

# Untersuchung der Eigenschaften von Einpreßmörteln mit Zusatz von Silikatstaub

**T 1913**

T 1913

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Untersuchung der Eigenschaften von  
Einpreßmörteln mit Zusatz von Silikastaub.

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy  
Dr.-Ing. E.H. Ranisch  
Dipl.-Ing. F. Herschelmann

Juli 1987

Gefördert durch das Institut für Bautechnik Berlin  
(Geschäftszeichen: IV 1-5-433/85)

## 1. Einleitung

Seit Spannbeton mit nachträglichem Verbund hergestellt wird, arbeitet man auch an der Verbesserung des Einpreßmörtels. Hierbei ungelöste Probleme waren auch mit ein Argument für die Fortentwicklung der Vorspanntechnik ohne Verbund.

Das Einpressen und der Einpreßmörtel sind durch DIN 4227 Teil 5 genormt. Danach besteht Einpreßmörtel nur aus Zement, Wasser und einem zugelassenen chemischen Zusatzmittel, der Einpreßhilfe. Probleme beim Einpressen in Spannkäle können zwei Ursachen zugeordnet werden:

- ungünstiges Fließverhalten,
- Entmischungen.

Unzureichende Fließfähigkeit entsteht beispielsweise durch Ansteifen des Mörtels bei langen Verpreßzeiten oder zu hohe Temperaturen. Die Folge sind Verstopfer oder Hohlräume im Spannkanal.

Entmischungen oder Sedimentation (Wasserabsonderungen, Bluten) können in Spannkälen, besonders bei langen Verpreßwegen oder -zeiten auftreten und führen letztlich zu einem unvollständigen Umhüllen der Spannglieder. Durch beide Problemkreise, die auch miteinander verknüpft sind, kann der Korrosionsschutz des Spannstahls beeinträchtigt sein und damit die Lebensdauer des Bauwerks verkürzt werden. Fehlender Verbund zwischen Spannstahl und Beton setzt darüber hinaus das Sicherheitsniveau herab.

Untersuchungen an Bauwerken deuten darauf hin, daß das mangelfreie Verpressen der Spannkäle sehr häufig nicht gelingt.

Silikastaub (englisch: Condensed silica fume "CSF" oder Microsilica) besteht aus sehr kleinen kugelförmigen Partikeln aus amorphem Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$ . Die Teilchen sind etwa 100mal kleiner als die vom Zement. Ihre spezifische Oberfläche liegt bei  $20 \text{ m}^2/\text{g}$  und ist damit größer als die von Tabakrauch.

Die Zugabe von Silikastaub zu Beton verändert die Betoneigenschaften viel stärker als jeder andere Betonzusatzstoff. Besonders zwei Eigenschaften machen Silikastaub auch für Einpreßmörtel interessant:

1. Die große Oberfläche absorbiert Wasser und verhindert damit Sedimentation und Bluten.
2. Die Kugelform verbessert die Fließeigenschaften.

Die Forschungsarbeit sollte nun Antworten auf folgende Fragen geben:

1. Können durch Zugabe von Silikastaub die Eigenschaften von Einpreßmörtel für den Spannbetonbau verbessert werden?
2. Welche Prüfverfahren sind für Einpreßmörtel mit Silikastaub geeignet?
3. Welche Anforderungen sind an Silikastaub für Einpreßmörtel zu stellen und wie ist die Güteüberwachung zu organisieren?

## 2. Literaturlauswertung

### 2.1 Allgemeines

Die Wegbereitung für den Einsatz von Silikastaub im Betonbau wurde in Norwegen geschaffen, woher auch der größte Teil der insgesamt rd. 200 ausgewerteten Veröffentlichungen, Forschungs- und Prüfberichte, stammt. Das hängt damit zusammen, daß in Norwegen, mitverursacht durch gesteigertes Umweltbewußtsein, zuerst Silikastaub in größeren Mengen erzeugt wurde. Heute liegt Norwegen mit 140.000 t/Jahr (1984) an dritter Stelle der Welterzeugung (s. Anlage 1). Aus den führenden Silikastauberzeugungsländern USA (300.000 t/Jahr) und UDSSR (150.000 t/Jahr) ist eine Anwendung als Betonzusatzstoff bisher nicht bekannt geworden. Forschungstätigkeiten hierzu finden jedoch in den USA seit kurzem statt. \*)

Zwischen norwegischen und dänischen Laboratorien besteht ein enger Forschungsverbund, deswegen ist der zweitgrößte Teil der Veröffentlichungen dänischen Ursprungs. Weitere Veröffentlichungen stammen aus Kanada, USA, Frankreich, Schweden, Japan, Island, Italien, Belgien und Finnland.

Aus Deutschland gibt es nur unveröffentlichte Prüfberichte, die im Zusammenhang mit den Zulassungsverfahren für den Einpreßmörtel "Macflow" /65/ und die silikastaubhaltigen Betonzusatzstoffe "Fesil-Silica" /67/ und "Corrocem" /66/ stehen.

Bei "Macflow" handelt es sich um einen italienischen Einpreßtrockenmörtel mit Silikastaub. Der Zulassungsbescheid, der der Firma Dyckerhoff & Widmann AG erteilt worden war, endete am 30.09.85 und wurde im wesentlichen wegen Schwierigkeiten bei der Güteüberwachung nicht verlängert.

---

\*) Die bundesdeutsche Silikastaubproduktion betrug im Jahr 1984 6.000 t.

Der überwiegende Teil der ausländischen Literatur beschäftigt sich mit den Eigenschaften von Beton, der mit Zusatz von Silikastaub hergestellt wurde. Dies war auch das Hauptthema von fünf Tagungen /1/, /47/, /113/, /110/, /132/. Der Kenntnisstand auf diesem Gebiet ist hoch.

Zum Einsatz von Silikastaub für Einpreßmörtel gibt es außer den bereits erwähnten Untersuchungen mit "Macflow" nur vier Veröffentlichungen /6/, /30/, /198/, /262/, welche ausschließlich Laborversuche beschreiben. Infolgedessen konnten bei der Literaturlauswertung kaum Antworten auf die Fragestellungen dieser Forschungsarbeit gefunden werden.

Hinweise auf Normen oder wenigstens regional bindende Richtlinien zum Einsatz von Silikastaub wurden in der Literatur nicht gefunden.

Die folgenden Hinweise auf Literaturstellen kennzeichnen ohne Anspruch auf Vollständigkeit besonders ergiebige Quellen.

## 2.2 Herstellprozeß und charakteristische Eigenschaften von Silikastaub

### 2.2.1 Herstellprozeß

Silikastaub entsteht als ein Nebenprodukt bei der Herstellung von Siliziummetall (Si) oder Ferrosilizium ( $Fe_xSi$ ) in elektrischen Lichtbogenöfen. Silizium wird durch Reduktion mit Kohle aus Quarz bei ca. 2000 °C gewonnen. Zur Herstellung von Ferrosilizium mit Siliziumanteilen von 45-90% wird Eisen zugegeben.

Die Reduktion des Quarzes erfolgt nicht vollständig. Es entsteht auch SiO-Gas, welches an der Oberseite des Ofens auch Luft zu SiO<sub>2</sub>-Gas oxidiert. Das Siliziumdioxid-Gas kondensiert bei Abkühlung zum ultrafeinen Silikastaub, welcher in Filtern gesammelt wird.

Da der so gewonnene Staub ein sehr geringes Schüttgewicht von weniger als 0,3 t/m<sup>3</sup> hat, wird der Staub in der Regel zum Transport verdichtet. Gebräuchliche Verfahren hierfür sind:

- a) Kompaktierung durch Pressen /138/  
(Schüttgewicht 0,4 - 0,6 t/m<sup>3</sup>)
- b) Herstellen von wässrigen Suspensionen, sogenannte "Slurries" mit einem Silikastaubgehalt von rund 50%.

In Deutschland ist zur Zeit ausschließlich Silikastaub norwegischer Herkunft auf dem Markt. Er wird von den norwegischen Tochterfirmen

- a) Fesil Legierungshandel GmbH.  
4100 Duisburg 13
- b) Elkem GmbH  
4000 Düsseldorf

und für die Firma Norcem-International Operations- Oslo von

- c) Reiner Chemische Fabrik GmbH & Co.  
6751 Weilerbach

vertrieben.

Die Firmen a) und c) bieten Silicastäube als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 mit Prüfbescheid des Instituts für Bau-technik an. Bei

- a) "Fesil-Silica" handelt es sich um Silikastaub in kompaktierter Form aus FeSi-Produktion

und bei

- c) "Corrocem" um ein Mischprodukt aus Silikastaub, Zement und pulverförmigem Fließmittel /62/.

Über Absatz und Baustellenerfahrungen in Deutschland mit diesen Zusatzstoffen ist noch nichts bekannt.

### 2.2.2 Physikalische Eigenschaften

Silikastaub besteht aus kugelförmigen Partikeln mit einem mittleren Durchmesser von 0,1  $\mu\text{m}$ . Der Staub ist damit 100mal feiner als Portland-Zement. Wegen dieser geringen Teilchengröße können Sieblinien nur durch sehr aufwendiges Auszählen von REM-Aufnahmen gewonnen werden. Dabei ist zu bedenken, daß die Mehrzahl der Teilchen am Rande des Auflösungsvermögens von Elektronenmikroskopen liegen.

Folgende Größenverteilung wurde ermittelt /23/:

< 0,05 $\mu\text{m}$	< 0,10 $\mu\text{m}$	< 0,20 $\mu\text{m}$	< 0,50 $\mu\text{m}$
20%	70%	95%	99%

Tabelle 1: Partikelgrößen von Silikastaub kanadischer Herkunft nach /23/

Die kleinen Partikel neigen wegen ihrer starken Oberflächenkräfte dazu, sich fest zu Agglomeraten zusammenzuballen. Dieser Vorgang kann durch die Kompaktierung noch verstärkt werden. Die Agglomerate können Korngrößen über 1  $\mu\text{m}$  erreichen und mechanisch ausgesiebt werden. Die Agglomeration soll jedoch die positiven Wirkungen von Silikastaub als Betonzusatzstoff nicht beeinträchtigen /57/.

Die spezifische Oberfläche des Staubes läßt sich mit dem BET-Verfahren ermitteln. Zahlreiche Untersuchungen ergaben einen Mittelwert von  $20 \text{ m}^2/\text{g}$ . Abweichungen um  $\pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$  kommen vor, sind aber selten. Die spezifische Oberfläche von Silikastaub ist damit doppelt so groß wie die von Tabakrauch /115/.

Allgemein werden die Streuungen der physikalischen Eigenschaften als so klein angesehen, daß sie ohne signifikanten Einfluß auf die Eigenschaften der mit diesen Stäuben hergestellten Betone und Mörtel bleiben.

### 2.2.3 Chemische Zusammensetzung

Die Mehrzahl der ausländischen Veröffentlichungen enthält chemische Analysen der verwendeten Silikastäube. Die Analyseverfahren sind jedoch im allgemeinen nicht angegeben. Aus den deutschen Zulassungen ist zu entnehmen, daß die Analyseverfahren nach DIN 1164 und der Prüfzeichenrichtlinie für Steinkohlenflugasche auch für die Stäube geeignet sind.

Alle Analysen zeigen übereinstimmend, daß Silikastäube zu über 75% aus amorphem  $\text{SiO}_2$  bestehen. Die übrigen Anteile über 1 Gewichtsprozent sind  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ . Der Glühverlust liegt zwischen 1 und 5%. Elementares Silizium ist in keiner Analyse enthalten.

Die ausländischen Analyseergebnisse sind auf Anlage 2 zusammengestellt. Die Gewichtsanteile sind nicht normalverteilt, deshalb kann eine Standardabweichung nicht angegeben werden.

Die Zusammensetzung der Stäube hängt maßgeblich vom Ort und von der Art des Herstellungsbetriebs ab (Si- oder FeSi-Produktion). Bei der norwegischen Siliziumproduktion beträgt der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt im Staub 94 - 98%. Bei der FeSi-Produktion nimmt der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt mit steigendem Eisengehalt in

der Legierung von 90 bis auf 80% ab. In anderen Ländern beträgt der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt vereinzelt nur 75% (mit abnehmendem  $\text{SiO}_2$ -Gehalt steigen vor allem die Anteile von Kohlenstoff, Glühverlust und den Oxiden von Eisen und Aluminium).

Anforderungen an die chemische Zusammensetzung von Silikastäuben als Betonzusatzstoff wurden bisher nur in Kanada spezifiziert /70/:

$\text{SiO}_2$ -Gehalt  $\geq$  85%

$\text{SO}_3$  -Gehalt  $\leq$  1%

Glühverlust  $\leq$  6%.

Diesen Anforderungen lagen weniger betontechnologische Erfahrungen zugrunde als vielmehr die Tatsache, daß die kanadischen Silikastäube diese Anforderungen stets erfüllen.

Systematische Untersuchungen zum Einfluß der Staubzusammensetzung auf die Betoneigenschaften wurden bisher nicht durchgeführt. Alle ausländischen Autoren stimmen darin überein, daß die Nebenbestandteile der Stäube in den angetroffenen Mengen und unter der Berücksichtigung, daß der Staubanteil maximal 25% des Zementgewichts beträgt, betonunschädlich und nicht korrosionsfördernd sind.

In diesem Zusammenhang fällt auf, daß in keiner ausländischen Arbeit der Gehalt an Chloriden angegeben ist, obwohl aus deutschen Untersuchungen /62/ bis /64/ und unveröffentlichten Analysen der norwegischen Staubhersteller bekannt ist, daß der Chloridgehalt im Staub 0,2% übersteigen kann. Nach konservativer Ansicht darf aus Gründen des Korrosionsschutzes nichts dem Beton zugegeben werden, daß mehr als 0,1% Chlorid enthält. Diese Grenze kann von den Lieferanten norwegischer Stäube eingehalten werden.

#### 2.2.4 Gesundheitliche Risiken

Über gesundheitliche Risiken im Umgang mit Silikastaub werden unterschiedliche Ansichten vertreten /115/.

Das norwegische Amt für Arbeitshygiene empfiehlt einen MAK-Wert von  $2 \text{ mg/m}^3$  /71/. Dieser Wert ist zehnmal so groß wie der für Quarzmehl.

#### 2.3 Frischbetoneigenschaften

Die Zugabe von Silikastaub bewirkt signifikante Änderungen der Frischbetoneigenschaften. Der Wasseranspruch für gleichbleibende Konsistenz steigt linear mit dem Staubgehalt an. Andererseits kann das zusätzliche Zugabewasser leicht durch Fließmittel eingespart werden, welche mit Silikastaub eine verstärkte Wirkung zeigen. Deshalb ist mit höheren Fließmitteldosierungen sogar eine Wassereinsparung möglich.

In bezug auf die rheologischen Eigenschaften hat Silikastaub einen stabilisierenden Effekt, d.h. Entmischen und Bluten werden drastisch reduziert, während die Viskosität ansteigt. Diese Einflüsse werden als besonders nützlich für Pumpbeton, Unterwasserbeton und Spritzbeton beurteilt /57/, /4/, /176/, /100/.

#### 2.4 Hydratation und Erhärtung

Silikastaub reagiert chemisch und physikalisch mit Zement. Die Zusammensetzung des Porenwassers wird verändert. Die Konzentration von  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  und  $\text{OH}$ -Ionen wird deutlich reduziert, wodurch der pH-Wert bis auf 11,9 absinken kann /57/, /29/, /145/.

Die puzzolanische Aktivität, d.h. Reaktivität mit Calciumhydroxid, wird unterschiedlich beurteilt. In mehreren Versuchen mit Zementpasten mit unterschiedlichem Silikastaubanteil wurde jedoch eine drastische Abnahme des  $\text{Ca(OH)}_2$ -Anteils mit steigendem Silikastaubgehalt gefunden /175/. Bei  $20^\circ \text{C}$  scheint die Reaktion des Staubes mit dem  $\text{Ca(OH)}_2$  erst nach 7 Tagen zu beginnen. Bis dahin sind die  $\text{SiO}_2$ -Kugeln noch in REM-Aufnahmen zu erkennen /160/, /186/. Danach scheint der Silikastaub zusätzliches Kalziumsilikathydrat (CSH) zu bilden.

Die chemischen Reaktionen von Silikastaub in Zementpasten verlaufen exotherm. Die Gesamtwärmemenge des Silikastaubs ist von gleicher Größenordnung wie die von Zement, die zeitlichen Wärmeentwicklungen verlaufen jedoch unterschiedlich. So bewirkt ein 10% Zementersatz durch Silikastaub eine beschleunigte Wärmeentwicklung und ein 20% Ersatz eine verzögerte Wärmeentwicklung /124/.

Ein wesentlicher physikalischer Effekt von Silikastaub wird in einer Erhärtungsbeschleunigung gesehen, die entsteht, weil die einzelnen Partikel als Kristallisationskeime für die Hydratationsprodukte des Zements dienen /174/.

Bei unzureichender Nachbehandlung neigt Beton mit Silikastaub stärker zum Fröhschwinden und zur Schrumpfrißbildung als herkömmlicher Beton. Das hängt mit der höheren Dichtigkeit zusammen, die einen Wassertransport von außen nach innen bremst /4/, /76/.

## 2.5 Festbetoneigenschaften

### 2.5.1 Festigkeit

Bereits seit Anfang der fünfziger Jahre ist bekannt, daß durch Zugabe von Silikastaub eine signifikante Druckfestigkeitssteigerung bewirkt werden kann /12/, /117/. Mit normalem Zuschlag können Druckfestigkeiten bis zu 160 MPa und mit hochfestem Zuschlag Druckfestigkeiten bis 300 MPa erreicht werden /8/, /10/. Druckfestigkeiten von 100 MPa sind mit gebräuchlichem Beschleunigen in 24 Stunden ohne nachteilige Wirkung auf die Endfestigkeit möglich /14/.

Das Wasserzementwertgesetz für silikastaubhaltige Betone kann in folgender Form geschrieben werden:

$$\beta_D \hat{=} \frac{W}{z + kS} \quad (1)$$

Der Faktor k wird "Zement-Äquivalenz-Faktor" genannt. Für die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen, einem Zementgehalt von 300 kg/m<sup>3</sup> und Unterwasserlagerung bei 20° C beträgt k = 3, d.h. ein Teil Silikastaub ersetzt drei Teile Zement. Der Faktor k steigt mit dem Alter und fällt mit dem Zementgehalt, dem Wassergehalt, dem Silikastaubanteil und vor allem bei schlechterer Nachbehandlung /101/, /4/, /177/.

Für übliche Festigkeitsniveaus ähneln Zugfestigkeit, E-Modul, Querdehnzahl und Bruchdehnung denen normalen Betons. Bei höheren Festigkeitsniveaus wird Silikabeton spröder /99/.

In den Ländern, die Silikastaub in großem Maße produzieren - vor allem Norwegen, Schweden, Dänemark und Kanada - wird der Staub z.Zt. überwiegend als Zementersatz eingesetzt, da dort der Preis von Silikastaub rund halb so groß wie der von Zement ist und die Zementersparung entsprechend Gleichung (1) erheblich ist. Das Ausnutzen der Festigkeitsgewinne bleibt auf Sonderfälle begrenzt.

Das zweitwichtigste Einsatzgebiet in den o.g. Ländern hängt mit der Verbesserung der Dichtigkeit des Betons durch Silikastaubzusatz zusammen. Dieser Bereich ist für die Länder ohne nennenswerte Eigenproduktion von besonderem Interesse. Hier ist jedoch noch viel Aufklärungsarbeit zu leisten.

### 2.5.2 Dichtigkeit

Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß die Durchlässigkeit (permeability) von Beton mit Silikastaub bemerkenswert niedrig ist. Das trifft besonders auch für Beton mit niedrigem Zementgehalt zu /61/, /4/, /11/, /26/, /36/, /37/, /46/, /55/, /57/, /109/, /121/, /127/, /161/, /175/, /203/. Es wird angenommen, daß die ultrafeinen Partikel die Kapillarporen durchsetzen, was zu einer Verfeinerung des Porensystems führt. Quecksilberdruckporosimetrische Untersuchungen ergaben eine lineare Proportionalität zwischen dem Gelporenraum und dem Staubgehalt, wobei der Gesamtporenraum praktisch konstant blieb /176/.

Die erhöhte Dichtigkeit bewirkt eine bedeutende Erhöhung des Widerstandes gegen das Eindringen von betonaggressiven Medien und damit eine deutliche Verbesserung der Dauerhaftigkeit, insbesondere bei chemischem Angriff /11/, /13/, /43/, /46/, /111/, /168/, /189/.

Auch die Frostbeständigkeit kann durch Zugabe von Silikastaub entscheidend verbessert werden. Es ist möglich, frosttausalzbeständige Betone ohne Luftporenbildner herzustellen /3/, /11/, /37/, /48/, /109/, /142/, /173/, /181/, /197/, /206/.

### 2.5.3 Korrosionsschutz der Bewehrung

Der Korrosionsschutz der Bewehrung kann vor allem durch die zwei Phänomene: Karbonatisierung und Chloridionenangriff beeinträchtigt werden. Da in beiden Fällen der Diffusionswiderstand des Betons die Geschwindigkeit der Schadensabläufe beeinflusst, wird die verbesserte Dichtigkeit von silikahaltigen Betonen auch hier von Nutzen sein. Andererseits verbraucht der Silikastaub  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , senkt den pH-Wert des Porenwassers und vermindert damit die Passivierung des Stahls. Auch wurde festgestellt, daß die Fähigkeit, Chloride zu binden, durch Silikastaubzugabe herabgesetzt wird.

Hinsichtlich des Korrosionsschutzes der Bewehrung hat Silikastaub somit konkurrierende Wirkungen.

Zahlreiche Untersuchungen haben nun ergeben, daß die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von normalem Beton und Silikabeton bei gleichem w/z- bzw. w/(z+S)-Wert gleich groß sind, während die Chloriddiffusion durch Silikastaubzugabe erheblich gebremst wird /44/, /46/, /104/, /111/, /144/, /151/, /175/, /193/.

