

**Einfluss der Randbedingungen auf das  
Prüfverfahren zum Nachweis des hohen  
Sulfatwiderstandes von Zement-/Flugasche-  
Gemischen**

**T 2920**

**T 2920**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2000, ISBN 3-8167-5760-X

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

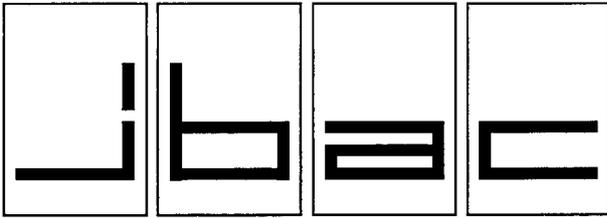
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

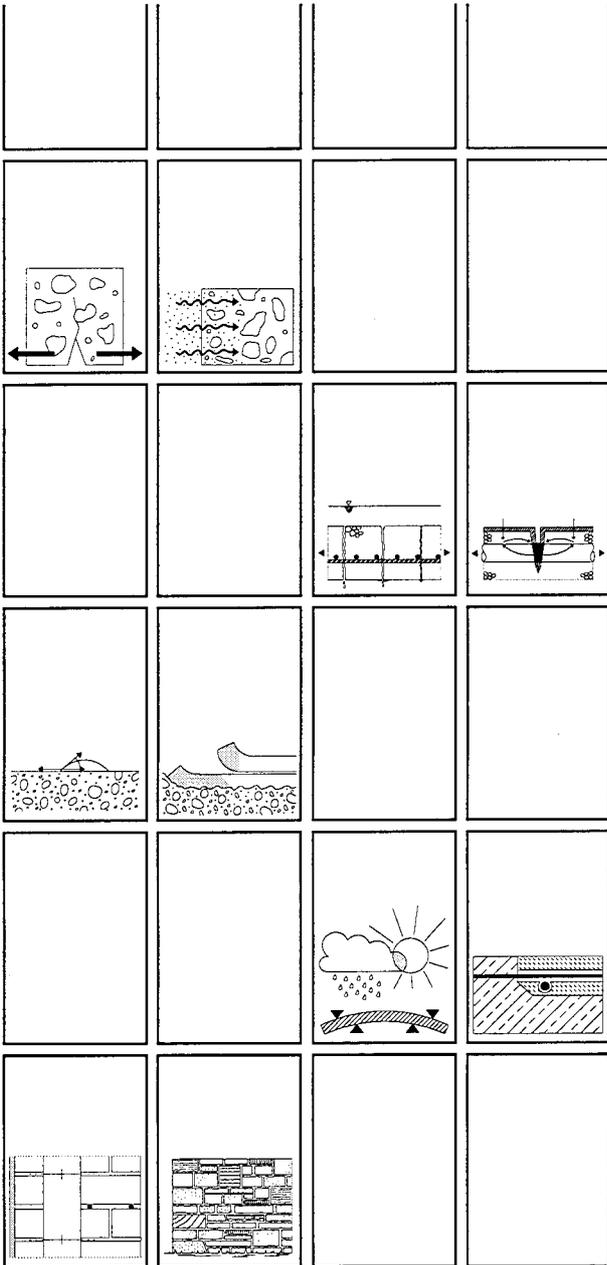
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [irb@irb.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

URL <http://www.irb.fhg.de>



**Institut für Bauforschung Aachen**  
 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule

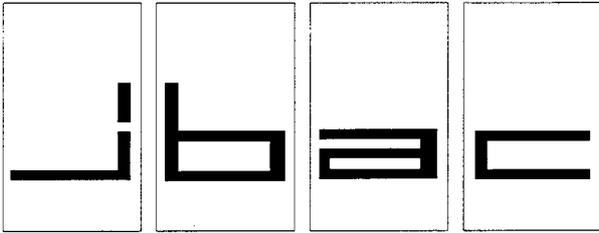


## Forschungsbericht F 688

Einfluß der Randbedingungen auf das Prüfverfahren zum Nachweis des hohen Sulfatwiderstandes von Zement-/Flugasche-Gemischen

**Baustoff · Bauteil · Bauwerk**

<b>Forschung · Entwicklung</b>			
<b>Überwachung</b>			
<b>Prüfung · Beratung</b>			



# INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Leitung: Professor Dr.-Ing. W. Brameshuber  
Professor Dr.-Ing. M. Raupach

Postfach, D-52056 Aachen  
Schinkelstraße 3, D-52062 Aachen

Telefon (02 41) 80-51 00 · Telex 8 32 704 thac d · Telefax (02 41) 88 88-139

Pi/Fk

## 4. Ausfertigung

## THEMA

Einfluß der Randbedingungen auf das Prüfverfahren zum Nachweis des hohen Sulfatwiderstandes von Zement-/Flugasche-Gemischen

## ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 688

vom 21.03.2000

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Sachbearbeiter

Dipl.-Min. R. Pierkes

Dipl.-Ing. U. Wiens

Auftraggeber/  
Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)  
Kolonnenstr. 30

10829 Berlin

Auftragsdatum

25.01.1999

Aktenzeichen

-

Dieser Bericht umfaßt 45 Seiten, davon 41 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.

Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<b><u>INHALTSVERZEICHNIS</u></b>		<b>Seite</b>
1	KURZFASSUNG.....	1
2	ABSTRACT.....	2
3	PROBLEMSTELLUNG .....	3
4	LITERATURAUSWERTUNG .....	6
4.1	Einfluß des Bindemittelgehaltes .....	6
4.2	Einfluß des Flugaschegehaltes .....	6
4.3	Einfluß des Wasserbindemittelwertes.....	7
4.4	Einfluß der Flugascheanrechnung auf den Wasserbindemittelwert.....	9
4.5	Einfluß des Zuschlags (Art, Körnung).....	10
4.6	Einfluß des Bindemittel-Zuschlag-Verhältnisses.....	12
4.7	Einfluß der Verdichtung.....	12
4.8	Einfluß der Vorlagerungsdauer .....	13
4.9	Einfluß des Vorlagerungsmediums .....	14
4.10	Einfluß des Sulfatlagerungs-Mediums.....	15
4.11	Einfluß der Lagerungstemperatur .....	17
4.12	Reproduzierbarkeit des Verfahrens.....	18
5	VERSUCHSPROGRAMM .....	19
6	DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	21
6.1	Einfluß des Flugaschegehaltes .....	21
6.2	Einfluß des Wasserzementwertes.....	23
6.3	Einfluß der Zuschlag-Sieblinie .....	25
6.4	Einfluß des Bindemittel-Zuschlag-Verhältnisses.....	27
6.5	Einfluß der Vorlagerungsdauer .....	29
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	31
8	LITERATUR.....	35
	TABELLEN .....	A1-A6

## 1 KURZFASSUNG

Das Flachprismenverfahren ist in Deutschland als Schnellprüfmethode für die Sulfatbeständigkeit von Bindemittelsystemen etabliert und wird seitens des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) in Prüfplänen zur Bindemittelzulassung angewendet.

Der Sachverständigenausschuß „Betontechnologie“ des DIBt (SVA-A) hat eine Überprüfung der Aussagefähigkeit des Prüfverfahrens angeregt. Nach der Einführung des Verfahrens wurden zwischenzeitig Veränderungen in der vorgeschriebenen Mischungszusammensetzung (Wasserbindemittelwert, Normsand) vorgenommen, die nach Literaturerkenntnissen Auswirkungen auf die Meßergebnisse haben dürften. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, den Einfluß verschiedener Rahmenbedingungen des Prüfverfahrens auf das Prüfergebnis, insbesondere bei Bindemitteln mit Steinkohlenflugasche (SFA), zu eruieren und Vorschläge zur Modifizierung des Prüfverfahrens zu erarbeiten.

Die Messungen erfolgten an einem CEM I 32,5 R mit etwa 8 M.-%  $C_3A$  und einem CEM I 32,5 R-HS nach DIN 1164. Der erstgenannte Zement wurde zudem mit einer Trockenfeuerungsflugasche nach DIN EN 450 kombiniert. Der Austausch von 20 und 40 M.-% SFA erfolgte im Verhältnis 1 : 1 gegen den Zement, der Wirksamkeitsfaktor wurde nach Prüfvorschrift mit  $k = 1$  angesetzt. Variiert wurden der Wasserbindemittelwert, die Vorlagerungsdauer, der Zuschlaggehalt und der eingesetzte Normsand. Die Sulfatschädigung wurde über Messung der Differenzdehnung zwischen sulfat- und  $Ca(OH)_2$ -gelagerten Prismen sowie über den Verlauf der Resonanzfrequenzen ermittelt.

## 2 ABSTRACT

The method of testing flat prisms in Germany is well accepted to evaluate the sulfate resistance of binders within short time. It is established by the Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) as a test method for the approval of new binder systems with high sulfate resistance.

The expert group „concrete technology“ of the DIBt (SVA-A) wanted to prove the evidence of this test method. After its establishment in the sixties, there had been some amendments in the composition of the tested mortar (water-binder-ratio, kind of standard aggregate). These amendments should show effects on the test results. The aim of this research project is to analyse the effect of several test conditions on the results of the flat prism method, especially with regard to binders containing pulverised coal fly ash. Modifications for optimizing the test method should be proposed to enhance the selectivity.

The cements used were an OPC with a  $C_3A$ -content of about 8 wt.-% and a CEM I with high sulfate resistance according to DIN 1164. Further on, the OPC was mixed with an coal fly ash according to DIN EN 450. 20 or 40 wt.-% of the cement were substituted with the fly ash in the same weight proportion. The fly ash was calculated with a k-value of  $k = 1$  in the  $w/(c + k \cdot f)$ -ratio, as given in the description of the test method.

The variable test conditions were the water-binder-ratio, the hydration time before sulfate exposure and the content and type of standard aggregate. The sulfate attack was measured by the differences in expansion between sulfate and  $Ca(OH)_2$ -stored prisms and by the measurement of frequency of resonance.

### 3 PROBLEMSTELLUNG

Die Korrosion von Beton durch sulfathaltige Wässer oder Böden tritt in der Regel erst nach langen Expositionszeiträumen auf. Aufgrund des hohen Diffusionswiderstandes von Beton gegenüber eindringenden Sulfationen - im Vergleich zu Chloridionen liegen die Diffusionskoeffizienten von Sulfationen mit  $10^{-14}$  m<sup>2</sup>/s rd. 100mal niedriger - sind Einlagerungsversuche von Betonprüfkörpern in Sulfatlösungen unter praxisnahen Bedingungen sehr zeitintensiv. Um ein Bindemittel in Beton zielsicher als „sulfatbeständig“ bewerten zu können, müßten die entsprechenden Prüfkörper über viele Jahre hinweg beobachtet werden. In den USA wurden beispielsweise von der Portland Cement Association ab 1942 umfangreiche Versuchsreihen zum Langzeitverhalten von Zement in Beton unter verschiedenen äußeren Angriffsmechanismen anberaumt /1, 2, 3/. Im Laufe der Zeit haben sich aus der Korrelation von Labor- und Freilandversuchen mit Zement-, Mörtel- und Betonprüfkörpern für sulfatbeständige Zemente deskriptive Anforderungen bezüglich der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung ergeben, die auch in Deutschland Eingang in die entsprechenden Normen /4, 7, 8/ gefunden haben.

Für die Bewertung und ggf. Zulassung von Bindemitteln als möglicher Ersatz für sulfatbeständige Zemente nach DIN 1164 sind jedoch Prüfverfahren notwendig, die in erheblich kürzerer Zeit praxisrelevante Ergebnisse liefern. Aus diesem Grund wurden eine Reihe von Schnellprüfverfahren zur Bewertung des Sulfatwiderstandes eines Bindemittels entwickelt, deren Vergleichbarkeit jedoch nur sehr bedingt gegeben ist /9, 10/. Wesentliche Kennzeichen dieser Verfahren sind kleine Prüfkörperabmessungen zur Verkürzung der Diffusionswege und hohe Sulfatkonzentrationen der Einlagerungslösungen zur Beschleunigung der Reaktions- und Diffusionsvorgänge. Aufgrund von sehr unterschiedlichen Randbedingungen, die oftmals auf das Bindemittel abgestimmt sind, ist eine Übertragbarkeit auf den Beton nur bedingt gegeben. Zudem stimmen die Bewertungskenngrößen für Betonprüfkörper (visuelle Bewertung, Druckfestigkeit) meist nicht mit denen der Schnellprüfverfahren (Dehnung, Biegezugfestigkeit) überein. Somit bleibt die Formulierung von Grenzwertkriterien für einzelne Schnellprüfverfahren Gegenstand fachlicher Diskussionen. Dementsprechend sind diese Verfahren in Deutschland nicht in die Normung aufgenommen worden. Sie sind jedoch Grundlage für einschlägige Prüfvorschriften zur vergleichenden Beurteilung der Sulfatbeständigkeit von alternativen Bindemitteln, so z. B. zur Zulassung von Portland-Ölschieferzementen seitens des DIBt /11/.

In Deutschland kommen im wesentlichen zwei Prüfverfahren zum Einsatz:

- das Flachprismenverfahren (Prüfkörperabmessungen:  $10 \cdot 40 \cdot 160 \text{ mm}^3$ ) nach Wittekind /12/, modifiziert durch Locher /13/,
- das Kleinprismenverfahren (Prüfkörperabmessungen  $10 \cdot 10 \cdot 60 \text{ mm}^3$ ) nach Koch und Steinegger /14/.

Bei der Beurteilung des Sulfatwiderstandes von Zementen über das Flachprismenverfahren wird die Dehnungsdifferenz zwischen in gesättigter  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung und in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösung (4,4 M.-%) gelagerten Prismen ermittelt und mit einem parallel geprüften Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement nach DIN 1164) verglichen. Locher /13/ bewertet die Zemente als sulfatbeständig, die nach 56 Tagen Hauptlagerung eine Sulfatdehnung von weniger als 0,5 mm/m aufweisen. Nach Osborn /15, 16/ und Patzias /17/ korrespondieren die Prüfwerte aus dem Flachprismenverfahren am besten mit den tatsächlich an Betonproben in Langzeitversuchen ermittelten Daten. Die Trennschärfe des Verfahrens ist für die Zemente jedoch nicht immer befriedigend, deren chemisch-mineralogische Zusammensetzung ( $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalt, Hüttensandgehalt) von den normativen Grenzen nur unwesentlich abweichen /18/. Osborn /15/ plädiert daher für einen Prüfzeitraum von 6 Monaten; Irassar /19/ von immerhin 3 Monaten. In der amerikanischen Normung /20/ wird beispielsweise die Sulfatbeständigkeit von Hochofenzementen über einen Beaufschlagungszeitraum von 180 Tagen geprüft.

Beim Kleinprismenverfahren darf nach 56 Tagen Sulfatlagerung die Biegezugfestigkeit der sulfatgelagerten Prüfkörper 70 % der Biegezugfestigkeit der wassergelagerten Prüfkörper einer sulfatbeständigen Mischung nicht unterschreiten. Vergleichende Untersuchungen mit parallel durchgeführten Auslagerungsversuchen an Beton ergaben nach z. B. Steinegger /21/ oder Silva Filho /22/ eine gute Übereinstimmung der einzelnen untersuchten Mischungen.

Im Zuge der Beurteilung von Gemischen aus Zement und Flugasche hinsichtlich ihres Sulfatwiderstandes als Alternative für einen HS-Zement gemäß DIN 1164 wird das Flachprismenverfahren nach der Prüfvorschrift des DIBt vorgeschlagen. Dabei wurde ein im Vergleich zu Locher /13/ verschärftes Dehnungskriterium als Grenzwert eingeführt. Für die Flugaschemischungen mit 20 bzw. 40 M.-% Flugasche, bezogen auf das gesamte Bindemittel (Zement + Flugasche) und einem Anrechnungsfaktor von  $k = 1$ , darf die Dehnungsdifferenz zwischen sulfatgelagerten und in  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung gelagerten Prismen nach 91tägiger Sulfatlagerung nicht mehr als 0,5 mm/m betragen.

Wie mehrere Untersuchungen /23, 24, 25, 26/ belegen, hängt die Einhaltung der Kriterien für alle Bindemittelsysteme, insbesondere aber für jene mit Zusatzstoffen, entscheidend von den der Prüfung zugrundeliegenden Rahmenbedingungen ab. Die Einflüsse einzelner Parameter wurden im Rahmen verschiedenster Projekte untersucht und die Ergebnisse publiziert. Eine Übersicht über die entsprechende Literatur ist den Versuchen dieses Forschungsvorhabens vorangestellt.

