

# Anforderungen an sulfatbeständigen Spritzbeton

Univ.-Prof. Dr. Walter LUKAS

Institut für Baustofflehre und Materialprüfung, Universität Innsbruck

## 1. EINLEITUNG

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Schäden in Stollenbauten an Spritzbetonen bzw. Auskleidungsbetonen untersucht, die alle auf einen Sulfatangriff zurückzuführen waren. Die Schäden äußern sich im Anfangsstadium in einer Rißbildung im Beton, die zu einer Auflockerung führt. Zu einem späteren Zeitpunkt können Aufwölbungen auftreten. Endstadium ist die vollkommene Auflösung der Bindemittelstruktur, so daß der Beton leicht durch mechanisches Abtragen entfernt werden kann. Prinzipiell läßt sich in den Stollenbereichen die Beobachtung machen, daß Spritzbeton bei gleicher Festigkeitsqualität rascher und intensiver angegriffen wird als herkömmlicher Beton ohne Beschleunigungsmittel.

Ein weiteres auffallendes Kennzeichen ist, daß dieser Zerstörungstyp nur bei bestimmten klimatischen Bedingungen, nämlich bei Temperaturen unter  $10^{\circ}\text{C}$ , gegeben ist. Genaue Untersuchungen (1) hinsichtlich des Zerstörungsmechanismus haben ergeben, daß bei den tiefen Temperaturen grundsätzlich ein etwas anderer Reaktionsmechanismus herrscht als bei einem Sulfatangriff unter Normalbedingungen. Bei letzterem treten bekanntlich Treibeffekte auf durch Umsetzung des Tricalciumaluminates oder dessen Hydratprodukten mit den von außen zugeführten Sulfatlösungen (vorwiegend aus Gips), so daß sich ein Calcium-aluminiumsulfat-Hydrat (Ettringit) bildet. Die neu gebildete Phase entwickelt aufgrund ihrer enormen Volumenzunahme Treibwirkungen, die Betonzerstörung zur Folge haben können.

Wesentlich unangenehmer ist die Bildung von zerstörenden Komponenten bei tiefen Temperaturen, die bis vor wenigen Jahren unbekannt waren, da nämlich der gesamte Zementanteil des Bindemittels in den Zerstörungsmechanismus eingebracht wird. Dies trifft somit nicht nur auf die Calciumaluminat-, sondern auch auf die Calciumsilicate zu. Das neu gebildete Produkt ist ein Calcium-silicium-aluminiumsulfat-Hydrat (Thaumasit). Es findet neben der Zerstörungswirkung, die vom Ettringit her bekannt ist, zusätzlich noch eine Umwandlung des Bindemittels durch chemische Reaktion statt. Die durch die Spritzmittel zugegebenen Alkalien bzw.  $\text{CO}_2$ -Anteile dürften den Bildungsvorgang wesentlich begünstigen. Eine wichtige Erkenntnis ist, daß sich diese Phase nur über Ettringit (2) bildet bzw. daß dieser als Startprodukt vorliegen muß.

Bei den untersuchten Schäden an Stollenauskleidungen ließ sich ein eindeutiger Zusam-

menhang zwischen verwendetem Zement und auftretender Zerstörung feststellen. Normale Portlandzemente bzw. Portlandzemente mit puzolanischen oder latenthyaualischen Beimischungen niedriger Konzentration waren immer Ziele des Sulfatangriffs. Ein gewisser Effekt ließ sich auch von der Qualität des aufgebrauchten Spritzbetons ableiten. Dichte Betone eines bestimmten Bereiches zeigten in der Regel geringeren Angriff als Betone gleicher Zusammensetzung mit Verdichtungsfehlern. Überall dort, wo in der Praxis  $\text{C}_3\text{A}$ -armer Zement verwendet wurde, waren auch bei längerem Sulfatangriff und stellenweise schlechtem Betongefüge keine Schäden feststellbar.

