

Naßspritzen mit Aluminatbeschleuniger bei einem Autobahntunnel

Application Of The Wet Shotcreting Method With Aluminate Accelerator For The Construction Of A Motorway Tunnel

Dr.-Ing. E. Kern, Ph. Holzmann AG, Frankfurt/Main

Beim Bau des Heilsbergtunnels bei Singen im Zuge der Autobahn Stuttgart-Schaffhausen wird das Naßspritzverfahren mit Aluminatbeschleuniger erfolgreich angewendet. Es ist unseres Wissens zum ersten Mal gelungen, im Baustelleneinsatz Wasserglas durch einen anderen Beschleuniger zu ersetzen. Die erforderliche Zugabemenge an Aluminatbeschleuniger liegt mit 30 bis 40 cm³/kg Zement erheblich niedriger als bei Wasserglas. Die Anforderung der DIN 1045 an den zulässigen Höchstwert von 50 cm³/kg wird erfüllt.

Es wird über die Erfahrungen in technischer, betrieblicher und wirtschaftlicher Hinsicht berichtet. Insbesondere wird auf die erzielten Eigenschaften des Spritzbetons und die wichtigsten Einflußgrößen eingegangen. Zur zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit, zur Größe des E-Moduls und zur Menge des Rückpralls werden Aussagen gemacht. Die Vor- und Nachteile im Vergleich zu den anderen Spritzverfahren werden aufgezeigt. Die Vorteile dieser Entwicklung liegen vor allem in der besseren Betonqualität, der einfachen betrieblichen Handhabung und im geringen Rückprall. Auf die erforderlichen betrieblichen Maßnahmen im Umgang mit dem Aluminatbeschleuniger und auf Fragen der Arbeits-hygiene wird eingegangen.

For the construction of the Heilsberg Tunnel near Singen, which is part of the Stuttgart-Schaffhausen Motorway, the wet shotcreting method with aluminate accelerator is being successfully applied. To our knowledge, it was possible for the first time on a construction site to use an alternative accelerator instead of water glass.

The required quantities of the aluminate accelerator are 30 to 40 cm³ per kg of cement, which is considerably lower than the figure for water glass. The maximum allowable value of 50 cm³/kg according to DIN 1045 is not exceeded.

The present paper describes the experience gathered with regard to technical, operational and economical aspects. The shotcrete properties obtained and the major factors of influence will be dealt with in detail. The development of the compressive strength with time, the order of magnitude of the modulus of elasticity and the quantity of rebound will be discussed. The method will be compared with other shotcreting methods, advantages and drawbacks will be shown.

The major advantages offered by this method are the better concrete quality, its easy application and the smaller quantity of rebound. The necessary operational measures for the use of the aluminate accelerator and questions of hygiene will also be dealt with.

1. EINFÜHRUNG

Auf den Tunnelbaustellen der Deutschen Bundesbahn wurde in großem Umfang das Naßspritzver-

fahren angewendet. Dabei ergab sich der glückliche Umstand, daß beim etwa 8 km langen Die-

tershantunnel im nördlichen Bauabschnitt trocken und im südlichen Abschnitt naß gespritzt wurde und so ein direkter, langfristiger Vergleich beider Spritztechniken möglich war (1) und (2).

Obwohl das Naßspritzen mit Dichtstromförderung im Gegensatz zum Trockenspritzen noch am Anfang seiner Entwicklung steht, schnitt es bei diesem Vergleich günstig ab. Als wesentliche Vorteile sind zu nennen:

- eine deutliche Ersparnis an Druckluft für die Betonförderung,
- wenig Rückprall,
- eine deutlich verminderte Staubbildung und
- eine höhere Spritzleistung und damit eine Steigerung der Vortriebsleistung.

Alle Beteiligten waren sich darüber einig, daß neben höheren Gerätekosten und höherem Reinigungsaufwand vor allem das Angewiesensein auf Wasserglas zur Beschleunigung des Erstarrens der Hauptnachteil dieser Spritztechnik ist. Die erforderliche hohe Zugabemenge und die nötige Erwärmung des Wasserglases auf etwa 40° beeinträchtigt nämlich die Festbetoneigenschaften und den baubetrieblichen Ablauf in erheblichem Maße. Die weiteren Entwicklungsbemühungen an dieser Spritztechnik waren deshalb vorwiegend auf Ersatz von Wasserglas durch ein besseres Mittel gerichtet.

Bei umfangreichen Spritzversuchen auf unserem Laborgelände in Neu-Isenburg mit verschiedenen Zement-Beschleuniger-Kombinationen erwiesen sich bestimmte weiterentwickelte Aluminatbeschleuniger dem Wasserglas überlegen. Aufgrund dieser Erfahrungen und erfolgreicher Eignungsprüfungen auf der Baustelle, entschloß sich Holzmann beim Bau des Heilsbergtunnels das Naßspritzverfahren mit Aluminatbeschleuniger anzuwenden.

2. Der Heilsbergtunnel

Der Heilsbergtunnel entsteht im Zuge des Neubaus der Autobahn A81 von Singen in Richtung Schaffhausen, Schweiz (Abb. 1). Er wird aus 2 Röhren mit je 2 Fahrbahnen von etwa 448 bzw. 478 m Länge gebildet. Den Auftrag zur Bauausführung erhielt auf Grund eines Sondervorschlages eine Arbeitsgemeinschaft der Firmen Philipp Holzmann und Rothpletz, Lienhard Schweiz.