### 2.5.4 Alkalireaktion

Eine Zugabe von Silikastaub ist geeignet, die Gefahr von Alkalitreiben auf zwei Arten entscheidend zu verringern /7/, /13/, /12/, /28/, /46/, /81/, /137/, /147/.

1. Durch die hohe Dichtigkeit des Betons wird das Eindringen von Alkalien von außen gebremst.
2. Der Alkaligehalt des Zements wird verringert.

## 2.6 Einpreßmörtel

### 2.6.1 Ausländische Untersuchungen

Die wenigen ausländischen Untersuchungen beschäftigen sich allgemein mit fließfähigen Zementmörteln und nicht speziell mit Einpreßmörteln für Spannkanäle /6/, /30/, /200/, /204/.

Zuerst hat White u.a. (1982) /204/ rotationsviskosimetrische Untersuchungen durchgeführt und dabei festgestellt, daß vor allem die Oberfläche von Zement und Silikastaub und die chemische Zusammensetzung des Fließmittels die Viskosität von Pasten beeinflussen.

1983 berichtet Altkin u.a. erstmals über systematische Versuche mit Verpreßmörteln (grouts) mit Silikastaubzusatz /6/. Die wichtigsten Ergebnisse waren:

- Für einen Silikastaubanteil zwischen 0 und 20% von Zement kann durch steigende Fließmittelzugabe die Viskosität nur auf einen bestimmten Grenzwert, der mit dem Staubanteil zunimmt, gesenkt werden (Anl. 3).
- Die zeitliche Zunahme der Viskosität hängt von der Fließmitteldosierung ab (Anl. 4).
- Die Mörteldruckfestigkeit steigt mit dem Silikastaubgehalt.

Auf der CANMET/ACI-Konferenz in Madrid (1986) /110/ wurden von Domone u.a. /30/ und von Wakeley u. Buck /200/ über Forschungen an Verpreßmörteln mit Silikastaub berichtet.

Domone untersuchte Zement/Silika-Mörtel mit Wasser/Bindemittelwerten von 0,3 bis 0,6. Der Silikastaubanteil betrug 0, 10 und 20% vom Zement.

Die wichtigsten Ergebnisse waren:

- a) Die Viskosität der Mörtel steigt mit dem Silikastaubgehalt.
- b) Der Fließmittelbedarf für konstante Viskosität steigt linear mit dem Silikastaubgehalt (Anl. 5).
- c) Die Viskosität hängt von der Mischungsprozedur ab (Reihenfolge).
- d) Silikastaub verhindert Sedimentation und Bluten (Anl. 6).

Wakeley und Buck haben Mörtelgemische aus Zement, Flugasche und Silikastaub mit einem quellenden Zusatzmittel (Kalziumsulfathemihydrat) untersucht. Die Versuche ergaben, daß das Quellvermögen durch geringe Silikastaubzusätze nicht beeinflußt wird. Unterschiede der Mörtelstruktur verschiedener Mischungen im frühen Alter verschwinden im Laufe der Zeit.

#### 2.6.2 Der Einpreßmörtel "Mac-Flow"

Mac-Flow ist ein Einpreßtrockenmörtel, der mindestens seit 1976 in Italien hergestellt wird. Er besteht aus einem italienischen Portlandzement, Silikastaub unbekannter Herkunft und Zusammensetzung und quellenden sowie verflüssigenden Additiven. Für diesen Einpreßmörtel hatte die Firma Dyckerhoff & Widmann AG vom 21.03.85 bis 30.09.85 eine bauaufsichtliche Zulassung /65/. Mac-Flow besitzt gegenüber herkömmlichen Einpreßmörteln nach DIN 4227 Teil 5 folgende Vorteile

- gleiche Tauchzeiten bei niedrigeren Wasserbindemittelwerten (0,32 - 0,33),

- gutes Fließverhalten auch bei höheren Temperaturen,
- längere Verarbeitungszeiten,
- keine Wasserabsonderungen,
- keine Raumänderungen,
- niedrigere Tauchzeiten ohne Sedimentationsgefahr.

Bei Einpreßversuchen unter erschwerten Bedingungen an senkrechten Hüllrohren wurden nach Untersuchungen von Kordina und Osteroth mit Mac-Flow bessere Ergebnisse als mit herkömmlichen Einpreßmörteln erzielt /87/, /88/.

## 2.7 Folgerungen

Das Ergebnis der Literaturlauswertung läßt sich in wenigen Sätzen zusammenfassen.

1. Die Zugabe von 5 bis 20% des Zementgewichtes Silikastaub beeinflusst die Frisch- und Festbetoneigenschaften stärker als jeder andere gebräuchliche Betonzusatzstoff.
2. Die Auswirkungen sind überwiegend positiv.
3. Problematische Wirkungen sind:
  - a) Erhöhter Wasseranspruch, der durch Fließmittelzusatz ausgeglichen werden muß.
  - b) Besonders sorgfältige Nachbehandlung erforderlich.
4. Die Zusammensetzung und die Materialeigenschaften der Stäube aus verschiedenen Ursprüngen unterscheiden sich vergleichsweise wenig. Der Einfluß dieser Unterschiede auf die Betoneigenschaften ist noch nicht bekannt.
5. Silikastaub wird in Deutschland nur in unbedeutenden Mengen produziert und muß daher importiert werden. Mehrere Firmen bieten Stäube in gleichbleibender Qualität (nach eigenen Angaben) an.
6. Silikastaub ist auch geeignet, die Eigenschaften von Einpreßmörteln zu verbessern.

### 3. Versuchsprogramm

#### 3.1 Gliederung

Das Versuchsprogramm gliedert sich in drei Teile:

1. Auswahl und Untersuchung der Stoffe
2. Herstellung von Mörteln (Vorversuche)
3. Herstellung und Prüfung von Mörteln (Hauptversuche)

#### 3.2 Auswahl und Untersuchung der Stoffe

##### 3.2.1 Zement

Alle Versuche wurden mit einem PZ 45 F von Dyckerhoff, Neu-  
beckum, aus einer Lieferung (17.01.86) durchgeführt. Dieser  
Zement gilt als besonders gut geeignet zur Herstellung von  
Einpreßmörteln.

An dem Zement wurden folgende Untersuchungen nach DIN 1164  
durchgeführt:

1. Chemische Analyse
2. Blainwert
3. Druckfestigkeit
4. Mahlfineinheit
5. Erstarren
6. Raumbeständigkeit

##### 3.2.2 Silikastäube

Es wurden sechs Silikastäube ausgewählt, die von zwei Her-  
stellern in Deutschland vertrieben werden. Die Stäube werden  
im folgenden mit A bis F bezeichnet. Hersteller und Firmen-  
bezeichnung der Stäube sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt.

An den Stäuben wurde eine chemische Analyse in Anlehnung an  
die Prüfzeichenrichtlinie bzw. DIN 1164 durchgeführt, das  
Schüttgewicht nach DIN 1060 bestimmt und Naßsiebungen durch-  
geführt.

T a b e l l e 3.1

Silika- staub	Vertrieb	Bezeichnung d. Staubes	Herkunft	Lieferform	Liefer- datum	Bemerkung
A	Fesil-Legie- rungshandel GmbH Postfach 130304 4100 Duisburg 13	SL 824	Norwegische Ferrosilizium Produktion,  Herstellerwerke wurden nicht bekanntgegeben	8 Säcke à 6,25 kg unkompaktiert	14.05.85	
B		SL 837		4 Säcke à 12,5 kg kompaktiert	16.12.85	
C	Elkem GmbH Königsallee 4000 Düssel- dorf 1	970 D, sample Lot EMS 2		1 Sack à 25,5 kg kompaktiert	05.12.85	
D		970 U, sample Lot EMS 14		1 Sack à 25,5 kg unkompaktiert	05.12.85	
E		F 100 T Lot EMS 4		1 Sack à 25,5 kg kompaktiert	05.12.85	Mischprodukt aus Silicastaub mit pulverförmigem Fließmittel
F		sample S.147.83		1 Sack à 25,5 kg kompaktiert	1984	

### 3.2.3 Zusatzmittel

Als Zusatzmittel wurden eingesetzt:

- a) Tricosal 188 (EH)
- b) Tricosal 181 (EH)
- c) Addiment BVF 503 (FM)

### 3.3 Vorversuche

Die Vorversuche mit einem Mörtelvolumen über 5 l dienten dazu, Mischungsverhältnisse herauszufinden, mit denen die Anforderungen von DIN 4227 Teil 5 erfüllt werden. Sie wurden in einem Klimaraum bei den vorgewählten Temperaturen von 5° C, 20° C und 30° C durchgeführt.

Die sechs Silikastäube wurden in Anteilen von 0, 5, 10 und 15 Masseprozent vom Zement zugegeben.

Der Wasserbindemittelwert  $w/(z+s)$  wurde auf 0,40 bis 0,44 eingestellt.

Variiert wurde die Zusatzmitteldosierung und der Wasser-Bindemittel-Wert, um möglichst eine Tauchzeit  $T_1$  (unmittelbar nach dem Mischen) von 40 bis 45 Sekunden zu erreichen. Wurde diese Forderung annähernd erfüllt, wurde umgehend die Fließfähigkeit des Mörtels mittels des Rotationsviskosimeters vom Typ Haake MV I P mit profilierten Zylindern und 0,96 mm Spaltbreite gemessen.

Die durchgeführten Vorversuche sind auf Anlage 7 aufgeführt. Die Herstellung der Mischungen erfolgte nach folgender Prozedur:

Das Wasser wurde in einen Plastikeimer mit 32 cm Durchmesser und 39 cm Höhe vorgegeben. In weiterer Reihenfolge wurden Zusatzmittel (Einpreßhilfe oder Fließmittel), Silikastaub und schließlich Zement nach und nach hinzugefügt. Nach Beendigung des Einstreuens wurde vier Minuten lang intensiv bei einer Drehzahl von 1600 Umdrehungen/Minute gemischt (Anlage 8).

Im Anschluß an das Mischen wurde die Mörteltemperatur gemessen.

### 3.4 Hauptversuche

Nach Auffinden eines die Forderungen erfüllenden Mischungsverhältnisses wurde ein Hauptversuch mit einem Mörtelvolumen von 15 l durchgeführt. Zusätzlich zur Tauchzeit  $T_1$  wurden weitere Tauchzeiten  $T_n$  im Abstand von 30 Minuten sowie parallel dazu Rotationsviskosimetriemessungen ausgeführt. Beendet wurden die Versuche, wenn die Tauchzeit 80 Sekunden überschritten wurde. Die durchgeführten Hauptversuche sind in Anlage 9 aufgeführt.

### 3.5 Untersuchungen am erhärteten Mörtel

Schließlich wurden aus den Mörtelmischungen unmittelbar nach dem Mischen und vereinzelt nach Erreichen der vorgegebenen maximalen Tauchzeit Proben zur Untersuchung der Raumänderung mit dem Tiefenmaß nach DIN 4227 und für Druckfestigkeitsprüfungen entnommen.

An einigen wenigen Proben wurden die Porenverteilung mittels Quecksilberporosimetrie bestimmt sowie das Gefüge mittels Rasterelektronenmikroskopie untersucht.

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1 Materialuntersuchungen

Die Untersuchungsergebnisse des Zements nach DIN 1164 sind auf Anlage 10 zusammengestellt.

Die Ergebnisse der chemischen Analyse für die Stäube A bis E sind auf Anlage 11 aufgeführt. Der Staub F wurde nicht analysiert.

Herausgehoben sei hier einzig die für den Korrosionsschutz wichtige Bestimmung des Chloridgehaltes, der sich in den Grenzen von 0,04 bis 0,11 Gewichtsprozent vom Silikastaub bewegt.

Die Versuche zur Bestimmung der Schüttdichte spiegeln in ihren Ergebnissen deutlich die Unterschiede von kompaktierten und unkompaktierten Silikastäuben wieder (siehe Anlage 12). Das Schüttdichteverhältnis von kompaktiertem Staub zu unkompaktiertem Staub beträgt etwa 2:1.

Die Ergebnisse der Ultraschallbadanalyse (Siebanalyse) sind ebenfalls auf Anlage 12 niedergeschrieben. Beim Durchgang durch das Prüfsieb mit 0,09 mm Maschenweite fällt der Silikastaub B besonders heraus.

Die Zusatzmittel wurden keinen Untersuchungen unterzogen.

#### 4.2 Ergebnisse der Vorversuche

Die Vorversuche dienten zum Auffinden der Zusatzmitteldosierung und des Wasserbindemittelwertes für eine Tauchzeit ( $T_1$  unmittelbar nach dem Mischen) von 40 bis 45 Sekunden. Für Mischungen ohne Silikaanteil gelang dieses für die Raumtemperatur von 5° C und 20° C. Bei 30° C Raumtemperatur überstiegen die Tauchzeiten  $T_1$  wesentlich die 45 Sekunden-Marke; die Voraussetzungen für einen Hauptversuch ohne Silikastaub bei 30° C waren nicht erfüllt worden.

Die ersten Vorversuche mit Silikastaub dienten zur Erkundung des Zusammenwirkens mit Einpreßhilfen und Fließmitteln. Es zeigte sich, daß mit der Einpreßhilfe Tricosal 181 bei zulässigen Dosierungen kein fließfähiger bzw. verarbeitungsfähiger Einpreßmörtel herstellbar ist. Tricosal 181 wurde aus den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen.

Bei den folgenden Vorversuchen wurde Tricosal 188 zunächst bis zu den zulässigen Dosierungen später darüber hinaus zugegeben.

Der Silikastaub B konnte selbst bei hohen Dosierungen von Einpreßhilfe keine Auflösung der Staubklümpchen bewirken; sie behielten weiterhin eine "gewisse Kornfestigkeit". Dies äußerte sich bei der Ermittlung der Tauchzeiten durch ein Knirschen beim Sinken des Tauchkolbens bzw. durch eine relativ hohe und stark schwankende Viskosität zu Beginn des Rotationsviskosimetrieversuchs, was auf das Zermahlen der Staubklümpchen zurückzuführen ist.

Auch mit einem Fließmittel - im Antrag zum Forschungsprogramm nicht vorgesehen - wurden mit den wenigen Silikastaubresten einige Vorversuche durchgeführt. Auch hier wurden die zulässigen Dosierungsmengen überschritten, um gute Fließeigenschaften zu erzielen.

In den Anlagen 14 bis 19 wurden die Ergebnisse der Vorversuche aufgeführt, die die gesetzten Anforderungen erfüllten bzw. denen am nächsten kamen.

#### 4.3 Ergebnisse der Hauptversuche (Frischmörtel)

Die Ergebnisse der Hauptversuche sind zusammen mit denen der Vorversuche in den Anlagen 13 bis 20 zusammengestellt.

Die Tauchzeit  $T_1$  (unmittelbar nach dem Mischen) von 40 bis 45 Sekunden konnte mit den zur Verfügung stehenden Materialien nur dadurch erreicht werden, indem der Wasser-Bindemittel-Wert in etwa an der vorgewählten oberen Grenze von 0,44 eingestellt wurde. Trotzdem mußte die zulässige Zusatzmittelmenge überschritten werden, um die Anforderungen an einen Einpreßmörtel zu erreichen.

Der Silikastaub E bildet in diesem Zusammenhang die einzige Ausnahme, da er schon mit Fließmittel vorgemischt war. Hier wurden bei einem Wasser-Bindemittel-Wert von etwa 0,40 und einer Zugabe von Einpreßhilfe im zulässigen Bereich stets eine brauchbare Mörtelzusammensetzung gefunden.

Die Tauchzeiten (unmittelbar nach dem Mischen) von den Vorversuchen und denen der Hauptversuche weichen (teilweise beträchtlich und auch im Wiederholungsversuch) voneinander ab. Ein Vergleich der Dosierungsmengen von unterschiedlichen Zusatzmitteln (Einpreßhilfe bzw. Betonverflüssiger) zeigt keine Unterschiede im Hinblick auf zu erzielenden Tauchzeiten; mit gleichen Dosierungen wurden etwa gleiche Tauchzeiten erreicht.

Wird die bezogene Viskosität in Abhängigkeit von der bezogenen Tauchzeit (Anlage 21 bis 26) betrachtet, so stellt man fest, daß die Viskosität in etwa im gleichen Maß wie die Tauchzeit zunimmt. Dabei sind die Viskositäten der Mörtel mit dem Silikastaub E deutlich höher als alle übrigen. In diesem Zusammenhang sei noch einmal daran erinnert, daß es sich bei dem Silikastaub E um ein Mischprodukt unter anderen mit pulverförmigem Fließmittel handelt. Ein Einfluß der Mörteltemperatur auf die Abhängigkeit von Viskosität und Tauchzeit bildet sich nicht deutlich heraus.

Nur für den Silikastaub E reicht die Zahl der Versuche aus, um die Abhängigkeit der Viskosität und der Tauchzeit von der Zeit erkennbar zu machen (siehe Anlage 27 bis 29). Die Tauchzeiten bei einer Mörteltemperatur von 20° C liegen relativ eng beieinander und verändern sich wenig. Ausnahme ist der Mörtel mit 5% Silikaanteil; seine Tauchzeit verdoppelt sich nach 90 Minuten. Uneinheitlich entwickeln sich die Tauchzeiten bei Mörteltemperaturen von 5° C und 30° C. Fast konstant blieben die Tauchzeiten auch über 90 Minuten hinaus allein für einen Mörtel mit 15%-Masseanteil von Silikastaub.

Die Viskosität steigt mit zunehmender Zeit aber uneinheitlich und stark schwankend in einem relativ breiten Bereich. Beispielhaft sei hier auf die beiden Kurven auf Anlage 27 verwiesen. In zwei identischen Versuchen ergaben sich bei einer Mörteltemperatur von 20° C und 15 M.-% Silikaanteil stark abweichende Kurvenverläufe.

Die nach dem Mischen gemessenen Temperaturen nehmen unabhängig vom Silikastaubanteil in der Regel zu; bei der Ausgangstemperatur von 5° C relativ mehr (bis zu 12° C) - bei der Ausgangstemperatur von 30° C relativ wenig (bis zu 35° C). Die verschiedenen Anteile Silikastaub bzw. Dosierungsmengen Einpreßhilfe oder Betonverflüssiger haben keinen deutlichen Einfluß auf die Temperaturentwicklung des Einpreßmörtels.

#### 4.4 Ergebnisse zu Untersuchungen der Raumänderung

Die Raumänderung der Nullversuche streute von +0,13 bis -2,62 Vol.-% (s. Anlage 13). In der Zusammensetzung des Einpreßmörtels mit Einpreßhilfe Tricosal 188 und dem Silikastaub E wird das Absetzmaß geringer; teilweise ging die Raumänderung ins Quellen über.

Die Ergebnisse der anderen Silikastäube streuen von -0,19 bis +1,16 Vol.-% (s. Anlage 15 bis 17 u. 19).

Der Einsatz von Addiment 503 hatte immer ein Absetzen (maximal -1,64 Vol.-%) zur Folge (s. Anlage 20).

#### 4.5 Druckfestigkeitsergebnisse

Es war ein Einfluß der Zusatzmittel auf die Druckfestigkeit festzustellen. Während Nullversuche - Versuche ohne Silikastaub und mit Einpreßhilfe Tricosal 188 - Druckfestigkeiten von 48 N/mm<sup>2</sup> bis 57 N/mm<sup>2</sup> erbrachten, wurden mit Silikastaub Druckfestigkeiten von 41 N/mm<sup>2</sup> bis 46 N/mm<sup>2</sup> ermittelt, also ein Abfall der Druckfestigkeit. Bei Verwendung des Betonverflüssigers Addiment 503 stellt sich eine Druckfestigkeit nach 28 Tagen von 58 N/mm<sup>2</sup> bis 70 N/mm<sup>2</sup> ein; eine Zunahme der Druckfestigkeit.

Einpreßmörtel mit dem Silikastaub E wurde nur in Kombination mit der Einpreßhilfe Tricosal 188 hergestellt. Es zeichnet sich bei diesen Versuchsergebnissen eine Abhängigkeit von der Zugabemenge des Silikastaubes und der Lagerungs- bzw. Herstellungstemperatur ab. Mit steigender Temperatur steigen die Druckfestigkeitsergebnisse. Mit steigendem Silikastaubgehalt fallen die Druckfestigkeiten. Bei Zugabe von 5 M.-% Silikastaub E wurden die höchsten Druckfestigkeiten erzielt.

Der einheitliche Zeitpunkt der Entnahme von Proben zur Bestimmung der Druckfestigkeit erwies sich als besonders wichtig. In einem Wiederholungsversuch zu dem Einpreßmörtel mit der Zusammensetzung 85 M.-% Zement, 15 M.-% Silikastaub E + 1% Einpreßhilfe bei einer Raumtemperatur von 20° C wurden Proben sofort nach dem Mischen und bei Versuchsende nach 330 Minuten entnommen. Die Druckfestigkeiten der nach dem Mischen entnommenen Proben betrug 55 N/mm<sup>2</sup>, die der beim Versuchsende entnommenen 77 N/mm<sup>2</sup>; eine Festigkeitssteigerung um 40%. Ähnliche Unterschiede wurden auch bei einigen anderen rein zufällig durchgeführten Mischungszusammensetzungen festgestellt. Eine systematische Untersuchung wurde nicht durchgeführt.

#### 4.6 Porosimetrie

Die Einpreßmörtel ohne Silikastaub weisen, wie auf Anlage 30 wiedergegeben wird, ein Porenmaximum mit einem Porenradius von 0,06 µm auf, das der Gelporosität, die dem Überschußwasser zuzuordnen ist, entspricht. Dieses Porenmaximum verschwindet durch Zugabe von Silikastaub fast vollständig; unabhängig von der Verwendung einer Einpreßhilfe oder eines Verflüssigers. Das wird auch am Gesamtporenraum deutlich, der von 31,8 Vol.-% der Nullprobe auf 27,4 Vol.-% sinkt.