Für die Praxis bedeutet dies nun, daß für die Herstellung eines sulfatbeständigen Spritzbetons zunächst zwei Punkte beachtet werden müssen, nämlich

- dichtes Betongefüge und
- die Verwendung eines hochsulfatbeständigen Zementes.

Da im Zuge der Errichtung von verschiedenen Tunnelbauten (z.B. Bosrucktunnel, Walgautunnel, U-Bahn Wien) in Österreich oft auch Strecken mit stark sulfathaltigen Wässern angefahren wurden, sind im Zuge einer systematischen Untersuchung im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens mit Dipl.-Ing. Dr.techn. H. Huber (Straßenforschungsprojekt Nr. 968) (3) die genauen Kriterien für die Herstellung eines sulfatbeständigen Spritzbetons - Auswahl des geeigneten Zementes bei hinreichender Beschleunigungswirkung - geprüft worden.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM

### 2.1 Zement und Erstarrungsbeschleuniger

Aus allen in Österreich erhältlichen Zementtypen ist jeweils ein repräsentatives Muster ausgesucht worden, und dieses hinsichtlich seines Reaktionsverhaltens mit verschieden zusammengesetzten Spritzmittelhilfen auf Aluminatbasis in unterschiedlicher Konzentration untersucht worden. Die verschiedenen Zemente unterschieden sich im  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalt. Nicht untersucht wurden Hochofenzemente, da diese in Österreich nicht für Spritzbetonarbeiten verwendet werden.

Als Beschleuniger ist auch Wasserglas ausgeklammert worden, da dieses Zusatzmittel kein zusätzliches Aluminat einführt. Vorversuche haben allerdings ergeben, daß mit HS-Zementen

günstige Sulfatbeständigkeit erzielbar ist. Werthmann (4) berichtete in letzter Zeit über Spritzbetone mit Wasserglas, die zum Teil in sulfathaltigen Strecken verwendet wurden.

Von den genannten Zementtypen sind Abbindeverhalten und Spritzfähigkeit in Praxisversuchen ermittelt worden. Darüberhinaus ist in verschiedenen Labortests die Sulfatbeständigkeit der ausgewählten Zemente mit und ohne Zusatzmittel sowie die Sulfatbeständigkeit einiger, in der Praxis hergestellter Spritzbetone beurteilt worden. So war es möglich, zusätzlich zu einem neu entwickelten Schnelltest (5), mit dem rasche Aussagen über die Sulfatbeständigkeit möglich sind, auch Langzeiterfahrungen zu sammeln und beide Ergebnisse zu korrelieren.

Im Folgenden sollen nun die wesentlichsten Punkte aus den vielen Versuchen vorgestellt werden.

## 2.2 Abhängigkeit des Erstarrungsverhaltens vom $C_3A$ -Gehalt

Betrachtet man zunächst die Erstarrungsbeschleunigung der Zemente mit unterschiedlichem  $C_3A$ -Gehalt unter dem Einfluß eines Zusatzmittels, so ergibt sich eine eindeutige Abhängigkeit der notwendigen Dosierung vom  $C_3A$ -Gehalt des Zementes. Mit Abnahme dieses Gehaltes nimmt der Spritzmittelbedarf zu. Die Zunahme hängt von der Art der Dosierung - flüssig/fest - und der Konzentration der reaktiven Komponente - in der Regel das lösliche  $Al_2O_3$  im Zusatzmittel - ab. Die Ergebnisse einiger Versuche dieser Untersuchung sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt und zwar für je zwei verschiedene Zusatzmittel in flüssiger und fester Form. Dabei wurden jeweils zwei Mittel mit unterschiedlich reaktiven Anteilen verwendet. Es zeichnet sich der bereits erwähnte Effekt deutlich ab, daß mit Abnahme des  $C_3A$ -Gehaltes eine höhere Dosierung zur Erreichung eines bestimmten Beschleunigungseffektes notwendig wird.