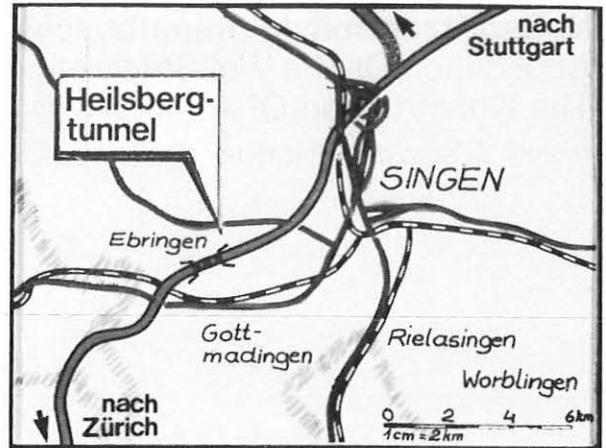


Abb. 1: Lage des Tunnels

Für den Rohbau, der Ende 1985 begann, wurde eine Bauzeit von 24 Monaten veranschlagt. Der Vortrieb erfolgt in der NÖT mit Spritzbeton als Sicherungsmaßnahme.



Abb. 2: Tunnelportal

Die Überdeckung des Tunnels ist mit 7 bis 20 m sehr gering (Abb. 2). Die Deckschicht besteht zumeist aus Waldboden; es folgt eine eiszeitliche Moräne aus Geschiebemergel, in dem sich die Vortriebsarbeiten bewegen.

Der Ausbruch des Tunnelquerschnittes wird in zwei Bauphasen vorgenommen:

1. Kalottenvortrieb auf ganzer Tunnellänge mit temporärer Sohlsicherung. Die mittlere Vortriebsleistung beträgt pro Tag 4 bis 5 m bei einer Abschlagslänge von 90 cm.
2. Strossenvortrieb mit schnellem Ringschluß mittels ausgerundetem Sohlgewölbe.

Erwähnenswert ist, daß beim Strossenvortrieb das Material im Tieflöffelverfahren von oben, d. h. von der Kalottensohle aus gelöst und weggefahren wird, während gleichzeitig unten die Sicherungsarbeiten auf der Strossensohle



Abb. 3: Strossenvortrieb

laufen, Abb. 3. Diese Lösung hat sich in sicherheitstechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht als sehr vorteilhaft erwiesen.

3. Naßspritzverfahren mit Aluminatbeschleuniger

Die einzelnen Herstellungsphasen des beim Heilsbergtunnel angewendeten Naßspritzverfahrens sind in Abb. 4 schematisch dargestellt. Der im Transportbetonwerk in einer Konsistenz von 36 - 40 cm hergestellte Ausgangsbeton wird mit Mischfahrzeugen in den Tunnel zur Vortriebsstelle gefahren, Phase 2.

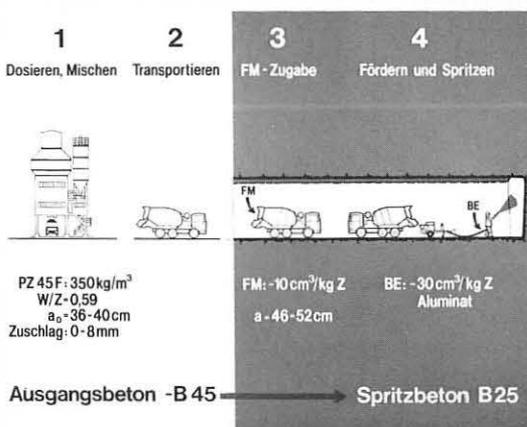


Abb. 4: Naßspritzverfahren mit Aluminatbeschleuniger

In Phase 3 wird durch Zugabe eines Fließmittels der steif-plastische Ausgangsbeton in etwa fließfähige Konsistenz gebracht und an die Pumpe übergeben. Am Ende der Pumpleitung, d. h. am Übergang zur Spritzdüse, wo die

Druckluftförderung einsetzt, Phase 4, wird ein Beschleuniger zugegeben, um den weichen Beton möglichst schnell zum Erstarren zu bringen. Bisher gelang dieser letzte zementchemisch schwierige Schritt nur durch relativ große Mengen an Wasserglas, die außerdem auf 35^o - 40^o C erwärmt werden mußten. Beim Heilsbergtunnel konnte diese Wirkung mit einem Aluminatbeschleuniger in relativ geringer Menge und ohne Erwärmung erreicht werden.

Die hohe Verformungswilligkeit des frischen Betons ist beim Naßspritzen deshalb erforderlich, weil der Beton auf dem Weg von der Pumpe zur Spritzdüse durch dünne und sich von 150 auf 50 mm Durchmesser verengende Leitungen gefördert werden muß. Das eigentliche Problem beim Naßspritzen besteht nun darin, den gerade fließfähig gemachten frischen Beton so schnell zum Erstarren und Erhärten zu bringen, daß er auch bei großer Spritzleistung in dicker Schicht "Überkopf" sicher hängenbleibt.

Diese Eigenschaften werden, wie bereits erwähnt, durch 2 Betonzusatzmittel erreicht, und zwar die Verformungswilligkeit durch Zugabe eines Fließmittels und das schnelle Erstarren und Erhärten durch Zugabe eines Beschleunigers, Abb. 5.

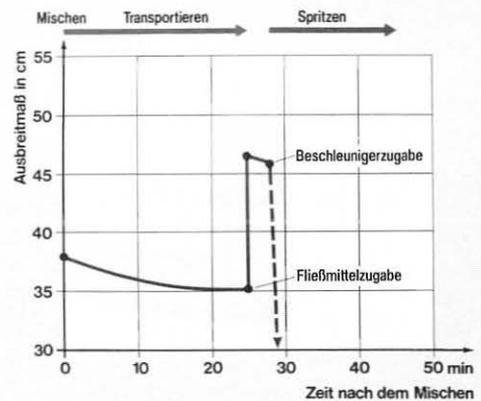


Abb. 5: Konsistenz des Ausgangsbetons beim Naßspritzen

Der Hauptwirkstoff des Beschleunigers ist ein hochwirksames Kali-Aluminat, Abb. 6. Es ersetzt das aus Silikaten bestehende Wasserglas. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, daß sich die gewünschte Wirkung mit relativ kleinen Zugabemengen erreichen läßt. Wie Abb. 7 zeigt, wird die in den Prüfrichtlinien für Betonzusatzmittel, auf die sich DIN 1045 bezieht, mit 50 cm³/kg Zement festgelegte Höchst-

