

# Microsilica-Betone unter Sulfatangriff

Autor(en): **Scherer, Josef / Fidjestøl, Per**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **113 (1995)**

Heft 10

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78679>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Josef Scherer und Per Fidjestøl

# Microsilica-Betone unter Sulfatangriff

**Betone sind oft Sulfatangriffen ausgesetzt. In der Praxis werden dementsprechend Zemente mit erhöhter Sulfatresistenz eingesetzt. Verschiedene Untersuchungen zeigen jedoch, dass ein gewöhnlicher, mit Microsilica vergüteter Portlandzement dem sulfatresistenten Zement gleichwertig, teilweise sogar überlegen ist.**

Im Untertagebau sowie in Abwasseranlagen sind Betone oft Sulfatangriffen ausgesetzt. Daher werden in der Praxis Zemente mit erhöhter Sulfatresistenz eingesetzt. Die Untersuchungen von Fiskaa 1973 sowie Mather 1980 zeigten jedoch, dass bei Sulfatangriffen ein gewöhnlicher Portlandzement, der mit Microsilica vergütet wird, dem sulfatresistenten Zement gleichwertig, teilweise sogar überlegen ist. Zur Überprüfung wurden von den Autoren Betonproben mit folgenden Bindemittelvarianten erstellt:

- Portlandzement
- Portlandzement/Microsilica
- Mischzement (PC + 20% eingemahlene Flugasche)

- Mischzement/Microsilica
- Zement mit erhöhter Sulfatresistenz

Diese Proben wurden in eine Natriumsulfatlösung (1500 mg SO<sub>4</sub>/l) eingelagert und werden nun in einem Langzeittest untersucht. In diesem Beitrag werden die ersten 3jährigen Zwischenergebnisse veröffentlicht. Die Untersuchungen werden im Elkekemigenen Labor in Kristiansand durchgeführt. Das Elkem Microsilica fällt als Filterstaub bei der Ferrosilizium- bzw. Silicium-Metall-Herstellung aus und ist ein in Deutschland zugelassenes Betonzusatzstoff.

## Versuchsordnung

Die Versuchsordnung ist aus Tabelle 1 ersichtlich. Die Betone wurden im Ehrlich-Tellermischer-60-1 gemischt. Nach 24 Stunden waagrechter Lagerung in den Formen erfolgte die Wassereinlagerung während 28 Tagen. Drei Proben (4/12/20) wurden nur 2 Tage im Wasser gelagert und danach bei 50%iger relativer Luftfeuchtigkeit und 20°C vorgehalten.

Nr.	Ze-ment-art	Ze-ment	Micro-silica kg/m <sup>3</sup>	Was-ser	Sand	Kies	Luft-poren-mittel	Nach-behand-lung	28-Tage-Würfel-druckfestigkeiten MP
1	PC	200	0.0	160					22.0
2	PC	450	0.0	225					50.0
4	PC	450	0.0	225				minimal	54.5
6	PC	450	0.0	225			Ja		42.3
7	PC	200	10.0	160					28.3
8	PC	450	22.5	225					62.1
9	PC	200	20.0	160					34.3
10	PC	450	45.0	225					65.9
12	PC	450	45.0	225				minimal	70.9
14	PC	450	45.0	225			Ja		65.7
15	PC	200	40.0	160					40.0
16	PC	450	90.0	225					70.9
17	MC	200	20.0	160					32.5
18	MC	450	45.0	225					64.9
20	MC	450	45.0	225				minimal	67.0
23	MC	200	0.0	160					21.0
24	MC	450	0.0	225					52.2
25	SR	200	0.0	160					21.4
26	SR	450	0.0	225					56.5

Zementart: PC: Portlandzement  
 MC: Mischzement (PC+20% eingemahlene Flugasche)  
 SR: Zement mit erhöhter Sulfatbeständigkeit

Tabelle 1. Ausgangsmischungen für die Versuche

## Spezifikation der Bindemittel

Die Spezifikationen der Bindemittel sind aus den Tabellen 2 bis 5 ersichtlich.

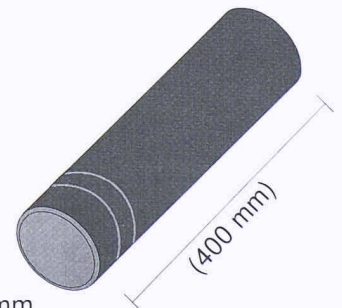
## Spezifikationen Aggregate/ Wasser/Zusätze

Die Spezifikationen betreffend Aggregate/Wasser/Zusätze lauten:

- Kies: Es wurde ein gebrochener Granit bis 16 mm Korn verwendet.
- Sand: Natürliche Gletscherablagerung
- Wasser: Trinkwasser Kristiansand, Norwegen
- Betonverflüssiger: 40%iges Naphtalin-Sulfonat (1-2,5% Dosierung vom Zementgewicht).
- LP-Mittel: 20%iges Tensid (0,15% Dosierung vom Zementgewicht).