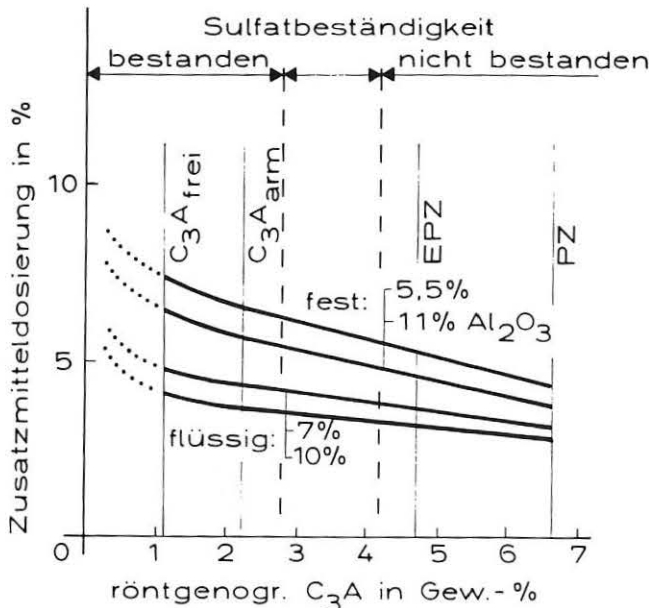


Abb. 1. Notwendige Dosierung von verschiedenen Zusatzmitteln (fest/flüssig) mit unterschiedlichem reaktiven Anteil (wasserlösliches  $Al_2O_3$ ) bei Zementen mit verschiedenem  $C_3A$ -Gehalt. Angestrebt wurde gleiches Beschleunigungsverhalten.

Interessanterweise ergeben sich bei den Mitteln auf flüssiger Basis geringere Zunahmen als bei jenen, die in fester Form zugegeben werden.

Die in Abbildung 1 dargestellten Konzentrationen der verschiedenen Zusatzmittel liefern aber kein eindeutiges Bild von der effektiven Wirkung des Zusatzmittels. Besser ist es, den wirksamen  $Al_2O_3$ -Gehalt des Beschleunigers auf den Zement-Gehalt umzurechnen. So zeigt sich bei beiden Spritzmittelvarianten - unabhängig ob flüssig oder fest - eine Abnahme der notwendigen Dosierungshöhe mit geringer werdender Konzentration an  $Al_2O_3$ . Dies entspricht im Prinzip einer Verdünnung des Beschleunigers. Ist bei einem festen Spritzmittel ein reaktiver Anteil von 5,5%  $Al_2O_3$  vorhanden, beträgt der auf den Zement (z.B.  $C_3A$ -arm) umgerechnete  $Al_2O_3$ -Gehalt nur 0,35%. Bei einem höher konzentrierten Mittel (11%  $Al_2O_3$ ) gleicher Zusammensetzung sind für gleiche Beschleunigungswirkung aber 0,62%  $Al_2O_3$  wirksam. Vergleicht man die Situation fest/flüssig am Beispiel des reaktiven Anteiles von ca. 10%, so kommt hier auch eine deutliche Absenkung beim flüssigen Zusatzmittel zum Ausdruck. Es fällt nämlich dieser Wert von 0,62% (fest) auf 0,37% (flüssig) reaktives  $Al_2O_3$ , bezogen auf den Zement, ab.

In dem Diagramm zeigt sich, daß für Zemente mit niedrigeren  $C_3A$ -Gehalten der für die Beschleunigung notwendige wirksame Anteil stark zunimmt. Bei  $C_3A$ -armen bzw. -freien Zementen ist der für die Beschleunigung notwendige  $Al_2O_3$ -Gehalt höher als bei  $C_3A$ -reichen. Da aber der vom Spritzmittel zugeführte  $Al_2O_3$ -Gehalt empfindlicher auf die Sulfatbeständigkeit reagiert als der vom Zement zugeführte, wirkt sich dies ungünstig auf die gesamte Sulfatbeständigkeit aus.