In den Laborversuchen wird an flugaschehaltigen und -freien Zementen der Einfluß der Parameter Wasserbindemittelwert, Vorlagerungsdauer, Zuschlagkörnung, und Zuschlaggehalt auf die Sulfatdehnung von Flachprismen untersucht. Parallel finden an der FMFA Baden-Württemberg Versuche mit einer Variation der Portlandzemente bezüglich ihres  $C_3A$ -Gehaltes statt.

Die vorliegenden Untersuchungen im Mörtelmaßstab zielen im ersten Zug auf die Trennschärfe des Flachprismenverfahrens. Demnach sind die Prüfbedingungen so zu wählen, daß zunächst einmal nach DIN 1164 /7/ sulfatbeständige und nicht sulfatbeständige Portlandzemente differenziert werden können. Eine Überprüfung der deskriptiven Grenzwerte nach DIN 1164.

Eine damit verbundene Veränderung der Prüfbedingungen zur verbesserten Differenzierung der Bindemittel darf keinesfalls zu einer verminderten Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis führen. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die nicht deskriptiv bewertbaren, zusatzstoffhaltigen Bindemittel, deren Sulfatbeständigkeit mittels des Flachprismenverfahrens geprüft werden soll.

Im Hinblick auf die Anwendung des Flachprismenverfahrens zur Bewertung flugaschehaltiger Bindemittel werden zudem Überlegungen angestellt, inwieweit eine mögliche Anrechnung der Flugasche oder eine Änderung der bewerteten Beaufschlagungsdauer zielführend sein kann.

## 4 LITERATURAUSWERTUNG

Im ersten Teil des Forschungsberichtes werden Literaturhinweise auf den Einfluß einzelner Parameter auf die Sulfatdehnung von Mörteln und Betonen vorgestellt. Dabei wird auf die Einflußgrößen besonders verwiesen, die sich auf den Sulfatwiderstand insbesondere flugaschehaltiger Bindemittel verstärkt auswirken.

### 4.1 Einfluß des Bindemittelgehaltes

In den amerikanischen Untersuchungen /1, 2, 3/ wird von einem deutlichen Einfluß des Bindemittelgehaltes berichtet. Bei gleichem Zuschlaganteil verbessert sich die Sulfatbeständigkeit von Mörtel und Beton mit steigendem Zementgehalt. Diese allgemeine Aussage ist zumindest für Portlandzemente erstaunlich, da durch Erhöhung des Zementgehaltes eine absolut höhere Menge  $C_3A$  in das System eingebracht wird. Die Prüfkörper in den genannten Untersuchungen wurden jedoch nicht mit definiertem Wasserzementwert, sondern mit der Richtgröße „Konsistenz“ hergestellt. Somit hängt der verbesserte Sulfatwiderstand eher mit einer relativen Verringerung des Wasserzementwertes als mit dem Bindemittelgehalt zusammen (vgl. Kapitel 4.3).

### 4.2 Einfluß des Flugaschegehaltes

Die Höhe des Flugaschegehaltes in einem Bindemittel wirkt sich auf eine Reihe von Parametern aus, die die Sulfatbeständigkeit des Bindemittelsystems beeinflussen. Zunächst einmal wird durch höhere Flugaschegehalte ein stärkerer Verdünnungseffekt bezüglich der Kleinkerkomponenten erreicht, d. h. es steht weniger Aluminat zur Bildung treibender Mineralphasen zur Verfügung. Weiterhin findet ein vermehrter Verbrauch von  $Ca(OH)_2$  (potentieller Reaktionspartner zur Bildung von Trisulfat und Gips) durch die puzzolanische Reaktion statt, die darüber hinaus zu höheren Festigkeiten und somit höheren Gefügewiderständen führt. Günstige Korngrößenverteilungen erhöhen zudem die Dichtheit des Mörtels/Betons (vgl. Kapitel 4.5). Der wesentliche Effekt ist die verdichtende Wirkung durch die Anlagerung der Reaktionsprodukte in den Kapillarporen.

Letztlich werden den Ca-ärmeren CSH-Phasen aus der Flugaschehydratation höhere Retentionskräfte für Anionen und somit höhere Diffusionswiderstände zugesprochen.

Die meisten dieser positiven Effekte können sich aber nur dann auswirken, wenn es auch zum rechtzeitigen Ablauf der puzzolanischen Reaktion kommt. Neben der Lagerungstemperatur (vgl. Kapitel 4.11) ist daher besonders bei hohen Flugaschegehalten im Bindemittel eine ausreichende Vorlagerungsdauer wichtig (Kapitel 4.8). Mörtelversuche zeigen, daß die prüfungsrelevante Vorlagerungsdauer von 14 Tagen bei Bindemitteln mit 40 statt 20 M.-% Flugasche zunächst zu höheren, jedoch meist noch unkritischen Dehnungsdifferenzen führen. Langzeituntersuchungen bis zu einer Sulfatlagerungsdauer von mehr als 10 Jahren deuten jedoch an, daß letztlich auch bei kürzerer Vorlagerung flugaschereiche Mischungen die geringeren Maximaldehnungen aufweisen /28/.

### 4.3 Einfluß des Wasserbindemittelwertes

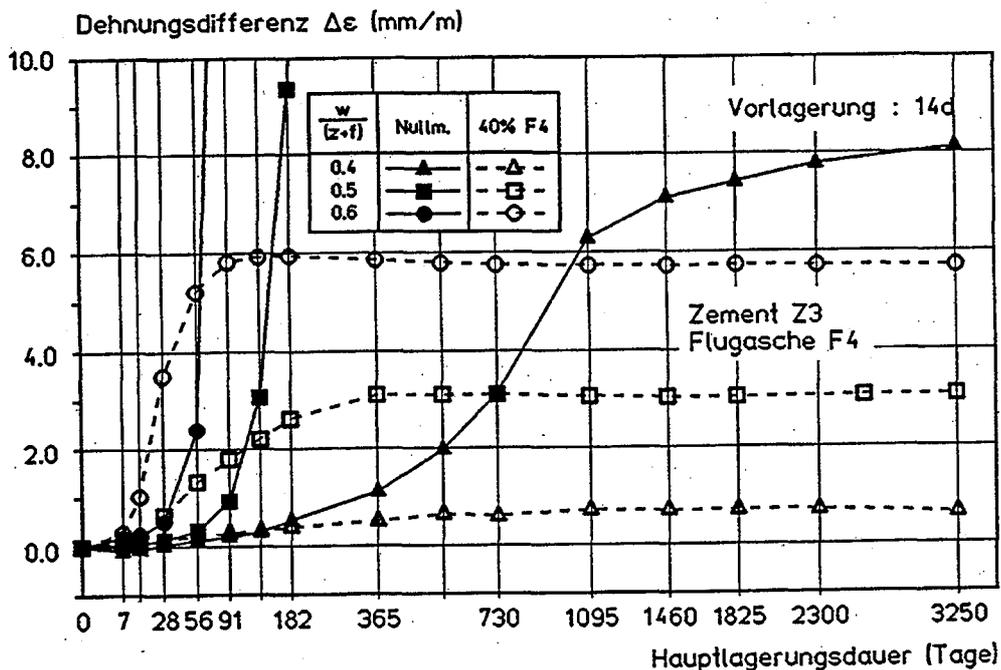
Neben der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung des Bindemittels bestimmt die Porenstruktur (= Dichte) und damit der Diffusionswiderstand des beaufschlagten Systems maßgeblich seine Sulfatbeständigkeit /29, 30/. Die Porosität wird in Mörtel und Beton unter anderem durch die Variation des Wasserzementwertes beeinflusst /31/. Zemente können bis zu etwa 40 % ihrer eigenen Masse an Wasser chemisch und physikalisch binden. Darüber hinausgehende Wasseranteile erzeugen kapillare Porenräume, die ein schnelleres Eindringen von z. B. Sulfationen in den Feststoff ermöglichen. Dem wird in der DIN 1045 07.88 /4/ durch die Begrenzung der zulässigen Wasserzementwerte bei geringer und starker Sulfatbeanspruchung Rechnung getragen.

Der Einfluß des Wasserzementwertes auf die Sulfatbeständigkeit von Mörteln und Betonen wird in einer Reihe von Untersuchungen belegt /z. B. 32, 33, 34/.

Eine Versuchsreihe im Rahmen des Forschungsprojektes „Einfluß von Steinkohlenflugasche auf den Sulfatwiderstand von Beton – F262“ /24/ demonstriert den Zusammenhang zwischen Wasserzementwert und Sulfatbeständigkeit (Bild 1) für Mörtelprismen. Ein steigender Wasserbindemittelwert verursacht sowohl bei der Zement-Flugasche-Kombination als auch insbesondere beim Portlandzement deutliche Zunahmen der Sulfatdehnung. In anderen Kombinationen war dieser Effekt bei den flugaschehaltigen Mischungen hingegen nur schwach ausgeprägt.

1970 wurde in der DIN 1164 /6/ die Mischungsvorschrift für Normmörtel geändert. Neben der Verwendung eines Normsandtes mit stetiger Sieblinie (vgl. Kapitel 4.5) wurde die Anwendung eines Wasserzementwertes von 0,50 (vorher 0,60) vorgeschrieben. Trotz der dadurch gegebenen höheren Dichte des Mörtels und einer damit zwangsläufig höheren Sul-

fatbeständigkeit erfolgte keine Neudefinition des Grenzwertkriteriums nach Locher /13/. Wie Untersuchungen /24, 25/ zeigen, leidet hierunter die Trennschärfe des Verfahrens. Portlandzemente, die von ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung keineswegs sulfatbeständig sein sollten, halten das ehemalige Kriterium nach 56 Tagen Sulfatlagerung zwar noch ein, zeigen kurz darauf jedoch progressiv anwachsende Sulfatdehnungen bis zur Zerstörung des Probekörpers.

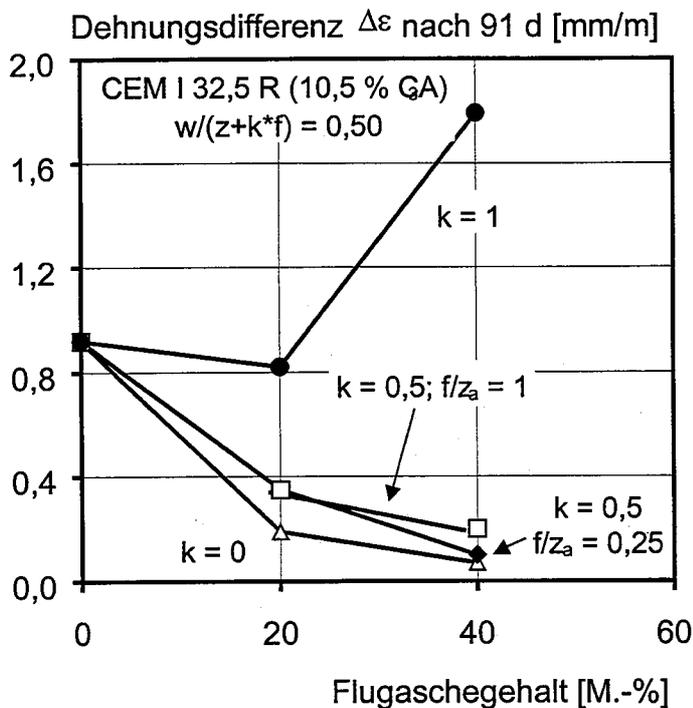


**Bild 1:** Sulfatdehnung eines Portlandzementmörtels mit und ohne Steinkohlenflugasche bei verschiedenen Wasserbindemittelwerten /28/

Um den Einfluß des Gefügewiderstandes zu minimieren und eine möglichst isolierte Prüfung des Bindemittels zu erreichen, werden für Mörtelprüfungen mitunter Mischungsvorschriften mit extrem hohen Wasserbindemittelwerten /35/ oder mit Zugabe von Gips im Überschuß /36/ vorgeschlagen. Mulenga et al. /37/ bevorzugen sogar eine Vakuumtränkung der Mörtel- und Betonprüfkörper mit der Prüflösung. Im Hinblick auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Betonanwendung sind diese Methoden jedoch fragwürdig, da der Sulfatwiderstand untrennbar von den Bindemittelleigenschaften und dem Betongefüge bestimmt wird /18/.

#### 4.4 Einfluß der Flugascheanrechnung auf den Wasserbindemittelwert

Wird Flugasche als Zusatzstoff eingesetzt, verhält sie sich zu Beginn der Hydratation weitgehend wie feinkörniger Zuschlag. Es hängt von ihrer Feinheit und der eingesetzten Menge ab, ob sie als Füllstoff das Gefüge verdichtet oder durch Kontaktzonen erhöhte Porositäten bedingt. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang, wie die Flugasche auf den Wasserbindemittelwert und den Zementgehalt angerechnet wird. Langzeituntersuchungen /24, 28/ zeigten, daß die in der Prüfvorschrift angegebene vollständige Anrechnung (Austausch Zement/Flugasche 1 : 1;  $k = 1$ ) zu den geringsten Sulfatwiderständen führt und das Prüfverfahren somit gegenüber der praktischen Anwendung verschärft (Bild 2).



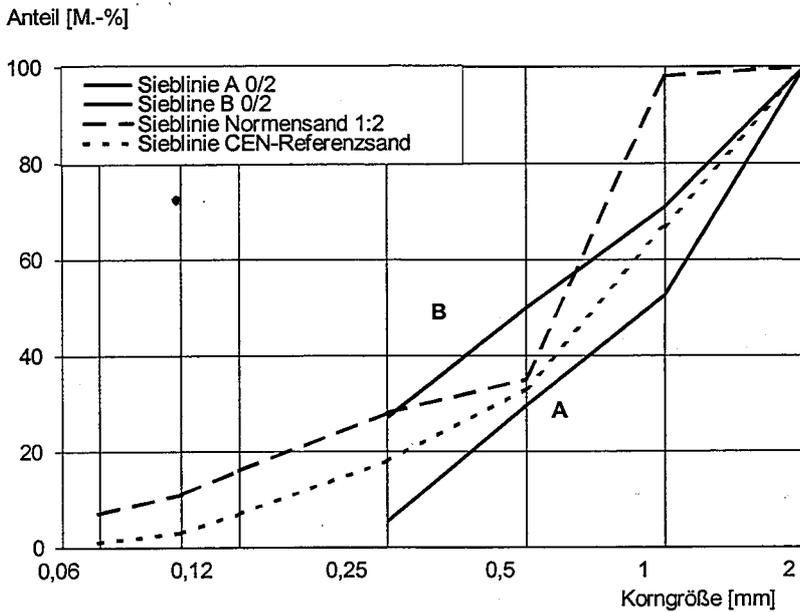
**Bild 2:** Sulfatdehnung flugaschehaltiger Portlandzementmörtel in Abhängigkeit von der Anrechnungsvariante für die Flugasche ( $w/(z+k \cdot f) = 0,50$ ; Hauptlagerungsdauer 91 d) nach /24/

#### 4.5 Einfluß des Zuschlags (Art, Körnung)

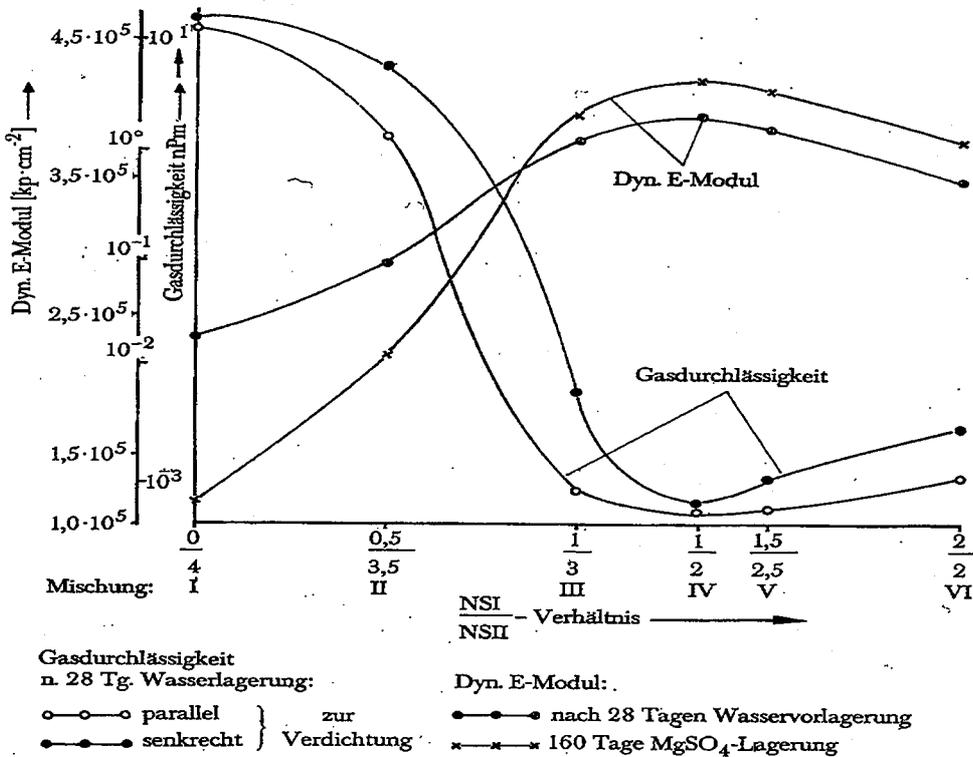
Petrographische Unterschiede im Zuschlag können sich deutlich auf den Sulfatwiderstand auswirken. Zu diesem Schluß kommen Untersuchungen von Piasta /38/ und Zelic /39/, bei denen insbesondere kalkhaltige Zuschläge durch Bildung nicht expansiver Mineralphasen in der Kontaktzone Zuschlag/Zementstein zu geringeren Dehnungsraten bei Sulfatbeaufschlagung führen. Kalkzuschlag kann aber mit gelöster Kieselsäure unter (kaltem) Sulfatangriff zu Thumasitbildung neigen /40, 41/, was einer Verstärkung der Schädigung gleichkommt. Die Verwendung von sulfathaltigem Zuschlag, insbesondere reinem Naturgips, führt in Untersuchungen von Schöner und Wierig /42/ zur Zerstörung der Prüfkörper, und zwar unabhängig, ob ein HS-Zement verwendet wurde oder nicht.