## Prüfverfahren

Aus den 19 Versuchsmischungen wurden Probezylinder mit 100 mm Durchmesser und 400 mm Länge gegossen (Bild 1).



Ø 100 mm

Bild 1. Probezylinder

Zur Vermeidung von «Kanteneffekten» wurden die Enden der Probezylinder mit Epoxy beschichtet.

## Bestimmung des Zerstörungsgrades

Gemessen wird die Änderung des Zylinderdurchmessers nach Einlagerung in Natriumsulfatbad, mit Drahtbürstmethode. Zu jedem Messzeitpunkt wird vom 400 mm langen Zylinder eine Scheibe abgetrennt. Mit der Spezialvorrichtung (vgl. Bild 2) wird der beschädigte Beton unter einem standardisierten Druck und in definierter Zeit gebürstet. Der neue verminderte Radius des Zylinders wird ausgemessen und verglichen.

Hinweis: Die Proben werden aufbewahrt, so dass ein vollständiger Nachweis für allfällige weitere Analysen und Prüfungen zur Verfügung steht.

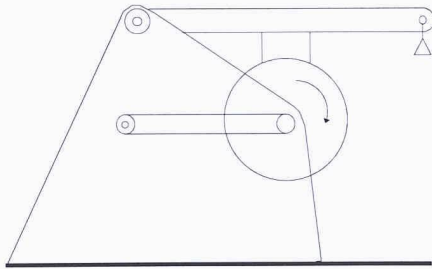


Bild 2. Drahtbürstmethode

**Visuelle Inspektion**

Da sich die Drahtbürstmethode infolge öfterer Volumenzunahme der Probezylinder als ungeeignet erwies, wurde diese durch eine visuelle Inspektion ergänzt.

Je nach Grad der Oberflächenzerstörung wurden die Proben von 1 bis 10 zensiert, wobei 1 keinen sichtbaren Angriff bedeutet und 10 für sehr schwere Angriffe steht. Unter schweren Angriffen (10) ist ein Absplittern der gesamten Oberfläche zu verstehen. Ein Elektronen-Mikroskop wurde zur Bestätigung der visuellen Inspektion beigezogen (vgl. Bild 3 und 4).

**Ergebnisse**

Tabelle 6 zeigt die visuelle Beurteilung der 19 Mischungen nach 1000 bzw. 1200 Tagen Einlagerung der Zylinder in der Natriumsulfat-Lösung (1500 mg SO<sub>4</sub>/l).

Bild 5 und Bild 6 zeigen die Änderung der Zylinderdurchmesser nach der Einlagerung im Natriumsulfatbad. Die Ermittlungen mit der Drahtbürstmethode waren problematisch, da teilweise Volumenzunahmen festgestellt wurden.

Es wurde beobachtet, dass Proben mit tiefen W/Z-Werten tendentiell weniger tiefe Abplatzungen zeigten als Proben mit hohen W/Z-Werten. Weiter wurde festgestellt, dass sich bei MS-vergüteten Proben harte Ablagerungen an der Oberfläche bildeten. Diese Beobachtungen werden weiter im Detail untersucht.

**Einfluss des Zementes**

Bild 7 zeigt die Auswirkung des Zementes sowie der Zementdosierung unter Sulfatangriff. Den in Bild 7 aufgezeigten Proben wurde kein Microsilica beidosiert. Die Folgerung, dass der Zement mit erhöhter Sulfatresistenz anfälliger auf Zerstörungen (Abplatzungen) war als der normale Portland- sowie der Mischzement, ist erstaunlich.

**Einfluss des Microsilica-Gehaltes**

Bild 8, 9 und 10 zeigen den Microsilica-Einfluss auf Portland- sowie Mischzemente

PC:	Typische Werte des norwegischen Portlandzementes	
%	SiO <sub>2</sub>	20.56
%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.76
%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.28
%	CaO	63.28
%	MgO	2.62
%	SO <sub>3</sub>	3.22
%	Alk.	1.12
%	C <sub>3</sub> S	55.74
%	C <sub>2</sub> S	17.18
%	C <sub>3</sub> A	7.08
%	C <sub>4</sub> AF	9.97
Blaine	m <sup>2</sup> /kg	305

Tabelle 2. Spezifikationen des norwegischen Portlandzementes

Elkem Microsilica		
%	H <sub>2</sub> O	0.8
%	L.O.I. 950 °C	1.59
%	SiC	0.92
%	tot. C	1.47
%	tot. S.	0.08
%	SiO <sub>2</sub>	6.0
%	Fe	0.07
%	Al	0.20
%	Ca	0.13
%	MG	0.12
%	K	0.43
%	Na	0.10
%	Ti	0.002
%	Mn	0.007
%	Ni	0.005
%	Pb	0.001
%	Zn	0.001
%	P	0.060
%	Cl	0.05
kg/m <sup>3</sup>	Dichte	291.0
m <sup>2</sup> /g	Spez. Oberfläche	24.0

Beurteilungskriterien zu Tabelle 6:

- Keine Zerstörungen leichte Farbänderungen
- Gesamte Probe farblich verändert
- 1 bis 2 Absplitterungen (D = 5 bis 10 mm)
- Mehrere Absplitterungen
- Mehrere Absplitterungen sowie eine abgeplatzte Stelle
- Mehrere abgeplatzte Stellen
- Mehrere grossflächige abgeplatzte Stellen
- Ganze Probe skelettiert und teilweise zersplittert
- Ganze Probe zersplittert
- wie 9, jedoch zusätzliche neue Bruchstellen

Tabelle 6. Visuelle Beurteilung der Prüfkörper

SR:	Typische Werte des norwegischen Zementes mit erh. Sulfatbeständigkeit	
%	SiO <sub>2</sub>	22.02
%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.54
%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.86
%	CaO	64.07
%	MgO	1.53
%	SO <sub>3</sub>	2.23
%	Alk.	0.65
%	C <sub>3</sub> S	56.40
%	C <sub>2</sub> S	20.60
%	C <sub>3</sub> A	1.17
%	C <sub>4</sub> AF	14.80
Blaine	m <sup>2</sup> /kg	315

Tabelle 3. Spezifikationen des norwegischen Portlandzementes mit erhöhter Sulfatbeständigkeit

Flugasche (20 % in PC eingemahlen bei Mischzement)		
%	SiO <sub>2</sub>	65.60
%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.54
%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.84
%	CaO	1.71
%	MgO	0.98
%	K <sub>2</sub> O	1.37
%	Na <sub>2</sub> O	1.34
%	Alk.	0.86
%	C	2.7

Tabelle 5. Spezifikationen eingemahlener Flugasche

Tabelle 4. Spezifikationen von Microsilica

Nr. Mischung	Einlagerung 1000 Tg	Einlagerung 1200 Tg
1	2	2.5
2	7.5	7.75
4	35	45
6	8	8.5
7	1.5	2.25
8	5.5	5.5
9	1	1.25
10	1.5	1
12	1.5	1.5
14	1	1.25
15	1	1
16	1	1
17	1	1
18	1	1
20	1	1
23	1.5	1.5
24	8	9
25	7	7.75
26	9	9.5