#### 4.7 Rasterelektronenmikroskopie

Eigene rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, daß die Mikrostruktur von Einpreßmörtel mit und ohne Silikastaub nach einer Abbindezeit von rd. 56 Tagen sich wenig bzw. gar nicht voneinander unterscheiden (Anlagen 30 bis 33). Die Bruchflächen zeigen in beiden Fällen große Nadeln-Ettringit -, massive CH-Kristalle und kapillare Poren. In Einpreßmörteln mit Silikastaub findet man

in diesen ganz vereinzelt noch Poren mit unhydratisierten Silika-Kugeln mit ca. 0,1  $\mu\text{m}$  (Darstellung s. Anlage 34). Für die Deutlichkeit und damit der Aussage der Aufnahmen sowie des Auflösevermögens haben sich Vergrößerungen von  $10^6:1$  herausgestellt (siehe Anlage 34).

### 3. Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Literaturlauswertung und der Versuchsdurchführung über Eigenschaften von Einpreßmörtel mit Zusatz von Silikastaub zeigen:

- a) In der Literatur wird Silikastaub fast nur im Zusammenhang mit (hochfestem) Beton behandelt. Hinweise über die Anwendung bei Einpreßmörtel sind sehr spärlich.
- b) Auch werden in der Literatur kaum Angaben über korrosionsfördernde Bestandteile der Stäube (z.B. Chlorid) gemacht.
- c) In den durchgeführten Analysen wurden 0,04 - 0,11 Masseprozent lösliches Chlorid festgestellt. Nach Angabe der Hersteller kann der Chloridgehalt auch noch höher sein.
- d) Die Kompaktierung kann zu Zusammenballungen (Klumpchen) mit "großer Festigkeit" führen (Silikastaub B); Zusatzmittel und intensives Mischen vermochten diese Zusammenballungen nicht zu zerstören.  
Derartige Stäube erscheinen für Einpreßmörtel nicht geeignet.
- e) Silikastaub muß stets mit einem Zusatzmittel - Einpreßhilfe oder Betonverflüssiger - verwendet werden. Die Versuche mit Dosierungen über den zulässigen Bereich ergaben keine Nachteile.

- f) Der Wassergehalt aller Einpreßmörtel wurde so eingestellt, daß sie eine Tauchzeit sofort nach dem Mischen von 40-45 Sekunden aufwiesen. Dies führte dazu, daß bei Silikastäuben ein Wasserbindewert von 0,44, also dem für Einpreßmörtel höchst zulässigen Wert verwendet werden mußten; bei einem Silikastaub ergab sich der Wasserbindemittelwert von 0,40.
- g) Teilweise wurden die Zusatzmittel über die zulässigen Dosierungen hinaus zugegeben; es traten keine Entmischungserscheinungen auf.
- h) Es wurde festgestellt, daß es Silika-Mischprodukte gibt, mit welchen Einpreßmörtel mit einer Verarbeitungszeit von mindestens 90 Minuten bei einer Mörteltemperatur bis 30° C hergestellt werden können.
- i) Einzelne Tastversuche ergaben, daß die Druckfestigkeiten von Proben, die unmittelbar nach dem Mischen und im höheren Alter entnommen wurden, sich unterscheiden; mit zunehmendem Mörtelalter bei Probeentnahme steigt die Druckfestigkeit deutlich.
- j) Porosimetriemessungen und Rasterelektronenmikroskopie bestätigen, daß sich Silikastaub in die Poren einlagert und das Porenmaximum, das der Gelporosität entspricht, glättet.
- k) Nach den Ergebnissen scheint ein Einpreßmörtel mit 5% Silikaanteil hinsichtlich des Fließvermögens und der Druckfestigkeit am günstigsten zu sein.
- l) Das Fließverhalten von Einpreßmörteln mit Silikastaub scheint mit der Rotationsviskosimetrie besser beurteilt werden zu können als allein mit dem Tauchversuch.

- m) Der Einfluß von Silikastaub auf die Raumänderung ist positiv. Das Absetzen des Einpreßmörtels wird stark verringert; bei entsprechenden weiteren Zusätzen findet Quellen statt.

Es wurde bei den durchgeführten Versuchen weder eine Wasserabscheidung noch ein Sedimentieren beobachtet.

- n) Eine Güteüberwachung der Stäube am Produktionsort scheint z.Zt. nicht durchführbar zu sein.

Insgesamt hat die durchgeführte Forschungsarbeit ergeben, daß mit Silikastaub hervorragende Einpreßmörtel hergestellt werden. Zur Angabe von Anforderungen und Rezepten müssen aber noch praxisgerechte Verpreßversuche durchgeführt werden.

## Anlage 1

---

Produktion von Silikastaub nach /1711/ in 1000 t pro Jahr

USA	300 *
UdSSR	150
Norwegen	140 *
Japan	70 *
Spanien	30
Frankreich	20 **
Island	20 **
Schweden	15 **
Kanada	15 **
Italien	10 **
BR Deutschland	6 **

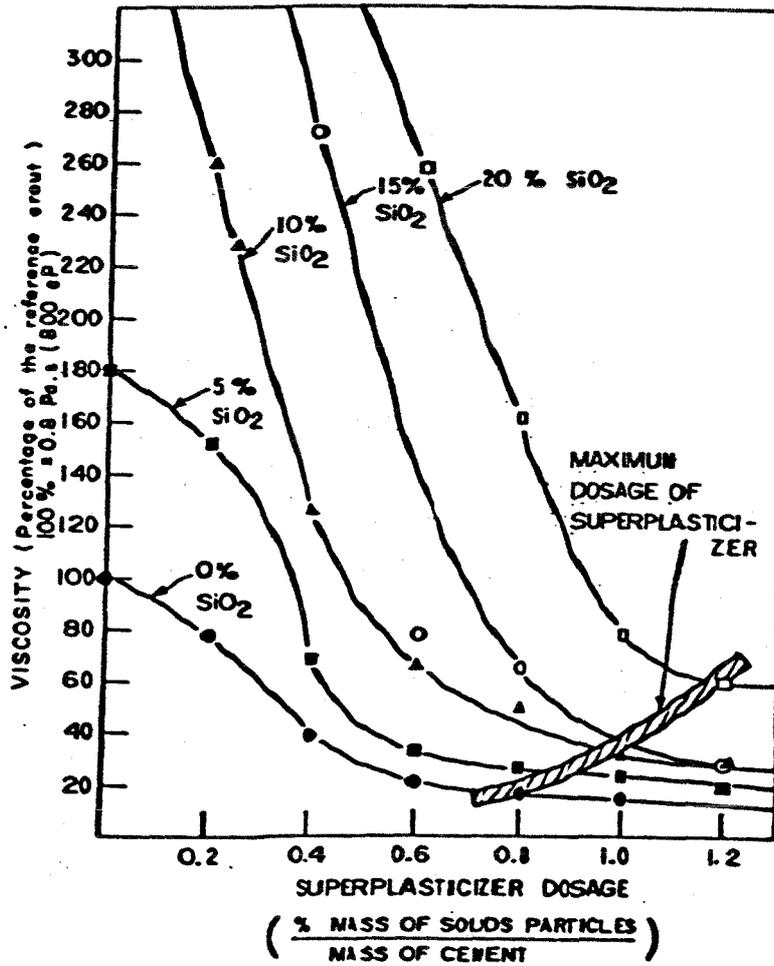
\* Länder, die Silikastaub eigener Produktion als Beton-  
zusatzstoff verwenden

\*\* Länder, die Silikastaub nicht bekannter Herkunft als  
Betonzusatzstoff verwenden

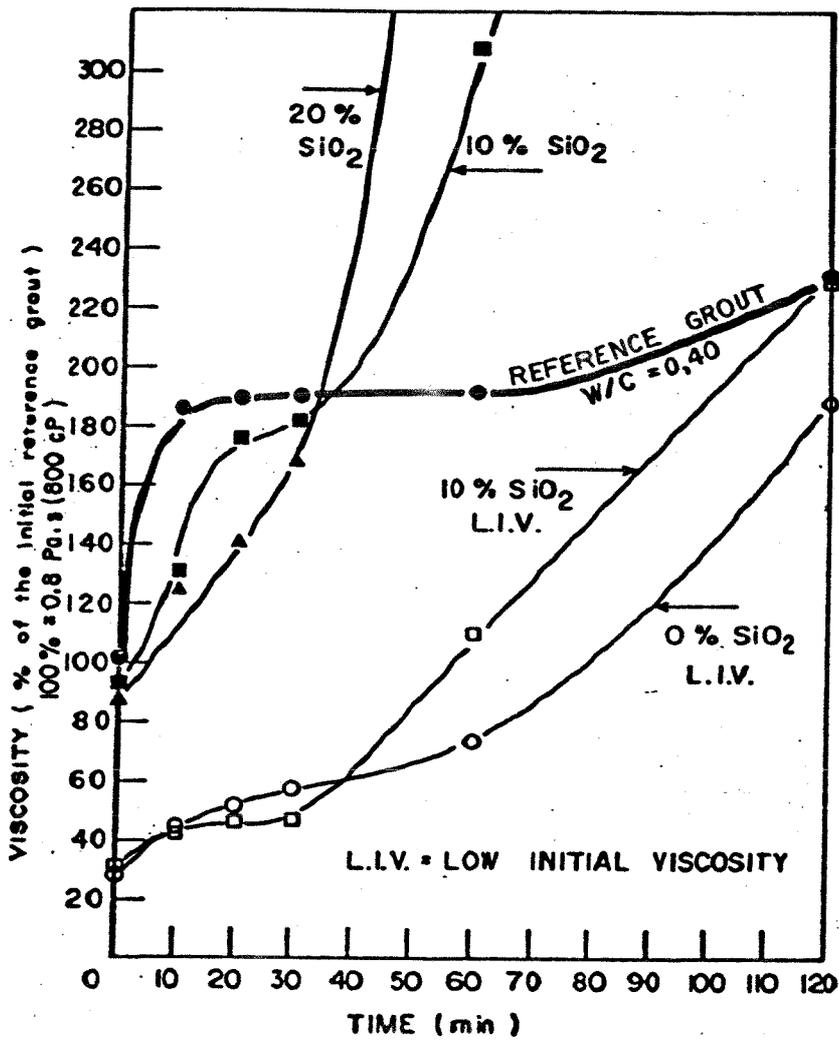
Anlage 2

Chemische Zusammensetzung verschiedener Silikastäube nach Veröffentlichungen

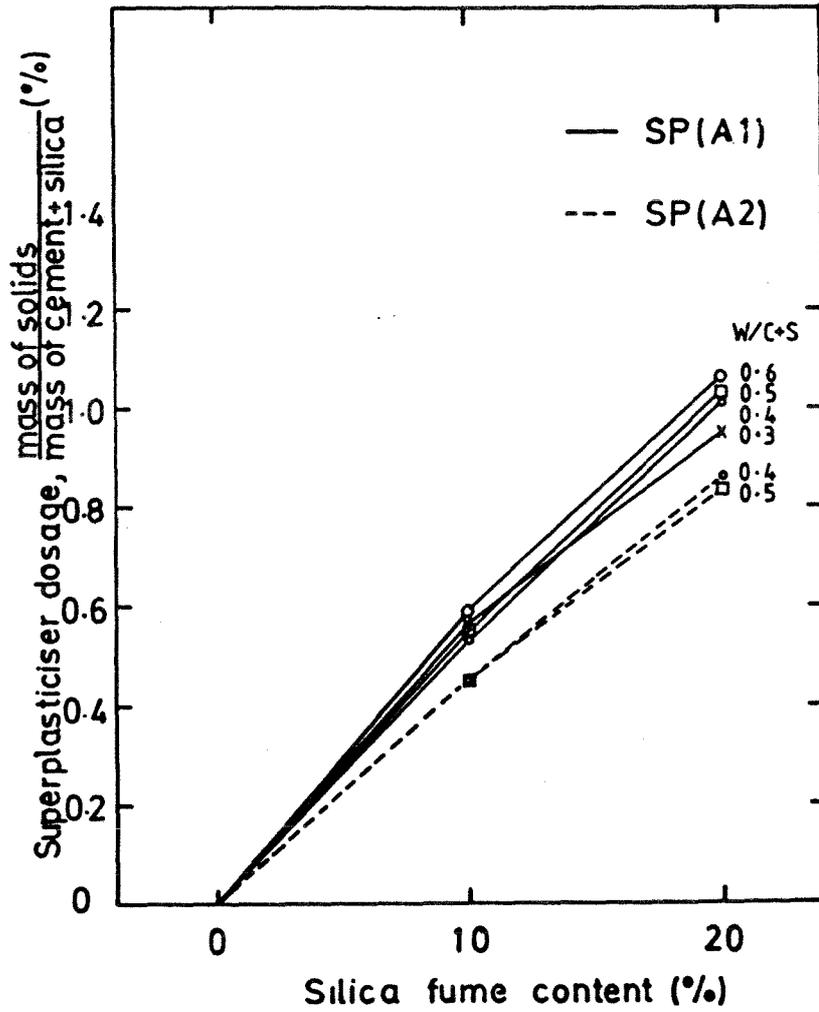
	Anzahl von Analysen	Mittelwert Gew.-%	Streubereich Gew.-%
SiO <sub>2</sub>	63	97,7	76 - 98
C	15	1,9	0,9 - 3,0
K <sub>2</sub> O	24	1,2	0,1 - 3,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34	1,1	0,02- 5,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35	0,8	0,02- 5,0
MgO	29	0,8	0,02- 2,5
SO <sub>3</sub>	10	0,6	0,1 - 1,3
Na <sub>2</sub> O	23	0,5	0,02- 1,4
CaO	28	0,3	0,02- 0,9
TiO <sub>2</sub>	1	0,09	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1	0,06	-
MnO	1	0,02	-
Glühverlust	25	3,0	1,0 - 5,0



Anfangsviskosität von Mörteln als Funktion der Fließmittel- und Silikastaubdosierung nach /6/

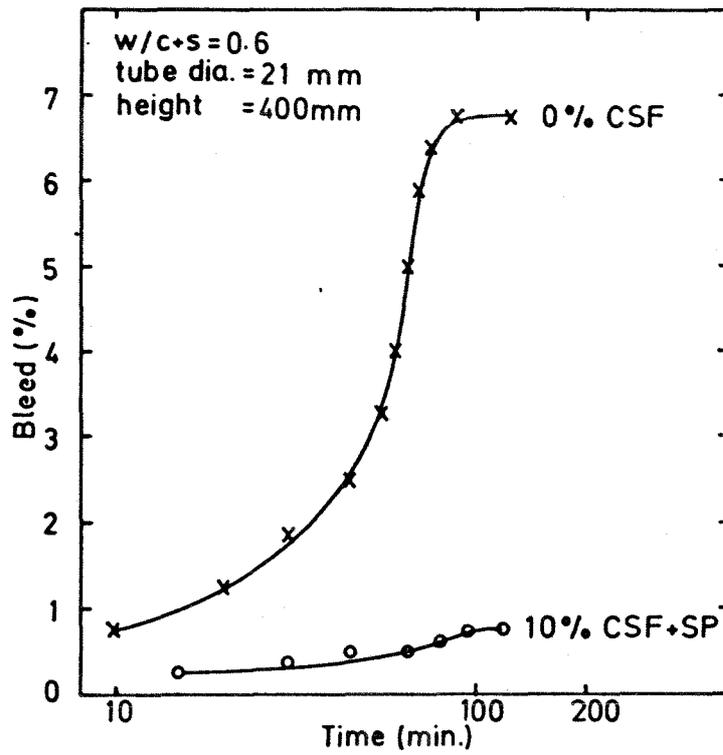


Zeitabhängigkeit der Viskosität von verschiedenen Mörteln nach /6/



Fließmittelbedarf als Funktion des Silikastaubgehaltes nach /30/

Anlage 6



Bluten von Mörteln mit und ohne Silikastaub nach  
/30/

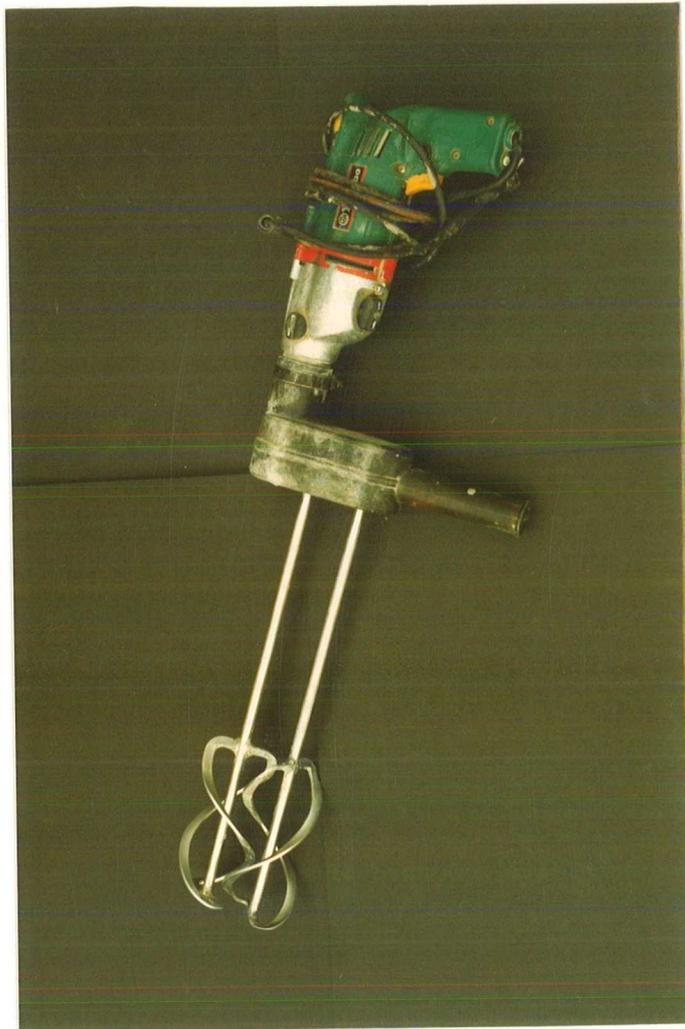
Umfang der Voruntersuchungen mit Angabe der Zusatzmitteldosierung

Silikastaub		Temperatur (° C)								
Sorte	M.-%	5			20			30		
		FM	EH1	EH2	FM <sup>1)</sup>	EH1 <sup>2)</sup>	EH2 <sup>3)</sup>	FM	EH1	EH2
Nullversuch		-	-	1,0*	-	-	1,0*	-	-	1,0; 1,5
A	5	-	-	1,5	-	-	1,0*;1,5*;2,5;3,0	-	-	-
	10	-	-	1,5	4,0;5,0	1,0	1,5; 2,5	-	-	-
	15	-	-	-	6,0	-	1,5	-	-	-
B	5	-	-	-	-	-	1,0;1,5*	-	-	-
	10	-	-	-	4,0	1,0*	1,5;2,0	-	-	-
	15	-	-	-	-	-	2,0; 2,5; 3,0	-	-	-
C	5	-	-	1,0;1,5*	-	-	1,0*;1,5; 2,0	-	-	1,5
	10	-	-	1,5	1,0;1,5;2,0;2,5	-	2,0	-	-	-
	15	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-
D	5	-	-	1,5	-	-	1,0*;1,5; 2,0	-	-	1,5
	10	-	-	1,5	2,0; 3,0; 4,0	-	-	-	-	-
	15	-	-	1,5	-	-	1,5	-	-	-
E	5	-	-	1,0*;1,5	-	-	1,0*;1,5	-	-	1,0*; 1,5*
	10	-	-	1,0	-	-	1,0*;1,5	-	-	1,0
	15	-	-	1,0	-	-	1,0*	-	-	1,0
F	5	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-
	10	-	-	-	1,0;1,5;2,0;3,0	-	2,0; 3,0	-	-	-
	15	-	-	-	4,0	-	-	-	-	-

1) Fließmittel: Addiment 503 2) Einpreßhilfe: Tricosal 181 3) Einpreßhilfe: Tricosal 188

\* Mehrfachversuche ( 2 bis 5)

Anlage 8



Bohrmaschine mit Rührwerk zum Mischen der  
Einpreßmörtel

Umfang der Hauptversuche mit Angabe der Zusatzmitteldosierung

Silikastaub Sorte M.-%	Temperatur (° C)								
	FM	5 EH1	EH1	FM <sup>1)</sup>	20 EH1 <sup>2)</sup>	EH1 <sup>3)</sup>	FM	30 EH1	EH2
Nullversuche	-	-	1,0	-	-	1,0*	-	-	-
A 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	5,0	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
B 5	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-
10	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	2,0;2,5	-	2,0	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D 5	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-
10	-	-	-	4,0	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E 5	-	-	1,0	-	-	1,0	-	-	1,5
10	-	-	1,0	-	-	1,0	-	-	1,0
15	-	-	1,0	-	-	1,0*	-	-	1,0
F 5	-	-	-	-	-	2,0	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1) Fließmittel: Addiment 503    2) Einpreßhilfe: Tricosal 181    3) Einpreßhilfe: Tricosal 188

\* Mehrfachversuche (2)

## Anlage 10

Untersuchungen des verwendeten Zementes PZ 45 der Firma Dyckerhoff, Neubeckum

Untersuchungsgegenstand		Versuch	Anforderung
Glühverlust	Gew.-%	3,13	$\leq 5,0$
davon CO <sub>2</sub>	"	2,58	$\leq 2,5$
Salzsäureunlösliches	"	1,38	$\leq 3,0$
Magnesium (MgO)	Gew.-%	1,83	$\leq 5,0$
Chlorid (Cl)	"	0,047	$\leq 0,1$
Sulfat (SO <sub>3</sub> )	"	3,03	$\leq 4,0$
bestimmte Reindichte	g/cm <sup>3</sup>	3,091	-
Porosität des Zementbettes	Vol.-%	0,53	-
Siebrückstand 0,2	Gew.-%	0,00	$\leq 3,0$
spezif.Oberfl.nach Blaine	cm <sup>2</sup> /g	3890	$\geq 2200$
Erstarren			
Wasserzusatz	Gew.-%	28,4	-
Erstarrungsbeginn	min	154	$\geq 60$
Erstarrungsende		221	$\leq 720$
Druckfestigkeit			
Alter (Tage)			
2		32	$\geq 20$
7	N/mm <sup>2</sup>	44	-
28		52	$\geq 45 \leq 65$
Raumbeständigkeit nach 2stündiger Kochzeit scharfkantig, rissefrei und ohne Verkrümmung (d.h. raumbeständig)			

Anlage 11

Chemische Bestandteile der Silikastäube A - E in Gewichtsprozent

Hersteller	I			II		
	A		B	C	D	E
Probe	unkomp.		komp.	komp.	unkomp.	komp.
Lieferform	unkomp.		komp.	komp.	unkomp.	komp.
Glühverlust	0,83	1,11	2,33	1,34	1,02	5,71
Kieselsäure (SiO <sub>2</sub> )	93,48	91,86	94,63	96,33	96,59	90,77
Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2)	2)	0,11	0,05	0,04	1)
Eisenoxid (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2)	2)	0,04	0,05	0,11	0,04
Calciumoxid (CaO)	2)	2)	0,48	0,20	0,48	0,28
Magnesiumoxid (MgO)	2)	2)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Natriumoxid (Na <sub>2</sub> O)	0,27	0,24	0,19	0,14	0,06	0,85
Kaliumoxid (K <sub>2</sub> O)	0,85	0,92	0,58	0,60	0,22	0,50
Chlorid (Cl)	0,04	0,04	0,11	0,08	0,06	0,04
Bleioxid (PbO)	0,03	0,03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Zinkoxid (ZnO)	<0,01	<0,01	0,05	0,01	0,01	0,01
Phosphat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,03	0,03	0,09	0,09	0,06	1)
Sulfat (SO <sub>3</sub> )	0,20	0,21	0,13	0,10	0,28	0,02

1) Bestimmung nicht durchführbar, da Eigenfärbung vorhanden

2) Bestimmung nicht durchgeführt

Eine Analyse für den Staub F wurde nicht durchgeführt.