## 2.3 Einfluß des $C_3A$ -Gehaltes auf die Sulfatbeständigkeit

Aus den verschiedenen Langzeituntersuchungen und Untersuchungen an Spritzbetonen, die unter definierten Bedingungen hergestellt und in konzentrierter Gipslösung gelagert wurden, ergibt sich folgendes Bild:

Betone ohne Spritzmittelzusatz aus normalen Portlandzementen mit hohem  $C_3A$ -Gehalt ergeben langfristig immer, Zemente mit mittlerem  $C_3A$ -Gehalt (z.B. EPZ) oft, und solche mit  $C_3A$ -Gehalten unter 3% ( $C_3A$ -arm bzw. -frei) keine Sulfatschäden. Bei Betonen mit Beschleunigern sind immer schlechtere Sulfatbeständigkeiten zu erwarten als bei Betonen ohne. Ergebnisse von drei Zementen mit verschiedenen  $C_3A$ -Gehalten, die in diese Gruppe einzureihen sind, sind in den Abbildungen 2 a - c graphisch dargestellt. Über das Verfahren selbst sei auf die Veröffentlichung (6) verwiesen. Neben der unterschiedlichen Reaktionsneigung der einzelnen Zementtypen mit Sulfat geht aus den Diagrammen der Einfluß der Sulfataufnahme von der zugegebenen Menge  $Al_2O_3$  hervor. Die Schnellprüfungen wurden an Leimkörpern mit einem W/Z-Wert von 0,6 vorgenommen. Die gesamte Spritzmitteldosierung wurde mit 4% konstant gehalten und nur der reaktive  $Al_2O_3$ -Gehalt, bezogen auf den Beschleuniger, variiert. Er betrug 0% bei Serie I, 5,5% bei Serie II, 9,3% bei Serie III und 10,9% bei Serie IV. Die Auslagerung erfolgte in konzentrierter Gipslösung. Da sich gegen Natriumsulfat andere Reaktionsmechanismen ergeben können, spiegelt diese Methode die Praxisbelastung besser wider. Die in den Diagrammen zu verschiedenen Zeiten eingetragenen Meßwerte ergeben die maximale Sulfatanreicherung in