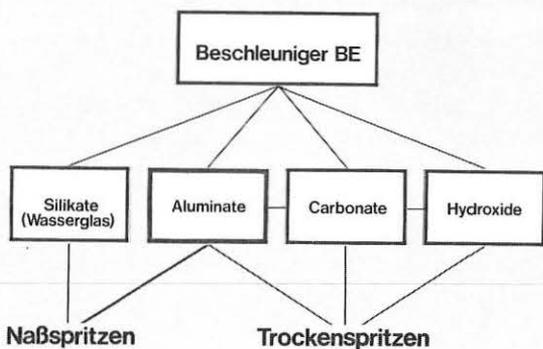


Abb. 6: Wichtige Wirkstoffe der Beschleuniger

	zulässige Zusatzmenge nach		tatsächl. Zusatzmenge auf der Baustelle
	DIN 1045	Sonderregelung	
Trockenspritzen (Pulver in g)	50	80	30-70
Naßspritzen (Wasserglas in cm ³)	50	100	50-100
Naßspritzen (Aluminat-BE in cm ³)	50	-	25-40

Abb. 7: Zusatzmengen an Beschleunigern je kg Zement beim Spritzbeton

menge im Gegensatz zum Wasserglas problemlos eingehalten. Beim Heilsbergtunnel lag die erforderliche Menge an Aluminatbeschleuniger zwischen 25 und 40, im Mittel bei 30 cm³/kg Zement.

Bei der verwendeten Spritzeinrichtung wird der flüssige Aluminatbeschleuniger mittels eines

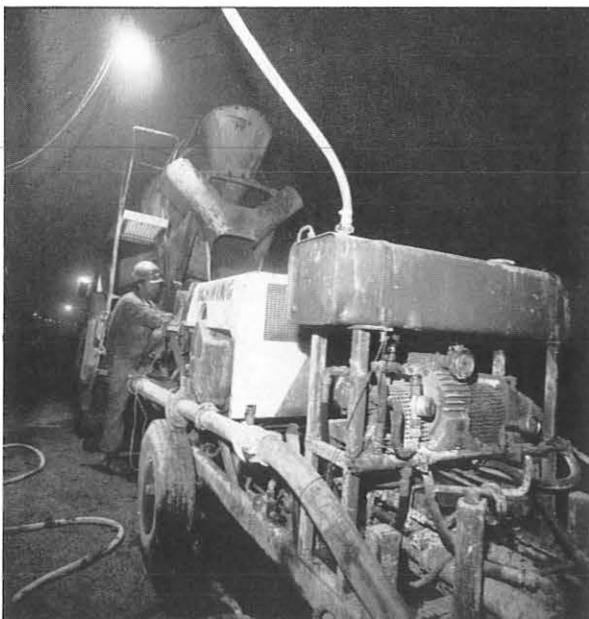


Abb. 8: Dosiergerät für den Beschleuniger

regelbaren Getriebes und einer Zahnradschleuse, die mit der Betonpumpe synchron geschaltet ist, zugegeben, Abb. 8. Damit läßt sich die Beschleunigerzugabe relativ gut auf die Betonfördermenge abstimmen. Die Zugabemenge an Aluminatbeschleuniger wird mit einer handelsüblichen, eichbaren Wasseruhr gemessen, die in den Materialfluß der Dosiereinrichtung eingebaut ist. Dadurch läßt sich die Zugabemenge je Kolbenhub relativ genau ermitteln.

Die je Kolbenhub geförderte Beton- bzw. Zementmenge hängt vom Füllungsgrad des Zylinders der Betonpumpe und dieser wiederum von der Konsistenz des Pumpbetons ab. Durchgeführte Messungen ergaben, daß bei einem Ausbreitmaß zwischen 45 und 50 cm der Füllungsgrad etwa konstant ist und somit auch die Zugabemenge an Beschleuniger, Abb. 9. Bei steifer werdender Konsistenz sinkt der Füllungsgrad ab, und die auf den Zementgehalt bezogene Menge an Beschleuniger wächst an. Fällt z. B. das Ausbreitmaß um 5 cm von 45 auf 40 cm ab, so steigt die Beschleunigermenge um 0,4 Gew.% an.

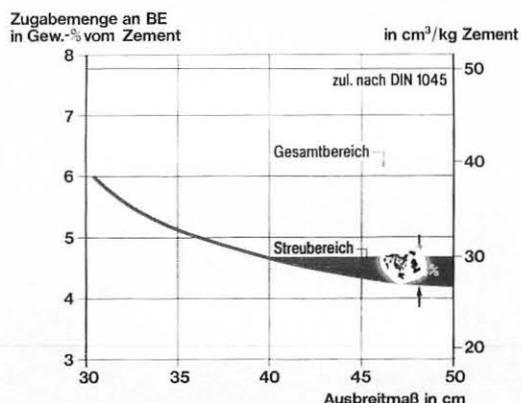


Abb. 9: Verbrauch von Aluminat-BE in Abhängigkeit von der Konsistenz des Betons

Da beim Heilsbergtunnel durch Zugabe des Fließmittels das Ausbreitmaß stets über 45 cm liegt, kann von einem konstanten Füllungsgrad und in Verbindung mit der Wasseruhr von einer steuerbaren Zugabemenge an Beschleuniger ausgegangen werden.

Die bisher beim Spritzen im Tunnelbau häufig nicht einhaltbaren Anforderungen der DIN 1045, nämlich die zulässige Beschleunigermenge und die Dosiergenauigkeit, werden hier erfüllt.