## Anlage 12

### Schüttdichte

Die Bestimmung der Schüttdichte erfolgte nach DIN 1060 Teil 3  
(Baukalk, Physikalische Prüfverfahren)

Probe	A	B	C	D	E	F
Lieferform	unkomp.	komp.	komp.	unkomp.	komp.	komp.
Schüttdichte kg/dm <sup>3</sup>	0,2478	0,5794	0,5756	0,31336	0,6479	0,473

### Siebanalyse

#### Ultraschallbadanalyse

Probe	Durchgang in M.-% durch das Prüfsieb in mm	
	0,063	0,09
A	99,6	99,6
B	41,2	51,9
C	98,7	99,8
D	98,5	99,4
E	60,1	92,5

Der Staub F wurde nicht analysiert.

Nullversuche

Masseanteil Zement   Silika		W/B	EH - Tricosal 188	Tauchzeit				Raum-   Mörtel- Temperatur	Raum- änderung	Druckfe- stigkeit	
%		-	%	ME	30	60	90	° C		%	N/mm <sup>2</sup>
				sec							
100	-	0,44	1,0	42	-	-	-	5	12	-	-
100	-	0,44	1,0	41	77	84	92	5	9	0,13	44
100	-	0,44	1,0	53	58	56	60	20	24	-2,62	57
100	-	0,46	1,0	38	49	50	58	20	25	-2,33	48
100	-	0,44	1,0	73	-	-	-	30	29	-	-
100	-	0,44	1,5	86	-	-	-	30	29	-	-

Staub A -Fesil-Silika SL 824, unkompaktiert

Masseanteil Zement   Silika		W/B	EH- Tricosal 188	Tauchzeit				Raum-   Mörtel- Temperatur	Raum- änderung	Druckfe- stigkeit	
%		-	%	ME	30	60	90	° C		%	N/mm <sup>2</sup>
95	5	0,44	1,5	121	-	-	-	5	10	-	-
90	10	0,44	1,5	1)	-	-	-	5	11	-	-
85	15	0,44	1,5	1)	-	-	-	5	-	-	-
95	5	0,44	1,5	120	-	-	-	20	23	-	-
90	10	0,44	1,5	>180	-	-	-	20	23	-	-
85	15	0,44	1,5	1)	-	-	-	20	-	-	-

1) Versuch abgebrochen, Tauchstab blieb stecken

Staub B : Fesil-Silika 837, kompaktiert

Masseanteil Zement   Silika		W/B	EH- Tricosal 188	ME	Tauchzeit			Raum-   Mörtel- Temperatur	Raum- änderung	Druckfestig- keit	
%		-	%	sec				° C	%	N/mm <sup>2</sup>	
95	5	0,44	1,5	38	-	-	-	20	23	-	-
95	5	0,44	2,0	36	43	51	58	20	25	-0,19	44
90	10	0,44	2,0	40	-	-	-	20	19	-	-
90	10	0,44	2,0	45	55	69	74	20	27	-0,07	41
85	15	0,44	2,0	48	-	-	-	20	24	-	-
85	15	0,44	2,5	49	-	-	-	20	24	-	-
85	15	0,44	3,0	58	-	-	-	20	25	-	-

Staub C - Elkem Micro-Silika 970 D

Masseanteil Zement   Silika		W/B	EH- Tricosal 188	Tauchzeit				Raum-   Mörtel- Temperatur	Raum- änderung	Druckfestig- keit
%		-	%	ME	30	60	90	° C	%	N/mm <sup>2</sup>
95	5	0,44	1,5	35	-	-	-	5	10	-
95	5	0,43	1,5	49	-	-	-	5	10	-
90	10	0,44	1,5	56	-	-	-	5	11	-
85	15	0,44	1,5	81	-	-	-	5	10	-
95	5	0,44	1,5	60	-	-	-	20	22	-
95	5	0,44	2,0	32	-	-	-	20	22	-
90	10	0,44	2,0	37	-	-	-	20	20	-
90	10	0,44	2,0	48	61	74	90	20	25	0,85
90	15	0,44	2,0	46	-	-	-	20	24	-
90	15	0,44	2,5	61	-	-	-	20	20	-

Staub D: Elkem Micro-Silika 970 U

Masseanteil Zement   Silika		W/B	EH- Tricosal 188	Tauchzeit				Raum-   Mörtel- Temperatur	Raum- änderung	Druckfestig- keit	
%		-	%	ME	30	60	90	° C		%	N/mm <sup>2</sup>
				sec							
95	5	0,44	1,5	67	-	-	-	5	12	-	-
90	10	0,44	1,5	239	-	-	-	5	11	-	-
95	5	0,44	1,5	64	-	-	-	20	24	-	-
95	5	0,44	2,0	44	-	-	-	20	24	-	-
95	5	0,44	2,0	48	54	55	65	20	25	1,16	46
95	5	0,44	1,5	56	-	-	-	30	30	-	-

Staub E : Elkem Micro-Silika, Emsac F 100 T

Masseanteil Zement   Silika		W/B	EH- Tricosal 188	Tauchzeit				Raum-   Mörtel- Temperatur	Raum- änderung	Druckfestig- keit	
%		-	%	ME	30	60	90	° C	%	N/mm <sup>2</sup>	
				sec							
95	5	0,40	1,0	38	-	-	-	5	11	-	-
95	5	0,40	1,0	49	72	116	132	5	11	0,89	48
90	10	0,40	1,0	43	-	-	-	5	11	-	-
90	10	0,40	1,0	48	50	51	51	5	11	1,11	39
85	15	0,41	1,0	45	-	-	-	5	11	-	-
85	15	0,41	1,0	44	43	42	43	5	11	1,32	39
95	5	0,40	1,0	41	-	-	-	20	23	-	-
95	5	0,40	1,0	41	77	88	93	20	24	-1,12	61
90	10	0,40	1,0	40	-	-	-	20	24	-	-
90	10	0,40	1,0	43	42	48	53	20	26	-0,57	56
85	15	0,40	1,0	43	-	-	-	20	23	-	-
85	15	0,40	1,0	44	42	39	37	20	27	-0,15	41
95	5	0,40	1,5	42	-	-	-	30	32	-	-
95	5	0,40	1,5	44	77	74	67	30	31	-0,16	69
90	10	0,40	1,0	43	-	-	-	30	30	-	-
90	10	0,40	1,0	44	72	nicht meßbar		30	35	±0,0	66
85	15	0,41	1,0	44	-	-	-	30	30	-	-
85	15	0,41	1,0	45	40	43	44	30	34	0,63	62

Staub F : Elkem

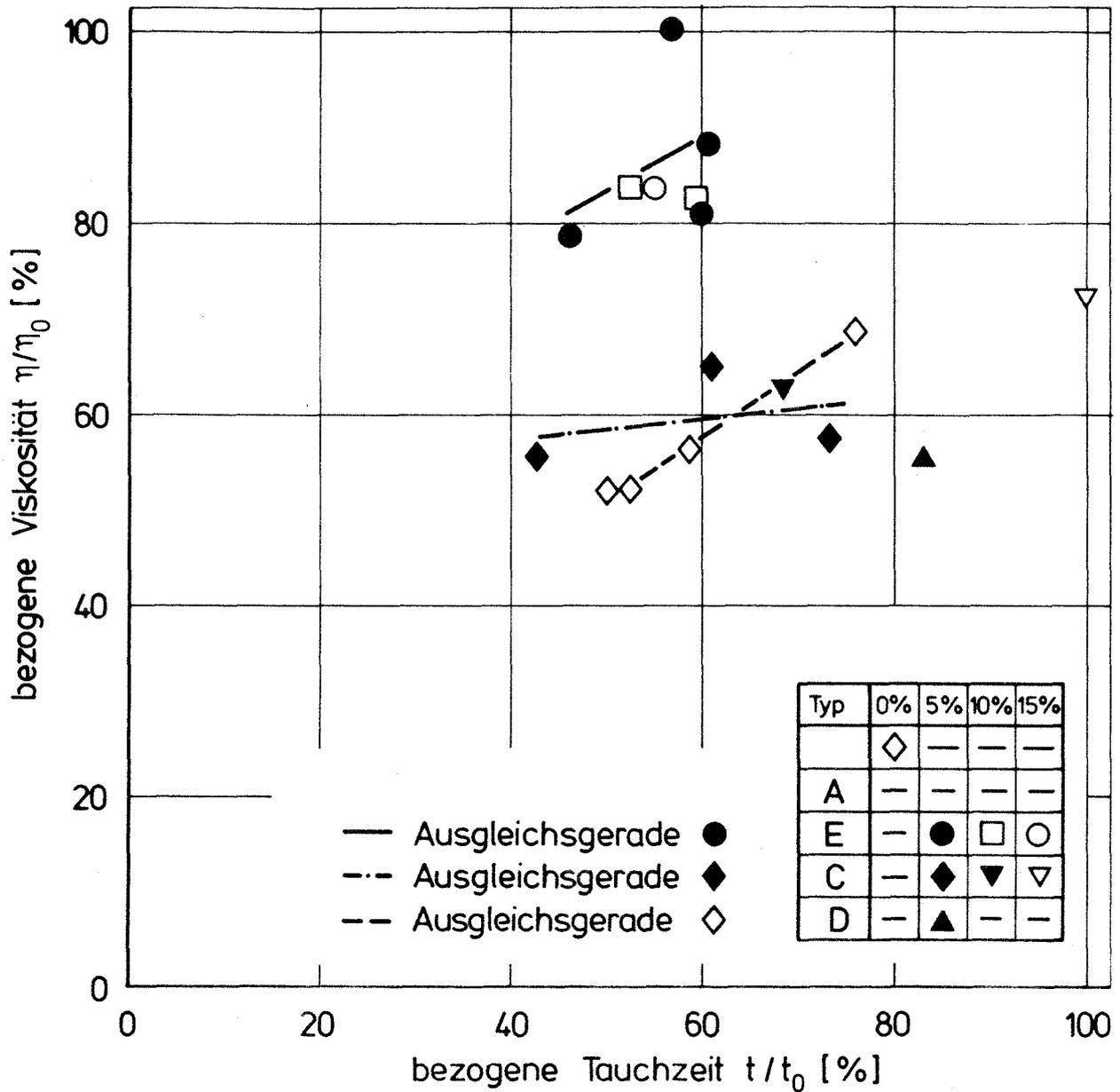
Masseanteil Zement   Silika		W/B	EH- Tricosal 188	Tauchzeit				Raum-   Mörtel- Temperatur	Raum- änderung	Druckfestig- keit	
%		-	%	Me	30	60	90	° C		%	N/mm <sup>2</sup>
				sec							
95	5	0,44	2,0	40	-	-	-	20	26	-	-
95	5	0,44	2,0	41	46	53	60	20	27	0,69	46
90	10	0,44	3,0	53	-	-	-	20	24	-	-

Anlage 19

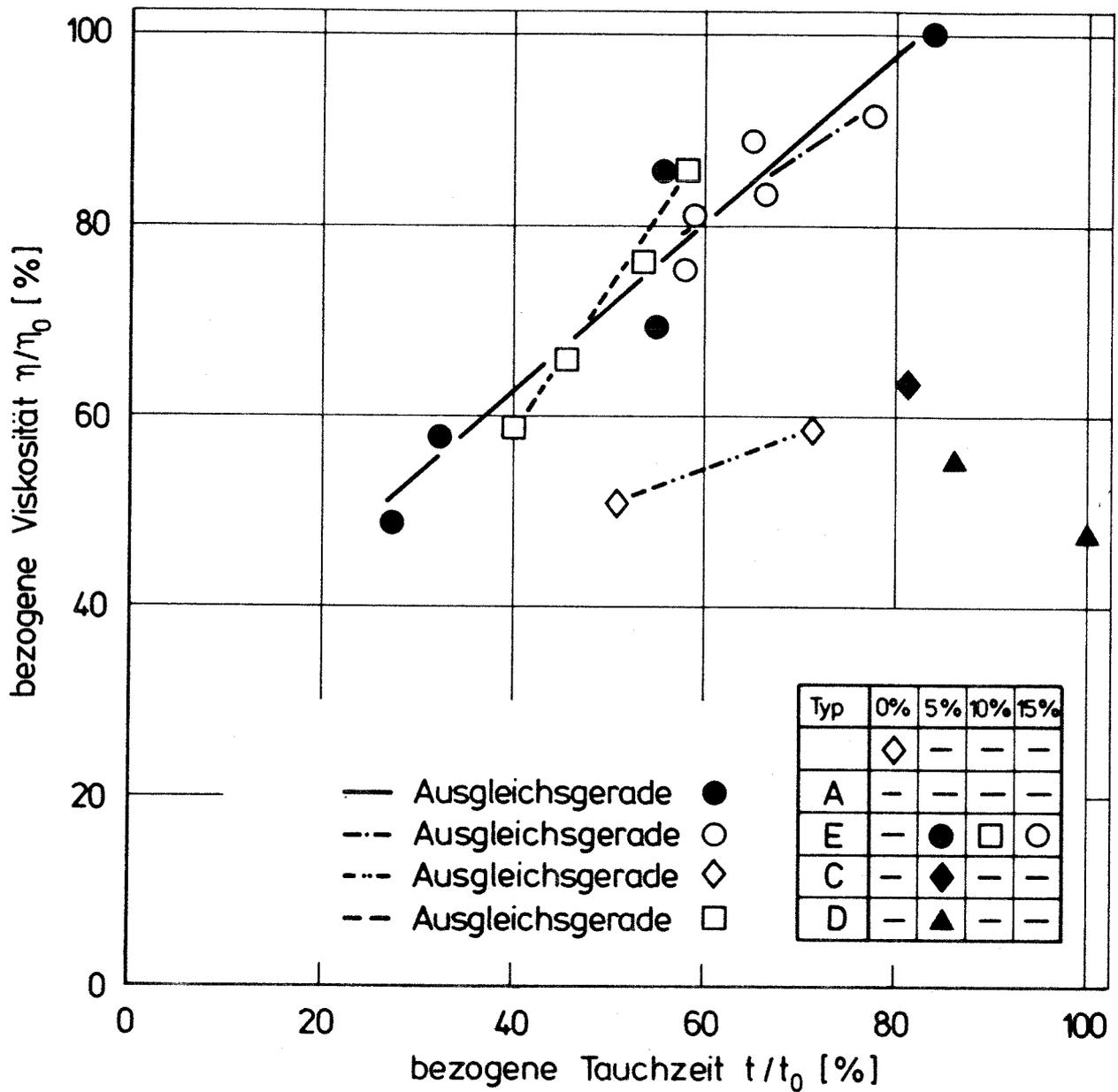
Einpreßmörtel mit Fließmittel Addiment 503 und verschiedener Silika-Stäube

Anlage 20

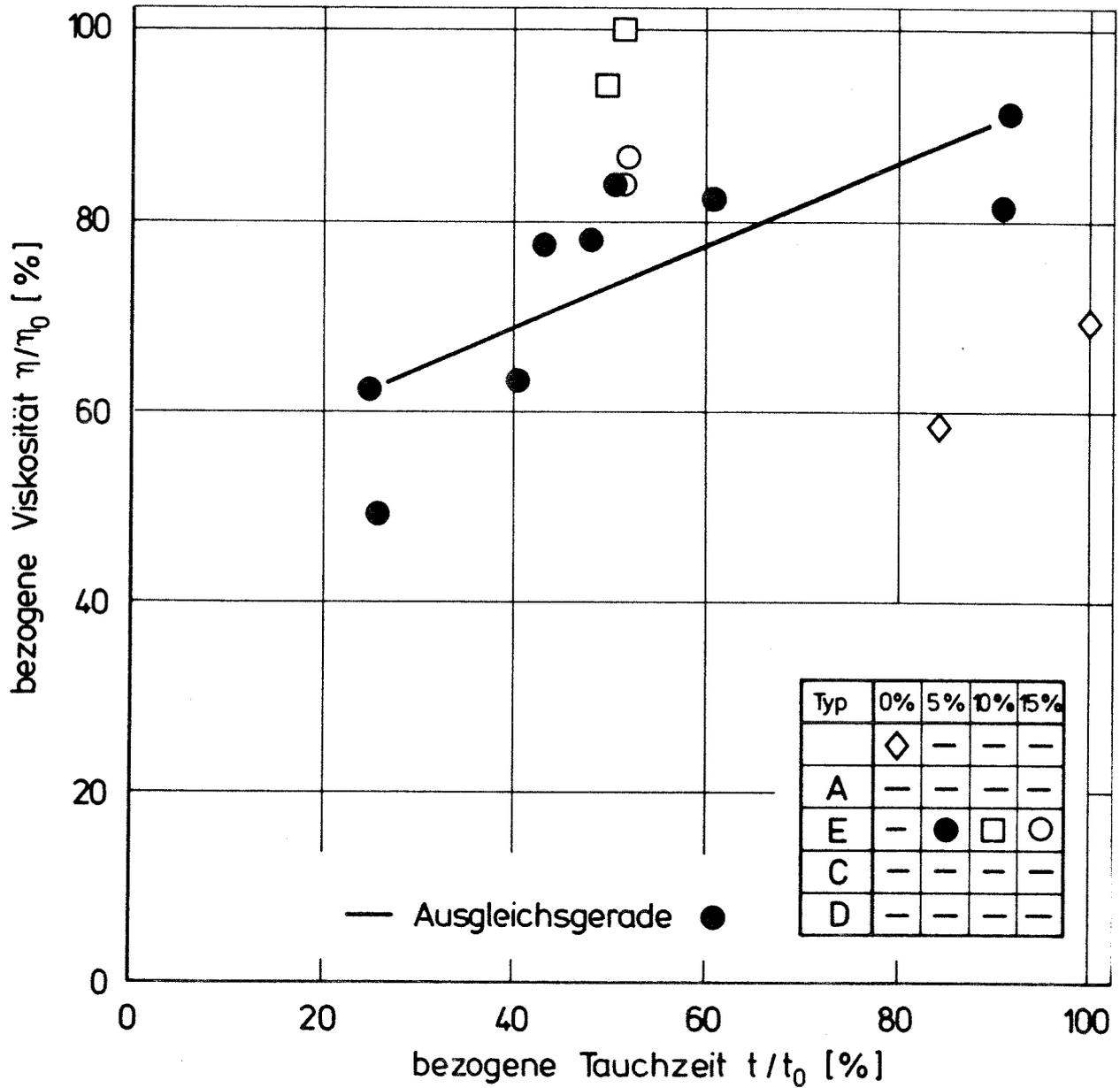
Masseanteil		W/B	FM Addiment 503	ME	Tauchzeit			Raum- Temperatur	Mörtel- Temperatur	Raum- änderung	Druckfestig- keit
Zement	Silika				30	60	90				
%		-	%	sec			° C		%	N/mm <sup>2</sup>	
90	10 (A)	0,44	5	38	-	-	-	20	23	-	-
90	10 (A)	0,44	5	51	34	30	29	20	24	-0,90	70
90	10 (C)	0,44	2	44	-	-	-	20	25	-	-
90	10 (C)	0,44	2,5	31	41	54	62	20	23	-1,64	58
90	10 (D)	0,44	4,0	40	-	-	-	20	23	-	-
90	10 (D)	0,44	4,0	43	36	36	40	20	24	-1,09	64