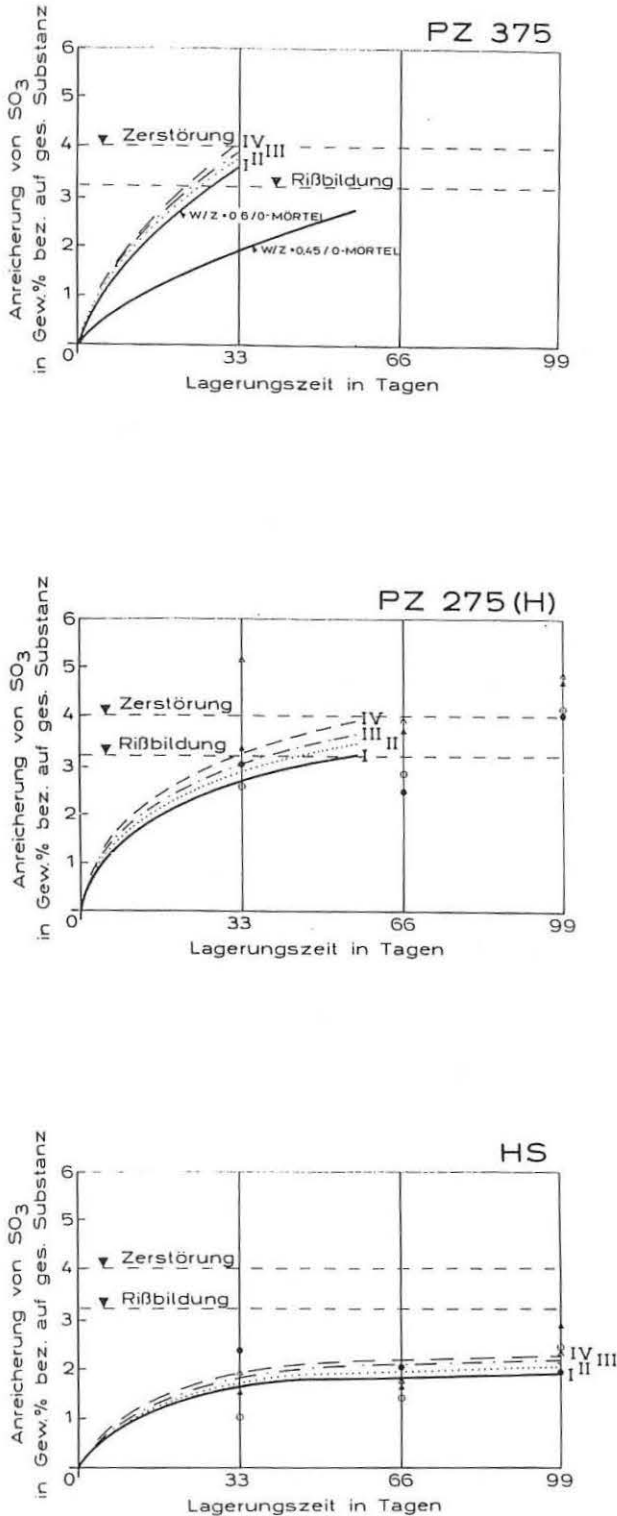


Abb. 2 a, b und c.

Maximale Sulfataufnahme über die Zeit bei Zementleimproben mit verschiedenen Beschleunigertypen (Dosierung 4 %) und teilweise unterschiedlichen W/Z-Werten.

I	= 0 %	$Al_2O_3$ = 0 %	(bez. auf Zement)
II	= 5,5 %	$Al_2O_3$ = 0,22 %	(bez. auf Zement)
III	= 9,3 %	$Al_2O_3$ = 0,372 %	(bez. auf Zement)
IV	= 10,9 %	$Al_2O_3$ = 0,436 %	(bez. auf Zement)

einer bestimmten Tiefe, die in der Regel zwischen 0,3 und 0,5 mm liegt. In größerer Tiefe nimmt die Sulfatanreicherung ab; ebenso tritt eine Abnahme gegen die äußere Schicht auf. Aus dem Kurvenverlauf dieser maximalen Anreicherung kann nach relativ kurzer Zeit ausgesagt werden, wie sich der untersuchte Zement mit und ohne Zusatzmittel hinsichtlich der Sulfatbeständigkeit verhält.

Die Zemente zeigen in der Grenzzone einen Anstieg des  $SO_2$ -Gehaltes zu frühen Reaktionszeiten. Zu Beginn der Reaktion wird demnach Sulfat aufgenommen. Diese Aufnahme ist bei sulfatbeständigen Zementen nach einer gewissen Reaktionszeit abgeschlossen. Es kommt zu keiner weiteren Anreicherung. Nicht sulfatbeständige Zemente zeigen bei Anreicherung sehr hohe Gehalte, die zur Zerstörung führen. Dabei kommt es im Frühstadium zur Rißbildung am Probekörper, später tritt eine vollkommene Zerstörung auf (Abb. 4). Versuche mit Proben aus Spritzbetonen, die aus Bauwerken entnommen und in konzentrierter Gipslösung gelagert wurden, ergaben hinsichtlich der Langzeitlagerung eine relativ gute Korrelation zu der Leimschnellprüfung.