In allen Prüfvorschriften wird von der Verwendung von Normsandgemischen ausgegangen, die üblicherweise aus inerten Quarzpartikeln bestehen. Bei sachgemäßem Einsatz der vorgeschriebenen Zuschläge kann der Effekt der petrographischen Zusammensetzung somit vernachlässigt werden.

Die Sieblinie des verwendeten Zuschlages wirkt sich deutlich auf die Dichte und somit den Sulfatanfälligkeit des Systems aus. Schwiete /30/ variierte in einer Untersuchung das Verhältnis der beiden Normsandkörnungen (nach DIN 1146 12.58 /5/) von „grob“ (NS I : NS II = 0 : 4) zu „fein“ (2 : 2), wobei das Verhältnis von Zement zu Zuschlag 1 : 4 betrug. Die resultierenden Sieblinien sind in Bild 3 im Vergleich zum „günstigen“ Sieblinienbereich A/B sowie zur Sieblinie des CEN-Referenzsandes dargestellt. Bei der Messung der Gaspermeabilität und des dynamischen Elastizitätsmodul der sulfatgelagerten Proben erwiesen sich die groben Mischungen als sehr ungünstig, obwohl sie aufgrund des geringeren Wasserabspruchs mit niedrigeren Wasserzementwerten hergestellt wurden. Der Grund hierfür liegt in einer durch mangelhafte Verdichtung ungünstigen Raumauffüllung durch eine im Grobkorn überbetonten, nicht stetigen Sieblinie. Die besten Werte erzielte die normgerechte Mischung (1 : 2, Bild 4), die dem optimalen Fein- zu Grobkorn-Verhältnis einer Ausfallkörnung am nächsten kommt. Auch Irassar /43/ und Venuat /34/ finden im Prinzip dieselben Zusammenhänge.



**Bild 3:** Sieblinien verschiedener Zuschlagsmischungen im Kornband 0/2 (nach /30/)



**Bild 4:** Gasdurchlässigkeit und dynamischer E-Modul von Portlandzementmörteln in Abhängigkeit vom Verhältnis der Normensandkörnungen I und II /30/

Wie aus der Bild 3 zu erkennen ist, ist die Sieblinie des CEN-Referenzsandes zwar stetig, aber insgesamt deutlich gröber als die Normsandmischung nach DIN 1164 12.58 /5/. Somit ist durch die Änderung des vorgeschriebenen Zuschlages in der DIN 1164 06.70 /6/ ein veränderter Sulfatwiderstand der Mörtel unter sonst gleichen Voraussetzungen zu erwarten. Dieser Frage wird im vorliegenden Projekt durch Mischungen mit den beiden Normzuschlägen nachgegangen.

#### **4.6 Einfluß des Bindemittel-Zuschlag-Verhältnisses**

Die in der Literatur beschriebenen Einflüsse des Zuschlaggehaltes auf Mörtel einerseits und Beton andererseits sind gegenläufig. In Mörteluntersuchungen findet Venuat /34/ höhere Sulfatdehnungen bei zuschlagreichen Mischungen. Dieselben Tendenzen leiten sich auch aus dem „positiven“ Einfluß hoher Bindemittelgehalte (in der Umkehrung: niedrige Zuschlaggehalte) gemäß Kapitel 4.1 ab. Schießl und Meng /31/ weisen auf beginnende Verdichtungsprobleme in Mörteln mit Sandgehalten über 45 Vol.-% hin, wodurch zusätzliche Porosität im transportrelevanten Kapillarbereich entsteht.

Im Beton hingegen verbessern hohe Zuschlaganteile die Dichtigkeit /33/. Die Erklärung hierfür wird anschaulich in /31/ dargestellt: Normzuschlag ist quasi diffusionsdicht und vermindert den transportrelevanten Porenquerschnitt proportional zu seinem Volumenanteil. Dem wirkt die porösere Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein entgegen, deren Anteil proportional zur Oberfläche des Zuschlages steigt. Feinkörniger Zuschlag (z. B. der Sand im Mörtel) verfügt über eine relativ zu seinem Volumen sehr große Oberfläche, so daß hier der Effekt der Kontaktzonen überwiegt. Nach /44/ stehen oberhalb eines Sandgehaltes von ca. 45 Vol.-% die Kontaktzonen in direkter Verbindung, wodurch der Diffusionswiderstand sprunghaft abnimmt.

#### **4.7 Einfluß der Verdichtung**

Eine gute Verdichtung der relativ kleinen Prüfkörper ist eine Voraussetzung für hohe Festigkeiten und dichtes Gefüge und somit für geringe Sulfatdehnungen. Der Einfluß unterschiedlicher Verdichtungstechnik wurde von Schwiete /30/ demonstriert. Besonders deutlich wirkt sich die Qualität der Verdichtung bei schlechter verarbeitbaren Mischungen aus. Dies sind in der Regel die mageren, d. h. zuschlagreichen Mischungen mit moderaten bis niedrigen Wasserzementwerten.

Die Prüfvorschrift verweist zum Thema „Verdichtung“ lediglich auf die DIN 1164. Da die geleistete Verdichtungsarbeit jedoch keine direkt meßbare Größe darstellt, liegt hierin wahrscheinlich eine Ursache für Prüfstreuungen zwischen verschiedenen Laboren (vgl. Kapitel 4.12).

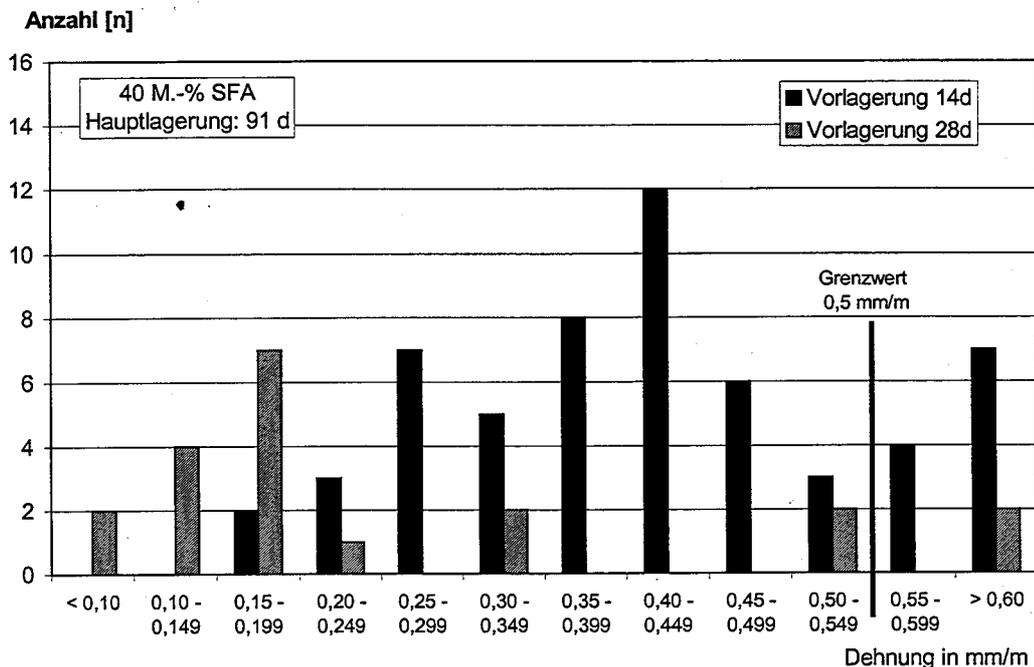
Künstlich eingebrachte Luftporen als freier Reaktionsraum zur Bildung der treibenden Phasen können nach Blanks /1/ die Sulfatbeständigkeit fördern, ohne jedoch als alleinige Maßnahme gegen Sulfatschäden in Frage zu kommen. Im Umkehrschluß zeigt sulfatbeaufschlagter Luftporenbeton schlechtere Frostwiderstände als die sulfatfrei gelagerten Vergleichsmischungen, weil die für die spannungsfreie Eisbildung notwendigen Porenräume bereits durch die Phasenneubildungen ausgefüllt sind.

#### **4.8 Einfluß der Vorlagerungsdauer**

Die Dichtheit eines Mörtels oder Betons ist eine Materialeigenschaft, die sich erst im Laufe der Hydratation entwickelt. Dementsprechend hängt sie neben der stofflichen Zusammensetzung des Bindemittels auch von der Zeitspanne ab, die die Matrix des Mörtels/Betons vor der Sulfatbeanspruchung hydratisieren kann.

Bindemittel mit Hüttensand oder Steinkohlenflugasche zeichnen sich durch besonders hohe Dichtheit und Diffusionswiderstände aus. Allerdings benötigen sie zur Entwicklung ihres Gefüges verlängerte Reaktionszeiten, da die latent-hydraulischen bzw. puzzolanischen Komponenten langsamer reagieren als der Portlandzement-Klinker.

Die Porenstruktur verschiedener Zementmörtel verändert sich im Laufe der Hydratation sehr deutlich /30/. Bewertet man die Kapillarporen als den transportrelevanten Porenradiusbereich (0,1 – 100 µm), zeigen Mörtel mit Portland- und auch Hochofenzementen zu den für das Prüfverfahren zur Diskussion stehenden Terminen für den Beginn der Sulfatlagerung (7, 14 oder 28 Tage) nur unerhebliche Porositätsunterschiede. Die puzzolanische Reaktion flugaschehaltiger Mischungen ist nach 14 Tagen hingegen gerade erst angelaufen; ihre gefügeverdichtende Wirkung kommt somit erst später zum Tragen. Die Vorlagerungsdauer ist für dieses Bindemittelsystem folglich von erheblicher Bedeutung. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Untersuchungen zum Langzeitverhalten von flugaschehaltigen Mörteln in Sulfatlösung“ /28/ bestätigte sich bei der Auswertung der Sulfatdehnungen einer Vielzahl von Zement-Flugasche-Kombinationen, daß verlängerte Vorlagerungszeiten bei diesen Bindemitteln zu verbesserter Sulfatbeständigkeit führen (Bild 5).



**Bild 5:** Sulfatdehnungen diverser Portlandzement-Flugaschemischungen (Prüfalter: 91 Tage) in Abhängigkeit von der Vorlagerungsdauer /28/

#### 4.9 Einfluß des Vorlagerungsmediums

Wittekind /12/ verwendete bei der Entwicklung des Flachprismenverfahrens Wasser als Medium für die Vor- und die Vergleichslagerung. Da hierdurch eine Auslaugung der Porenlösung auftreten kann, wurde die Prüfvorschrift des DIBt dahingehend abgeändert, daß eine  $\text{Ca(OH)}_2$ -gesättigte Lösung als Lagerungsmedium zu verwenden ist. Vergleichende Untersuchungen /25, 26/ stellen fest, daß die Sulfatdehnungen der Prüfkörper tendentiell höher sind, die in der  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung vorgelagert wurden. Als Erklärung wird eine Diffusion von  $\text{Ca(OH)}_2$  in den Mörtel vermutet, das dort zur Bildung treibender Sulfatphasen zur Verfügung steht. Insbesondere die sekundäre Gipsbildung bei der Beaufschlagung mit hochkonzentrierten Prüflösungen (vgl. Kapitel 4.10) kann als Erklärung herangezogen werden. Die Maßnahme sollte sich demnach besonders bei den Bindemittelsystemen verschärfend auswirken, in denen puzzolanische oder latent-hydraulische Zusatzstoffe eigentlich eine Absenkung des  $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehaltes hervorrufen würden.

Smolczyk und Blunk /18/ setzten neben Wasser auch verdünnte Sulfatlösung als Vorlagerungsmedium und sogar als Anmachwasser ein, um das Verhalten von Frischmörteln im Kontakt zu sulfathaltigen Wässern zu beurteilen. Sie stellten durch diese Vorlagerungs-

methode bei Portlandzementen mit und ohne HS-Eigenschaften sowie bei Hochofenzementen keine nennenswerte Veränderung des Sulfatwiderstandes fest. Bei Portlandhüttenzement wird die Sulfatbeständigkeit dagegen bis in den Bereich des Hochofenzementes angehoben, weil durch die hohe anfängliche Sulfatgabe ein Großteil des vorhandenen Aluminates unschädlich umgesetzt wird, bevor das Zementgefüge aussteift.

Derselbe Effekt ist auch für Kompositzemente mit Steinkohlenflugasche zu erwarten. Darauf deutet auch eine Versuchsreihe /28/ hin, in der Mörtel mit Flugaschen unterschiedlichen, leichtlöslichen Sulfatgehaltes auf ihre Sulfatbeständigkeit bewertet wurden. Je höher der Sulfatgehalt der Flugasche war, desto geringer fielen die sulfatbedingten Dehnungen aus. Letztlich sollten aber auch Portlandzemente mit  $C_3A$ -Gehalten, die nur geringfügig über dem HS-Kriterium liegen (in etwa 5 – 7 M.-%), durch frühzeitige Umsetzung von Aluminat sulfatbeständiger werden.

Osborne /45/ berichtet über Versuche, in denen Betone auf Hochofenzementbasis vor der Sulfatbeaufschlagung 28 Tage unter Wasser bzw. im Klima 20 °C/65 % r. F. vorgelagert wurden. Eine weitere Prüfserie wurde direkt nach dem Ausschalen in Sulfatlösung gelagert. Durch die Karbonatisierung (Verbrauch von  $Ca(OH)_2$ , Senkung des pH-Wertes, Verdichtung) erreichen die luftgelagerten Proben die höchsten Sulfatwiderstände, die wassergelagerten Prüfkörper hingegen die niedrigsten. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangt neben Sersale /46/ auch Venuat /34/, der Prüfmörtel zur vollständigen Karbonatisierung einer  $CO_2$ -Atmosphäre aussetzt. Die Dehnungen der Mörtel stagnieren nach wenigen Monaten auf geringem Niveau. El-Sakhawy et al. /47/ ermitteln gegenläufige Tendenzen. Sie prüfen den Einfluß von Nachbehandlungsverfahren auf den Sulfatwiderstand. Dabei schneidet die Versuchsreihe mit Luftlagerung („ohne Nachbehandlung“) schlechter ab als die wassergelagerten Prüfkörper. Eine zunehmende Nachbehandlungsdauer verbessert dabei die Sulfatbeständigkeit.

#### 4.10 Einfluß des Sulfatlagerungs-Mediums

Wesentliches Merkmal für Schnellprüfungen zur Sulfatbeständigkeit ist unter anderem die extrem hohe Sulfatkonzentration der Prüflüssigkeit. In der Literatur reichen die eingesetzten Konzentrationen von 1.000 mg/Liter bis zu 70.000 mg/Liter. Die Stärke des Sulfatangriffes korreliert dabei mit der Menge der zur Verfügung stehenden Sulfate (z. B. /23/), so daß meßbare Ergebnisse innerhalb kurzer Beaufschlagungszeiträume überhaupt erst ermöglicht werden. Wischers und Sprung /48/ weisen allerdings darauf hin, daß aus Sicht der Betonpraxis die angegeben Werte bis zum Faktor 20 über den Grenzwerten liegen, für die nach DIN 1045 bereits eine Betonbeschichtung vorgeschrieben ist. Hime /49/ zieht bei solch ho-

hen Salzgehalten neben der Sulfatschädigung auch die Gefügezerstörung durch Salzkristallisation in Betracht. Zudem ist bekannt, daß eine Bildung von sekundärem Gips erst bei den versuchsbedingt überhöhten Sulfatkonzentrationen möglich wird /50, 51/.

