboratories as well as contractors specialised in underground works.

[2] Swedish Road Administration:

Södra Länken, Hammarby-Entreprenad SL 03. Övrig handling 1997-10-27. Bergmekanik-Bergförstärkning.

[3] Malmgren, L.:

LKAB, Kiruna. Personal information from ongoing research project. December 1998.

[4] Tunnel 95:

Swedish Road Administration. Publ 1995:32.