Eine schematische Darstellung der maximalen Sulfatanreicherung der untersuchten Zemente geht aus der Abbildung 3 hervor. Dabei zeigt sich, daß Zemente ohne Zusatzmittel mit einem  $C_3A$ -Gehalt über 3,5 % durch Anreicherung von  $SO_2$  in die rißanfällige Zone kommen. Dies sind alle in Österreich erhältlichen Portlandzemente, Portlandzemente mit Hochofenschlacke, Flugasche oder Trass, Eisenportlandzement-Typen.

Bei Zementen mit einem  $C_3A$ -Gehalt unter 3,2 % war kein Angriff an der Oberfläche feststellbar. Die Zugabe von Beschleunigungsmitteln auf Aluminatbasis wirkt sich auf die Sulfataufnahme negativ aus. Dies kommt zum Beispiel beim PZ 275 (H) zum Ausdruck (Abb. 4). Das bedeutet, daß mit Zugabe des Beschleunigers die Sulfatbeständigkeit schlechter wird.

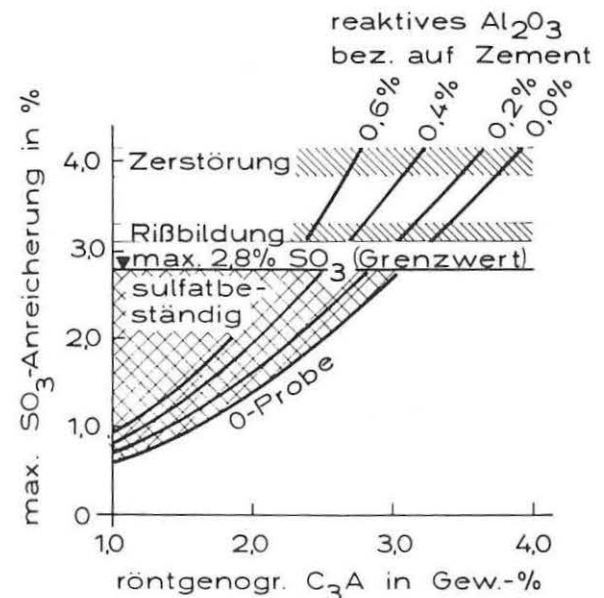


Abb. 3. Grenzwertkurve zwischen sulfatbeständigen (schraffierter Bereich) und nicht sulfatbeständigen Zementen. Der Grenzwert liegt bei 90 % des Wertes, der zur Rißbildung führt.