Neben der absoluten Konzentration der Sulfationen spielt auch die Art des Salzes eine wichtige Rolle, dessen Auflösung die Ionen liefert. Die Prüfvorschrift fordert eine Lösung von  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Untersuchungen belegen, daß unter sonst gleichen Prüfbedingungen  $\text{MgSO}_4$ -Lösung der gleichen Konzentration zu einer stärkeren Korrosion führt /25/. Dieser Effekt ist insbesondere bei hochfesten Betonen mit zunehmendem Gehalt an Microsilica zu beobachten /52, 53/. Wichtigster Grund hierfür ist eine Austauschreaktion von Magnesium für Calcium in den CSH-Phasen. Diese vom eigentlichen Sulfatangriff unabhängige Reaktion verursacht einen Festigkeitsverlust und somit geringere Gefügewiderstände /23, 48, 54, 55/. Nach Clark und Brown /56/ kann sich unter dem Einfluß von  $\text{MgSO}_4$  auch das Calciumaluminatferrit in expansives Monosulfat umwandeln und zur Sulfatdehnung beitragen. Eine Auswirkung dieser nur im Laborversuch beobachteten Reaktion auf HS-Zementmörtel wurde seinerzeit von Schwiete /23/ aber nicht beschrieben.

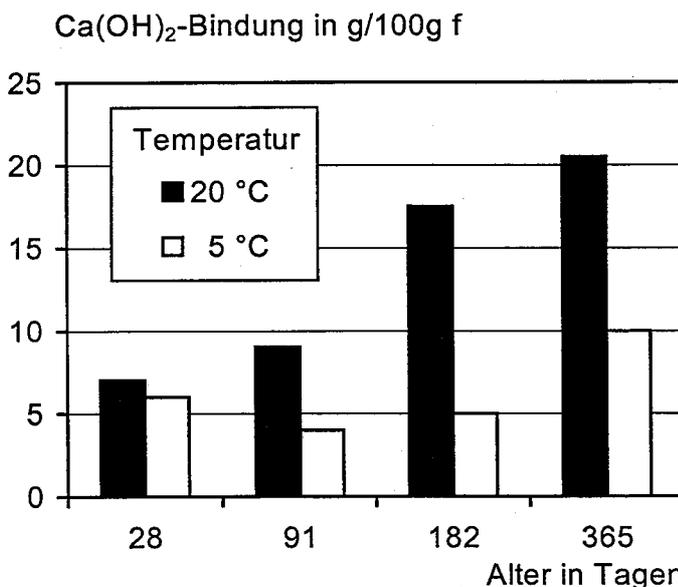
Sehr komplex werden die Verhältnisse, wenn die Prüfflüssigkeiten gelöste, fremdionige Salze enthalten. Oberhalb geringer Konzentrationen wird Alkalichlorid-Lösungen eine verstärkende Wirkung der Korrosion zugesprochen /33, 48/. Diese Wirkung ist jedoch vom jeweiligen Bindemittel abhängig. Al-Amoudi /57/ berichtet von erhöhten Sulfatwiderständen puzzolanhaltiger Bindemittel, sobald Chlorid in der Sulfatlösung enthalten ist.

Meerwasser müßte aufgrund seines hohen Alkalichlorid- und Sulfatgehaltes einen sehr starken Sulfatangriff bewirken. Ähnlich wie die Luftkarbonatisierung bei trocken vorgelagerten Prüfkörpern bewirkt hier das im Wasser enthaltene Hydrogenkarbonat eine Karbonatisierung und somit zusätzliche Verdichtung des Betons /48, 58/. Außerdem besteht ein Zusammenhang zwischen der Alkalität der Prüflösung und dem Sulfatangriff /59/, so daß sich durch die Einwirkung des Karbonates und der damit verbundenen Absenkung des pH-Wertes in den Bereich von ca. pH 10 zusätzliche Verminderungen des Sulfatangriffes ergeben.

#### 4.11 Einfluß der Lagerungstemperatur

Üblicherweise werden chemische Reaktionen durch die Erhöhung der Umgebungstemperatur beschleunigt. Im Fall der Sulfatschädigung durch die Bildung von sekundärem Ettringit trifft dies nicht zu. Wärmere Lagerung (z. B. bei 40 °C) führt zum Aussetzen der Sulfatdehnung /23, 60/. Die Umwandlung des Monosulfates und vor allem das Längenwachstum der Ettringitnadeln sind hingegen bei Lagerungstemperaturen unter 10 °C thermodynamisch begünstigt und führen selbst bei HS-Zementen zu verstärkten Dehnungen /23, 48/. Außerdem findet Thaumasit in diesem Temperaturbereich seine optimalen Bildungsbedingungen, dessen destruktive Eigenschaften bei der geeigneten chemischen Umgebung die Auswirkungen des Sulfatangriffes verstärken. Wird hingegen in einer Lösung mit Magnesiumsulfat geprüft, bewirken die niedrigen Temperaturen die oberflächliche Abscheidung von gelartigem Brucit (Magnesiumhydroxid), der insbesondere bei niedrigeren Wasserzementwerten das Porensystem verstopft und eine Sulfatdiffusion in den Prüfkörper behindert /23, 51/.

In flugaschehaltigen Bindemitteln führt eine Lagerung bei niedrigen Temperaturen zu einer verlangsamten puzzolanischen Reaktion (Bild 6); die positiven Eigenschaften der Flugasche kommen erst in höherem Alter zum Tragen. Bei vorzeitigem Sulfatangriff resultiert hieraus ein stark herabgesetzter Sulfatwiderstand /25, 37, 50/.

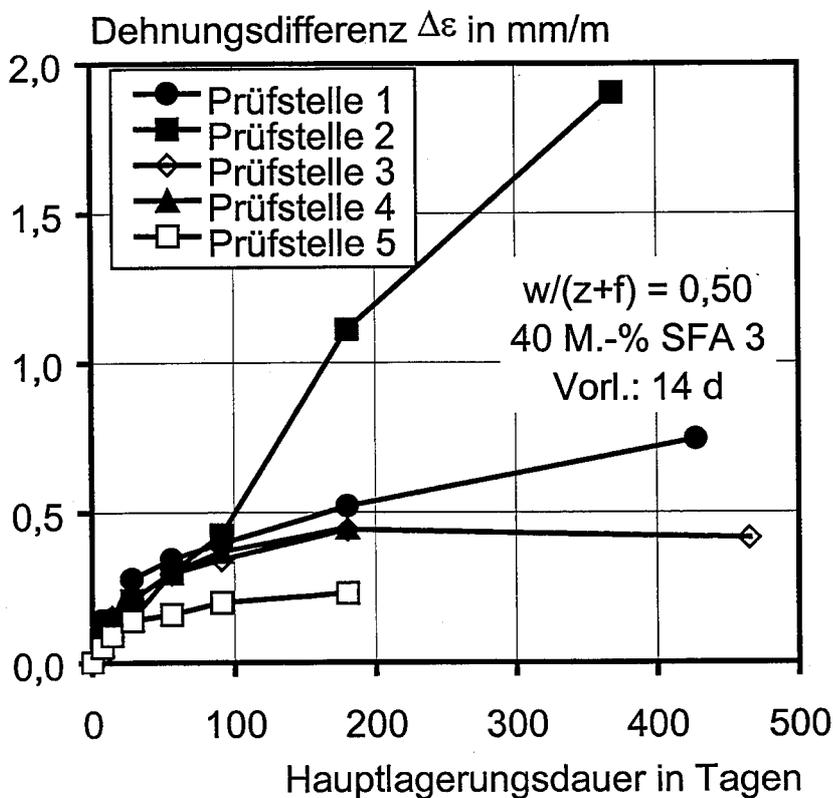


**Bild 6:** Ca(OH)<sub>2</sub>-Bindung eines Bindemittels aus 80 M.-% CEM I und 20 M.-% SFA infolge der puzzolanischen Reaktion bei 5 °C und 20 °C /61/

#### 4.12 Reproduzierbarkeit des Verfahrens

Der Vorteil vom Einsatz kleiner Prüfkörper in Hinblick auf kurze Diffusionswege geht je nach Prüfmethode mit relativ hohen Meßwertstreuungen einher. Nischer /35/ beispielsweise hält aus diesem Grund das Kleinprismenverfahren für nur bedingt aussagefähig. Mehta /62/ versucht die schlechte Statistik durch hohe Stückzahlen kleiner Prüfkörper zu kompensieren.

Bei der Bewertung der HS-Eigenschaften flugaschehaltiger Bindemittel durch das Flachprismenprüfverfahren mit seinem Grenzwertkriterium ist eine exakte Durchführung der Prüfvorschriften notwendig. Ein Ringversuch mit mehreren Laboratorien zur Prüfstreuung und Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse /63/ zeigte, daß bei gleichartiger Durchführung und Einsatz der identischen Ausgangsstoffe deutliche Differenzen in den Prüfergebnissen auftraten (Bild 7). Führen die Messungen zu den frühen Prüfterminen noch zu einer einheitlichen Bewertung des Bindemittels, sind trotzdem relative Abweichungen von mehr als 100 % zu verzeichnen. Dieser Trend verstärkt sich bei fortschreitender Beaufschlagungsdauer.



**Bild 7:** Sulfatdehnung eines SFA-haltigen Bindemittels, ermittelt im Ringversuch von 5 verschiedenen Prüfstellen /63/

Im Rahmen des Ringversuches wurden keine weiterführenden Untersuchungen zu den Ursachen der hohen Prüfstreuungen durchgeführt. Da mit identischen Ausgangsstoffen gearbeitet wurde und die Durchführung der Dehnungsmessungen wenig anfällig für systematische Fehler ist, ist die Ursache in Ungenauigkeiten bei der Prüfkörperherstellung und Lagerung zu vermuten. Insbesondere die geleistete Verdichtungsarbeit als schwer zu quantifizierende Größe kann deutlichen Einfluß genommen haben (vgl. Kapitel 4.7). Eine Überprüfung des Sachverhaltes könnte durch eine Messung von in einer Grundgesamtheit hergestellten Probekörpern in verschiedenen Prüfinstituten erfolgen.

Bei Bindemitteln, deren Dehnungswerte in der Größenordnung eines Grenzwertkriteriums liegen, kann dies im Einzelfall zu widersprüchlichen Bewertungen führen. Ein anschauliches Beispiel liefert Smolczyk /18/, der die Sulfatdehnung eines CEM III/A nach 56 Tagen zunächst auf 1,45 mm/m bestimmte. Eine Wiederholungsmessung zeigte qualitativ denselben Dehnungsverlauf, allerdings um ca. 4 Wochen verzögert. Hieraus resultierte eine Sulfatdehnung nach 56 Tagen von lediglich 0,35 mm/m. Für diesen Zement läge nach den Ergebnissen der ersten Prüfung eine Einstufung als „nicht sulfatbeständig“, nach denen der zweiten Prüfung als „sulfatbeständig“ nahe.

## 5 VERSUCHSPROGRAMM

In den im Kapitel 2 zitierten Forschungsprojekten wurde schwerpunktmäßig der Sulfatwiderstand verschiedener Zement-Flugasche-Gemische untersucht. Eine Variation der Prüfbedingungen erfolgte nur punktuell.

Von systematischen Untersuchungen der Einflüsse von Randbedingungen auf das Flachprismen-Prüfverfahren handelt der vorliegende Forschungsbericht. Basierend auf der DIBt-Vorschrift zur Beurteilung des Sulfatwiderstandes von Zement-Flugasche-Gemischen wurden Prüfmörtel mit 20 bzw. 40 M.-% Flugasche (nach DIN EN 450 /64/) hergestellt. Die Mengenangabe bezieht sich auf den Gesamtbindemittelgehalt, der Anrechnungsfaktor beträgt  $k = 1$ . Als Zement wurde ein handelsüblicher CEM I 32,5 R mit mittlerem  $C_3A$ -Gehalt von ca. 8 M.-% eingesetzt. Als Vergleich zu den flugaschehaltigen waren darüber hinaus flugaschefreie Mischungen mit diesem CEM I sowie mit einem CEM I 32,5 R-HS vorgesehen. Die chemischen Kenndaten der eingesetzten Rohstoffe sind Tabelle A1 im Anhang zu entnehmen.

Tabelle 1 zeigt die vollständige Mischungsmatrix. Unter den darin festgelegten Randbedingungen wurden Flachprismen mit den Abmessungen  $10 \cdot 40 \cdot 160 \text{ mm}^3$  hergestellt. Je Mörtelmischung wurden 6 Flachprismen zunächst 2 Tage in den Formen im Klima  $20 \text{ °C}/95 \text{ % r. F.}$  belassen. Nach dem Ausschalen wurden die Flachprismen 12 Tage (bzw. 26 oder 89 Tage) hochkant auf Rosten stehend in gesättigter  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung bei  $20 \text{ °C}$  gelagert. Nach dieser Vorlagerung wurde eine Serie von 3 Flachprismen in 4,4 %iger  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösung bei  $20 \text{ °C}$  auf Rosten stehend gelagert (Sulfatlagerung). Die zweite Serie von 3 Flachprismen verblieb weiter in gesättigter  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung bei  $20 \text{ °C}$  (Vergleichslagerung). Die Dehnungen sowie die auftretenden Masseänderungen wurden im Alter von 0, 7, 14, 28, 56, 91 und 182 Tagen nach Beginn der Hauptlagerung ermittelt. An den Prüfkörpern der Mischungen, bei denen die Parametervariation signifikante Auswirkungen auf die Dehnungswerte zeigte, wurden Resonanzfrequenzmessungen im Hinblick auf potentielle Gefügeschädigungen durchgeführt.

Parallel zu den Untersuchungen am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) wurden an der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt (FMPA) Baden-Württemberg Untersuchungen mit Variationen im  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalt der Zemente, im Flugaschegehalt und in der Mischungsvorschrift (Stand DIN 1146 12.58 bzw. 06.70) durchgeführt. Soweit die einzusetzenden Rohstoffe übereinstimmten (Flugasche, CEM I mit etwa 8 M.-%  $\text{C}_3\text{A}$ ), wurde das am ibac verwendete Material zur Verfügung gestellt, um punktuell auch Anhaltswerte für die Meßstreuung zwischen den Prüflabors zu erhalten.

**Tabelle 1:** Versuchsprogramm zum Einfluß der Prüfbedingungen auf das Ergebnis der Prüfung des Sulfatwiderstandes mit dem Flachprismenverfahren

Zement	SFA <sup>1)</sup>	w/(z+f)-Wert <sup>2)</sup>				Vorlagerungsdauer <sup>3)</sup>		Sand <sup>4)</sup>		Zuschlaggehalt <sup>5)</sup> g/(z+f)		
		0,40	0,50	0,60	0,70	28	91	CEN	NS <sub>alt</sub>	2	3	4
-	M.-%	-				d		-			-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CEM I 32,5 R <sup>6)</sup>	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	20	-	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X
	40	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM I 32,5 R-HS	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

1) eine Flugasche gemäß DIN EN 450 (Trockenfeuerungsflugasche)

2) einheitlich CEN-Referenzsand gemäß DIN EN 196-1; Vorlagerungsdauer 14 d;  $g/(z+f) = 3$

3) Vorlagerung in gesättigter  $\text{Ca(OH)}_2$ -Lösung;  $w/(z+f) = 0,50$ ; CEN-Referenzsand gemäß DIN EN 196-1;  $g/(z+f) = 3$

4)  $w/b = 0,60$ ; CEN-Sand gemäß DIN EN 196-1; NS<sub>alt</sub>: Normsand nach DIN 1164 6.70 (Blatt 7); Vorlagerungsdauer 14 d

5)  $g/(z+f) = \text{Verhältnis Zuschlag}/(\text{Zement}+\text{Flugasche})$ ; einheitlich CEN-Referenzsand gemäß DIN EN 196-1; Vorlagerungsdauer 14 d,  $w/(z+f) = 0,50$

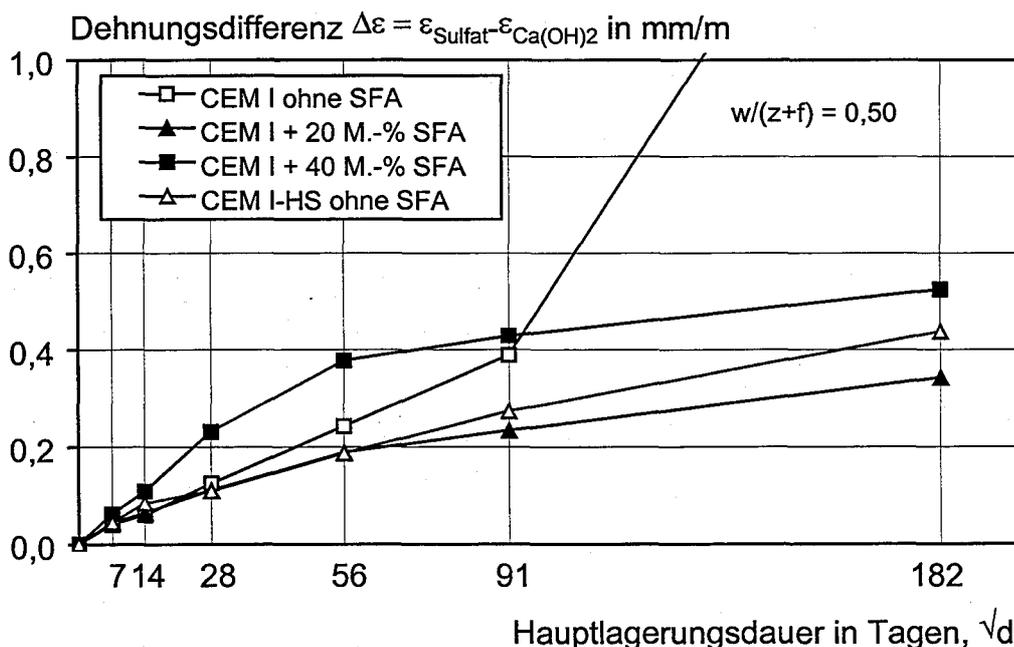
6)  $\text{C}_3\text{A}$ -Gehalt rd. 8 M.-%

## 6 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

### 6.1 Einfluß des Flugaschegehaltes

In Kombination mit dem CEM I wurde der Flugaschegehalt bei einem Wasserbindemittelwert von 0,50 in den Abstufungen 0, 20 und 40 M.-% variiert.