Der Einfluß verschiedener Zemente auf die Wirksamkeit der Aluminatbeschleuniger wurde in Abhängigkeit von der Zugabemenge nach einem mo-

difizierten Vicat-Versuch geprüft. In Abb. 10 ist das Ergebnis dieser Prüfung für die beim Heilsbergtunnel angewendete Zement-Beschleuniger-Kombination aufgetragen. Die günstigste Wirkung wird danach bei einer Zugabemenge von 35 cm³/kg Zement erreicht. Bei höheren Zugabemengen nimmt die beschleunigende Wirkung wieder ab. Wie die Erfahrung gezeigt hat, reicht dieser Versuch jedoch nicht aus, um die Beschleunigerwirkung abschließend für das Verhalten auf der Baustelle beurteilen zu können. Er gibt lediglich grundsätzliche Hinweise auf die Reaktivität der Kombination.

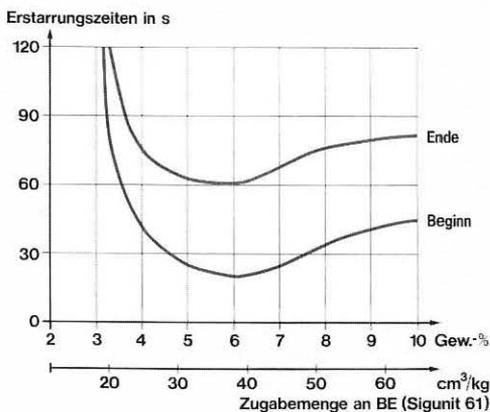


Abb. 10: Wirkung der Zugabemenge an Aluminat-BE auf das Erstarren von Zementleim

Um den Einfluß niedriger Außentemperaturen auf die Wirksamkeit des Aluminatbeschleunigers zu klären, wurden auf der Baustelle einige Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurde die Zugabemenge an Beschleuniger ermittelt, die auch bei niedrigen Temperaturen ein problemloses Spritzen ermöglicht. In Abb. 11 sind die erforderlichen Zugabemengen in Abhängigkeit von der Frischbetontemperatur für einen Beton mit

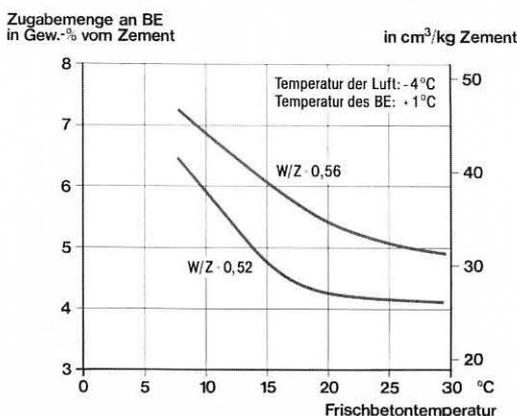


Abb. 11: Erforderliche Zugabemenge an Aluminat-BE bei niedrigen Außentemperaturen

dem Wasserzementwert 0,52 und 0,56 angegeben. Die Temperatur der Luft betrug dabei -4 °C und die des Aluminatbeschleunigers +1 °C.

Die Versuche ergaben danach, daß auch bei niedrigen Außentemperaturen durch geringe Erhöhung der Beschleunigermenge die Spritzbetonarbeiten ohne besondere Probleme weiterlaufen können. Die ursprünglich im Winter befürchteten Störungen stellten sich nicht ein.

Es zeigte sich, daß der Aluminatbeschleuniger Frosttemperaturen bis zu -20 °C ohne nachteilige Folgen verträgt. Beim Spritzen sollte seine Temperatur allerdings nicht unter 0 °C liegen. Diese geringe Temperaturempfindlichkeit des Aluminatbeschleunigers ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem Wasserglas.

4. Spritzdüse

Beim Naßspritzverfahren werden an der Spritzdüse - wie Abb. 12 zeigt - drei Förderleitungen zusammengeführt, und zwar die des Betons, der Druckluft und des Beschleunigers.

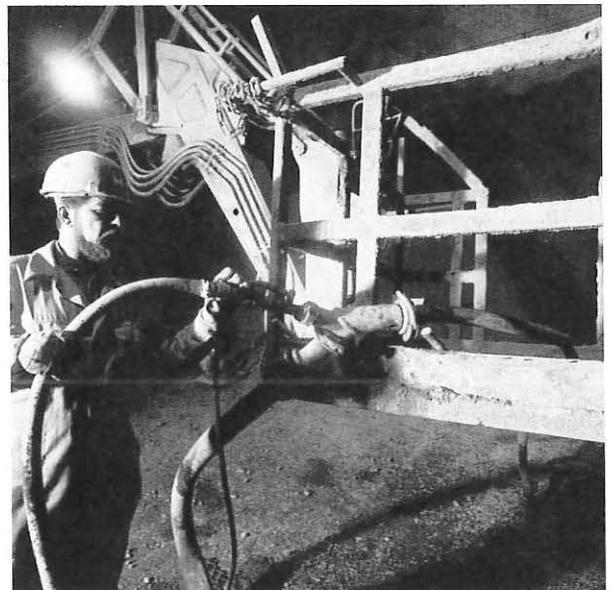


Abb. 12: Kupplungsstück der Spritzdüse

Hieraus ergeben sich auch die wesentlichen drei Aufgaben, die die Spritzdüse zu erfüllen hat. Sie muß

1. den Übergang vom Pumpbeton, d. h. vom Dichtstrom zum luftgetragenen Dünnstrom ermöglichen,
2. das gleichmäßige Verteilen des Beschleunigers unter den Beton durch Verwirbeln sicherstellen und

3. eine hohe Anwurfgeschwindigkeit des Spritzbetons ermöglichen, damit eine gute Haftung und Verdichtung des Betons erreicht wird.

Diese Aufgabe erfüllt ein 2 bis 3 m langer Spritzschlauch mit 45 mm Durchmesser, die sogenannte Schlauchdüse. Die Druckluft reißt den dichten Betonstrom zum Dünnstrom auf, verwirbelt den eingesprützten Beschleuniger im Beton und führt in der relativ langen Mischstrecke die Reaktionspartner von Beschleuniger und Zement zusammen.