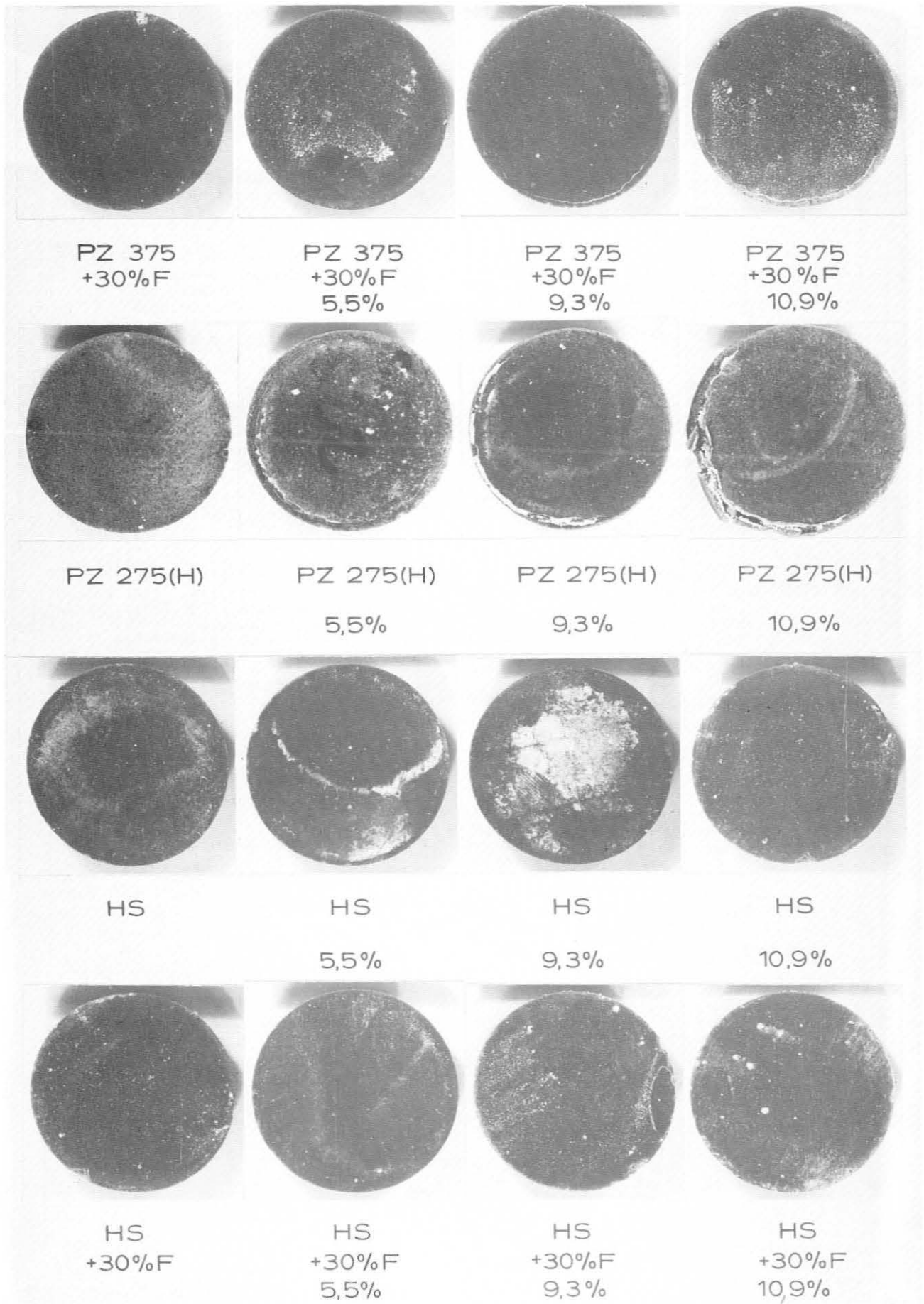


Abb.4. Probekörper von Zement PZ 375, PZ 275 (H) und HS (Durchmesser 50 mm) der beschriebenen Serien I- IV nach 99 Tagen Lagerung in konzentrierter Gipslösung.

Um hier trotz Zusatz eines Erstarrungsbeschleunigers einen sulfatbeständigen Spritzbeton zu erhalten, muß der  $C_3A$ -Gehalt des Zementes gesenkt werden. Damit man der Ausgangssituation (Zement ohne Beschleuniger) vergleichbare Verhältnisse erhält, muß bei Zugabe von 0,6 % reaktivem  $Al_2O_3$  - das entspricht einer Dosierung von 6 % eines Zusatzmittels mit 10 %  $Al_2O_3$ -Anteil - der  $C_3A$ -Gehalt des Zementes auf etwa 2,3 % gesenkt werden. Dies bedeutet, daß je 0,1 %  $Al_2O_3$ -Gehalt im Beschleuniger (bezogen auf den Zement) der  $C_3A$ -Gehalt des Zementes um 0,15 % gesenkt werden sollte (Abb.3).

Um umgekehrt eine Beschleunigung mit einem vertretbarem  $Al_2O_3$ -Gehalt im Zusatzmittel zu erhalten, ist im Zement ein geringer Anteil an  $C_3A$  wünschenswert. Damit der Dosierungsanteil des Beschleunigers nicht zu hoch wird, haben sich Zemente mit  $C_3A$ -Gehalten (röntgenographisch bestimmt) von 2 - 2,8 % bewährt.