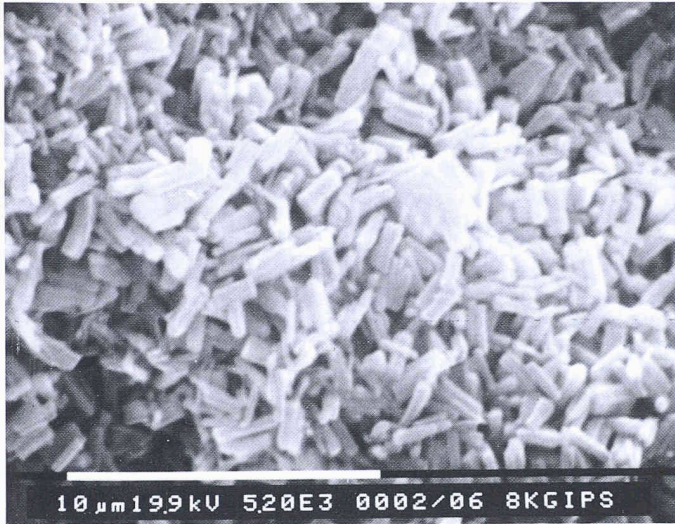


Bild 3. Gips auf Bruchoberfläche bei Mischung Nr. 8

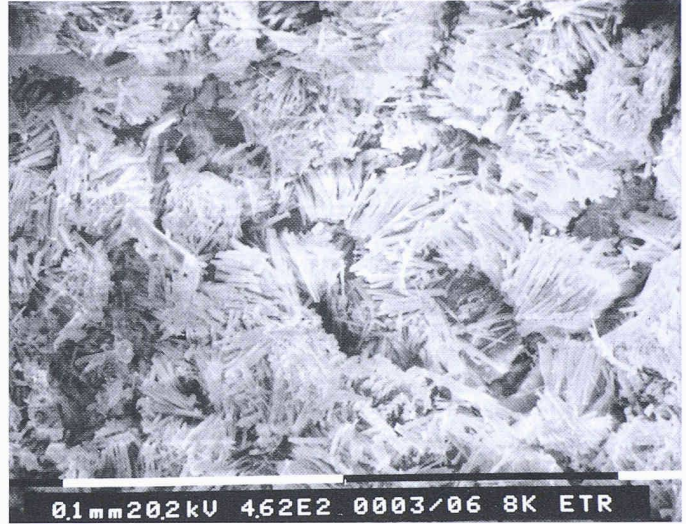


Bild 4. Ettringit in den Poren bei Mischung Nr. 8

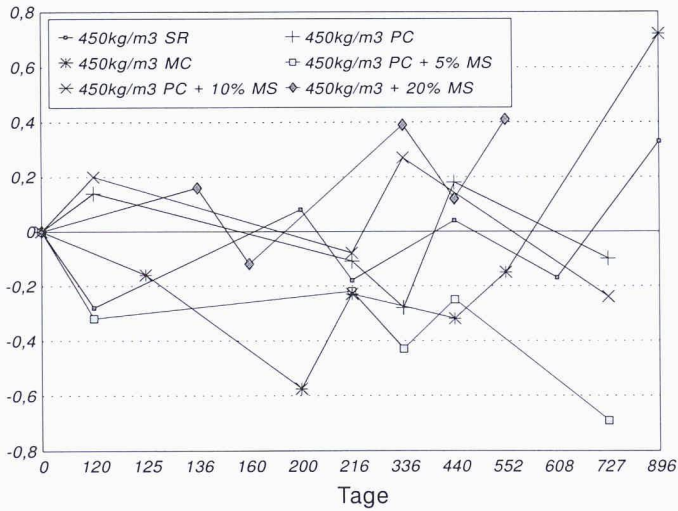


Bild 5. Änderung der Probezylinder bei hohem Zementgehalt (450 kg/m³)

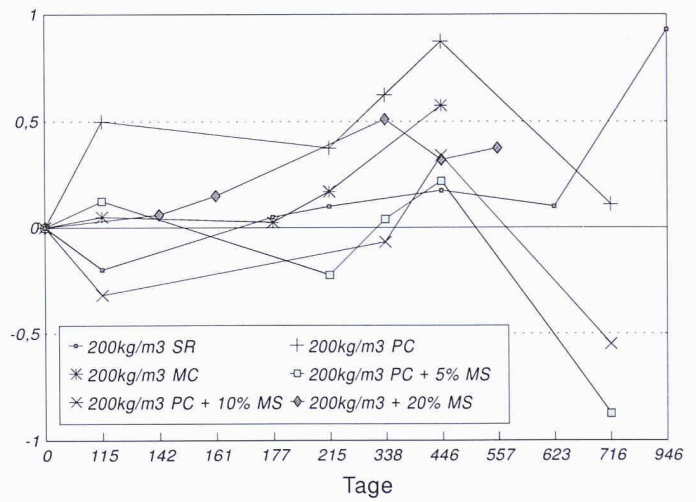


Bild 6. Änderung der Probezylinder bei tiefem Zementgehalt (200 kg/m³)

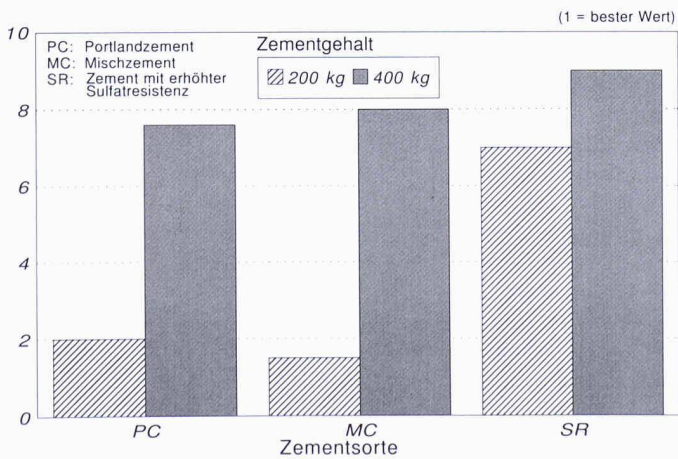


Bild 7. Auswirkung des Zementes und der Zementdosierung unter Sulfatangriff

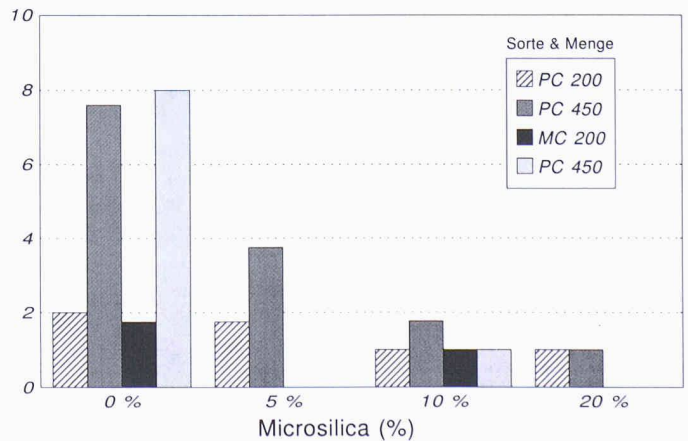


Bild 8. Einfluss des Microsilica-Gehaltes

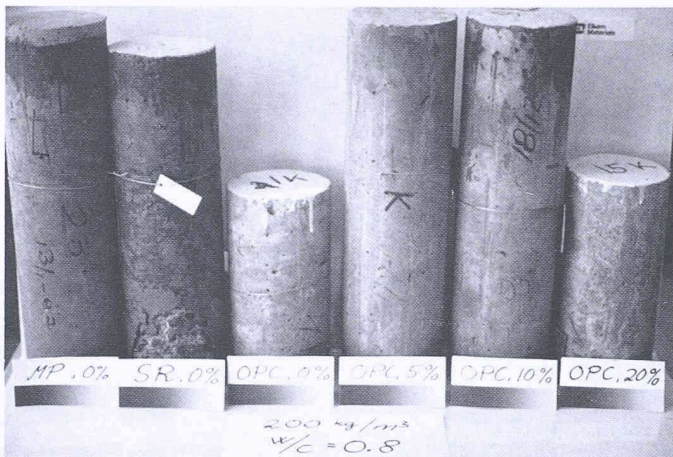


Bild 9. Proben mit tiefem Zementgehalt (200 kg/m<sup>3</sup>)