Untersuchungen auf der Baustelle haben ergeben, daß die Ausbildung des Kupplungsstückes an der Einmündung zur Spritzdüse die für das Spritzen erforderliche Zugabemenge an Beschleuniger nennenswert beeinflußt. Diese Erfahrung führte zur Entwicklung eines gut geeigneten Kupplungsstückes.

Da der Spritzschlauch ähnlich wie beim Trockenspritzen mit einem aufgelockerten Betonstrom, einem Dünnstrom, gefüllt ist, ist ein ermüdungsarmes Spritzen aus der Hand auch von der Hebebühne aus möglich. Wie Abb. 13 zeigt, sind aufwendige und teure Manipulatoren nicht erforderlich. Es genügen einfache Unterstützungen bzw. Hilfskonstruktionen. Die Spritzleistung liegt bei 6 bis 8 m³ in der Stunde, so daß beim Kalottenvortrieb ein Abschlag von 90 cm in einer knappen Stunde mit Spritzbeton gesichert ist. Die Dicke des Spritzbetons beträgt im Mittel 35 cm bei einer Mindest-Solldicke von 25 cm.

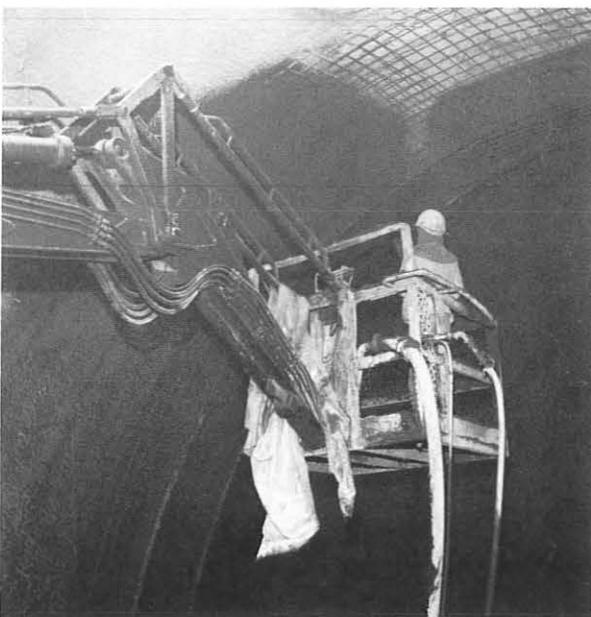


Abb. 13: Spritzen von Hand in der Kalotte

5. Eigenschaften des Spritzbetons

5.1 Eigenschaften des frischen bzw. jungen Spritzbetons

Im Gegensatz zum Wasserglas, das mehr ein blitzartiges Erstarren bewirkt, führt der verwendete Aluminatbeschleuniger zu einem etwas langsameren Erstarren in den ersten Sekunden nach dem Auftreffen auf den Untergrund. Dadurch ist der mit Wasserglas gespritzte Beton nach dem Auftreffen praktisch nicht mehr weiter verdichtbar, während der mit Aluminatbeschleuniger aufgebraachte Spritzbeton von der Spritzenergie des nachfolgenden Betons noch weiter verdichtet wird. Dieses günstige rheologische Verhalten des Spritzbetons mit Aluminatbeschleuniger wirkt sich in einer besseren Umhüllung der Bewehrung und damit besserem Verbund, geringerem Spritzschatten und höherer Dichte gegenüber dem Spritzbeton mit Wasserglas aus. Aus dem gleichen Grund ist auch der Rückprall beim Aluminatbeschleuniger geringer als beim Wasserglas.

Es entsteht ein homogener Beton ohne "Blätterteigstruktur". Parallel und senkrecht zur Spritzrichtung entnommene Bohrkerne ergaben praktisch gleiche Elastizitätsmoduln und Druckfestigkeiten.

5.2 Eigenschaften des erhärteten Spritzbetons

Die Spritzbetonarbeiten wurden zunächst mit einem Gehalt an PZ 45 F von 400 kg/m³ begonnen. Aufgrund der erreichten hohen Festigkeiten wurde der Zementgehalt auf 350 kg/m³ vermindert.

Prüfalter zwischen 28 und 84 Tagen
Druckfestigkeit in N/mm²

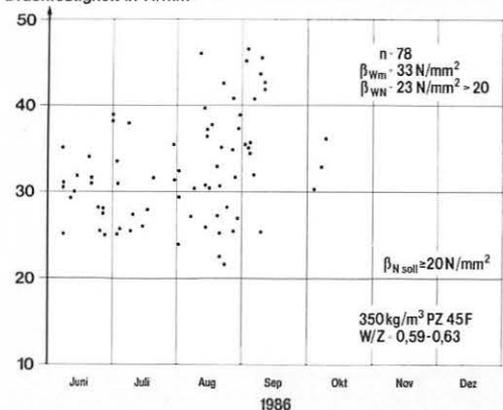


Abb. 14: Druckfestigkeit der Bohrkerne aus der Spritzbetonschale beim Heilsbergtunnel

Die Druckfestigkeitsergebnisse der Güteprüfungen an Bohrkernen aus der Spritzbetonschale der Kalotte sind in Abb. 14 gezeigt.

Von Juni bis Oktober 1986 lag die Druckfestigkeit im Mittel bei 33 N/mm^2 . Die geforderte Nennfestigkeit von 20 N/mm^2 für aus dem Bauwerk entnommene Bohrkern mit 10 cm Durchmesser wurde in keinem Fall unterschritten. Die Streuung der Ergebnisse ist vor allem auf die Streuungen beim Ausgangsbeton zurückzuführen. Die statistische Auswertung ergab für den Ausgangsbeton die gleiche Standardabweichung von $6,3 \text{ N/mm}^2$ wie für den Spritzbeton.