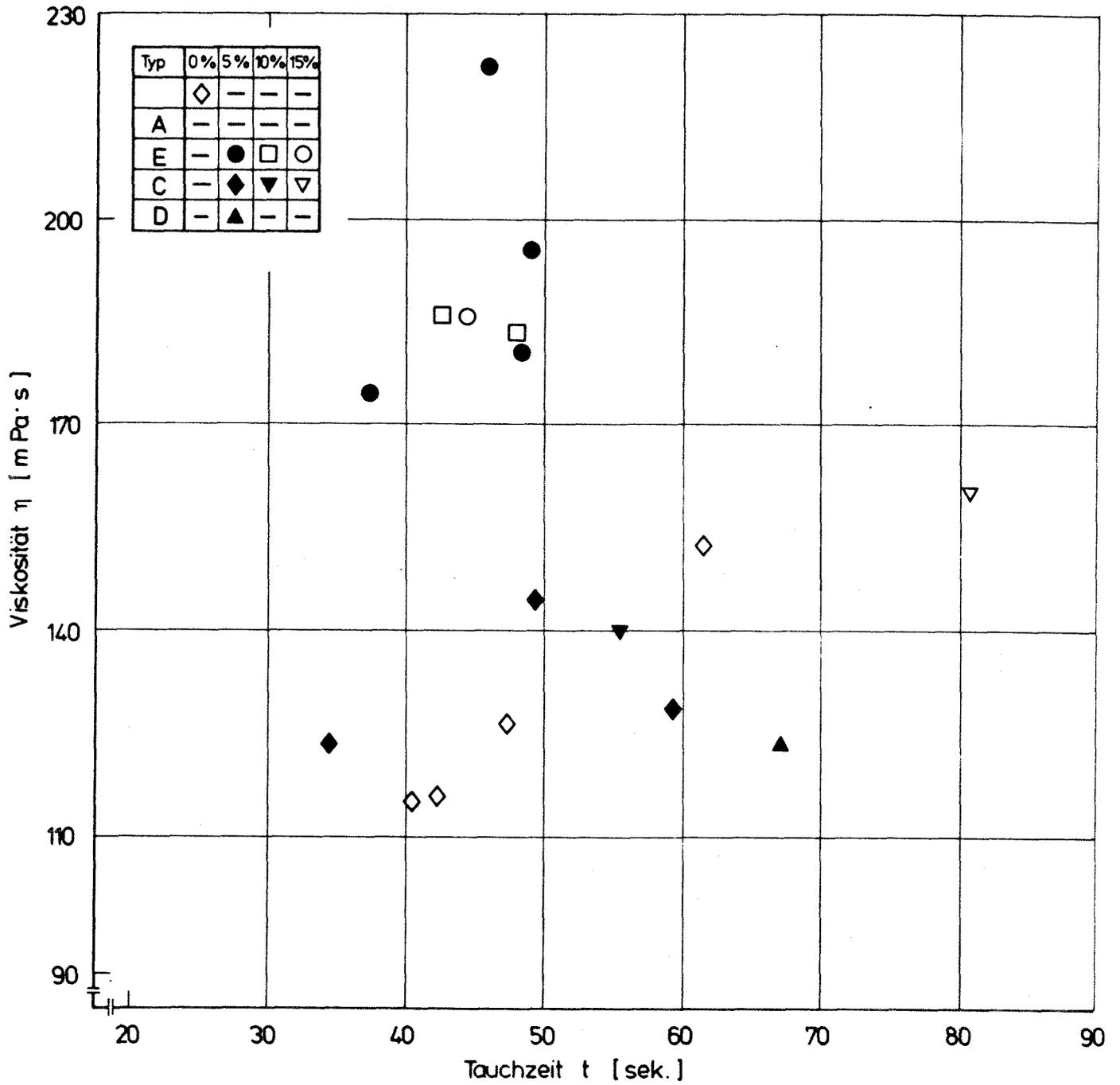
Bezogene Viskosität in Abhängigkeit von der bezogenen Tauchzeit bei einer Mörteltemperatur von 5°C



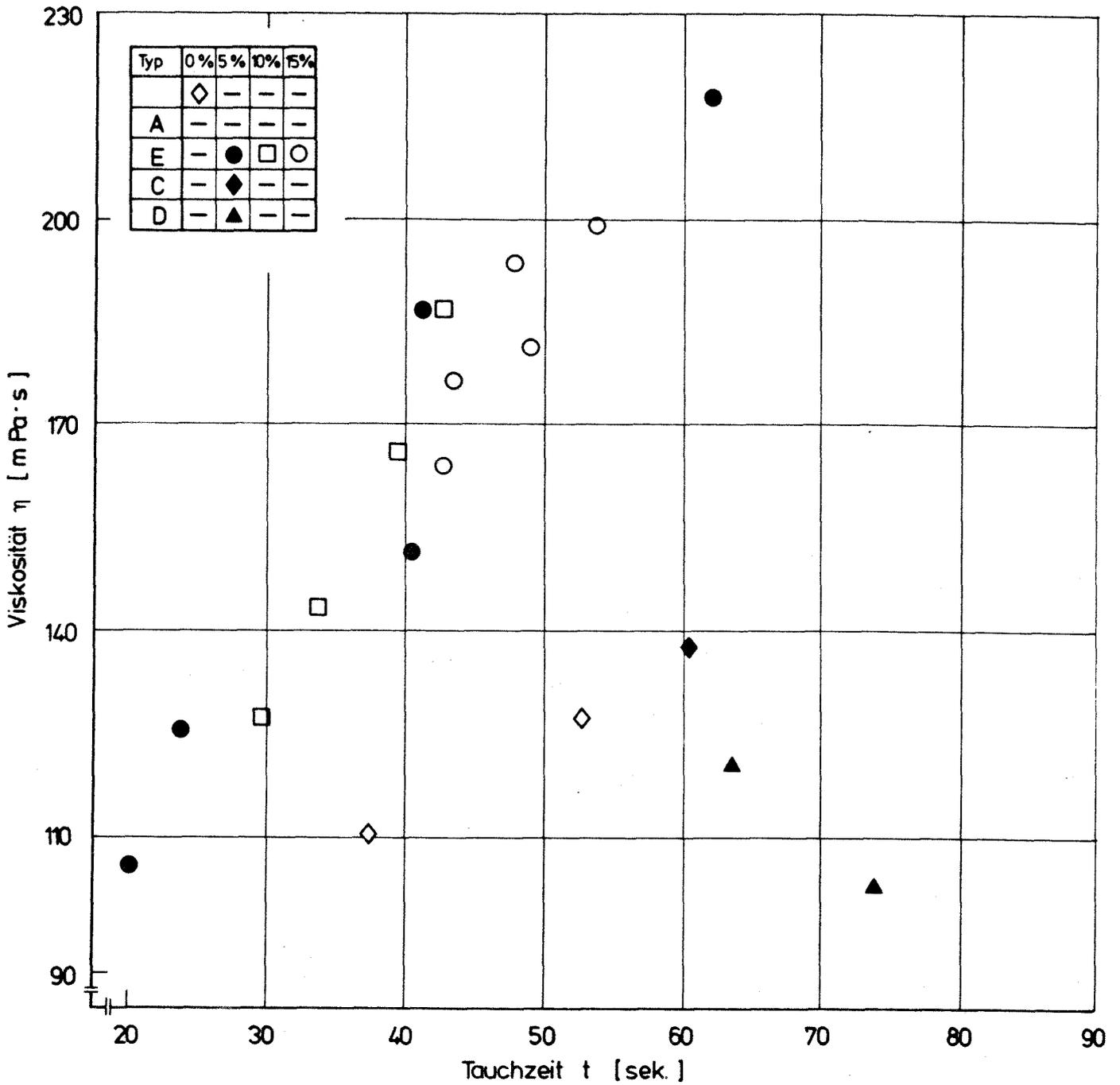
Bezogene Viskosität in Abhängigkeit von der bezogenen Tauchzeit bei einer Mörteltemperatur von 20° C



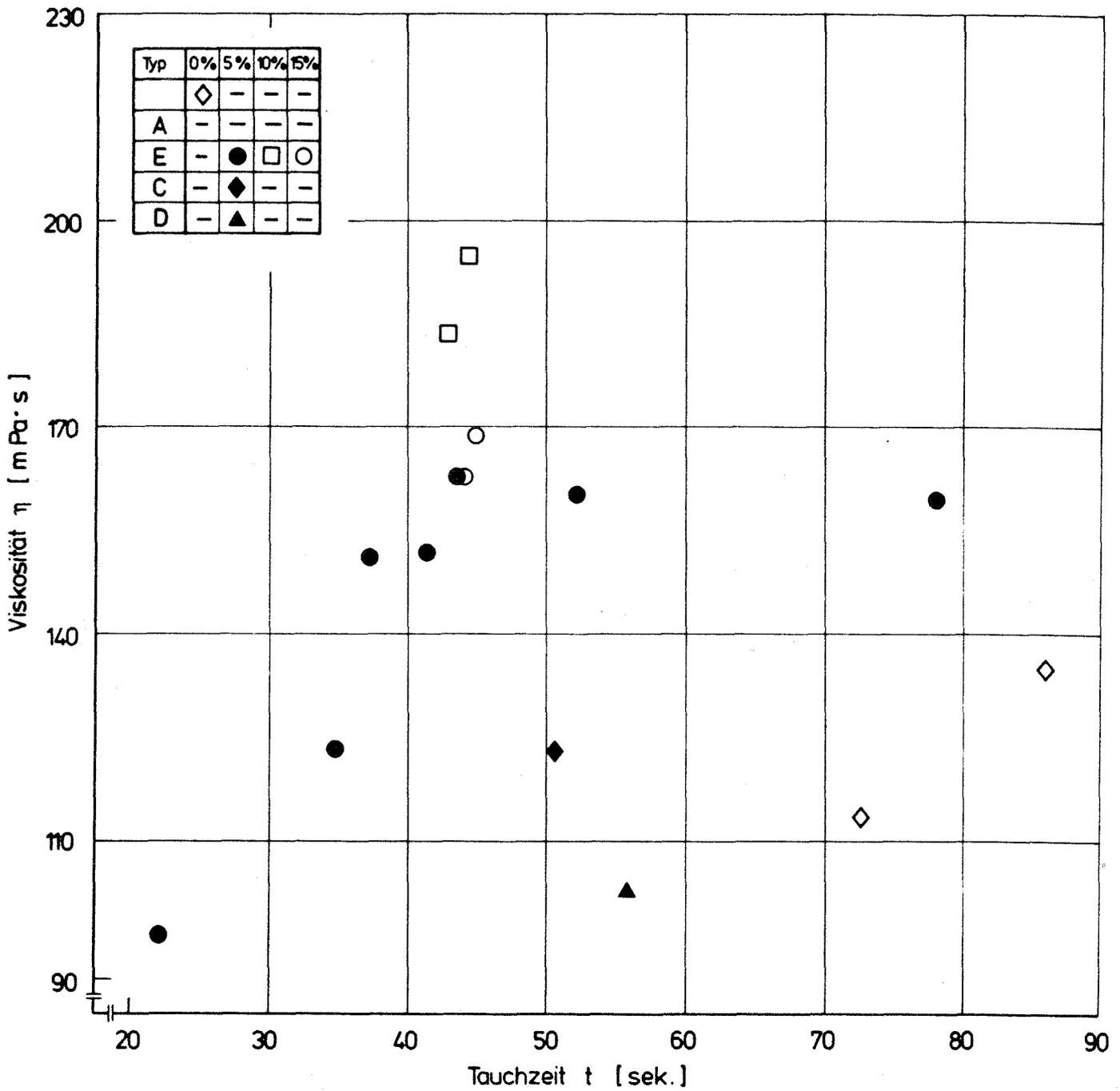
Bezogene Viskosität in Abhängigkeit von der bezogenen Tauchzeit bei einer Mörteltemperatur von 30 ° C



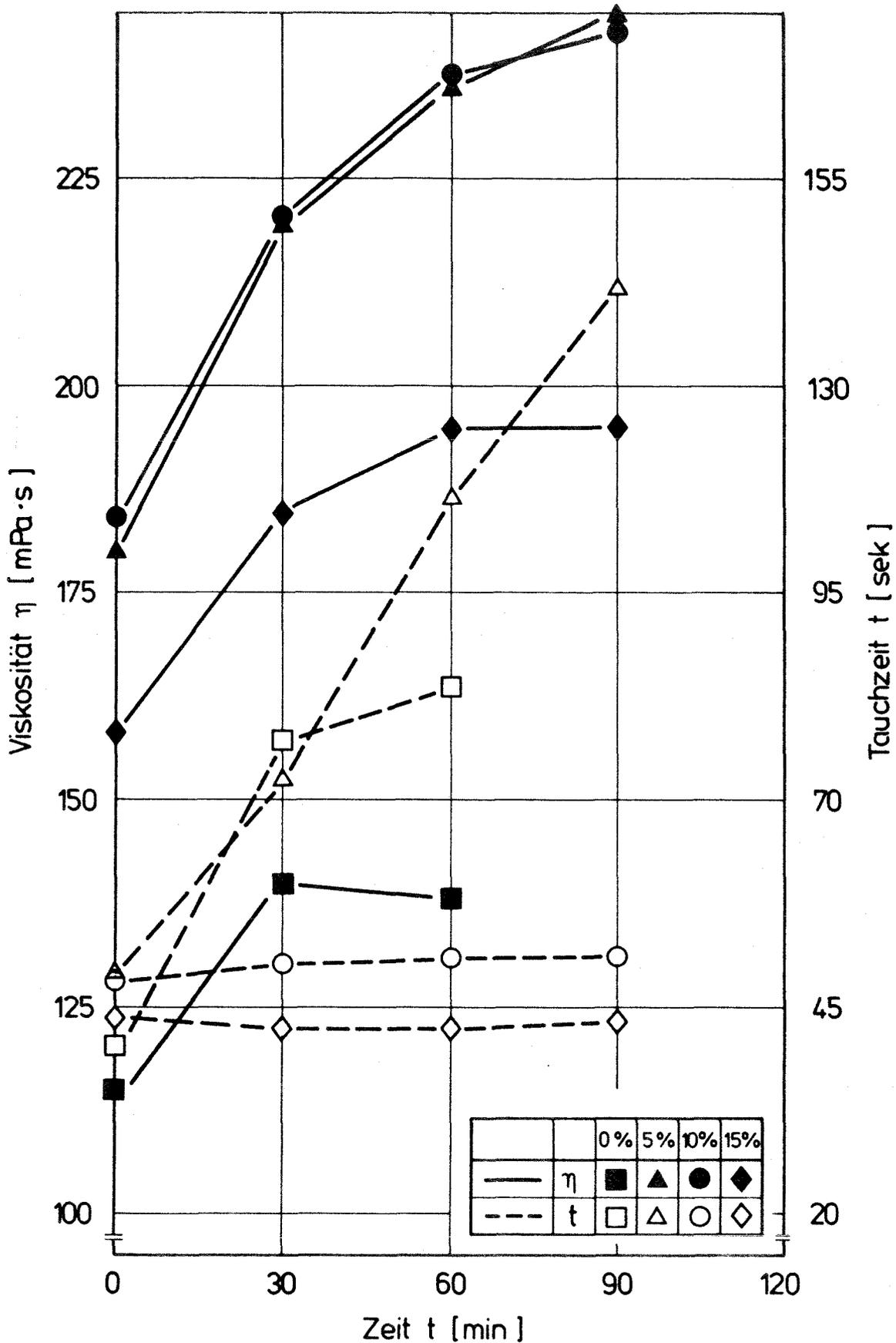
Viskosität in Abhängigkeit von der Tauchzeit bei einer Mörteltemperatur von 5 °C



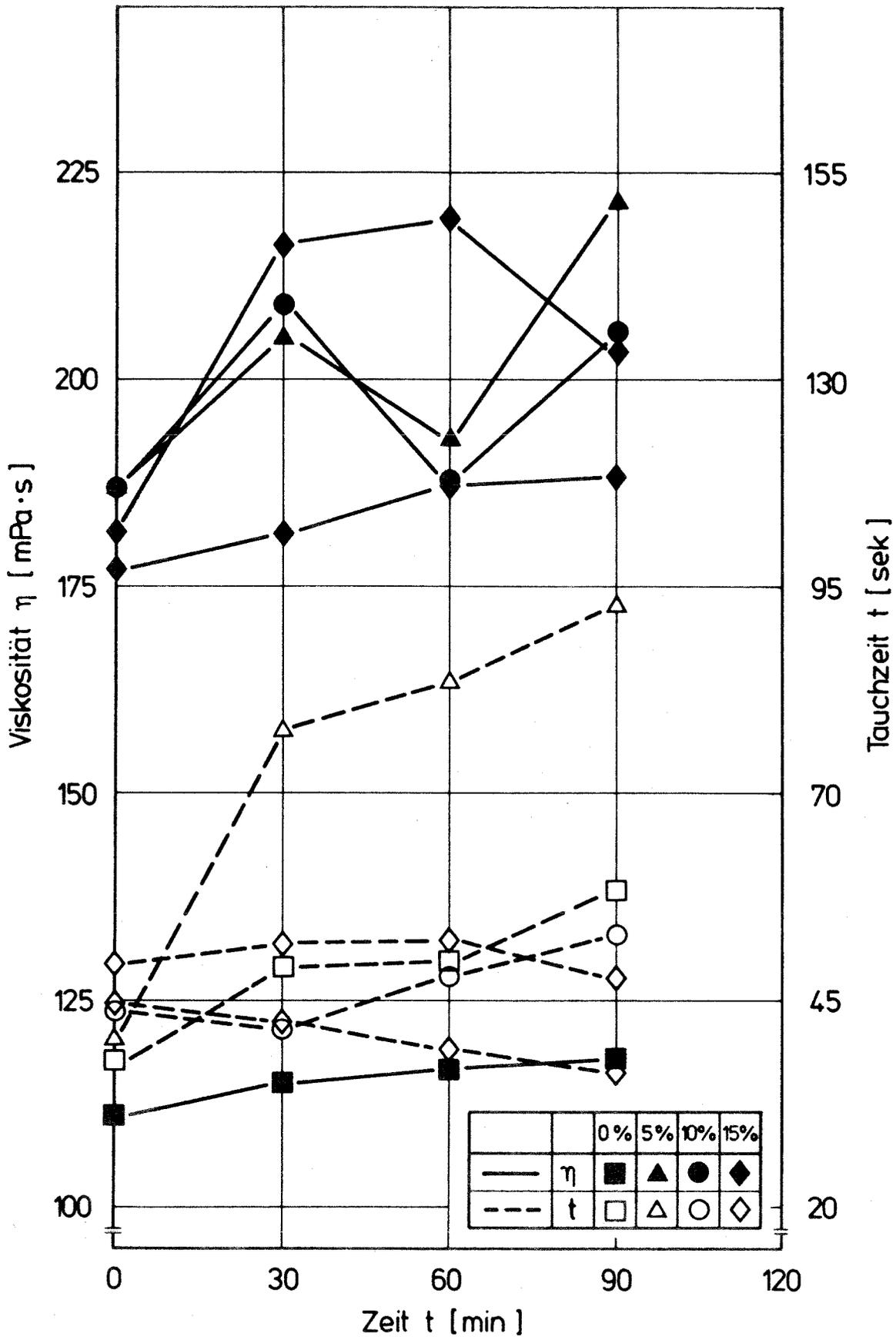
Viskosität in Abhängigkeit von der Tauchzeit bei einer Mörteltemperatur von 20 ° C



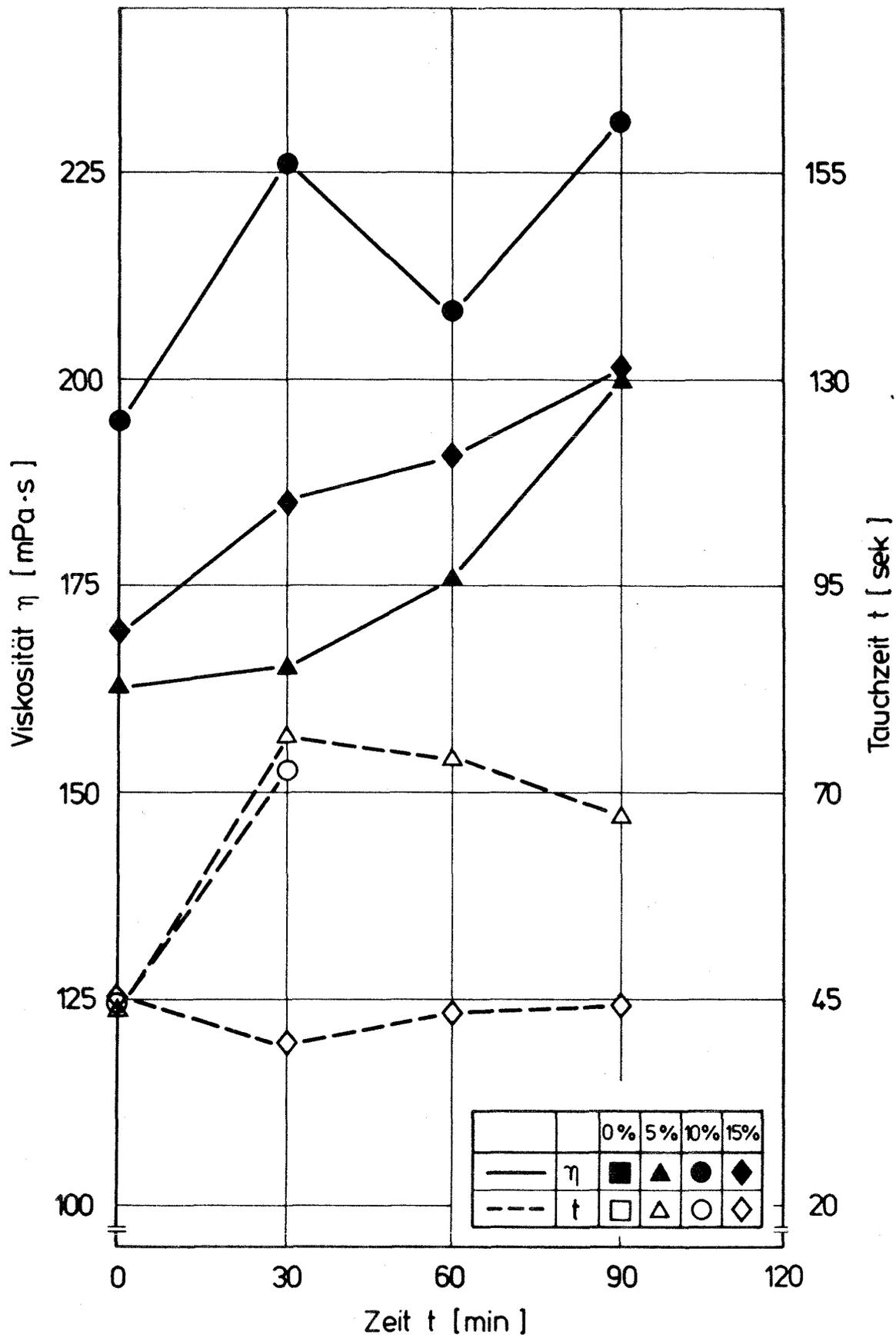
Viskosität in Abhängigkeit von der Tauchzeit bei einer Mörteltemperatur von 30° C