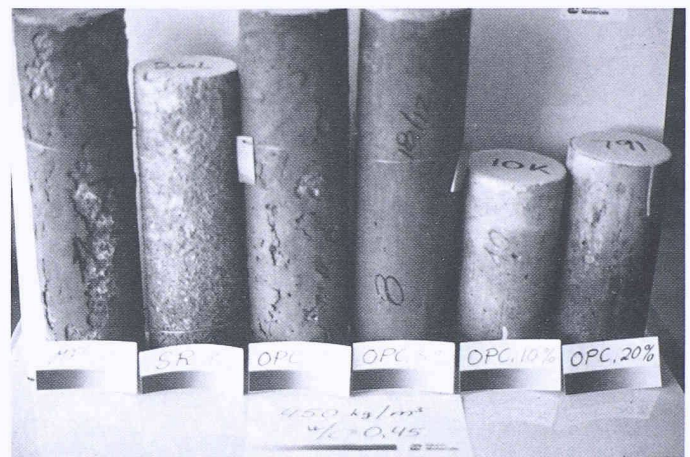


Bild 10. Proben mit hohem Zementgehalt (450 kg/m<sup>3</sup>)

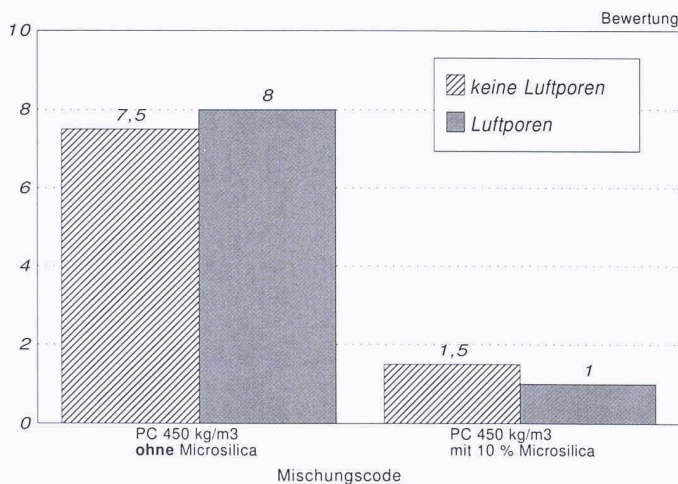


Bild 11. Einfluss des Luftporenmittels

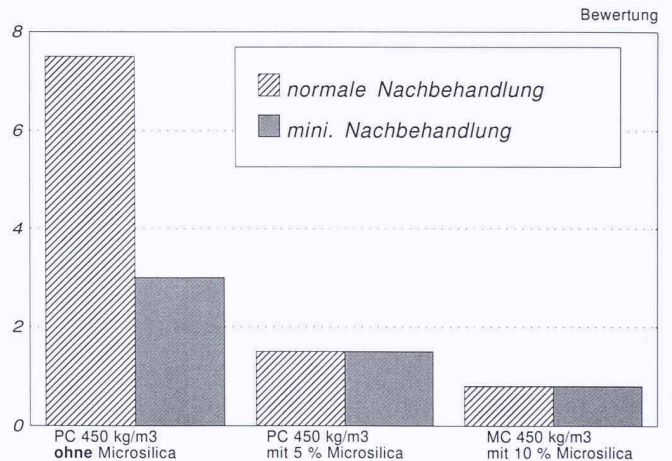


Bild 12. Einfluss der Nachbehandlung

bei unterschiedlichen Zementdosierungen (200 bzw. 450 kg/m<sup>3</sup>) unter Sulfatangriff.

**Einfluss des Luftporenmittels**

Den Mischungen 6 und 14 wurde ein Luftporenmittel (20%iges Tensid) beidoseiert. Bild 11 zeigt den Einfluss des LP-Mittels.

**Einfluss der Nachbehandlung**

Während die Mischungen in Normalfall 28 Tage in Wasser gelagert sind, wurden die Mischungen 4, 12 sowie 20 nach 2 Tagen dem Wassertank entnommen und bei 20°C-Temperatur und 50%iger Luftfeuchtigkeit gelagert. Bild 12 zeigt den Einfluss der Nachbehandlung. Diverse Details sind aus den Bildern 13 bis 17 zu entnehmen.