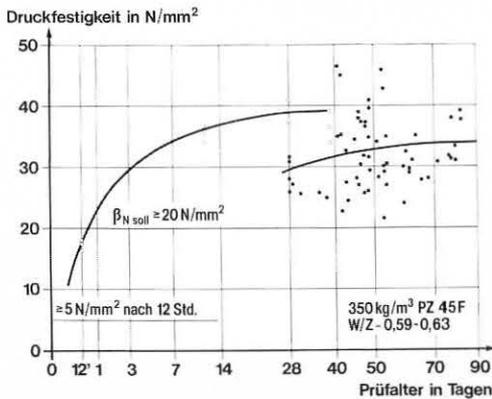


Abb. 15: Druckfestigkeit der Bohrkern beim Heilsbergtunnel aus der Spritzbetonschale ● aus den Spritzbetonplatten ○

Die in Abhängigkeit vom Alter erzielten Bohrkernfestigkeiten sind in Abb. 15 aufgetragen. Sie zeigt, daß nach 12 Stunden bereits eine Druckfestigkeit von etwa 18 N/mm^2 erreicht wurde, die weit über dem geforderten Wert von 5 N/mm^2 liegt.

In Abb. 16 ist die Festigkeitsentwicklung des Naßspritzbetons vom Heilsbergtunnel mit den entsprechenden Kurven von Naßspritzbeton mit Wasserglas und von Trockenspritzbeton verglichen. Bei den beiden letztgenannten Kurven handelt es sich um Ergebnisse vom Dietershantunnel.

In den ersten 24 Stunden ist der Festigkeitsverlauf des Naßspritzbetons vom Heilsbergtunnel ähnlich dem des Trockenspritzbetons. Mit zunehmendem Alter wächst die Festigkeit am Heilsbergtunnel jedoch stärker an. Im Vergleich dazu ist der Festigkeitsverlauf des Ausgangsbetons dargestellt. Dabei ist zu beachten, daß die Werte für den Ausgangsbeton an Würfeln und

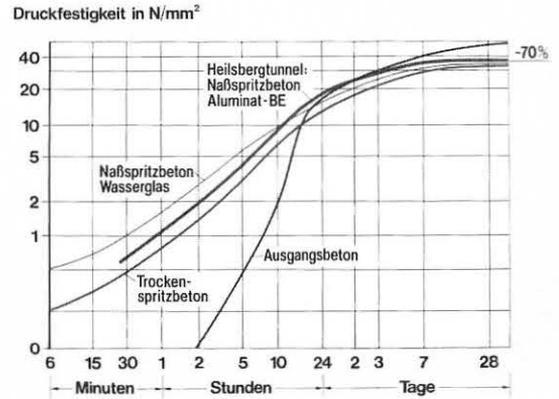


Abb. 16: Festigkeitsentwicklung der Spritzbetone

nicht am Bauwerk ermittelt wurden. Unter Berücksichtigung dieses Einflusses beträgt das Festigkeitsbildungsvermögen des Naßspritzbetons vom Heilsbergtunnel 75 bis 80% , d. h. es liegt relativ hoch.

Um ein Bild über das Verformungsverhalten des Spritzbetons vom Heilsbergtunnel zu erhalten, wurden E-Modul, Spannungsdehnungslinie, Kriechen und Schwinden untersucht und mit den entsprechenden Werten anderer Spritzbetone und von Normalbeton verglichen. Die erzielten Ergebnisse sind in den nächsten Bildern dargestellt.

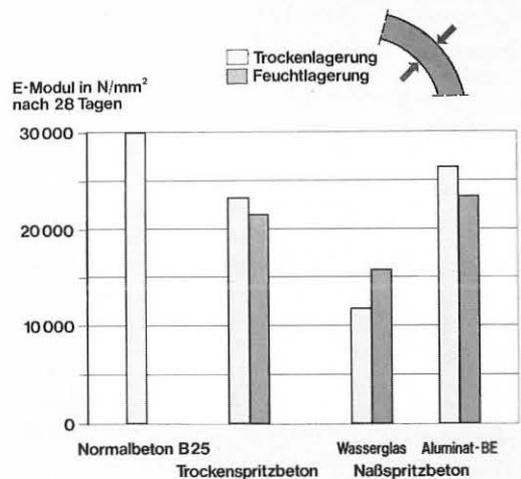


Abb. 17: E-Modul parallel zur Spritzrichtung

Die an Bohrkernen aus dem Heilsbergtunnel gemessenen E-Moduln in Spritzrichtung bei Feucht- und Trockenlagerung liegen mit etwa 25.000 N/mm^2 im Vergleich zu den anderen Spritzbetonverfahren relativ hoch und kommen dem Rechenwert für einen Normalbeton B 25 relativ nahe, Abb. 17. Abb. 18 stützt diese Aussage. Sie zeigt gemessene E-Moduln von Naßspritzbeton in Abhängigkeit von der Zugabemenge an Beschleuniger. Die Werte vom Heilsberg-

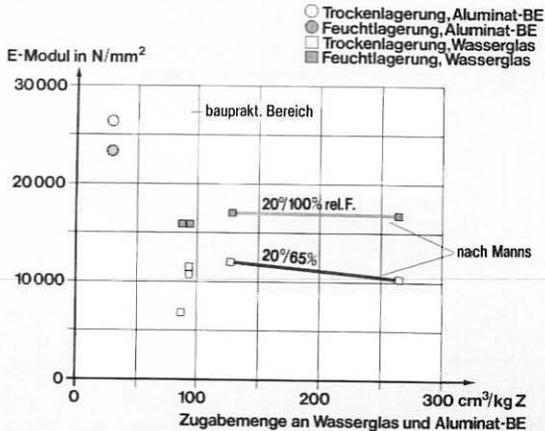


Abb. 18: E-Modul parallel zur Spritzrichtung in Abhängigkeit von der Zugabemenge an Wasserglas und Aluminat-BE

tunnel mit einer Zugabemenge an Aluminatbeschleuniger von 30 cm³/kg Zement liegen an der oberen Grenze des skizzierten Streubereichs. Der Unterschied zum Normalbeton ist gering. Hier zeigt sich der große Vorteil der geringen Zugabemenge an Aluminatbeschleuniger. Die als "baupraktischer Bereich" herausgestellte Fläche gilt für Wasserglas. Der baupraktische Bereich für Aluminatbeschleuniger liegt links davon, nämlich zwischen 25 und 40 cm³/kg.