Ohne Flugasche zeigt sich die aus anderen Untersuchungen bekannte kontinuierliche, aber erst jenseits der 91 Tage progressive Dehnungsentwicklung (Bild 8, Tabelle A3). Deutliche Gefügeschäden werden bei der Resonanzfrequenz-Methode (RF) sogar erst nach mehr als 140 Tagen Hauptlagerung in Sulfatlösung verzeichnet (Bild 9, Tabelle A4.2). Die Resonanzfrequenz der sulfatgelagerten Proben im Alter ab 28 Tage nimmt allerdings langsamer zu als in der Vergleichslagerung. Wahrscheinlich steht der gleichartigen Nacherhärtung bei der Proben eine allmählich einsetzende Sulfatdehnung entgegen.



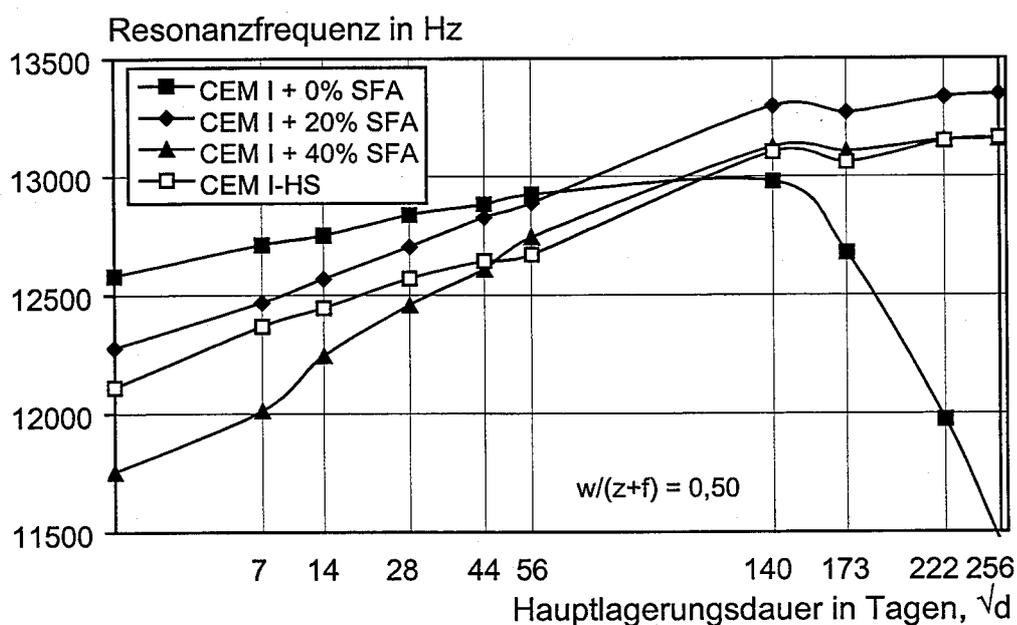
**Bild 8:** Sulfatdehnung der Mörtel mit CEM I-HS sowie mit CEM I in Kombination mit verschiedenen Gehalten an Steinkohlenflugasche

Durch den Austausch von 20 M.-% Portlandzementklinker gegen die gleiche Menge Steinkohlenflugasche wird die Sulfatdehnung ab 28 Tagen verringert und nähert sich bei 182 Tagen einer Dehnung von rd. 0,4 mm/m. Damit unterschreitet diese Mischung sogar die Dehnungsdifferenz des HS-Zementes. Gefügeschäden sind durch Resonanzfrequenzmessungen ebenfalls nicht nachzuweisen.

Die deutlich abgestuften Frequenzwerte zu Beginn der Hauptlagerung repräsentieren die unterschiedlichen Porositäten und Festigkeiten der Mischungen (Bild 9). Die puzzolanische Reaktion wird durch eine sich im Lauf der Zeit verringernde Differenz zwischen den RF der Flugasche haltigen und -freien Mischungen belegt.

Die Mischung mit 40 M.-% Steinkohlenflugasche zeigt zu Beginn der Hauptlagerung zunächst die höchsten Dehnungswerte, ohne das Kriterium von 0,5 mm/m nach 91 Tagen zu überschreiten. Zum einen wird die Sulfatdehnung durch eine aufgrund der Verdünnung des Zementgehaltes verlangsamte Festigkeitsentwicklung weniger behindert, zum anderen wirkt die Flugasche vor Beginn der puzzolanischen Reaktion wie zusätzlicher, feinkörniger Zuschlag. Mit einsetzender puzzolanischer Reaktion stagniert die Dehnung. Die Resonanzfrequenz erreicht nach ca. 5 Monaten ihren Maximalwert und hält dann dieses geringfügig unterhalb der flugascheärmeren Mischung liegende Niveau. Schädigungen sind nicht zu verzeichnen. Wie Langzeituntersuchungen /28/ zeigen, ist beim Fortführen der Sulfatlagerung damit zu rechnen, daß die flugaschereiche Mischung geringere Enddehnwerte aufweisen wird als die Mischung mit 20 M.-% Flugasche oder auch der HS-Zement nach DIN 1146.

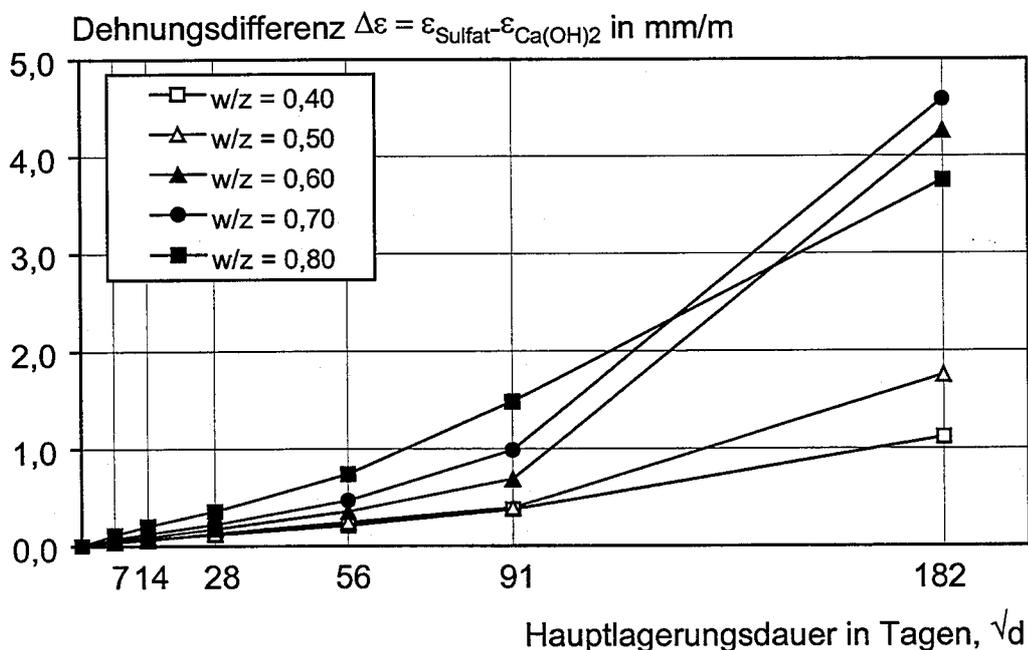
Abgesehen von geringfügig höheren Werten zu Beginn der Hydratation ist die Entwicklung der Resonanzfrequenz des CEM I-HS praktisch identisch mit der flugaschehaltigen Mischungen.



**Bild 9:** Resonanzfrequenz der sulfatgelagerten Mörtel mit CEM I-HS sowie mit CEM I in Kombination mit verschiedenen Gehalten an SFA

## 6.2 Einfluß des Wasserzementwertes

Bei den Mischungen mit Portlandzement kommt es parallel zu der stufenweisen Erhöhung des Wasserzementwertes und der daraus resultierenden Porositätserhöhung zu einem deutlichen Anstieg der Sulfatdehnung (Bild 10). Dabei zeigt sich die ungenügende Trennschärfe des Flachprismenverfahrens. Obwohl der Zement mit einem  $C_3A$ -Gehalt von etwa 8 M.-% die in der DIN 1146 formulierten Anforderungen an die chemisch-mineralogische Zusammensetzung für sulfatbeständige Bindemittel nicht einhält, führen erst hohe Wasserzementwerte zur Überschreitung des ehemaligen Grenzwertkriteriums ( $w/z = 0,80$  nach 56 Tagen bzw.  $w/z = 0,60$  nach 91 Tagen). Alle Mischungen zeigen im Prüfzeitraum eine progressive Entwicklung der Sulfatdehnung, so daß ein Enddehnwert nicht absehbar ist. Dabei ist ab 91 Tagen der Treibvorgang in der porösesten Mischung ( $w/z = 0,80$ ) geringer als beim Wasserzementwert von 0,60 und 0,70. Gegebenenfalls hat sich frühzeitig ein Teil des entstehenden Ettringits zwängungsfrei im resultierenden Porenraum ausgebildet, so daß das verbleibende Dehnungspotential bereits wieder abnimmt. Zur Klärung des Phänomens wären zeitgebundene mineralogische Untersuchungen notwendig.



**Bild 10:** Sulfatdehnung der CEM I-Mörtel in Abhängigkeit vom Wasserzementwert

Beim sulfatbeständigen Portlandzement nach DIN 1164 belegt die nur unwesentliche Abhängigkeit der ohnehin geringen Dehnung vom Wasserzementwert, daß die Sulfatbeständigkeit dieses HS-Zementes auf seiner chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und nicht auf Gefügeeigenschaften beruht (Bild 11). Eine Gruppierung der Sulfatdehnungen mit sehr niedrigen Werten bei Wasserzementwerten bis 0,50 bzw. mit etwas höheren Dehnungen bei Wasserzementwerten ab 0,60 verschimmt nach 6monatiger Hauptlagerung wieder. Der Dehnungsfortschritt verläuft degressiv. Die kontinuierliche Dehnungsentwicklung belegt aber auch, daß trotz der (rechnerischen) Abwesenheit von  $C_3A$  eine sulfatbedingte Expansion der Prüfkörper erfolgt. Diese Beobachtung wurde in Langzeituntersuchungen ebenfalls getätigt /28/.

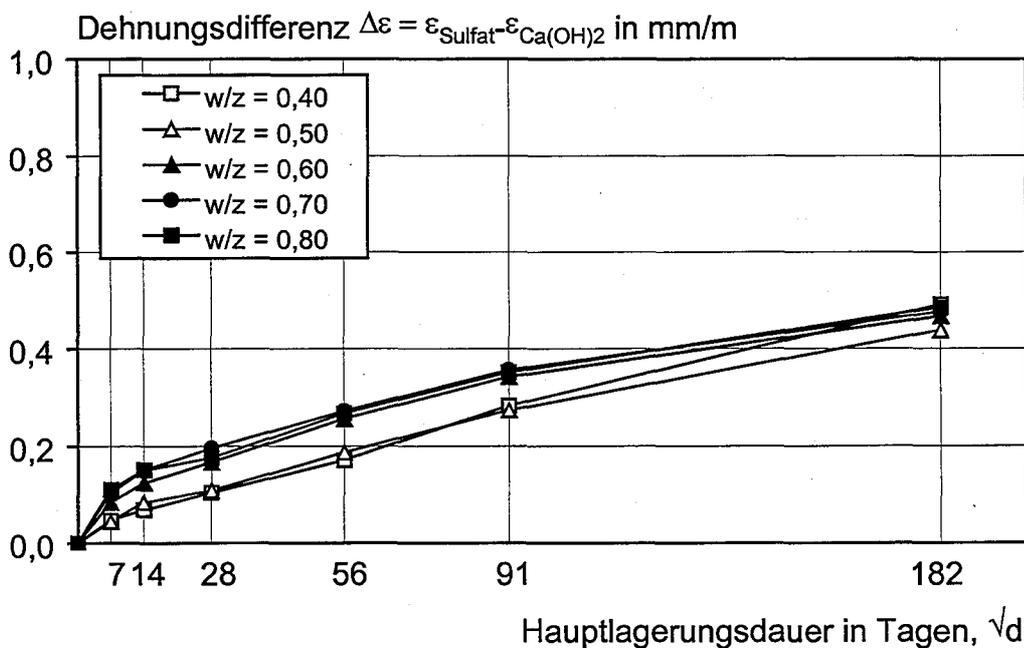
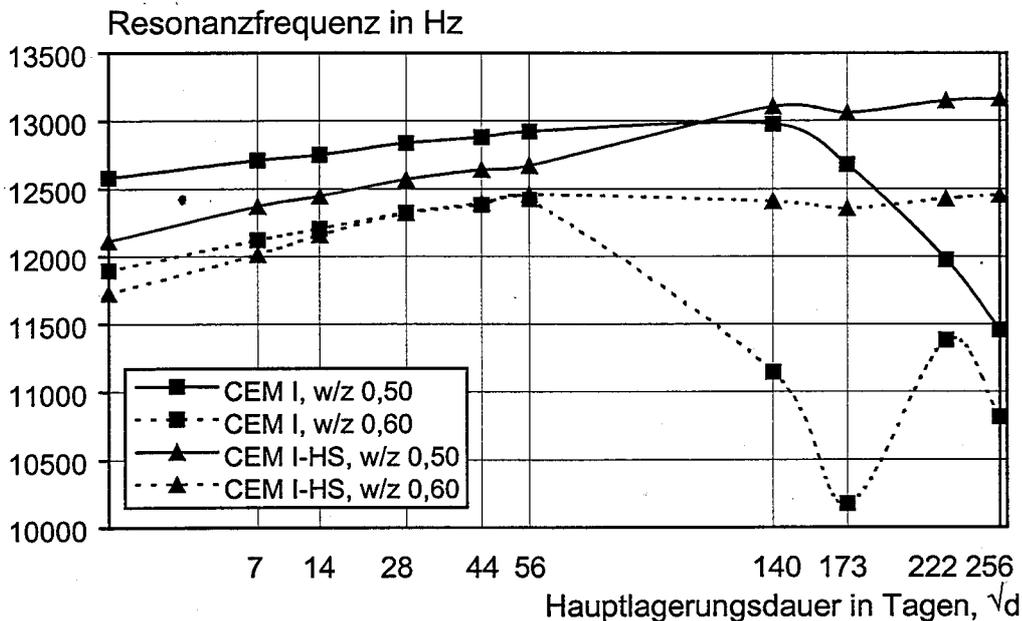


Bild 11: Sulfatdehnung der CEM I-HS-Mörtel in Abhängigkeit vom Wasserzementwert

Das porösere Gefüge der wasserreichen Mischungen spiegelt sich in entsprechend niedrigeren Niveaus der Resonanzfrequenzen wieder (Bild 12). Während beim CEM I-HS mit einem w/z-Wert von 0,50 durch die Nacherhärtung die Meßwerte auch nach 5 Monaten noch leicht steigen, stagnieren sie bei der wasserreicheren Mischung bereits nach 56 Tagen. Beim CEM I setzt die Abnahme der Resonanzfrequenzen bei der Mischung mit w/z = 0,60 deutlich früher ein und ist stärker ausgeprägt. Der Anstieg der Frequenzen jenseits der 200 Tage-Grenze ist ohne weitere Untersuchungen nicht erklärbar.