**Kommentar der Versuchsergebnisse**

Den Untersuchungen wurde ein relativ tiefer Sulfatgehalt (1500 SO<sub>4</sub> mg/l) zugrunde gelegt. Trotz der niedrigen Konzentration

zeigten einige Proben starke Schadenbilder. Während praktisch alle Proben während den ersten 20 Monaten den Angriffen standhielten, sind die grossen Schäden zwischen dem zwanzigsten und dreissigsten Monat aufgetreten. Die schlechte Widerstandsfähigkeit des Zementes mit erhöhter Sulfatbeständigkeit kam unerwartet. Eine mögliche Erklärung ist, dass bei derart niedriger Sulfatkonzentration die Ettringitbildung nicht wichtig scheint.

Ettringit wurde hauptsächlich in Hohlräumen (Bild 4) gebildet, während sich Gips auf den Bruchstellen (Bild 3) ablagerte. Wenn die Gipsbildung ein wichtiger Angriffsmechanismus ist, beeinflusst die C<sub>3</sub>-A-Menge die Widerstandsfähigkeit des Materials nicht, man kann also nicht erwarten, dass sulfatbeständiger Zement mit niedrigem C<sub>3</sub>-A-Gehalt sich besser verhält als normaler Zement.

Dieses Resultat steht im Gegensatz zur allgemeinen Praxis. Ein Grund für diesen Widerspruch kann die den Versuchen zugrunde gelegte niedrige Sulfatkonzentra-

tion sein. Somit stellt sich die Frage: Zu welchem Grad hängt die Art des kritischen Angriffs (Gips oder Ettringit) von der Sulfatkonzentration im aggressiven Medium ab? Wenn sich der Angriffsmechanismus je nach Natriumsulfatkonzentration ändert, ist die Wahl der Betonzusammensetzung im Untertagebau von ausschlaggebender Bedeutung.

**Wasser/Zementwert sowie Zementgehalt**

Anlässlich der Versuchsreihe erscheint ein tiefer Zementgehalt, trotz des erhöhten W/Z-Wertes, vorteilhaft. Dafür gibt es folgende mögliche Erklärungen:

- Erhöhte Porosität durch hohe W/Z-Werte kann bedeuten, dass zusätzlicher Platz für eine Expansion der Reaktionsprodukte bleibt, ohne dass es zu Abplatzungen kommt.
- Infolge der Wasserlagerung der Probe löst sich das Kalzium mit dem Wasser. Dies ist

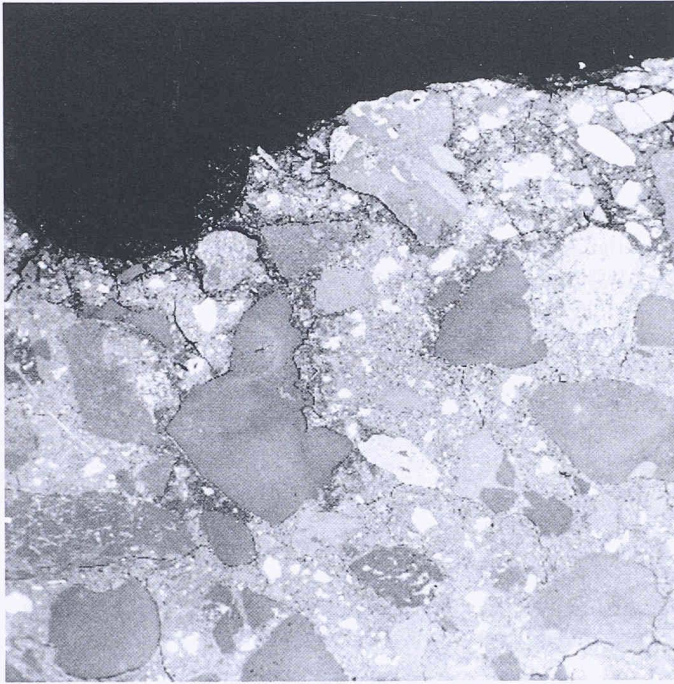


Bild 13.  
Sich im Gange befindender Sulfatgriff auf Mischung 2. Der Mischung 2 wurde kein Microsilica beigemischt. Die identische Ausgangsmischung mit 10% Microsilica (Mischung 10) lässt keinen Sulfat-griff erkennen