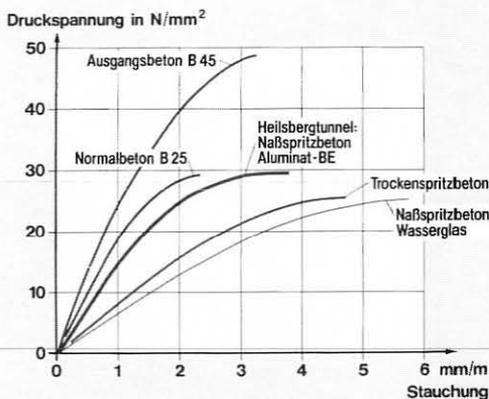


Abb. 19: Spannungsdehnungslinien von Beton

In Abb. 19 sind die Spannungsdehnungslinien aufgetragen, die bei konstanter Belastungsgeschwindigkeit von etwa 0,2 N/mm² je Sekunde an Bohrkernen aus Trockenspritzbeton und Naßspritzbeton mit Wasserglas und Aluminatbeschleuniger ermittelt wurden. Es handelt sich hierbei um Mittelwerte aus jeweils drei Bohrkernen, die aus dem Bauwerk entnommen wurden.

Im Vergleich dazu sind die entsprechenden Linien für den Ausgangsbeton B 45 und den

Normalbeton B 25 angegeben. Es zeigt sich, daß der mit Aluminatbeschleuniger gespritzte Beton dem Verhalten des Normalbetons B 25 am nächsten kommt. Der Naßspritzbeton mit Wasserglas dagegen ergab die größten Verformungen, während der Trockenspritzbeton dazwischen liegt.

Das Kriechen des Naßspritzbetons vom Heilsbergtunnel wurde an Bohrkernen aus dem Bauwerk untersucht. Die gemessenen und auf die Kriechspannung bezogenen Kriechverformungen sind in Abhängigkeit von der Belastungsdauer in Abb. 20 gezeigt. Die Kriechspannung betrug 8 N/mm². Die Lagerungsbedingungen wurden mit 20°C und 65% relative Feuchte ungünstig gewählt. Die Kriechspannung wurde im Alter des Betons von 28 Tagen aufgebracht.

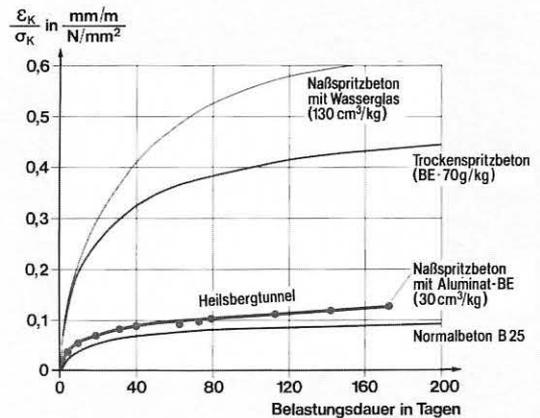


Abb. 20: Kriechen ϵ_k von Spritzbeton B 25 im Tunnelbau

Zum Vergleich wurden die unter den gleichen Belastungs- und Lagerungsbedingungen von Manns am Otto-Graf-Institut (3) ermittelten Ergebnisse für Trockenspritzbeton und Naßspritzbeton mit Wasserglas angegeben. Zu berücksichtigen ist allerdings, daß die Zugabemengen an Beschleuniger hierbei relativ hoch lagen. Das Bild zeigt, daß die Kriechverformungen des Spritzbetons mit Wasserglas nennenswert größer sind als die eines üblichen Normalbetons der gleichen Festigkeitsklasse. Die Kriechverformungen des Naßspritzbetons mit Aluminatbeschleuniger waren dagegen unbedeutend höher als die des Normalbetons.

Im Hinblick auf das Schwinden der Spritzbetone ergaben sich, wie Abb. 21 zeigt, ähnliche Zusammenhänge wie beim Kriechen. Die gemessenen Schwindverformungen des Naßspritzbetons vom Heilsbergtunnel entsprechen etwa den Werten eines üblichen Normalbetons. Die Schwind-

verformungen der beiden anderen Spritzbetone dagegen waren um ein Mehrfaches größer, besonders die des Naßspritzbetons mit Wasserglas.

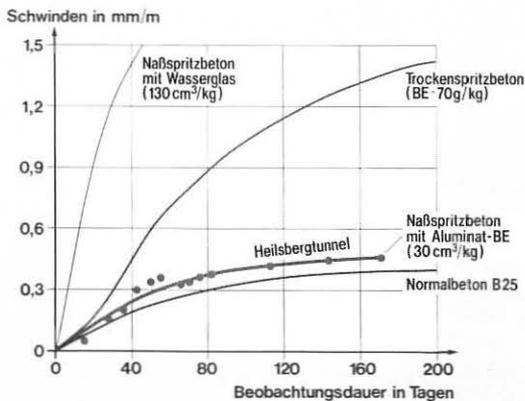


Abb. 21: Schwinden von Spritzbeton B 25 im Tunnelbau

6. Staubbelastung

Beim gut durchlüfteten Strossenvortrieb wurden Staubmessungen durchgeführt, und zwar in einer Entfernung von 1 bis 5 m von der Spritzdüse. Dabei betrug die Menge des lungengängigen Staubes $1,8 \text{ mg/m}^3$, d. h. weit weniger als der erlaubte Grenzwert von 6 mg/m^3 .