Viskosität und Tauchzeit des Silikastaubes E in Abhängigkeit von der Zeit bei einer Mörteltemperatur von 5° C

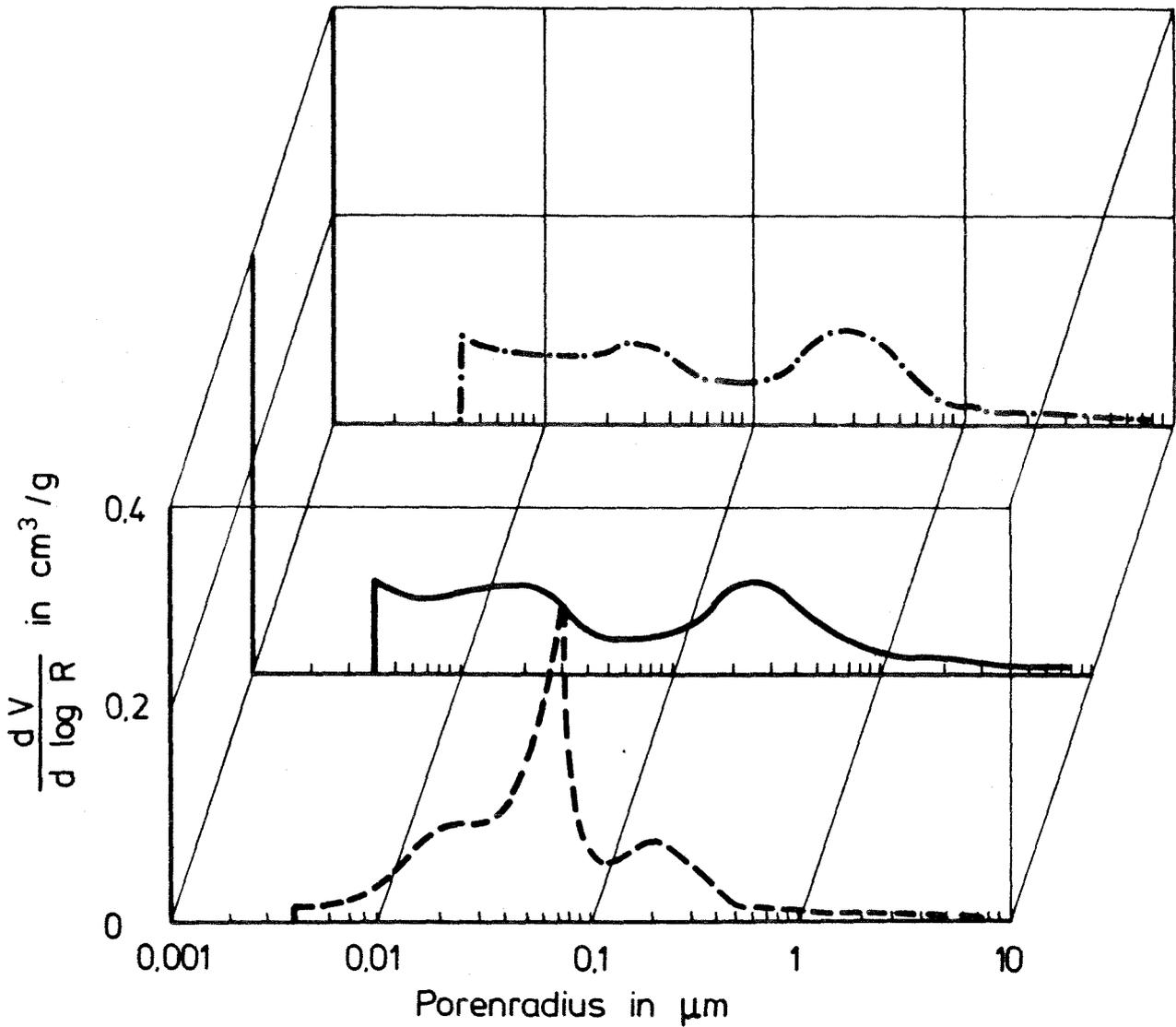


Viskosität und Tauchzeit des Silikastaubes E in Abhängigkeit von der Zeit bei einer Mörteltemperatur von 20° C



Viskosität und Tauchzeit des Silikastaubes E  
in Abhängigkeit von der Zeit bei einer  
Mörteltemperatur von 30° C

# Porosimeter Porenradien - Verteilungen



- ⋯ 10% Silika C  
 2.5% BV (Addiment 503)  
 27.7 V.-% Porenraum von 0.005 bis 5 μm
- 10% Silika C  
 2% EH (Tricosal 188)  
 27.4 V.-% Porenraum von 0.005 bis 5 μm
- - - ohne Silika  
 1% EH (Tricosal 188)  
 31.8 V.-% Porenraum von 0.005 bis 5 μm

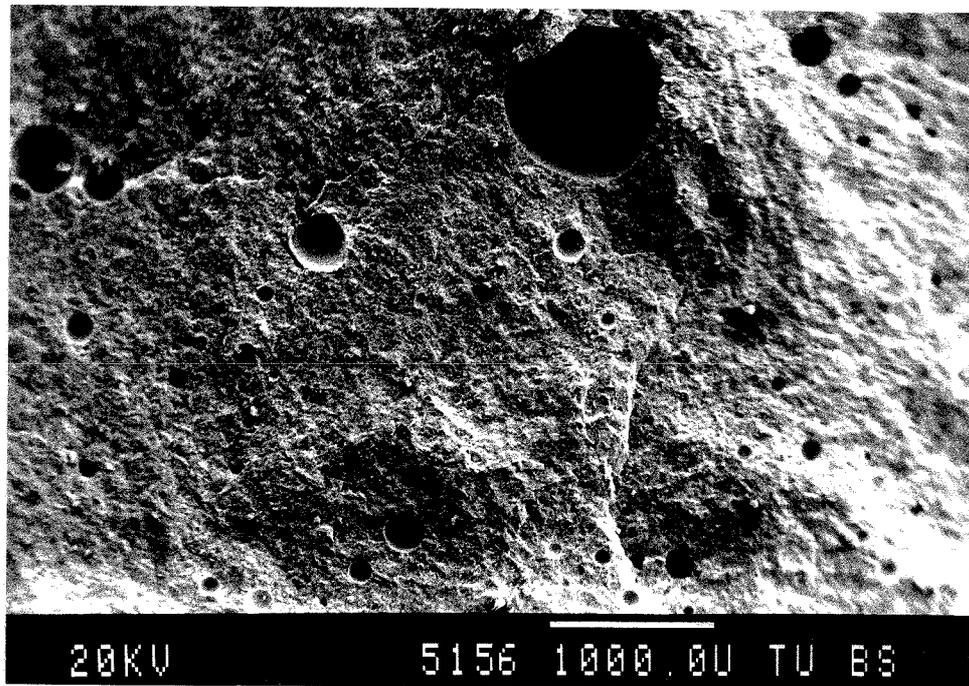


Bild 1: Typische Mikrostruktur eines Einpreßmörtels ohne Silikastaub nach 56 Tagen Abbindezeit

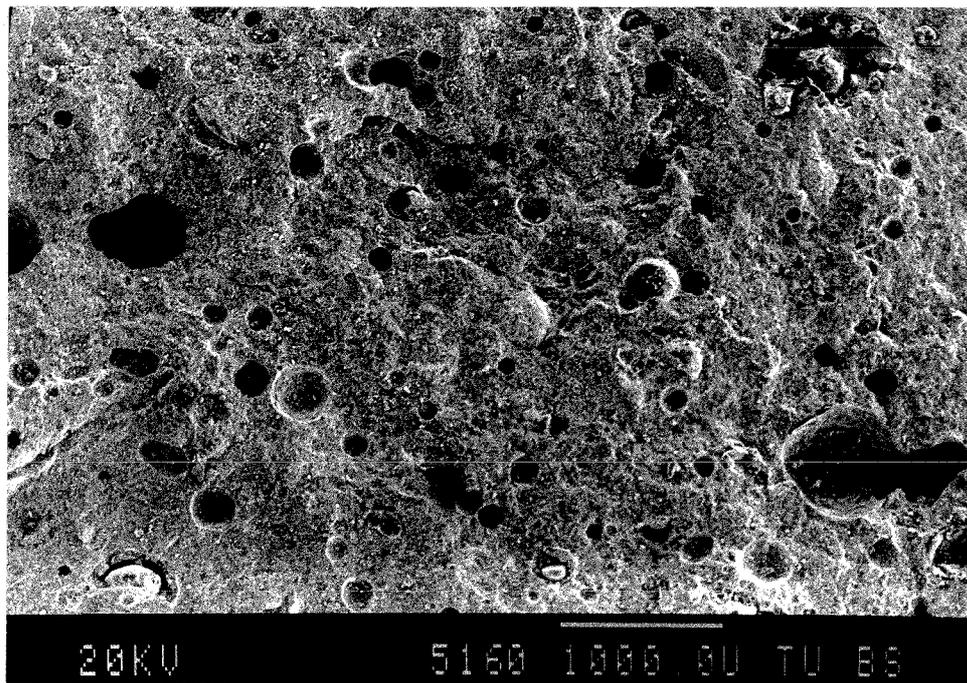


Bild 2: Einpreßmörtel mit Silikastaub und Einpreßhilfe als Zusatzmittel. Kein wesentlicher Unterschied zu Bild 1

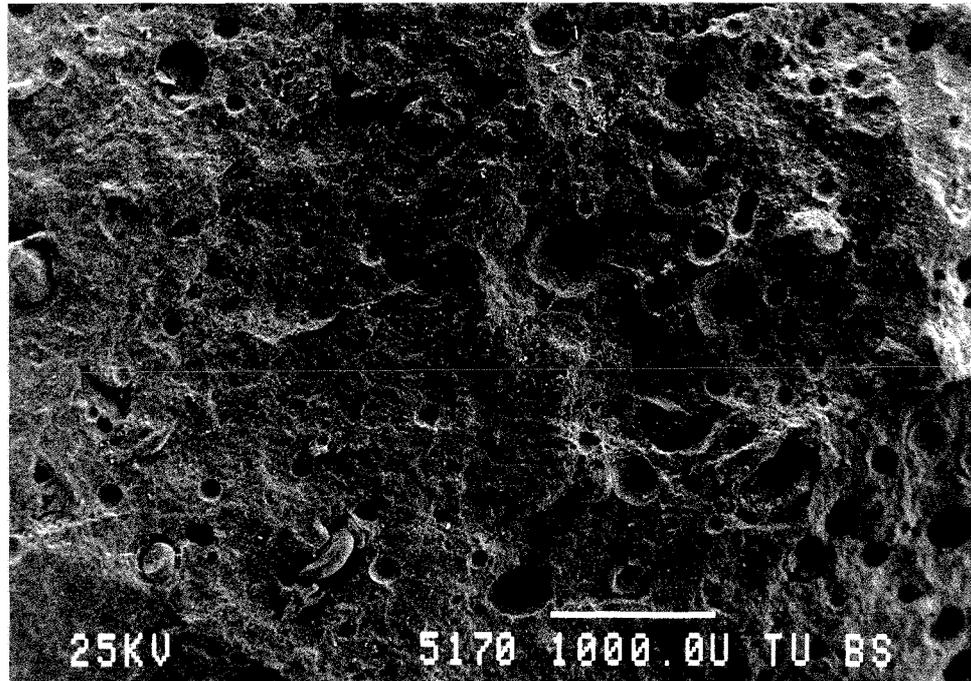


Bild 3: Auch wirkt sich die Verwendung von Betonverlüssiger nicht auf die Mikrostruktur aus. Wie in Bild 2 sind auch hier knollenartige inerte Zementbestandteile zu sehen

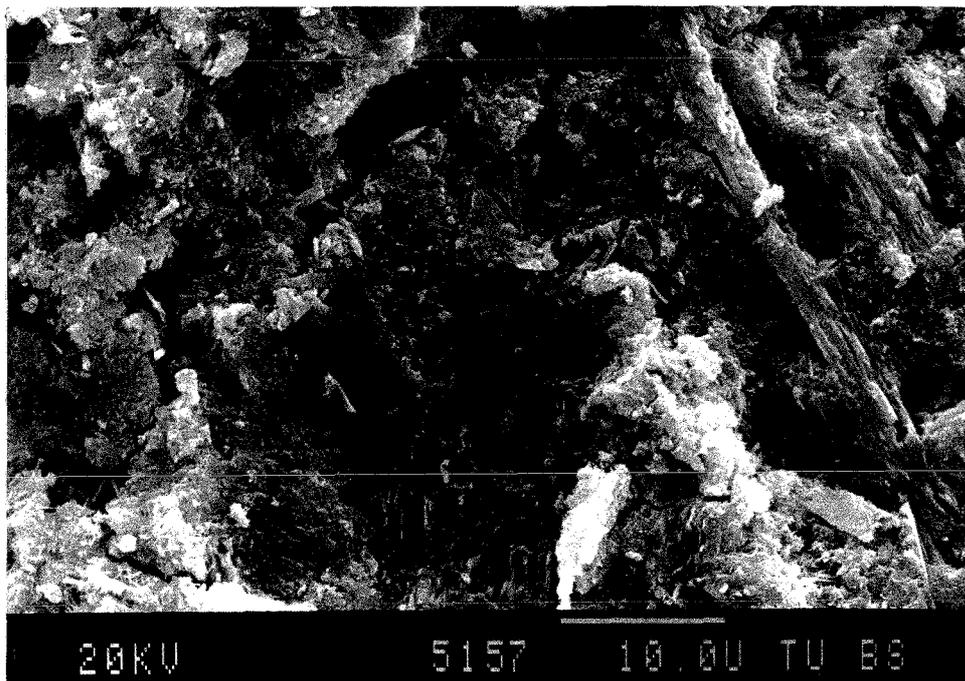


Bild 4: Bruchfläche eines relativ dichten Einpreßmörtels ohne Silikastaub

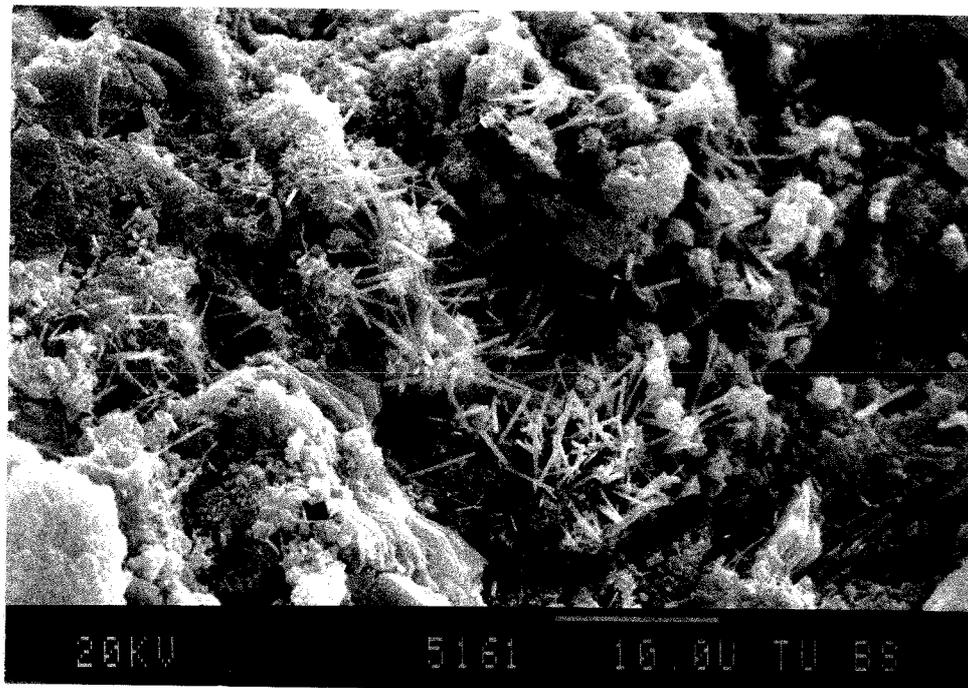


Bild 5: Struktur mit großen Nadeln - Ettringit - eines Einpreßmörtels mit Silikastaub. Silikastaub ist nicht erkennbar