**Bild 12:** Resonanzfrequenzen der sulfatgelagerten CEM I- bzw. CEM I-HS-Mörtel in Abhängigkeit vom Wasserzementwert

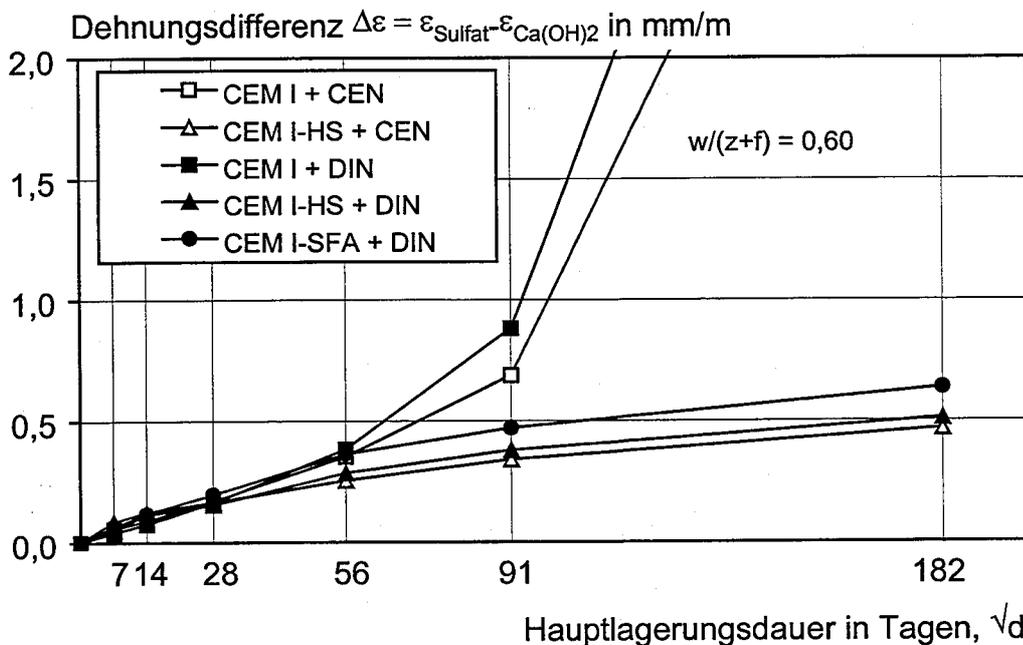
Da der Einfluß des Wasserbindemittelwertes auf flugaschehaltige Mischungen im Rahmen abgeschlossener Forschungsprojekte (/24, 25, 28/, vgl. Kapitel 4.1) untersucht wurde, entfiel hier die Herstellung weiterer Mischungen. Hohe Wasserbindemittelwerte führen bei „ungünstigen“ Zement-Flugasche-Kombinationen und hohen Flugaschegehalten zu anfänglich stärkeren Dehnungen, die das Grenzwertkriterium durchaus überschreiten können. Die Langzeituntersuchungen zeigen aber, daß sich nach spätestens einem Jahr weitgehend stabile Dehnungen einstellen, die deutlich unterhalb der Sulfatdehnung solcher Portlandzemente liegen, die zunächst die Grenzwerte eingehalten hatten (Bild 1).

Eine in der Betonpraxis vorgesehene Teilanrechnung der Flugasche auf den Wasserbindemittelwert mit  $k = 0,4$  führt zu nochmals deutlich verringerten Sulfatdehnungen /24/.

### 6.3 Einfluß der Zuschlag-Sieblinie

Die Änderung der DIN 1146 /6/ im Jahr 1970 sieht als zu verwendenden Normsand den CEN-Referenzsand vor. Wie in Kapitel 4.5 beschrieben wird, ist dieser Sand gröber als der zuvor eingesetzte Normsand, weist jedoch eine stetige Sieblinie auf.

In den Versuchen wurde mit allen drei Bindemitteln (CEM I, CEM I-HS, CEM I + 20 M.-% SFA) Mörtel mit beiden Sandvarietäten und einem Wasserbindemittelwert von 0,60 hergestellt. Wie die Gegenüberstellung der Dehnungswerte zeigt, treten bis 56 Tage Hauptlagerung kaum Unterschiede auf (Bild 13). Ab 91 Tagen ergeben sich bei den Mischungen mit dem CEN-Sand die etwas geringeren Dehnungsraten. Aufgrund der größeren Sieblinie dieses Normsand es war unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus /30/ eher ein umgekehrter Effekt zu erwarten. Offensichtlich führt aber die Stetigkeit der Sieblinie zu einer besseren Verdichtung und Raumausfüllung. Einen entsprechenden Hinweis liefern die Messungen der Resonanzfrequenz, wonach bereits in jungem Prüfalter durchgängig höhere Werte für die Mörtel mit CEN-Sand gemessen werden.



**Bild 13:** Sulfatdehnung der verschiedenen Mörtel in Abhängigkeit vom Typ des verwendeten Normsand es

Obwohl die flugaschehaltige Mischung in der „ungünstigen“ Konstellation mit einem Wasserbindemittelwert von 0,60 und dem DIN-Sand hergestellt wurde, hält sie nach 91 Tagen das Dehnungskriterium noch ein.

Die Verwendung des „alten“ Normsand es nach DIN 1146 12.58 führt tendentiell zu einer deutlicheren Differenzierung der eingesetzten Bindemittel. Der Einfluß entwickelt sich aber erst bei Lagerungsfristen über 56 Tagen und ist auch nach 91 Tagen nur schwach ausgeprägt. Eine Differenzierung der Bindemittelsysteme läßt sich durch Änderung anderer Rah-

menbedingungen des Prüfverfahrens jedenfalls effektiver gestalten. Zudem spricht die leichte (und wenig fehleranfällige) Handhabung des CEN-Referenzsand es im Laborbetrieb ebenso für dessen Verwendung wie der Einsatz von in der Regel stetigen Zuschlaggemischen im System „Beton“.

### 6.4 Einfluß des Bindemittel-Zuschlag-Verhältnisses

Hohe Zuschlaggehalte führen beim CEM I zu einer deutlich verringerten Sulfatbeständigkeit (Bild 14, Tabelle A3). Die Prüfkörper der Mischung mit einem Zement/Normsand-Verhältnis von 1 : 4 sind als einzige nach 6 Monaten zerstört.

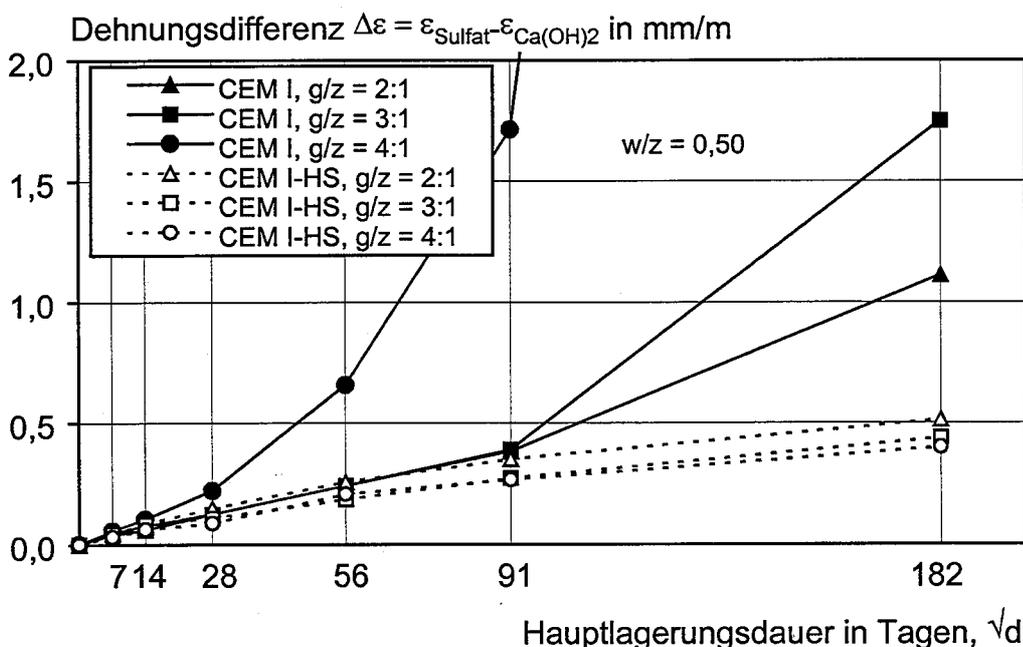


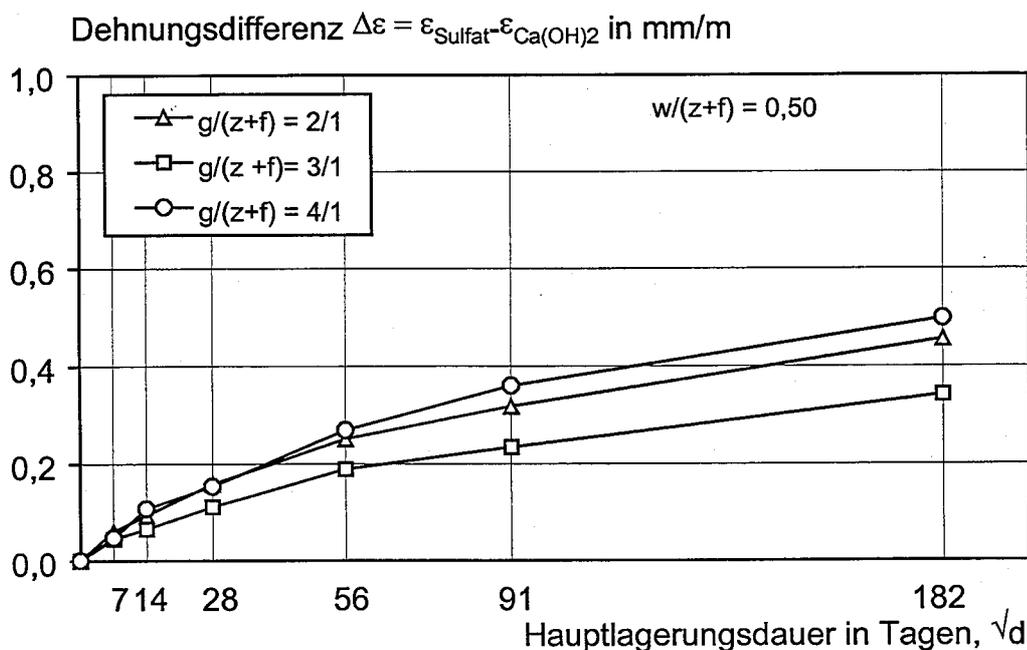
Bild 14: Sulfatdehnung der CEM I bzw. CEM I-HS-Mörtel in Abhängigkeit vom Zuschlaggehalt

Im System „Beton“ ist nach Literaturangaben eine gegenläufige Tendenz zu beobachten. Hier erhöht sich der Sulfatwiderstand mit steigendem Zuschlaggehalt. Die Ursache für die geringe Beständigkeit des Mörtels dürfte im ungünstigen Verhältnis von diffusionsdichtem Zuschlagvolumen und diffusionsrelevanter Zuschlagoberfläche (poröse Kontaktzone) beim Sandzuschlag begründet sein. Nach /44/ stehen oberhalb eines Sandgehaltes von ca. 45 Vol. % die Kontaktzonen in Verbindung, wodurch der Diffusionswiderstand sprunghaft abnimmt.

Da der CEM I-HS aus mineralogisch-chemischer Sicht sulfatbeständig (kein  $C_3A$  nach Bogue) und seine Dehnung von Diffusionskennwerten weitgehend unabhängig ist, spielen hohe Zuschlaggehalte auch keine Rolle. Dies spiegelt sich auch in den stabilen Meßwerten der Resonanzfrequenzen wider. Die geringfügig erhöhten Dehnungswerte bei der zementreichen Mischung sowie eine kontinuierliche Dehnungszunahme deuten an, daß andere Klinker- oder Hydratationsphasen als Ausgangsstoff für expansive Sulfatphasen begrenzt wirksam werden.

Die flugaschehaltige Mischung zeigt den optimalen Sulfatwiderstand beim in der Prüfvorschrift vorgegebenen Bindemittel/Zuschlagverhältnis von 1 : 3 (Bild 15). Insgesamt ist der Einfluß des Bindemittel-Zuschlag-Verhältnisses aber geringer ausgeprägt, da durch die puzolanische Reaktion eine Verdichtung der porösen Kontaktzone erreicht wird. Das Dehnungskriterium wird jedenfalls nach 91 Tagen von keiner der untersuchten Bindemittel/Zuschlag-Mischungen überschritten.

Bemerkenswert ist, daß sich bei der zuschlagreichen Mischung nach ca. 6 Monaten eine einsetzende Gefügeschädigung in den Resonanzfrequenzen abzeichnet, die bei den Dehnungswerten nicht nachvollziehbar ist (Bild 16). Hier wären weiterführende Untersuchungen zur Klärung der Frage notwendig, ob die Sulfatdehnung noch verzögert einsetzt.



**Bild 15:** Sulfatdehnung der flugaschehaltigen CEM I-Mörtel in Abhängigkeit vom Zuschlaggehalt (20 M.-% SFA)

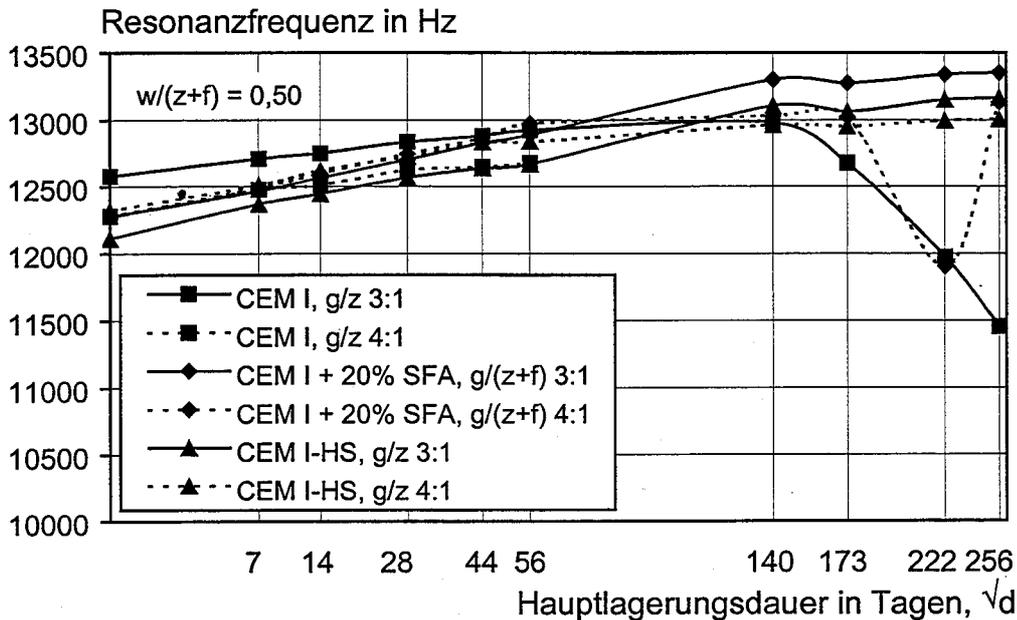


Bild 16: Resonanzfrequenz verschiedener Mörtel in Abhängigkeit vom Zuschlaggehalt

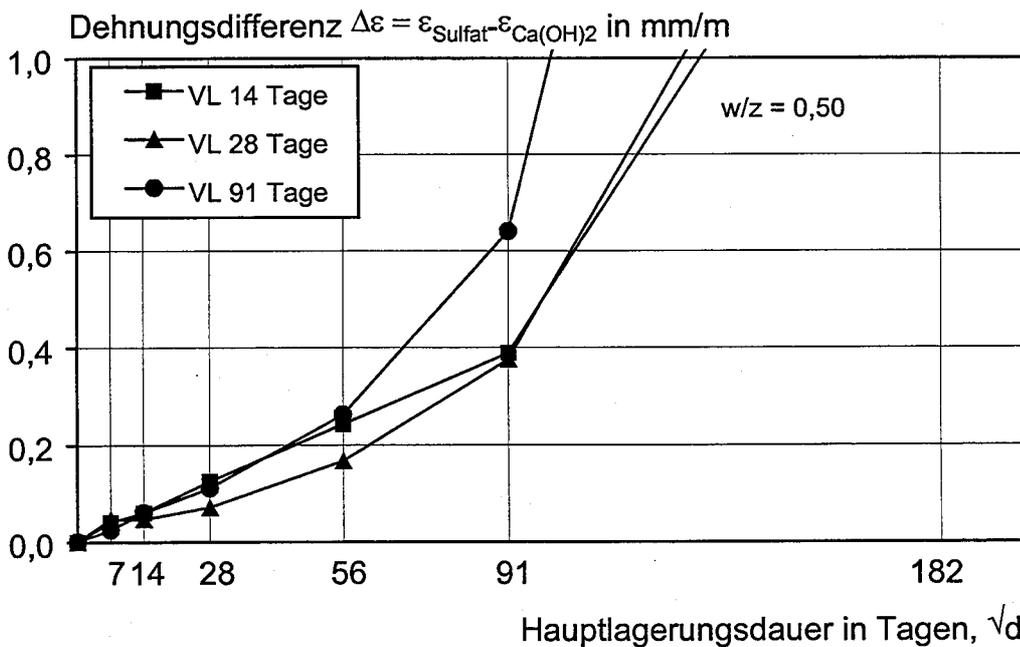
## 6.5 Einfluß der Vorlagerungsdauer

Verlängerte Vorlagerungsfristen wirken sich auf die Sulfatbeständigkeit der reinen Portlandzement-Mischung im fortgeschrittenen Prüfalter nachteilig aus. Während eine 28 Tage-Vorlagerung die Sulfatdehnung zunächst noch geringfügig gegenüber der Lagerung nach Prüfvorschrift reduziert, überschreitet die drei Monate vorgelagerte Mischung ab 56 Tagen Hauptlagerung deren Dehnungswerte deutlich (Bild 17). Dieselbe Entwicklung zeigt sich bei der Messung der Resonanzfrequenzen. Ein Grund hierfür könnte darin liegen, daß sich der primär gebildete Ettringit im Lauf der verlängerten Vorlagerung bereits wieder in Monosulfat zurückgebildet hat. Beim Zutritt der Sulfationen in der Hauptlagerung entsteht dann im bestehenden Gefüge sekundärer Ettringit, der zu den beobachteten Dehnungen führt. Diese Hypothese müßte durch phasenanalytische Untersuchungen bestätigt werden. Die Dehnungszunahmen der Probekörper sind jedenfalls im gesamten Prüfzeitraum und unabhängig von der Vorlagerungsdauer progressiv, was sich mit den Ergebnissen aus den Langzeitversuchen in /24, 25, 28/ übereinstimmt.