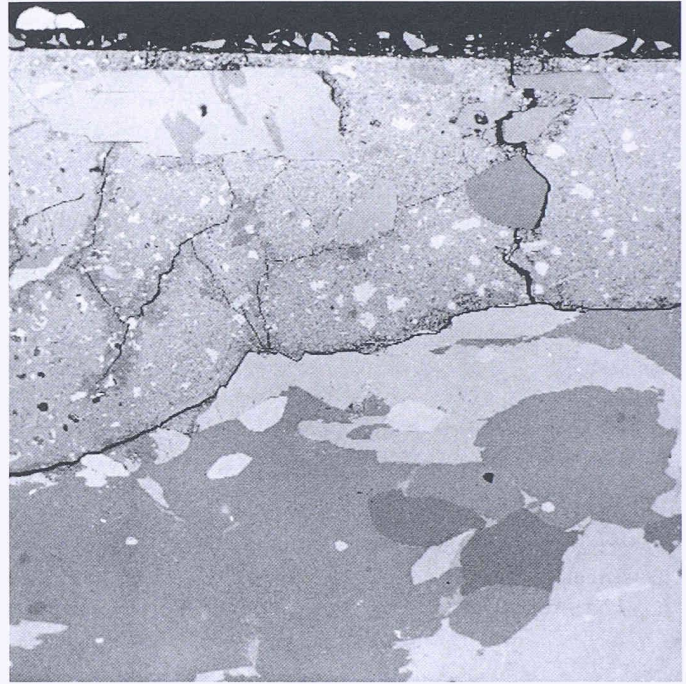


Bild 14.  
Mischung 10 lässt keinen Sulfatgriff erkennen. Als einzige Veränderung ist ein Kalziumdurchschlag an der Oberfläche bis zu einer Tiefe von 60 bis 80 zu erkennen

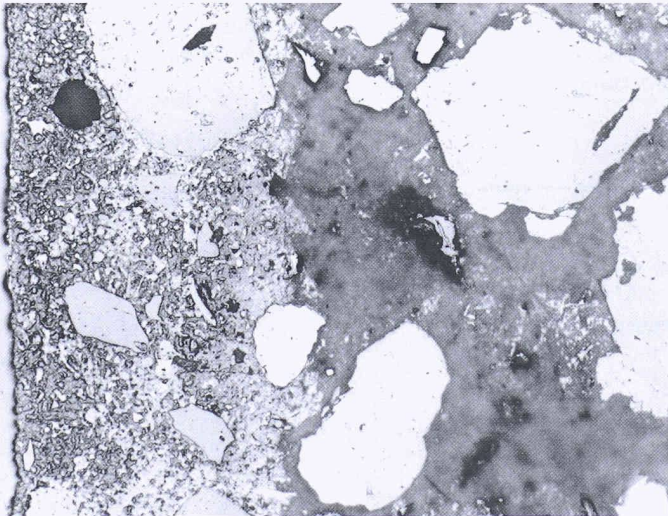
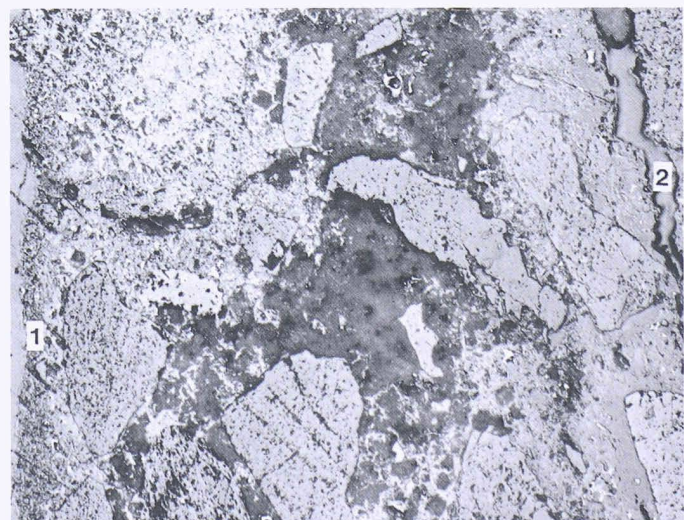
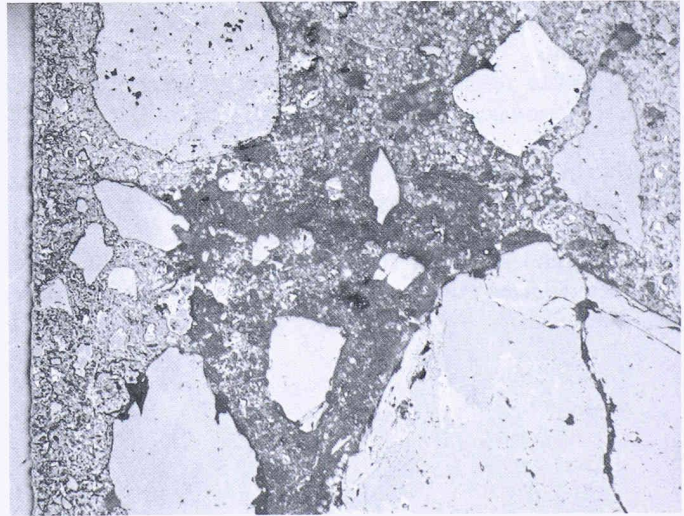


Bild 15.  
In Betonen mit tiefem Zementgehalt  $200 \text{ kg PC/m}^3$  und 10% Microsilica-Zusatz ist an der Oberfläche bis zu einer Tiefe von 0,4 mm der Kalziumdurchschlag typisch. Ansonsten sind keine Ablösungen ersichtlich

Bild 16.  
Auch bei Betonen mit hohem Zementgehalt  $450 \text{ kg PC/m}^3$  und 20% Microsilica-Zusatz ist der Kalziumdurchschlag an der Oberfläche ersichtlich. Ansonsten sind keine Ablösungen zu erkennen.