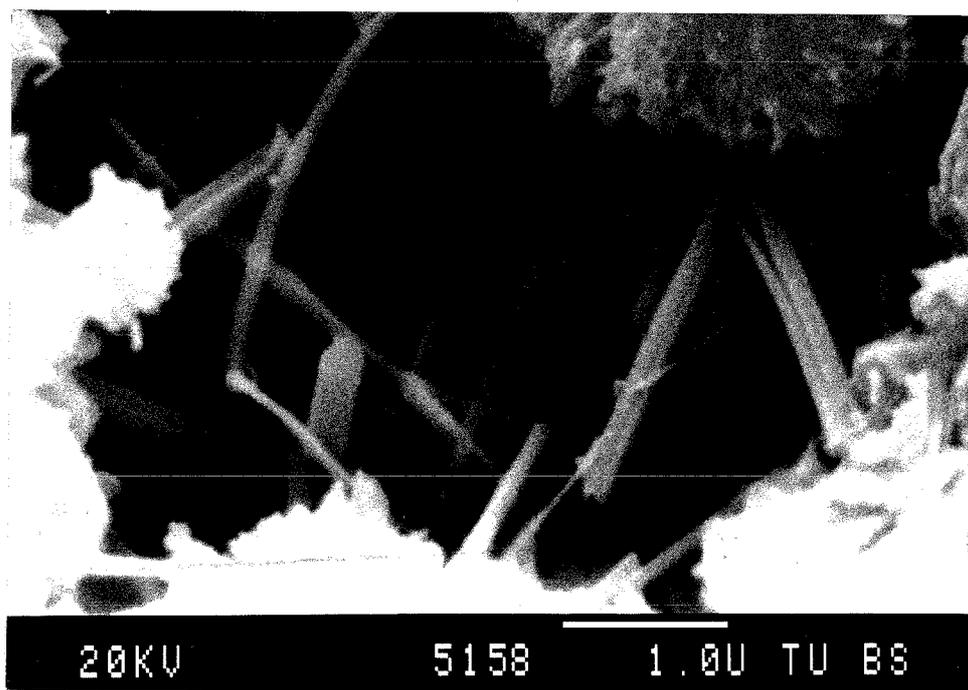


Bild 6: Detailaufnahme von Bild 5

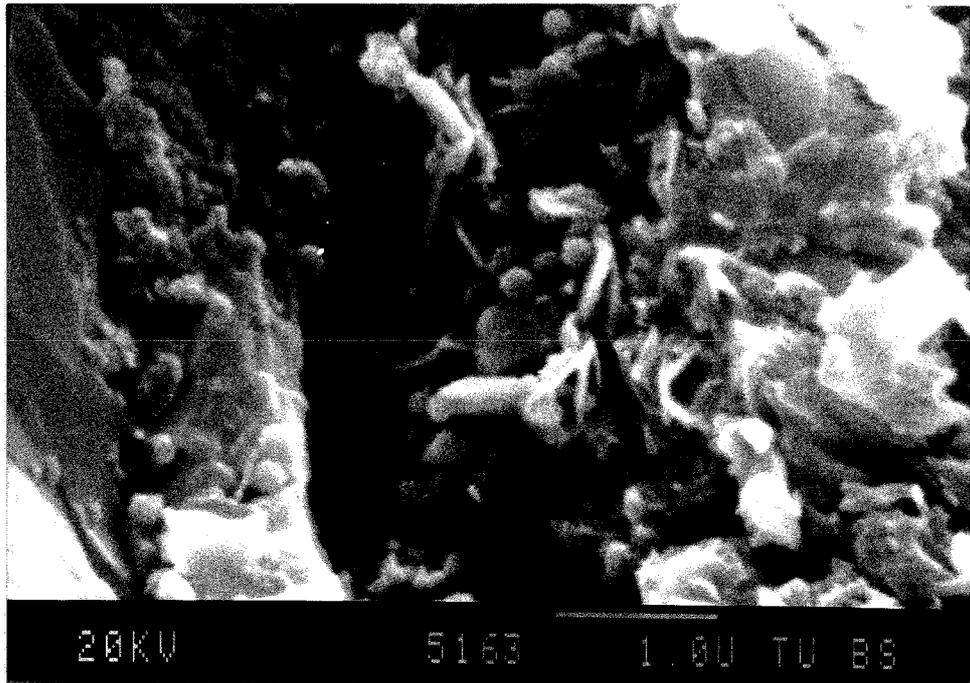


Bild 7: Noch nicht hydratisierter Silikastaub füllt kleine Poren

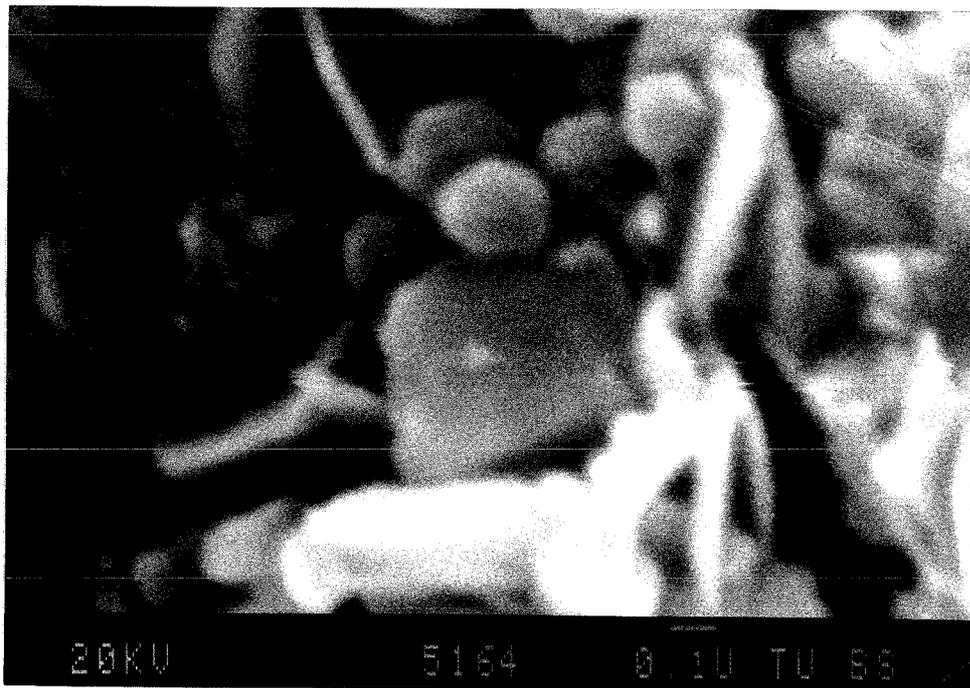


Bild 8: Detailaufnahme von Bild 7 ohne Verbesserung der Bildaussage

- 
- /1/ ACI  
Progress in Concrete.  
ACI local Chapter Symposium, Quebec Sept. 1981
- /2/ Aarsleff, Leif; Mollbak, Kjeld  
Silica-Concrete for Structural Application -  
Some Case Studies  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /3/ Aitcin, Pierre-Claude; Pigeon, M.  
Performance of Condensed Silica Fume Concrete used in  
Pavements and Sidewalks.  
In: Dur.of Build.Mat. 3(1986) 353-368.
- /4/ Aitcin, Pierre-Claude; Pinsonneault, P.; Rau, Gerhard  
The Use of Condensed Silica Fume in Concrete.  
In: The Material Science Society Symposium on Flyash,  
Boston, Nov.1981, 316-325.
- /5/ Aitcin, Pierre-Claude  
Condensed Silica Fume  
Universite de Sherbrooke, Quebec, Canada, Aug. 1983
- /6/ Aitcin, Pierre-Claude; Ballivy, G. ; Parizeau, R.  
The Use of Silica Fume in Grouts  
In: ACI SP-83 (Innovative Cement Grouting) 1983, 1-18.
- /7/ Asgeirsson, H.; Gudmundsson, Gudmundur  
Puzzolanic Activity of Silica Dust  
Cement and Concrete Research 9 (1979), S.249-252
- /8/ Rache, H.H.  
Densified Cement/Ultra-fine Particle-Based Materials.  
in: Sec.Int.Conf.on Superplasticizers in Concrete, Juni 1981
- /9/ Balaguru, P.; Kendzulak, John  
Flexural Behavior of Slurry Infiltrated Fiber Concrete  
(SIFCON) Made Using Condensed Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /10/ Bedard, Claude; Aitcin, Pierre-Claude  
A la recherche d'un beton de 150 MPa.  
in: Canad.J.Civ.Eng. 10(1983) Nr.4, S.600-613.

- 
- /111/ Bellander, Ulf  
Experiences with Silica Fume in Ready-Mixed Concrete  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /121/ Bernhardt, C.J.  
SiO<sub>2</sub>-stov som cementtilsetning  
Betongen Idag, April 1952, s. 29-53
- /131/ Buck, A.D.; Furkes, J.P.  
Characterization and Reactivity of Silica Fume  
U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station  
MP SL-81-13, July 1981  
CTIAC Report No.47, 12S. (NTIS AD A103 369)
- /141/ Buerge, Theodor A.  
14,000 psi in 24 hours  
Concrete International 9 (1983), S.36-41
- /151/ Buerge, Theodor A.  
High Strength Lightweight Concrete With Condensed  
Silica Fume  
ACI Publication SP-79-39 DETROIT 1983
- /161/ Buerge, Theodor A.  
Fiber Reinforced High-Strength Shotcrete with Condensed  
Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /171/ Buil, M.; Paillere, A.M.; Roussel, B.  
High strength Mortars Containing Condensed Silica Fume  
Laboratoire central des Ponts et Chaussees Paris, France  
12 pp., oder in: Cement and Concrete Research, Vol.14  
pp.693-704, 1984
- /181/ Bumbleton, Brian  
(Siliziumdioxid verhindert Alkaliangriff)  
Silica dilutes Alkali attack. (engl.)  
New Civ.Eng.(NCE) (1985)Nr.654, S.19-20, Abb.
- /191/ Butler, W.B.  
A Discussion of "Properties of Portland Cement Concrete  
containing Fly Ash and condensed Silica Fume " by P.K.Metha  
and O.E.Gjorv  
Cement and Concrete Research 13 (1983), S.291

- 
- /20/ Carette, G.G. ; Malhotra, V.M.; Aitcin, Piere-Claude  
Mechanical properties of portland cement concrete incorpo-  
rating blast-furnace slag and condensed silica fume  
CANMET Division Report MRP/MSL Report 84-73 (OP&J), Energy,  
Mines and Resources, Kanada, Ottawa, 1984, 21pp.
- /21/ Carette, G.G. ; Malhotra, V.M.  
Early-Age Strength Development of Concrete Incorporating  
Fly Ash and Condensed Silica Fume  
ACI Publication SP-79-41 DETROIT 1983
- /22/ Carette, G.G. ; Malhotra, V.M.  
Mechanical Properties, Durability and Drying Shrinkage of  
Portland Cement Concrete incorporating Silica Fume  
Division Report MRP/MSL 82-80 Draft, CANMET  
Energy, Mines and Resources Canada,  
Ottawa, June 1982, S. 3-13
- /23/ Carette, G.G. ; Malhotra, V.M.  
Silica Fume in Concrete - Preliminary Investigations  
CANMET Report  
82-1E, 1982, S.1-15
- /24/ Carlsson, Mats; Hope, Reidar; Pedersen, Jan  
Use of Condensed Silica Fume (CSF) in Concrete  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /25/ Chatterji, S. ; Thaulow, N. ; Christensen, P.  
Puzzolanic Activity of Byproduct Silica-Fume from  
Ferro-Silicon Production  
Cement and Concrete Research 12 (1982), S.781-784
- /26/ Cheng-yi, H.; Feldman, R.F.  
Influence of Silica Fume on the Microstructural Development  
in Cement Mortar  
Cement and Concrete Research, Vol.15, 1985, pp.285-294
- /27/ Dahl, Per A.  
Plastic Shrinkage of Silica Concrete - Consequences and  
Preventive Measures  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982

- 
- /28/ Diamond, S. ; Barneyback, R.S.; Struble, L.T.  
On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reaction  
Proc. 5. Int. Conf. on Alkali-Silica Reaction in Concrete  
Cape Town, 1981, S252/22
- /29/ Diamond, S.  
Effects of Microsilica on Poresolution Chemistry of cement  
Paste  
Am. Ceram. Soc. Journal, Vol.66, No.5, Mai 1983, pp.C-82 -84
- /30/ Domone, P.L.; Tank, S.B.  
Use of Condensed Silica Fume in Portland Cement Grouts  
Sec. int Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /31/ Einstabland, T.  
HIGH STRENGTH CONCRETE  
NORDISK BETONG 1-2-1986, S.55-58
- /32/ FMPA; Eichler ; Manns  
Untersuchung von Corrocem.  
FMPA Pruefungsbericht B 22518/Ei/Lo. Maerz 1979.
- /33/ FMPA; Zimbelmann  
Beaufsichtliche Zulassung "Macflow"  
Pruefungsbericht fuer Dyckerhoff & Widmann, Juli 1983
- /34/ FMPA  
Zulassungspruefungen fuer den Einpressmoertel der Firma Mac,  
Treviso, Italien.  
Forschungs-und Materialpruefungsanstalt  
Baden-Wuerttemberg, Juli 1981
- /35/ Feldman, P.F. ; Cheng-yi, H.  
Properties of Portland Cement-Silica Fume Pastes  
2. Mechanical Properties  
Cement and Concrete Research, Vol.15, S.943-952, 1985  
Pergamon Press, Ltd., USA
- /36/ Feldman, P.F. ; Cheng-yi, H.  
Properties of Portland Cement-Silica Fume Pastes  
1. Porosity and Surface Properties  
Cement and Concrete Research, V. 15, No.5, 1985, pp. 765-774

- 
- /377/ Feldman, R.F.  
Influence of Condensed Silica Fume and Sand/Cement Ratio on  
Pore Structure and Frost Resistance of Portland Cement Mor-  
tars  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /387/ Firma Dyckerhoff & Widmann  
Injektionsversuche mit MACFLOW - CABLE GROUT - Zement  
Original Pruefungszeugnis Nr.:LA 297/480, Aug.1979
- /397/ Firma Dyckerhoff & Widmann  
Injiziermörtelversuche mit MACFLOW - CABLE GROUT - Zement  
Pruefungszeugnis Nr.:LA 122/506, Maerz 1980
- /407/ Firma Dyckerhoff & Widmann  
Einpreßmörtelversuche mit dem Injizierzement "Macflow"  
bei unterschiedlichen Temperaturen  
Versuchsanstalt Utting  
Dyckerhoff & Widman
- /417/ Firma ELKEM-EMSAC  
A breakthrough in concrete technology
- /427/ Firma FESIL  
Fesil-Silica, A new additive for the improvement of concrete  
quality  
Technical Bulletin from A/S FESIL & CO, Norway, Juni 80
- /437/ Gautefall, Olav  
Effect of Condensed Silica Fume on the Diffusion of Chlo-  
chlorides through Hardened Cement Paste  
Sec. Int Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /447/ Gautefall, Olav ; Vennesland, Oystein  
Effect of Cracks on the Corrcsion of Embedded Steel in  
Silica-Concrete Compared to Ordinary Concrete  
Nordic Concrete Research Publication No.2  
The Nordic Concrete Federation (1983), S.17-28
- /457/ Gjorv, Odd E.  
Chemical Processes related to Concrete  
The Norwegian Institute of Technology, NTH  
Trondheim, Norway, 1983

- 
- /46/ Gjorv, Odd E.  
Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume  
ACI Publication SP-79-36 DETROIT 1983
- /47/ Gjorv, Odd E. ; Loland, Kjell E.  
Condensed Silica Fume  
Nordic Res. Sem., Trondheim, 1982
- /48/ Gjorv, Odd E. ; Johansen, Randulf  
Silica in concrete  
Sintef report n STF 65 A 81 031, Trondheim (Norway), T.2  
Juni 1981
- /49/ Goult, D.J. ; Pratt, P.L.  
The development of microstructure during the hydration of  
cement blends II Low alkali sulphate resistant cement blend-  
ed with silica fume  
First Int. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag  
and Other Mineral By-prod. in Concrete, Montebello, Canada  
1983
- /50/ Grutzeck, M.W.; Atkinson, S.; Roy, D.M.  
Mechanism of Hydration of Condensed Silica Fume in  
Calcium Hydroxide Solutions  
ACI Publication SP-79-33 DETROIT 1983
- /51/ Gudmundsson, Gudmundur  
Produktion of Blended Cement Based on Silika Fume  
- Practical Experiences  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /52/ Gutt, W.; Nixon, P.J.  
Use of Waste Materials in The Construction Industry. Analy-  
sis of the RILEM symposium by Correspondence  
Materials and Structures, Research and Testing, Vol.12,  
No.70, 1979, 255-306
- /53/ Helland, S. ; Einstabland, T. ; Hoff, A.  
High Strength Concrete  
Nordisk Betongdag 1983, The Norway Concrete Society, Oslo,  
Norwegen
- /54/ Helland, S.  
Silica Fume in High Strength Concrete  
nordisk betong, 1-2-1986, S. 91-95

- 
- /55/ Herfurth, E.A.  
Microsilica- Einsatzmoeglichkeiten und Auswirkungen in zementgebundenen Produkten  
1985
- /56/ Hirvonen, L.  
Spektralanalyse von Silikastaeben (finn.)  
VTT Espoo, Finland, Forschungsbericht, Jan.1983.
- /57/ Hjorth, L.  
Microsilica in Concrete  
Nordic Concrete Research Publication No.1  
The Nordic Concrete Federation (1982), S.9.1-18
- /58/ Hjorth, L.  
Silica Fumes as Additions to Concrete.  
Pres. at Engineering Foundation Conf. on  
"Characterization and Performance Prediction of Cements and Concretes", New Hampshire, July 1982.
- /59/ Hogstad, Ola  
Experiences from Ready-Mixed Production of Silica Concrete  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /60/ Holland, Terence C. ; Krysa, Anton H. ; Luther, Mark D. ;  
Lui, Tony C.  
Use of Silica-Fume Concrete to Repair Abrasion-Erosion Damage in the Kinzua Dam Stilling Basin  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /61/ Hustad, T.; Loland, Kjell E.  
Silika i Betong - Delrapport nr. 4: Permeabilitet  
Forskningsrapport STF65 A81031, SINTEF adv. 65, FCB, NTH,  
Trondheim, Juni 1981
- /62/ IBAC; Jortzick  
Zulassungspruefung des Mischproduktes "Corrocem"  
als Betonzusatzstoff nach DIN 1045  
IBAC Pruefbericht Nr.A 1185/2, Feb 1984
- /63/ IBAC; Jortzick  
Zulassungspraefungen an den Mischprodukten "Fesil-Silica LD 10" und "Fesil-Silica L5" als Betonzusatzstoff nach DIN 1045  
Pruefungsbericht Nr.A 1199/3, IBAC, Aachen, 1982

- 
- /64/ IBAC; Jortzick  
Zusatzversuche an Fesil-Silica  
Pruefbericht Nr.A 1447, IBAC, Aachen, Okt. 1984
- /65/ IfBt; Reiner Chemische Fabrik  
Pruefbescheid fuer "Corrocem" als Betonzusatzstoff  
nach DIN 1045.
- /66/ IfBt  
Silica-Staub "FESIL-Silica" als Betonzusatzstoff nach  
DIN 1045  
Pruefbescheid PA VII-21/302
- /67/ IfBt; Firma Dyckerhoff & Widmann  
Einpress-Trockenmoertel "Mac-Flow"  
Zulassungsbescheid Nr. Z-3.5-1, vom 21.3.85.
- /68/ Iler, P.K.  
Coagulation of colloidal silica by calcium ions, mechanism  
and effect of particle size  
Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 27, n 3,  
pp 476-488, 1975
- /69/ Iler, R.K.  
The Chemistry of silica  
Wiley, 1979
- /70/ Isabelle, H.L.  
Development of a Canadian Specification for Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /71/ Jahr, J.  
Possible Health Hazards from different Types of  
Amorphous Silicas - Suggested Threshold Limit Values.  
Inst. of Occupational Health, Oslo : 1980.
- /72/ Jahren, Per A.  
Performance of Concrete Incorporating Condensed Silica Fume  
and Superplasticizers  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag..  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /73/ Jahren, Per A.  
Use of Silica Fume in Concrete  
ACI Publication SP-79-32 DETROIT 1983.

- 174/ Jensen, Aage P.  
Beams and Shell in High-Strength Concrete  
Nordic Concrete Research Publication No.2  
The Nordic Concrete Federation (1983), S.114-124
- 175/ Johansen, Randulf  
Silica in Concrete, Report section Nr.6, Long term effects  
Report, Cement and Concrete Research Inst., Trondheim, Norway,  
Juni 81
- 176/ Johansen, Randulf  
Silicastov; fabrikkbetong, Varmblandet betong  
Report STF 65 F79035, Cement and Concrete research Institute  
The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway  
Aug 1979
- 177/ Johansen, Randulf  
Silikastov i Fabrikbetong, Langtidseffekter  
Report STF65 F79019, SINTEF dep FCB, Trondheim, Norway, Mai  
1979, 64 p.
- 178/ Johansen, Randulf  
Silika i betong - Delrapport nr.6 : Langtidseffekter  
Report STF65 A81031, SINTEF adv. 65, FCB, NTH, Trondheim,  
Juni 1981
- 179/ Jortzick; IBAC  
Pruefbericht Nr.A 1447  
Zusatzversuche an Fesil-Silica  
Institut für Bauforschung, RWTH Aachen  
s.auch Textstelle 0083, Sept 1984
- 180/ Kakizaki, M.; Okamoto, K. ; Takano, T.  
Study of Cast-in-Place High-Strength Concrete Made with  
Silica Fume, Alumina-Type Mineral, and Fly Ash  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- 181/ Kawamura, Mitsunori ; Takemoto, Kunio ; Hasaba, Shigemasa  
Effect of Silica Fume on Alkali-Silica Expansion in Mortars  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag....  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- 182/ Kawamura, Mitsunori ; Takemoto, Kunio ; Hasaba, Shigemasa  
Elucidation of Alkali-Silica Reaction Mechanism by the Com-  
bination of EDXA and Microhardness Measurements  
Trans. of the Japan Concrete Institute, Vol.4, 1982, pp.1-8

- 
- /83/ Kohno, Kiyoshi; Komatsu, Hiroyuki  
Use of Ground Bottom Ash and Silica Fume in Mortar and  
Concrete  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /84/ Kohno, Kiyoshi; Horii, K. ; Fukushima, H.  
Use of Fly Ash, Blast Furnace Slag and Condensed Silica  
Fume for Concrete Block Stripped Immediately After Molding  
ACI Publication SP-79-62 DETROIT 1983
- /85/ Kolderup, H.  
Particle Size Distribution of Fumes Formed by Ferrosilicon  
Production  
Journal of the Air Pollution Control Association  
Vol. 27, No.2, Februar 1977, S.127-130
- /86/ Kompen, Reidar  
Practical Experiences with Silica Concrete in the Field  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /87/ Kordina, Karl ; Osteroth, H.-H.  
Zum nachtraeglichen Verpressen schwer zugaenglicher  
Spannglieder.  
In: Bauingenieur 62(1987)
- /88/ Kordina, Karl ; Osteroth, H.-H.  
Versuche zum nachtraeglichen Verpressen von Spanngliedern  
mit dem Vacuumverfahren.  
Inst.f.Baustoffe,Massivbau u.Brandschutz, TU Braunschweig,  
Veruchsbericht Nr. G 85 8281, Jan.1986.
- /89/ Krogh, H.  
Examination of Synthetic Alkali-Silica Gels  
Proc. Smp. on Alkali-Aggregate Reaction - Preventive Mea-  
sures, Reykjavik, Iceland, 1975, pp.131-163
- /90/ Krysa, Anton H.  
Placement of Silica Fume Concrete and Rehabilitation Work  
at Kinzua Dam Stiling Basin  
Warren, Pennsylvania, U.S.Army Engineer District, Pittsburgh  
Pennsylvania, Nov 1898

- 191/ Kumar, A.; Roy, D.M.  
A Study of Silica-Fume-Modified Cements of Varied Fineness  
Journal of the American Ceramic Society  
Vol.67, No.1  
S.61-64, Jan 1984
- 192/ Kurdowski, W. ; Nocun-Wczelik, W.  
The Tricalcium Silicate Hydratation in the Presence of Active Silica  
Cement and Concrete Research, Vol.13, 1983, pp. 341-348
- 193/ Lankard, David R.  
(Schlaempegetraenkter Faserbeton - SIFCON)  
Slurry infiltrated fiber concrete - SIFCON.  
(engl.; Ref.engl., span.)  
Concr.Int. 6(1984)Nr.12, S.44-47, Abb., Lit.
- 194/ Larrard, F.de ; Moreau, A.; Buil, M.  
Improvement of mortars and concrete really attributable to condensed Silica Fume  
Sec. Int. Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, ...
- 195/ Lehtonen, V.  
Silica Fume in Concrete - A Project Description  
Condensed Silika Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- 196/ Lessard, S. ; Aitcin, Pierre-Claude; Regourd, M.  
Development of a Low Heat of Hydration Blended Cement  
ACI Publication SP-79-40 DETROIT 1983
- 197/ Levi, F.; Bosco, C. ; Bocca, P.  
Prove Su Malta D'Iniezione in Guaine per C.A.P.  
Istituto di Scienza delle Construzioni, Protocollo, Feb.75
- 198/ Lewandowski, R.  
Mineralische Nebenprodukte zur Betonherstellung. Bericht  
Über die CANMET/ACI-Tagung in Kanada. TL.2.  
Betonwerk und Fertigteilbautechnik. 50(1984)Nr.2, S.101-104
- 199/ Loland, Kjell E.  
Matematisk modellering av betongens deformasjons- og brudde-  
genskaper basert pa skademekaniske prinsipper - Anvendelse  
pa betong med og uten tilsetning av silikastov  
Dr.ing.-avhandling ved Institut for Bygningsmateriallaere,  
NTH, Trondheim, Juni 1981