### 3. ZUSAMMENFASSUNG

Die Sulfatbeständigkeit des Spritzbetons wird durch 3 Faktoren bestimmt:

- Der  $C_3A$ -Gehalt des Zementes und der  $Al_2O_3$ -Gehalt der puzzolanischen Beimahlung (Hochofenschlacke bzw. Flugasche)
- Der Anteil an wasserlöslichem  $Al_2O_3$  im Zusatzmittel
- Die Dichtigkeit des Spritzbetons

Die Laboruntersuchungen haben gezeigt, daß für die Erzielung eines sulfatbeständigen Spritzbetons eine Beschränkung des  $C_3A$ -Gehaltes des Zements auf höchstens 3 % (röntgenographische Bestimmung) notwendig ist. Gleichzeitig muß der Einfluß des Zusatzmittels berücksichtigt werden. Für je 0,10 %  $Al_2O_3$ -Gehalt (bezogen auf Zement) im Zusatzmittel sollte der  $C_3A$ -Gehalt im Zement um 0,15 % reduziert werden. Zemente mit  $C_3A$ -Gehalten unter 1,5 % sollten nicht verwendet werden. PZ-Zemente mit und ohne Flugaschen- oder Schlackenbeimischung sind als nicht sulfatbeständig einzureihen.

Die Verwendung von  $C_3A$ -armen Zementen bringt für die Herstellung des Spritzbetons auf der Baustelle die Nachteile einer geringeren Festigkeitsentwicklung. Diese können zum größten Teil durch eine exakte Optimierung des Gemisches aus Zement und Zusatzmittel beseitigt werden. Neben der Verwendung eines  $C_3A$ -armen Zementes sind für die Herstellung eines baustellengerechten, sulfatbeständigen Spritzbetons folgende Maßnahmen notwendig:

- Verwendung von Spritzhilfen mit möglichst geringem Gehalt an wasserlöslichem  $Al_2O_3$  (auf alle Fälle unter 10 %)
- Exakte Vermischung von Zement und Zusatzmittel (vorteilhaft flüssige Spritzhilfen oder Fertigtrockenmörtel)
- Bindemitteldosierung mindestens  $390 \text{ kg/m}^3$  (wasserundurchlässiger Beton)
- Zuschläge 0/11 mm im Sieblinienbereich B

Vor Beginn der Spritzbetonherstellung ist die Sulfatbeständigkeit der zur Anwendung kommenden Kombination aus Zement und Zusatzmittel nachzuweisen.

### LITERATUR

1. Lukas, W.: Betonzerstörung durch  $SO_3$ -Angriff unter Bildung von Thaumasil und Woodfordit. Cement and Concrete Research, Vol.5, S. 503 - 515 (1975).
2. Lukas, W., Röck, R., und Hagleitner, G.: Energiedispersiv-analytische Untersuchungen an Ettringiten in Zementleimproben. Zement - Kalk - Gips, Nr.7, S.328 - 330 (1977).
3. Sulfatbeständiger Spritzbeton für Straßentunnelauskleidungen. Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Wien, Heft 192 (1982).
4. Werthmann, E.: Festigkeiten von Spritzbeton, der 20 Jahre sulfathaltigen Wässern ausgesetzt war. Zement und Beton, 28/4, S.111 (1983).
5. Lukas, W.: Modellmäßige Vorstellung über den Mechanismus des Sulfatangriffs auf Proben aus verschiedenen Zementen. Zement und Beton, 25/1, S.17 - 21 (1980).
6. Lichtner, K.: Die Anwendung des Torkretier-Verfahrens bei Ausbesserungsarbeiten. Neue Bauwelt 4, S.406 - 408 (1969).
7. Linder, R.: Technologie des Spritzbetons. Beton- und Stahlbetonbau, S. 40 - 45 und S. 63 - 67 (1963).
8. Schwanda, F.: Spritzbeton im Stollen- und Tunnelbau. Beton 10 (1960).