Außerdem wurde der Frage nach dem Gehalt an alkalischen Aerosolen nachgegangen, die als stark reizend und gesundheitsschädigend eingestuft werden. Die Untersuchungen ergaben keinen Anhalt für das Auftreten derartiger Stoffe.

7. Rückprall

Das erwähnte günstige rheologische Verhalten des Betons mit Aluminatbeschleuniger beim Auftreffen auf den Untergrund führt zu einer nennenswerten Verminderung des Rückpralls. Während man grob vereinfacht von einem Rückprall beim Trockenspritzen von 35 %, beim Naßspritzen mit Wasserglas von 25 % ausgehen kann, liegt der Rückprall beim Naßspritzen mit Aluminatbeschleuniger nur bei 10 bis 15 %.

In Abb. 22 sind die verbrauchten Spritzbetonmengen in der Kalotte für die Monate März bis Juli und in der Strosse für die Monate September und Oktober 1986 aufgetragen. Die dunkle Fläche zeigt den an Stichproben gemessenen Rückprall auf. Er lag in der Kalotte bei etwa 15 und in der Strosse bei 5 bis 10 %.

Das Bild zeigt außerdem die hohen Übermengen an verbrauchtem Spritzbeton gegenüber der

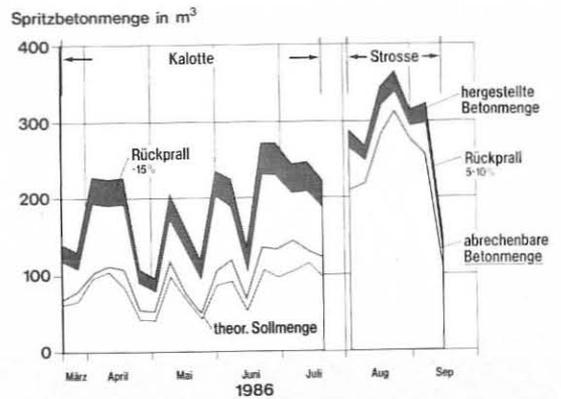


Abb. 22: Verbrauchsmengen an Spritzbeton beim Naßspritzen mit Aluminat-BE beim Heilsbergtunnel

theoretischen Sollmenge und der abrechenbaren Menge. Dieser relativ große Unterschied ergibt sich im wesentlichen aus kohäsionslos eingelagerten Sandschichten, die beim Ausbaggern und Anspritzen ausbrechen.

8. Setzungsmessungen

Die ständigen Kontrollmessungen, die entsprechend der NÖT laufend durchgeführt wurden, ergaben entgegen den errechneten und nach allgemeiner Erfahrung erwarteten Werten nur geringe Verformungen. Der Grund liegt offensichtlich in dem günstigen Festigkeits- und Verformungsverhalten der hergestellten Spritzbetonschale. Das Gebirge wird zum Tragen der Lasten optimal mit herangezogen.

9. Betonüberwachung

Um Schwierigkeiten und Probleme möglichst frühzeitig zu erkennen, wurde eine intensive Betonüberwachung durchgeführt, die über den Rahmen der üblichen BII-Überwachung weit hinausging. Sie wurde tatkräftig vom Hersteller des Beschleunigers, der Firma Sika, unterstützt. Dadurch konnten z. B. Probleme mit der Lagerstabilität und Ausflockungen des Beschleunigers rechtzeitig erkannt und behoben werden.

Die Ausflockungen wurden vor allem beim Kontakt des hochreaktiven Stoffes mit Verunreinigungen beobachtet. Es zeigte sich, daß die Wirkung des Beschleunigers durch die Ausflockungen jedoch nur unwesentlich beeinträchtigt wird. Verhindert werden muß jedoch, daß Ausflockungen in die Dosierpumpe gelangen und die Zuführung des Beschleunigers stören oder ganz blockieren.

Das Problem der Verunreinigung wurde beim Heilsbergtunnel durch Verwendung von Plastiksäcken zur Auskleidung der Lagerbehälter und durch wirksame gerätemäßige Verbesserungen gelöst. Eine sorgfältige Wartung der Geräte ist erforderlich.

Die befürchtete Reaktionsempfindlichkeit des Beschleunigers gegenüber unterschiedlichen Zementchargen wurde nicht beobachtet.



Abb. 23: Tunnelröhre vor Einbringung der Innenschale

10. Zusammenfassung

Am Heilsbergtunnel ist die Anwendung des Naßspritzverfahrens mit Aluminatbeschleuniger anstelle von Wasserglas gut gelungen. Es ergaben sich im wesentlichen folgende bemerkenswerte technische und wirtschaftliche Vorteile:

- hohe Betonqualität
- Beton nach DIN 1045
Bedarf an Beschleuniger $< 50 \text{ m}^3/\text{kg}$ Zement
gute Dosiergenauigkeit
- wenig Rückprall
- geringe Staubentwicklung

Als Nachteile sind zu nennen:

- Säubern der Maschine aufwendiger als beim Trockenspritzen
- hohe Kosten für den Beschleuniger
- intensive technische Betreuung erforderlich.

SCHRIFTTUM

(1) H. Wind, E. Kern:

Erprobung von Spritzbetontechniken und ihr Einfluß auf den Baufortschritt bei zwei Tunneln der DB-Neubaustrecke Hannover-Würzburg. STUVA-Bericht 30, Vorträge der STUVA-Tagung '85.

(2) H. Schöfer:

Deutsche Bundesbahn-Neubau-Strecke Hannover-Würzburg - Bau des Dietershantunnels. Zement und Beton, 1986, Heft 3.

(3) W. Manns, B. Neubert, R. Zimbelmann:

Festigkeitsentwicklung und Verformungsverhalten von hochbeschleunigtem Spritzbeton
Beton 1987, Heft 6