- 
- /100/ Loland, Kjell E.; Hustad, T.  
Silica in concrete - report section n 1 :  
fresh concrete and methods of analysing:  
FCB Report- Cement and Concrete Research Institute, Trondheim  
Norway, 23. Juni 1981
- /101/ Loland, Kjell E.; Hustad, T.  
Silika i betong - Delrapport nr.2 : Mekaniske egenskaper  
Report STF6 5 A81031, SINTEF adv. 65, FCB, NHT, Trondheim,  
Juni 1981
- /102/ Loland, Kjell E.; Gjørsv, Odd E.  
Silica Fume in Concrete  
Cement and Concrete Research Institute, Trondheim  
FCB Report SFT 65 F81011
- /103/ Loland, Kjell E.; Gjørsv, Odd E.  
Silikabetong  
nordisk betong  
6-1981, s.5-10
- /104/ Loland, Kjell E.; Gjørsv, Odd E.  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /105/ Maage, Magne  
Strength and Heat Development in Concrete: Influence of Fly  
Ash and Condensed Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M. Malhotra), Vol.2
- /106/ Maage, Magne; Skjølsvold, O.  
Karbonatisering av betong med og uten silikastov  
Report No. STF65 A83090 SINTEF dep FCB, Trondheim, Norway,  
Dez. 1983, 39 p.
- /107/ Maage, Magne  
Underwater Concrete  
Nordic Concrete Research Publications No.3  
The Nordic Concrete Federation (1984), s.167-182
- /108/ Maage, Magne; Sellevold, Erik J.  
Feltmalinger av karbonatisering i betong med og uten  
silikastov  
nordisk betong 1-1985, s.21f

- 
- /109/ Malhotra, V.M.  
Mechanical Properties, and Freezing-and-Thawing Resistance of  
Non-Air-Entrained and Air-Entrained Condensed Silica-Fume  
Concrete Using ASTM Test C 666, Procedures A and B  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /110/ Malhotra, V.M.  
Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete  
Proc.Sec.Int.Conf., Madrid 1986, Vol.2, ACI SP-91.
- /111/ Malhotra, V.M.  
Use of Mineral Admixtures for Specialized Concretes  
Concrete International April 1984, S.19-24
- /112/ Malhotra, V.M.; Carette, G.G.  
Silica Fume - its use in Concrete  
Concrete Constructor, Chicago, U.S.A., Mai 1982, pp.443-446
- /113/ Malhotra, V.M.  
Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products  
in Concrete.  
CANMET Int.Conf. Montebello/Kanada 1983, ACI SP-79.
- /114/ Malhotra, V.M.; Carette, G.G.  
Silica Fume Concrete -  
Properties, Applications and Limitations  
in Division Report MRP/MSL 82-54, CANMET, Energy, Mines and  
Resources Canada, Ottawa, May 1982
- /115/ Malhotra, V.M.; Carette, G.G.  
Silica fume: a puzzolan of new interest for use  
in some concretes.  
In: Concr.Constr. 27(1982) 443-446.
- /116/ Markestad, A.  
(Studie ueber den kombinierten Einfluss des  
Siliziumkondensats und eines wasserreduzierenden  
Zusatzmittels auf den Wasserbedarf u. die Betonfestigkeit)  
A study of the combined influence of condensed silica  
fume and water reducing admixture on water demand and...  
Mater.et Constr.(rilem) 19(1986)Nr.109, S.39-47, Abb.,  
Tab.,Lit.
- /117/ Markestad, A.  
Tilsetning av SiO<sub>2</sub>-stov til betong  
6.Nordiske Betongforskningskongress, Goteborg, Aug. 1969

- 
- /118/ Marusin, Stella L.  
Chloride Ion Penetration in Conventional Concrete and Concrete Containing Condensed Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M. Malhotra), Vol.2
- /119/ Mehta, Purushottam K.  
Influence of pozzolanic admixtures on the transition zone in concrete  
Int. Sem., Some aspects of admixtures and ind. by-products..  
Chalmers University, Goteborg, April 1986
- /120/ Mehta, Purushottam K. ; Gjorv, Odd E.  
Reply to W.B. Butler's Discussion of the paper  
"Properties of Portland Cement Concrete containing Fly Ash and condensed Silica Fume".  
Cement and Concrete Research 13 (1983), S.292
- /121/ Mehta, Purushottam K. ; Gjorv, Odd E.  
Properties of Portland Cement Concrete containing Fly Ash and condensed Silica Fume  
Cement and Concrete Research 12 (1982), S.587-595
- /122/ Mehta, Purushottam K. ; Gjorv, Odd E.  
Silica in Concrete  
Report No. 7: Fly Ash and Condensed Silica-Fume  
Cement and Concrete Research Institute (FCB)  
Norwegian Institute of Technology  
Report Number: STF65 A82030, April 1982
- /123/ Meland, Inger  
Heat of Hydratation for Cement Paste with Silica Fume  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /124/ Meland, Inger  
Influence of Condensed Silica Fume and Fly Ash on the Heat Evolution in Cement Pastes  
ACI Publication SP-79-34 DETROIT 1983
- /125/ Modeer, Matz  
Silica Fume as Replacement for Some of the Cement in Ordinary Concrete with Standard Portland Cement; Compressive Cube Strength Tests  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982

- 
- /126/ Moksnes, J. ; Jacobsen, B.  
HIGH-STRENGTH CONCRETE DEVELOPMENT AND POTENTIALS FOR  
PLATFORM DESIGN  
OFFSHORE TECHNOLOGIE CONF., HOUSTON 1985, S.485-497.
- /127/ Nagataki, Shigeyoshi; Ujike, Isao  
Air Permeability of Concretes Mixed with Fly Ash and Condensed Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /128/ Nagataki, Shigeyoshi; Akashi, T.  
Properties of Concrete Containing Silica Fume  
Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.6, 1984  
pp.47-54
- /129/ Nagataki, Shigeyoshi; Yonekura, A.; Yokota, H.  
Effect of Condensed Silica Fume on Mechanical Properties of  
Concrete Cured by High Temperature  
Cement Concrete, No.387, 1979, pp.8-15, (in Japanese)
- /130/ Nebesar, B. ; Carrette, G.G.  
Variations in the chemical composition, specific surface  
area, fineness and pozzolanic activity of a condensed silica  
fume  
Division Report MRP/MSL 84-126 (J), CANMET, Energy, Mines  
and Recourses Canada, Ottawa, Sept 1984, 13 pp.
- /131/ Nelson, J.A.; Young, J.F.  
Addition of Colloidal Silicas and Silicates to Portland  
Cement Pastes  
Cement and Concrete Research, Pergamon Press, Inc.  
Vol. 7, 1977, S.277-282
- /132/ Nilsson, Lars-Olof  
Some Aspects of Admixtures and Industrial By-Products  
on the Durability of Concrete.  
Int.Sem., Chalmers University Goeteborg 1986.
- /133/ Ohama, Y. ; Muranishi, R.  
Relation between Curing Conditions and Strength of Silica  
Fume Modified Concrete  
Proc. of 27. Japan Congr. on Materials Research, Society of  
Materials Science, Japan, Kyoto, Marz. 1984, pp.199-202

- 
- /134/ Ohama, Y. ; Demura, K.; Muranishi, R.  
Development of Superhigh Strength Concrete Made with Silica Fume Addition and Polymer Impregnation  
ACI Symp.on Polymers in Concrete, Kansas City, Sept. 1983
- /135/ Ohama, Y. ; Demura, K.  
Process Technology and Properties of Super-High-Strength Concrete Made by Polymer Impregnation of Silica-Fume Concrete  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /136/ Okkenhaug, Knut  
The Effect of W/C-Ratio on the Evaluation of the Pozzolanic Activity of Silica Fume  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /137/ Olafsson, Hakon  
Effect of Silica Fume on the Alkali-Silica Reactivity of Cement  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /138/ Olsen, W.C.  
Kompaktering av silikastov. Mikroanalytiske studier av kompaktert stov  
Chr. Michelsens Inst., Nr./90802/SEM 203/ II&III, Bergen, April 80
- /139/ Olstad, Paul H.  
Silica i betong uhyre lovende.  
In: Plan og Bygg 27(1979)
- /140/ Olstad, Paul H.  
Combination of Silica Fume and Different Types of Cement  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /141/ Opsahl, Ole A.; Hoyer Ellefsen, A.S.  
(9) Die Verwendung von Silika im Spritzbeton  
Robocon Shotcreting Systems, Oslo, Norway, April 1982

- /142/ Opsahl, Ole A.  
Freeze-Thaw Resistance of Silica Concrete  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /143/ Page, C.L.; Havdahl, J.  
Electrochemical Monitoring of Corrosion of Steel in  
Microsilica Cement Pastes  
In: Mat.et Constr.Vol.18, Nr.103,41-47
- /144/ Page, C.L.; Vennesland, Oystein  
Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of  
Silica-Fume cement pastes  
Mater.et Constr.(rilem) 16(1983)Nr.91, S.19-25
- /145/ Page, C.L.; Vennesland, Oystein  
Pore solution composition and chloride binding capacity of  
silica fume-cement pastes  
Cement and Concrete Research Inst., Trondheim, Norway,  
Aug.82
- /146/ Palm, Carl-Olof  
Silica Fume in Concrete with Low Water-Cement Ratios  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /147/ Perry, C. ; Gillott, J.E.  
The Feasibility of Using Silica Fume to Control Concrete Ex-  
pansion due to Alkali-Silica Reaction  
In: Dur.of Build.Mat. 3(1985), Nr.2, S.115-131.
- /148/ Pistilli, Michael F.; Winterstein, R. ; Cechner, Richard  
The Uniformity and Influence of Silica Fume from a U.S.Sour-  
ce on the Properties of Portland Cement Concrete  
ASTM Cement, Concrete and Aggregates, Vol.6, No.2, 1984  
pp 120-124
- /149/ Pistilli, Michael F.; Rau, Gerhard; Cechner, Richard  
The Variability of Condensed Silica Fume from a Canadian  
Source and its Influence on the Properties of Portland  
Cement Concrete  
ASTM Cement, Concrete, and Aggregate Volume 6, Number1, 1984  
pp. 33-37

- 
- /150/ Popovic, K. ; Ukraincik, V. ; Djurekovic, A.  
Improvement of mortar and concrete durability  
by the use of condensed silica fume.  
in: Dur.of build.Mat. 2(1984)171-186.
- /151/ Preece, Carolyne M. ; Arup, H.; Froelund, Thomas  
Elektrochemical Behaviour of Steel in Dense Silica-Cement  
Mortar  
ACI Publication SP-79-42 DETROIT 1983
- /152/ Preece, Carolyne M. ; Froelund, Thomas; Bager, Dirch H.  
Chloride Ion Diffusion in Low Porosity Silica Cement Paste  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /153/ Radjy, F.F. ; Loland, Kjell E.  
Microsilica concrete: properties and applications  
Proc. of the Conf. Artic 85, ASCE 1985, P. 680, ASCE, NY  
1985
- /154/ Radjy, F.F. ; Loland, Kjell E.  
Microsilica concrete: a technological breakthrough commer-  
cialized  
Very High Strength Cement-Based Materials, Proc. MRS Vol. 42  
1985, p. 305; MRS Pittsburgh, PA
- /155/ Radjy, F.F. ; Bogen, T. ; Sellevold, Erik J.;  
Loland, Kjell E.  
A Review of Experience with Condensed Silica-Fume Concretes  
and Products  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /156/ Ramachandran, V.S.  
Differential thermal method of estimating calcium hydroxide  
in calcium silicate abd cement pastes  
Cem. Conc. Res., Vol. 9, No.6, 1979, pp.677
- /157/ Ramakrishnan, V.; Srinivasan, V.  
Performance Characteristics of Fiber Reinforced Condensed  
Silica Fume Concretes  
ACI Publication SP-79-43 DETROIT 1983
- /158/ Regourd, M.  
Condensed Silica Fume  
Univ. de Sherbrooke, Quebec, Canada, Aug. 1983  
(Editor: P.-C.Aitcin)

- 
- /159/ Regourd, M. ; Mortureux, B. ; Aitcin, Pierre-Claude;  
Pinsonneault, P.  
Microstructure of field concretes containing silica fume  
Proceedings, 4.Int. Conf. on Cement Microscopy, Las Vegas,  
U.S.A., 1982, pp.249-260, (Editor: G.R. Gouda)
- /160/ Regourd, M. ; Mortureux, B. ; Gautier, E.  
The reactivity of various pozzolans.  
In: Proc.of the 5e Symp.Int. Sobre Tecnologia del Concreto,  
Monterey,Mex.,Maerz 1981, 1-14.
- /161/ Regourd, M. ; Mortureux, B. ; Hornein, H.  
Use of Condensed Silica Fume as Filler in Blended Cements  
ACI Publication SP-79-46 DETROIT 1983
- /162/ Reiner Chemische Fabrik  
Corrocer: Betonzusatz gegen Korrosion.  
Reiner Chem. Fabrik GmbH&CO, Weilerbach,  
Techn. Informationsblatt, Sept.85.
- /163/ Robins, P.J.; Aistin, S.A.  
Bond of Lightweight Aggregate Concrete Incorporating Conden-  
sed Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /164/ Samuelson, Paul  
The Influence of Silica Fume on the Risk of Efflorescence on  
Concrete Surfaces  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /165/ Sandvik, Malvin ; Gjorv, Odd E.  
Effect of Condensed Silica Fume on the Strength Development  
of Concrete  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2
- /166/ Sandvik, Malvin  
Fasthetsutvikling for silicabetong ved ulike temperatur-  
nivaer  
Report STF 65 F81016, Cement and Concrete research Institute  
The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway,  
March 1981

- 
- /167/ Sandvik, Malvin  
Mathematical Models of the Strength Development of Concrete  
and Application on Concrete with and without the Addition  
of Condensed Silica Fume  
Dr.ing Thesis, Report BML 84.101, The Norwegian Institute  
of Technology, Trondheim, Febr.1984, 293 p.
- /168/ Schorr  
Sulfatwiderstand von Zementmoertel ohne und mit Zusatz  
von Corrocem.  
Materialpruefungsamt Kaiserslautern, Pruefungsbericht  
Nr. 80/1510, Aug. 1980
- /169/ Schubert, Peter ; IBAC  
Pruefbericht Nr.A 1145  
Betonversuche unter Zusatz von Fesil-Silica  
Institut für Bauforschung, RWTH Aachen  
s.auch Textstelle 0084
- /170/ Seabrook, P.T.; Wilson, H.S.  
High-strength semi-lightweight concrete for Use in offshore  
structures: Utilization of fly ash and silica fume  
Sec. Int. Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume,...  
Paper No.30, Madrid 1986
- /171/ Seki, Shingo; Morimoto, M.; Yamane, N.  
Recherches Experimentales sur L'Amelioration du Beton par  
L'Incorporation de Sous-produits industriels  
(Experimentelle Untersuchungen über die Verbesserung von Be-  
ton durch Einschluß industrieller Nebenprodukte)  
Annales de L'Institut Technique du Batiment et des Travaux  
Publics No. 436 , Juillet / Aout 1985  
Serie: Beton 231
- /172/ Seki, Shingo; u.a.  
The Study on Application and effect of Silica Fume  
Civil Engineering, Vol.25, No.18, Dez. 1984, PP. 23-28
- /173/ Sellevold, Erik J.  
Frost resistance of concrete with condensed silica fume  
Int. Sem., Some aspects of admixtures and ind. by-products..  
Chalmers University, Goteborg, April 1986
- /174/ Sellevold, Erik J.; Bager, Dirch H. ; Jensen, E.K.;  
Knudsen, T.  
Silica Fume - Cement Pastes  
Hydratation and Pore Structure  
Cement and Concrete Research Institut, Trondheim  
Nordisk Miniseminar on Silica in Concrete

- 
- /175/ Sellevold, Erik J.  
Microsilica in Concrete  
Norwegian Building Research Institute (NBI)  
Report to Elkem A/S, Elkem Chemicals, Marz 1984
- /176/ Sellevold, Erik J.; Payer, Dirch H. ; Klitgaard, J.K.  
Silica Fume - cement pastes: hydration and pore structure  
Report no. 82.610, Div. of Building Materials, Nor. Inst. of  
Techn., Trondheim, Norway, 1982
- /177/ Sellevold, Erik J.; Radjy, F.F.  
Condensed Silica Fume (Microsilica) in Concrete:  
Water Demand and Strength Development  
ACI Publication SP-79-35 DETROIT 1983
- /178/ Skjolsvold, O.  
Carbonation Depths of Concrete with and without Condensed  
Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.H.Malhotra), Vol.2
- /179/ Skrastins, J.I. ; Zoldners, N.G.  
Ready-Mixed Concrete Incorporating Condensed Silica Fume  
ACI Publication SP-79-44 DETROIT 1983
- /180/ Sorensen, Eigil V.  
Concrete with Condensed Silica Fume. A Preliminary Study of  
Strength and Permeability.  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /181/ Sorensen, Eigil V.  
Freezing and Thawing Resistance of Condensed Silica Fume  
(Microsilica) Concrete Exposed to Deicing Chemicals  
ACI Publication SP-79-37 DETROIT 1983
- /182/ Stein, H.N. ; Stevels, J.M.  
Influence of silica on the hydration of  $\text{CaOSiO}_2$   
Journ of Applied Chemistry, Aug. 1964, pp 338-346
- /183/ Swamy, R.N. ; Al-Asali, M.M.  
Engineering implications of ASR expansion in concrete and  
the effectiveness of mineral admixtures  
Int. Sem., Some aspects of admixtures and ind. by-products..  
Chalmers University, Goteborg, April 1986

- 
- /184/ Tazawa, E.; Yonekura, A.  
Drying Shrinkage and Creep of Concrete with Condensed Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M. Malhotra), Vol.2
- /185/ Tazawa, Y.; Nobuta, Y.; Ishii, A.  
Physical Properties and Durability of High-Strength Lightweight Concrete Incorporating Condensed Silica Fume  
Kajima Institute of Construction-Technology, Japan  
Vol.32 (1984), S.2
- /186/ Tenoutasse, N.; Marich, A.M.  
The influence of silica fume on the hydration and micro-structure of OPC Pastes  
Sec. Int. Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, ...  
Paper No. 31, Madrid 1986
- /187/ Traetteberg, A.  
Frostvirkning i mortel med silikastov  
Forskningsrapport STF65 A80019, SINTEF adv. 65, FCB, NTH, Trondheim, Mai 1978
- /188/ Traetteberg, A.  
Waste Materials in the Construction Industry  
FCB-SINTEF Report, Cement and Concrete Research Inst. Norw.  
STF65 A 78006 5 (May 1977)
- /189/ Traetteberg, A.  
Silica Fumes as a Pozzolanic Material  
il cemento  
Vol.75(1978) S.369-376
- /190/ Traetteberg, A.  
Frost action of blended cement with silica dust  
Durability of Building Materials and Components, ASTM,  
STP 691, 1980, pp. 536-548
- /191/ Vennesland, Oystein ; Gjorv, Odd E.  
Silica Concrete - Protection against Corrosion of Embedded Steel  
ACI Publication SP-79-38 DETROIT 1983
- /192/ Vennesland, Oystein ; Gjorv, Odd E.  
Effect of Corrochem on the oxygen diffusion and electrical resistivity of concrete  
Cement and Research Institute, Trondheim, Norway, 1977  
STF65 F77068, 6 Seiten

- 
- /193/ Vennesland, Oystein  
Corrosion of Steel Embedded in Silica Concrete  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /194/ Vennesland, Oystein  
Silika i Betong - Delrapport nr. 3: Korrosjonsegenskaper  
Forskningsrapport STF65 481031, SINTEF adv. 65, FCB, NTH,  
Trondheim, Sept. 1981
- /195/ Virtanen, Jorma  
Condensed Silica Fume Expands the Using Area of Concrete  
Betonituote, Helsinki, V.53, No. 2, Feb.1983, pp 71-74
- /196/ Virtanen, Jorma  
Silica Fume in Concrete  
Condensed Silica Fume in Concrete  
Division of Building Materials  
University of Trondheim, Norway, Feb 1982
- /197/ Virtanen, Jorma  
Freeze-Thaw Resistance of Concrete Containing Blast-Furnace  
Slag, Fly Ash or Condensed Silica Fume  
ACI Publication SP-79-49 DETROIT 1983
- /198/ Virtanen, Jorma  
Mineral By-Products and Freeze-Thaw Resistance of Concrete  
Nordic Concrete Research Publications No.3  
The Nordic Concrete Federation (1984), S.191-208
- /199/ Waagaard, K.  
Veritas Design Recommendation for Offshore Concrete Structures - Background for Special Requirements for Offshore Structures  
Nordisk Betong 2-4 (1982) Journal of the Nordic Concrete Federation, Stockholm, Sweden
- /200/ Wakeley, L.D. ; Buck, A.D.  
Effects of Different Fly Ashes and Silica Fume on Selected Properties of an Expansive Grout  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.P.Malhotra), Vol.2
- /201/ Warris, B.  
Strength of Concrete Containing Secondary Cementing Materials  
ACI Puublication SP-79-28 DETROIT 1983

- 
- /202/ Weres, Oleh ; Yee, Andrew ; Tsao, Leon  
Kinetics of Silica Polymerization  
Journal of Colloid and Interface Science,  
Vol.84, No.2, Dez 1981
- /203/ Wesche, Karlhans  
Zusammenfassung und Bewertung  
der von der Fa. A/S FESIL & CO, Briskeby/N, vorgelegten  
Untersuchungen mit Fesil-Silica-Staub (Kurzbezeichnung FS)  
Institut für Bauforschung, RWTH Aachen, W 261
- /204/ White, Elizabeth; Roy, D.M.  
Rheological Behavior of Cement Slurries, Mortars and Grouts  
Cement and Concrete Research  
Symposium of Materials Research Society Annual Mtg.,  
Boston, MA., 1.-4.11.1982
- /205/ Wolsiefer, John  
Ultra High-Strength Field Placeable Concrete with Silica  
Fume Admixture  
in: Concrete International Nr.4, April 1984, S.25-31
- /206/ Yamato, Takeshi ; Emoto, Yukio; Soeda, Masashi  
Strength and Freezing-and-Thawing Resistance of Concrete  
Incorporating Condensed Silica Fume  
Sec. Int. Conference: Fly Ash, Silica Fume, Slag...  
Madrid 1986, CANMET/ACI, (Editor: V.M.Malhotra), Vol.2