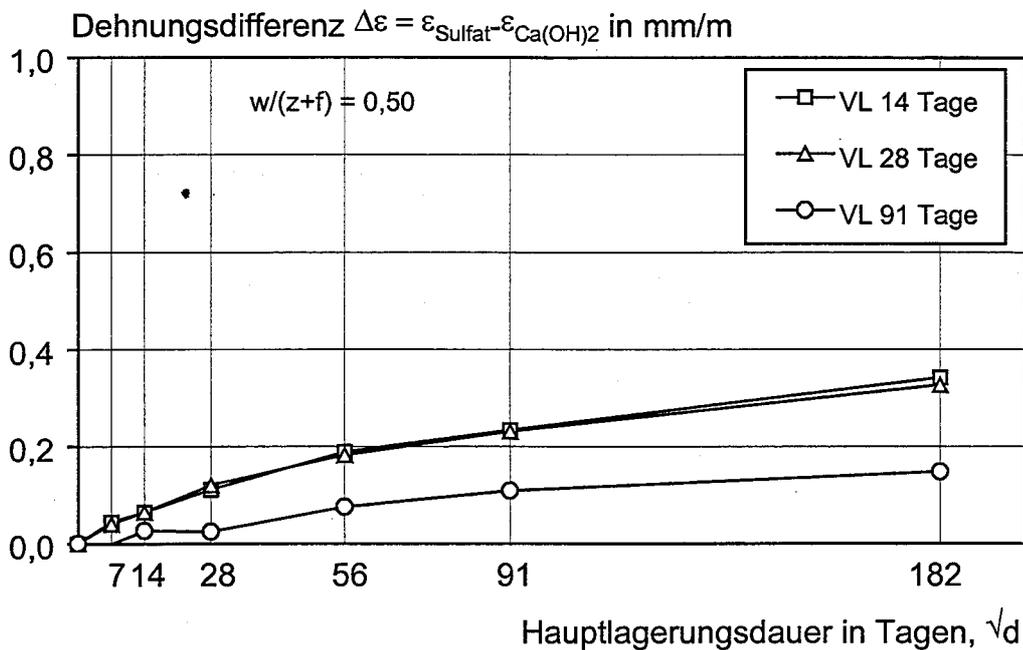
Auf die Dehnungsdifferenzen und die Resonanzfrequenzen des sulfatbeständigen Zementes nach DIN 1146 /7/ hat die Vorlagerungsdauer keinerlei Einfluß. Dies ist ein weiterer Beleg dafür, daß das Bindemittel unabhängig vom sich ausbildenden Gefüge sulfatbeständig und daher im Prüfverfahren als Referenzprobe grundsätzlich geeignet ist.

Bei den flugaschehaltigen Mischungen zeigt eine 28tägige Vorlagerung keine Abweichung vom schon relativ niedrigen Dehnungsniveau des Prüfstandards (14 Tage Vorlagerung, Bild 18). Der positive, in erster Linie gefügeverdichtende Effekt der puzzolanischen Reaktion spielt bis hierhin also noch keine wesentlich Rolle. Bei verlängerter Vorlagerung kommt die puzzolanische Reaktion dagegen bereits zu Beginn der Hauptlagerung zum Tragen. Die Dehnungsbeträge sind extrem niedrig und liegen letztlich zunehmend deutlich unter den Werten der sulfatbeständigen Zementmischung nach DIN 1146.

Eine Optimierung der Trennschärfe des Verfahrens ist über die Variation der Vorlagerungsdauer somit nicht zu erreichen, zumal eine potentielle Verlängerung dieser Frist für die Konzeption eines Schnellprüfverfahrens wenig zielführend wäre.



**Bild 17:** Sulfatdehnung des CEM I – Mörtels in Abhängigkeit von der Vorlagerungsdauer



**Bild 18:** Sulfatdehnung der CEM I – Mörtel mit 20 M.-% Steinkohlenflugasche in Abhängigkeit von der Vorlagerungsdauer

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ziel des Flachprismenverfahrens ist es, als Schnellprüfmethode die Sulfatbeständigkeit von Bindemitteln im Vergleich zu HS-Zementen nach DIN 1146 zu ermitteln. Die Eignung des Verfahrens läßt sich dadurch bewerten, ob Portlandzemente ohne HS-Eigenschaften nach DIN 1146 sicher von solchen mit HS-Qualität differenziert werden können. Eine Bewertung nach dem Grenzwertkriterium von Locher /13/ zeigt sich aber spätestens seit der geänderten Vorschrift zur Normmörtel-Herstellung als nicht trennscharf genug. Die vorliegenden und viele in der Literatur beschriebene Versuche zeigen, daß entweder eine Veränderung des Kriteriums „Dehnung als Funktion der Beaufschlagungsdauer“ oder der Prüfbedingungen erfolgen müßte.

Als Möglichkeiten, ein trennscharfes **Kriterium** zu definieren, stehen zur Verfügung:

■ Verlängerung der Beaufschlagungsdauer

Eine Reihe nicht sulfatbeständiger Zemente entwickeln ihre Hauptdehnung und die damit verbundenen Gefügestörungen zeitlich erst zu Prüfzeitpunkten von 90 oder 180 Tagen, während sulfatbeständige Bindemittel hier oft schon weitgehend stabile Dehnwerte erreichen. Insbesondere bei der vergleichenden Bewertung von puzzolanhaltigen Bindemitteln sind längere Prüfzeiträume notwendig. Auch wenn lange Lagerungszeiten dem Sinn eines Schnellprüfverfahrens entgegenstehen, ist eine Ausdehnung des Beobachtungszeitraumes auf 180 Tage sinnvoll.

■ Veränderte Definition des Grenzwertes

Der aktuelle, bereits niedrige Grenzwert setzt schon heute sehr exaktes Messen voraus. Vergleichsmessungen und Ringversuche zeigen, daß durch geringfügige Ungenauigkeiten (vornehmlich bei der Herstellung der Prüfkörper) bereits große relative Fehler entstehen, die bei weiterer Absenkung des Schwellenwertes leicht zu Fehlinterpretationen führen können.

Setzt man dagegen die Beaufschlagungsdauer auf 180 Tage, muß im Gegenzug eine Erhöhung des Grenzwertes erfolgen. Als Größenordnung für das neue Grenzwertkriterium kann auf Basis der  $\sqrt{t}$ -Gesetzmäßigkeit von Diffusionsvorgängen ein Wert von 0,75 oder 0,80 mm/m nach 180 Tagen extrapoliert werden. Da die Dehnungszunahme der nicht sulfatbeständigen Bindemittel in der Regel progressiv und die der sulfatbeständigen Zemente degressiv verläuft, ist trotz der Erhöhung eine trennscharfe Beurteilung zu erwarten.

Die vorliegende Untersuchung beschäftigte sich weiterhin mit den Möglichkeiten, durch Variation der **Versuchsbedingungen** bessere Differenzierungen zu erreichen. Zur Abgrenzung des „nicht sulfatbeständigen“ CEM I zeigten sich folgende Maßnahmen als geeignet:

■ Erhöhung des Wasserbindemittelwertes

Bekanntermaßen erhöht sich hierdurch die Porosität des Mörtels, sein Diffusionswiderstand nimmt ab. Somit können die eindringenden Sulfationen schneller zu den potentiellen Reaktionsorten ( $C_3A$ ) gelangen. Hierdurch würde letztlich aber nur die deskriptive Abgrenzung sulfatbeständiger Bindemittel anhand ihres  $C_3A$ -Gehaltes und unter Ausschluß von Gefügeeigenschaften nachgefahren. Angesichts der Wasserzementwert-Beschränkung für Betone unter starkem chemischen Angriff (DIN 1045-1) führt eine solche Maßnahme jedenfalls nicht zu praxisnäheren Ergebnissen.

■ Erhöhung des Zuschlaggehaltes

Anders als im System „Beton“ steigert man durch Erhöhung des Zuschlaganteils im Mörtel die Diffusivität überproportional. Dies liegt beim eingesetzten Sand an dem ungünstigen Verhältnis zwischen diffusionsdichtem Volumen und diffusionsrelevanter Kontaktzonenporosität. Der Effekt auf den Sulfatwiderstand ist quasi derselbe wie bei der Erhöhung des Wasserbindemittelwertes und zielt ebenso auf eine isolierte Betrachtung der reinen Bindemittelleigenschaften. Will man im Prüfverfahren jedoch ein realitätsnahes Abbild des Systems „Beton“ erzeugen, ist eine Erhöhung des Zuschlaganteils wenig zielführend.

Die Anwendung einer oder mehrerer der zuvor beschriebenen Maßnahmen führt zu deutlicheren Differenzierungen zwischen sulfatbeständigen und nicht sulfatbeständigen Portlandzementen gemäß DIN 1146. Ziel des Flachprismenverfahrens ist es aber letztlich nicht, Portlandzemente zu bewerten, die ohnehin über die deskriptive Norm beurteilt werden. Das Prüfverfahren soll als Schnelltest alternative Bindemittelsysteme, in Fall dieser Untersuchung Kombinationen aus Portlandzement und Steinkohlenflugasche, im Hinblick auf ihre Sulfatbeständigkeit bewerten. Hierbei ist zu beachten, daß die Ergebnisse des Prüfverfahrens auch die nachfolgend beschriebenen, in der Baupraxis zu beobachtenden Effekte repräsentieren.

Flugaschehaltige Betone haben sich unter Sulfatbelastung als dauerhaft erwiesen. Diese Eigenschaft ist allerdings weniger durch systematische Feldversuche untermauert, sondern eher empirisch ermittelt worden. Unbestritten ist dabei, daß die positive Wirkung der Flugaschen weniger auf ihrer chemisch-mineralogischen Sulfatbindung in unschädlichen Phasen oder auf Verdünnungseffekten beruht, sondern in erster Linie auf der aus der puzzolanischen Reaktion resultierenden Dichtheit des flugaschehaltigen Betons oder Mörtels. Ände-

rungen der Prüfbedingungen, die allein auf die Wirkung der mineralogischen Sulfatbindung und nicht der gefügetechnischen Bindemittleigenschaften zielen, werden puzzolanhaltigen Bindemitteln nicht gerecht.

Wegen des langsameren Ablaufs der puzzolanischen Reaktion wird in der praktischen Anwendung von Steinkohlenflugasche ein Sicherheitsabschlag angesetzt, um die Vorgaben der 28 Tage-Prüfungen für alle Zementarten und Umgebungsbedingungen erreichen zu können. Nach der DAfStb-Richtlinie /27/ darf Flugasche in Beton für Innen- und Außenbauteile nur bis maximal 25 % des Zementgehaltes mit einem Wirksamkeitsfaktor von  $k = 0,4$  auf den Wasserbindemittelwert angerechnet werden. Akzeptiert man die gefügeverdichtende Wirkung von Flugasche als maßgebliche Ursache für die hohe Sulfatbeständigkeit der mit diesem Zusatzstoff hergestellten Bindemittel, erhebt sich auch für die Durchführung des Prüfverfahrens zwangsläufig die Frage nach der Anrechnung der Flugasche. Der heutige Ansatz, für die Flugasche im Prüfverfahren einerseits die volle Wirksamkeit ( $k = 1$ ) anzusetzen, andererseits aber mit der Sulfatbeaufschlagung bereits quasi zum Beginn der puzzolanischen Reaktion nach 14 Tagen Vorlagerung zu beginnen, führt eher zu unrealistischen Ergebnissen. Früherer Prüfungen dokumentieren, daß unter Anwendung der Anrechnungsregularien bei ansonsten identischer Durchführung des Prüfverfahrens der in der Praxis zu beobachtende hohe Sulfatwiderstand von Flugasche haltigen Bindemitteln realistisch abgebildet wird.

Eine Neugestaltung der Prüfvorschrift könnte demnach durch die gleichzeitige Veränderung der folgenden Prüfparameter unter Beibehaltung der sonstigen Vorgaben zu einer verbesserten Bewertung der Sulfatbeständigkeit von flugaschehaltigen und flugaschefreien Bindemittelsystemen führen:

- Heraufsetzen der Beaufschlagungsdauer auf 180 Tage bei gleichzeitiger Anhebung des Dehnungsgrenzwertes auf 0,80 mm/m.
- Anrechnung der Steinkohlenflugasche auf den Wasserbindemittelwert nach den Vorgaben der DAfStb-„Richtlinie zur Verwertung von Flugaschen nach DIN EN 450 im Betonbau“ /27/.
- Genaueste Spezifikation der Herstellbedingungen (vor allem auch Verdichtung), da ansonsten die gewonnene Trennschärfe des Verfahrens durch zu hohe Prüfstreuungen wieder verloren geht.