Bild 17.  
Die Probe 26 aus Zement mit erhöhter Sulfatbeständigkeit zeigt Abplatzungen an der Oberfläche (1), und etwa 1 mm tiefer entsteht bereits ein neuer Bruch (2).



speziell bei porösen Betonen (tiefe Zementgehalte, hohe W/Z-Werte) der Fall. Entsprechend steht mehr Volumen für die Expansionsprodukte zur Verfügung.

Der tiefe Zementgehalt reduziert die  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Menge. Dies reduziert die Gipsbildung.

Beim porösen Beton dringen die Sulfate tiefer in diesen ein. Dementsprechend werden die Angriffe auf ein grösseres Betonvolumen verteilt.

Bei tiefen W/Z-Werten und hohem Zementgehalt können grössere Mengen an Expansionsprodukten gebildet werden. Der verfügbare Raum jedoch ist bei hochwertigen Betonen geringer. Dies würde auf eine Tendenz zu vermehrten Abplatzungen im hochwertigen Beton hinweisen.

#### Microsilica

Die Resultate in Tabelle 2 und den entsprechenden Bildern zeigen die Vorteile der Microsilica-Beimischung. Eine Dosierung von 5-10 Gewichtsprozenten des Zements (Feststoff) scheinen ausreichenden Schutz zu bieten. Offensichtlich gilt diese Feststellung für normale Portlandzemente wie auch Mischzemente.

Microsilica reagiert in verschiedener Weise schützend gegen Sulfatangriffe:

Dank der pozzolaren Reaktion wird freier Kalk verbraucht. Eine 10%ige MS-Dosierung reduziert die freie Kalkmenge im Beton um rund 50%. Der restliche Kalk ist dank dem feineren Porensystem besser in Beton verteilt.

Microsilica verändert die Porenstruktur und damit die Wasserdurchlässigkeit des Betons massgeblich im positiven Sinne. Während das Gesamtvolumen der Poren konstant zu bleiben scheint, ändern sich Porengrösse und Verteilung: Grosse Poren werden in mehrere Kleinporen unterteilt. Die kleineren Porendurchmesser verringern die Wasserdurchlässigkeit des Betons.

Eine weitere Wirkung der veränderten Porengrössenverteilung muss ebenfalls in Betracht gezogen werden: Viele Poren können sogar zu eng werden, um grosse Sulfat-Ione in das Betoninnere zu lassen, was mit Beobachtungen von Oberflächenablagerungen an einigen Proben in Einklang steht. Die Ablagerungen könnten durch eine Reaktion zwischen Kalk aus dem Beton und Sulfat im Tank entstanden sein.

Der Schutzmechanismus durch Microsilica besteht aus:

Reduzierter Durchlässigkeit, die die Geschwindigkeit, mit der Sulfat in den Beton eindringt, verringert und unter Umständen sogar verhindert.

Verringerung des Gehaltes an ungebundenem Kalk, wodurch die Gipsmenge (und Ettringit), die sich bilden kann, reduziert wird.

#### Weitere Arbeit

Unter Berücksichtigung der etwas unerwarteten Resultate, besonders im Hinblick auf die Widerstandsfähigkeit sulfatbestän-

#### Literatur

[1]

*Fiskaa, O. H.*, 1973: Betong 1 anlunskiifer (Beton in Alaunschiefer). Norwegisches Geotechnisches Institut, Veröffentlichung Nr. 101, Oslo 1973. Norwegisch mit englischer Zusammenfassung, 12 Seiten.

[2]

*Mather, K.*, 1980: «Faktoren, die die Sulfatresistenz von Mörtel beeinflussen.» 7. intern. Konferenz zum Thema Zementchemie. Band IV. Paris 1980, Seiten 580-585

[3]

*Regourd, M.*, 1983: «Haltbarkeit, physio-/chemische und biologische Verfahren mit Bezug auf Beton».

[4]

*Sandvik, M.*, 1983: Silicabetong etc. FCB/SINTEF-Bericht STF 65 A83063, Trondheim 1983 (auf norwegisch).

digen Zements, wurden neue Untersuchungen begonnen. Diese werden einige der im laufenden Experiment unternommenen Tests duplizieren und ergänzende Tests, unter Berücksichtigung der Wirkung verschiedener Sulfatkonzentrationen, hinzufügen. Der Sinn des neuen Programmes ist es, die laufenden Resultate zu überprüfen und festzustellen, in welcher Weise der Angriffsmechanismus von der Konzentration von Sulfaten im Wasser abhängt.

Adressen der Verfasser:

*Josef Scherer*, Ing. HTL, für MBT (Schweiz AG), Vulkanstrasse 110, Postfach, 8048 Zürich  
*Per Fidjestøl*, Dipl. Ing., A/S Elkem Materials Faci, (N)