## 8 LITERATUR

- /1/ Blanks, R. F.: Ten-Year Report on the Long-Time Study of Cement Performance in Concrete. In: Journal of the American Concrete Institute 49 (1953), Nr. 3, S. 601-614
- /2/ Miller, D. G. ; Manson, P. W.: Long-Time Tests of Concretes and Mortars Exposed to Sulfate Waters. Minnesota : University of Minnesota, Agricultural Experimental Station. - In: Technical Bulletin (1951), Nr. 194, S. 5-111
- /3/ Keil, F.: Zwanzig-Jahres-Bericht der Langzeit-Versuche über das Verhalten von Zement im Beton. In: Beton 16 (1966), Nr. 1, S. 27-35, Nr. 2, S. 77-83
- /4/ DIN 1045-1 07.88. Beton und Stahlbeton - Bemessung und Ausführung
- /5/ DIN 1164 12.58. Zement - Zusammensetzung und Anforderungen
- /6/ DIN 1164 06.70. Zement - Zusammensetzung und Anforderungen
- /7/ DIN 1164 1094. Zement - Zusammensetzung und Anforderungen
- /8/ DIN 4030 06.91. Beurteilung betonangreifender Wasser, Böden und Gase - Grundlagen und Grenzwerte
- /9/ Lieber, W. ; Bleher, K.: Die Beurteilung der Sulfatbeständigkeit von Zementen nach konventionellen Schnellmethoden. In: Zement-Kalk-Gips 13 (1960), Nr. 6, S. 310-314
- /10/ Schlutter, W.: Versuchsparameter bei der Prüfung des Sulfatwiderstands von Mörteln und Betonen Aachen : Institut für Bauforschung, 1989. - Studienarbeit
- /11/ Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Ölschieferzement ÖZ 35 L-NW/HS. Berlin : DIBt, 1989
- /12/ Wittekind, W.: Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung. In: Zement-Kalk-Gips 13 (1960), Nr. 12, S. 565-572
- /13/ Locher, F. W.: Zur Frage des Sulfatwiderstandes von Hüttenzementen. In: Zement-Kalk-Gips 19 (1966), Nr. 9, S. 395-401
- /14/ Koch, A. ; Steinegger, H.: Ein Schnellprüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff. In: Zement-Kalk-Gips 13 (1960) Nr. 7, S. 317-324
- /15/ Osborne, G. J.: Determination of the Sulphate Resistance of Blastfurnace Slag Cements Using Small-Scale Accelerated Methods of Test. In: Advances in Cement Research 2 (1989), Nr. 5, S. 21-27
- /16/ Osborne, G. J.: The Sulphate Resistance of Portland and Blastfurnace Slag Cement Concretes. Detroit : American Concrete Institute, ACI Sp-126, 1991. - In: Durability of Concrete Second International Conference Montreal, Canada 1991 (Malhotra, V. M. (Ed.)), Vol II, S. 1047-1071

- /17/ Patzias, T.: Evaluation of Sulphate Resistance of Hydraulic Cement Mortars by the ASTM C1012 Test Method. In: Concrete Durability, Katherin and Bryant Mather International Conference, ACI, SP100, Vol. 2 (1987), S. 2103-2120
- /18/ Smolczyk, H.-G. ; Blunk, G.: Zum Verhalten von sehr jungem Beton gegen Sulfatwässer. In: Beton-Informationen (1972), Nr. 1, S. 1-9
- /19/ Irassar, F. ; Batic, O.: Effects of low Calcium Fly Ash on Sulfate Resistance of OPC Cement. In: Cement and Concrete Research 19 (1989), Nr. 2, S. 194-202
- /20/ ASTM C 989-94 (1994): Standard Specification for Ground Iron Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars. Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1994. - In: Annual Book of ASTM Standards, Volume 04.02, S. 494-498
- /21/ Steinegger, H.: Prüfung und Beurteilung der Sulfatwiderstandsfähigkeit von Zementen. In: Zement-Kalk-Gips 23 (1967), Nr. 2, S. 67-71
- /22/ Silva Filho, L. C. P. ; Agopyan, V.: Effect of Silica Fume on Concretes Against Sulfate Attack. London : E&FN Spon, 1995. - In: Proceedings of the International Conference on Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading, CONSEC'95, Sappora, Japan, 2-4 August 1995, (Sakai, K. ; et al. (Ed.)), Vol. II, S. 1227-1236
- /23/ Schwiete, H.-E. ; Ludwig, U. ; Därr, G.-M.: Effect of Sodium - and Magnesium Sulphate Solution of Ceveral Concentrations and Temperatures on the Durability of Cement Mortar. Prague : Technical University Prague Building Research Institute, 1969. - In: Proceedings of the RILEM-Symposium "Durability of Concrete", Preliminary Report, Part II, S. C413-C431
- /24/ Schießl, P. ; Härdtl, R.: Einfluß von Steinkohlenflugasche (SFA) auf den Sulfatwiderstand von Betonen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1992. – Forschungsbericht Nr. F 262
- /25/ Schießl, P. ; Meng, B. ; Härdtl, R.: Verbesserung des Sulfatwiderstands von Beton durch Steinkohleflugasche. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. - Forschungsbericht Nr. F 1262
- /26/ Lang, E.: Untersuchungen zum Sulfatwiderstand von Zement-Flugasche-Gemischen. In: Report des Forschungsinstituts für Eisenhüttenschlacken 1/1998
- /27/ Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, DAfStb: Richtlinie zur Verwertung von Flugaschen nach DIN EN 450 im Betonbau, September 1996
- /28/ Brameshuber, W. ; Pierkes, R. ; Wiens, U.: Untersuchungen zum Langzeitverhalten von flugaschehaltigen Mörteln in Sulfatlösung. Aachen : Institut für Bauforschung, 1999. - Forschungsbericht Nr. F 729
- /29/ Ludwig, U. ; Schwiete, H. E.: Einfluß der offenen Porosität auf die Beständigkeit von Mörteln und Betonen gegen aggressive Lösungen. In: Zement-Kalk-Gips 20 (1967), Nr. 12, S. 555-561

- /30/ Schwiete, H.-E. ; Ludwig, U. ; Luehr, H.-P.: Resonanzfrequenzmessungen an in Wasser und aggressiven Lösungen gelagerten Mörtelprismen. Der Einfluß der Porosität auf die Aggressivbeständigkeit von Zementmörtelprismen. Opladen : Westdeutscher Verlag. - In: Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen (1967), Nr. 1720
- /31/ Schießl, P. ; Meng, B.: Neuer Ansatz zur Charakterisierung der Porenstruktur zementgebundener Baustoffe im Hinblick auf die Interpretation von Transportvorgängen. Aachen : Institut für Bauforschung, 1995. – Forschungsbericht Nr. F 526
- /32/ Nasser, K. W. ; Lai, P. S. H.: Effect of Sulfates on Concrete Containing Fly Ash. Detroit : American Concrete Institute, ACI Sp-126, 1991. - In: Durability of Concrete Second International Conference Montreal, Canada 1991 (Malhotra, V. M. (Ed.)), Vol III, S. 817-838
- /33/ Riedel, W.: Die Korrosionsbeständigkeit von Zementmörteln in Magnesiumsalzlösungen. In: Zement-Kalk-Gips (1973), Nr. 6, 286-305
- /34/ Venuat, M.: Effets de certains paramètres sur l'essai de durabilité aux eaux sulfatées. Prague : Technical University Prague Building Research Institute, 1969. - In: Proceedings of the RILEM-Symposium "Durability of Concrete", Preliminary Report, Part II, C14-28
- /35/ Nischer, P.: Beton mit hohem Widerstand gegen treibenden Angriff und seine Prüfung. In: Zement und Beton 33 (1988), Nr. 3, S. 159-161
- /36/ Lerch, W.: Significance of Tests for Sulfate Resistance. In: Proceedings American Society for Testing and Materials 61 (1961), S. 1043-1051
- /37/ Mulenga, D. M. ; Nobst, P. ; Stark, J.: Praxisnahes Prüfverfahren zum Sulfatwiderstand von Beton und Mörtel mit und ohne Flugasche. Berlin : Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, 1999. - In: Beiträge zum 37. Forschungskolloquium am 07. und 08. Oktober 1999 an der Bauhaus-Universität Weimar, S. 197-213
- /38/ Piasta, W. G. ; Hebda, L.: Sulphate Expansion and Permeability of Concrete with Limestone Aggregate. In: Magazine of Concrete Research 43 (1991), Nr. 155, S. 81-85
- /39/ Zelic, J. ; Krstulovic, R. ; Tkalcec, E. ; Krolo, P.: Durability of the Hydrated Limestone-Silica Fume Portland Cement Mortars Under Sulphate Attack. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 6, S. 819-826
- /40/ Gerdes, A. ; Wittmann, F. H.: Modell zur Vorhersage der Langzeitbeständigkeit von Beton unter Einwirkung betonangreifender Wässer oder Kohlendioxid. Ehningen : Expert, 1993. - In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Tagungsbericht des dritten Internationalen Kolloquiums, (Wittmann, F. H. ; Bartz, W. J. (Ed.)), Teil 3, S. 1453-1477

- /41/ Halliwell, M. A. ; Crammond, N. J.: Avoiding the Thaumasite Form of Sulfate Attack. Ottawa ; NRC Research Press, 1999. - In: Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the Eight International Conference, Vancouver, May 30 - June 3, 1999, (Lacasse, M. A. ; Vanier, D. J. (Ed.)), Vol 1, S. 139-148
- /42/ Schöner, W. ; Wierig, H. J.: Langzeitversuche an Betonen aus Zuschlägen mit hohem Sulfatgehalt. In: Zement-Kalk-Gips 34 (1989), Nr. 9, S. 476-480
- /43/ Irassar, E. F. ; Sota, J. D. ; Batic, O. R.: Evaluation of Sulfate Resistance of Blended Portland Cements. Lyon : Centre D'actualisation Scientifique Et Technique -CAST-, 1988. - In: Proceedings of the International Conference Measurements and Testing in Civil Engineering,(Jullien, J. F. (Ed.)), Vol. 1, S. 301-310
- /44/ Houst, Y. F. ; Sadouki, H. ; Wittmann, F. H.: Influence of Aggregate Concentration on the Diffusion of CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>. London : E & FN Spon, 1992. - In: Interfaces in Cementitious Composites, Proceedings of the International Conference held by RILEM, Toulouse 1992 (Maso, J. C. (Ed.)), S. 279
- /45/ Osborne, G. J.: The Effectiveness of a Carbonated Outer Layer to Concrete in the Prevention of Sulphate Attack. London : E.& F.N. Spon, 1990. - In: Protection of Concrete, Proceedings of the International Conference, held at the University of Dundee, Scotland, Uk, on 11-13 Sept. 1990, (Dhir, R. K. ; Green, J. W. (Ed.)), S. 75-91
- /46/ Sersale, R. ; Cioffi, R. ; Vito de, B. ; Frigione, G. ; Zenone, F.: Sulphate Attack of Carbonated and Uncarbonated Portland and Blended Cement Mortars. Göteborg : Amarkai AB and Congrex, 1997. - In: Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol 4: Performance and Durability of Cementitious Materials, Göteborg, June 2-6, 1997, (Justnes, H. (Ed.)), S. 4iv017 7 pp
- /47/ El-Sakhawy, N. R. ; El-Dien, H. S. ; Ahmed, M.E. ; Bendary, K. A.: Influence of Curing on Durability Performance of Concrete. In: Magazine of Concrete Research 51 (1999), Nr. 5, S. 309-318
- /48/ Wischers, G. ; Sprung, S.: Verbesserung des Sulfatwiderstands von Betonen durch Zusatz von Steinkohleflugasche. - Sachstandsbericht Mai 1989. In: Beton 40 (1990), Nr. 1, S. 17-21, Nr. 2, S. 62-66
- /49/ Hime, W. G. ; Mather, B.: „Sulphate Attack, or is it?“. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 4, S. 789-791
- /50/ Heinz, D.: mündliche Mitteilung, 1999
- /51/ Ludwig, U. ; Därr, G. M.: Über die Sulfatbeständigkeit von Zementmörtel. Opladen : Westdeutscher Verlag. - In: Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen (1967), Nr. 2636

- /52/ Park, Y. S. ; Suh, J. K. ; Lee, J. H. ; Shin, Y. S.: Strength Detoriation of High Strength Concrete in Sulfate Environment. In: Cement and Concrete Reasearch 29 (1999), Nr, 9, S 1397-1402
- /53/ Bentur, A. ; Goldman, A. ; Ben-Bassat, M.: High Performance Concretes in Concentrated Magnesium Sulfates, Magnesium Chlorides and Sodium Sulfates Solution. London : E & FN Spon, 1995. - In: Proceedings of the International Conference on Concrete Under Severe Conditions Environment and Loading, CONSEC'95, Sapporo, Japan, 2-4 August 1995, (Sakai, K ; et al. (Ed.)), Vol. II, S. 1237-1246
- /54/ Biczok, I.: Betonkorrosion - Betonschutz. 2. Aufl. Wiesbaden : Bauverlag, 1968
- /55/ Peterson, O.: Chemical Effects on Cement Mortar of Calcium Magnesium Acetate as a Deicing Salt. In: Cement and Concrete Research 25 (1995), Nr. 3, S. 617-626
- /56/ Clark, B. A. ; Brown, P. W.: Phases Formed from the Hydration of Tetracalcium Aluminoferrite and Magnesium Sulfate. In: Advances in Cement Research 11 (1999), Nr. 3, S. 133-137
- /57/ Al-Amoudi, O. S. B. ; Rasheeduzzafar, -. ; Maslehuddin, M. ; Abduljauwad, S. N.: Influence of chloride ions on sulphate deterioration in plain and blended cements. In: Magazine of Concrete Research 46 (1994), Nr. 167, S. 113-123
- /58/ Sprung, S.: Beton für Meerwasserentsalzungsanlagen. In: Beton 28 (1978), Nr. 7, S. 241-245
- /59/ Heller, L. ; Ben-Yair, M.: Effects of Sulfate Solutions on Normal and Sulfate Resisting Portland Cement. In: Journal of Applied Chemistry 14 (1964), S. 20-30
- /60/ Aköz, F. ; Türker, F. ; Koral, S. ; Yüzer, N.: Effect of raised Temperature of sulfate solutions on the Sulfate Resistance of Mortars with and without Silica Fume. In: Cement and Concrete Research 29 (1999), Nr. 4, S. 537-544
- /61/ Schießl, P. ; Meng, B.: Grenzen der Anwendbarkeit von Puzzolanen in Beton. Aachen : Institut für Bauforschung, 1996. - Forschungsbericht Nr. F 405
- /62/ Mehta, P. K. ; Gjorv, O. E.: A New Test for Sulfate Resistance of Cements. In: Journal of Testing and Evaluation (1974), Vol. 2, Nr. 6, S. 510-514
- /63/ Wiens, U. ; Vannahme, St. ; Pierkes, R.: Ringversuch zur Prüfung des Sulfatwiderstandes von Zement-Flugasche-Gemischen – Ergebnisfortschreibung. Aachen : Institut für Bauforschung, 1999. - Prüfbericht Nr. M 14
- /64/ DIN EN 450 01.85. Flugasche für Beton - Definition, Anforderungen und Güteüberwachung

Tabelle A1: Chemisch-Mineralogische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe

Bestandteil	Einheit	CEM I 32,5 R	CEM I 32,5 R-HS	Stemkohlen Flugasche
1	2	3	4	5
Glühverlust	M.-%	3,06	2,45	2,92
Kohlenstoff				
- als CO <sub>2</sub>		2,25	2,25	6,20
- als C		0,61	0,61	1,69
SiO <sub>2</sub>		19,08	18,97	49,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4,92	4,03	25,85
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,88	6,10	8,79
CaO		64,00	60,80	4,31
MgO		1,54	2,19	2,05
Na <sub>2</sub> O		0,10	0,02	1,19
K <sub>2</sub> O		0,69	0,53	2,51
SO <sub>3</sub>		2,51	2,51	1,47
TiO <sub>2</sub>		0,20	0,18	1,01
MnO		0,14	0,04	n. b.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,16	0,08	0,76
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,01	0,01	n. b.
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,004	0,008	n. b.
C <sub>3</sub> A <sup>1)</sup>		8,44	0,38	-
C <sub>2</sub> S <sup>1)</sup>		-	3,55	-
C <sub>3</sub> S <sup>1)</sup>		74,78	69,24	-
C <sub>4</sub> AF <sup>1)</sup>	9,04	19,02	-	
CaO <sup>1)</sup>	1,49	-	-	
Unlösliches	n. b.	n. b.	78,33	
Chlorid	n. b.	n. b.	0,010	
Freikalk	n. b.	n. b.	0,57	

1) Klinkerphasen berechnet nach Bogue

2) n. b. = nicht bestimmt

Tabelle A2: Eigenschaften der Zemente

Prüfgröße		Einheit	CEM I 32,5 R	CEM 32,5 R-HS
1	2	3	4	5
Spez. Oberfläche		cm <sup>2</sup> /g	3060	2600
Raumbeständigkeit		mm	1,8 < 4	2,2 < 4
Erstarren	Beginn	h:min	2:30 > 1:00	3:10 > 1:00
	Ende		3:00 < 12:00	3:35 < 12:00
Wasseranspruch		M.-%	26,4	23,7
Ausbreitmaß		mm	191	183
Druckfestigkeit	7 Tage	N/mm <sup>2</sup>	37,4	31,7
	28 Tage		46,8	44,0
Biegezugfestigkeit	7 Tage		6,3	6,2
	28 Tage		6,9	7,5

Tabelle A3: Zeitliche Entwicklung der Sulfatdehnung; VL 14 in Ca(OH)<sub>2</sub>

Zement	VL	SFA <sup>1)</sup>	w/(z+f)	Norm-Sand	Zement/Sand	Dehnungsänderung									
						7	14	28	56	91	182				
						d									
						mm/m									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12				
CEM I 32,5 R <sup>2)</sup>	14	-	0,4	CEN	1:3	0,040	0,067	0,116	0,207	0,373	1,113				
			0,5			0,040	0,060	0,124	0,242	0,389	1,749				
			0,6			0,056	0,089	0,171	0,353	0,687	4,262				
			0,7			0,071	0,122	0,218	0,464	0,982	4,585				
			0,8			0,111	0,200	0,353	0,740	1,478	3,751				
			0,6			DIN 58 <sup>2)</sup>	0,040	0,076	0,164	0,384	0,880	5,478			
	28	20	0,5	CEN	1:2	0,047	0,047	0,071	0,167	0,376	1,909				
	91					0,024	0,060	0,111	0,262	0,640	4,198				
	14					0,6	DIN 58 <sup>2)</sup>	1:3	0,049	0,076	0,124	0,242	0,382	1,111	
									1:4	0,056	0,104	0,222	0,656	1,713	14,809
	28					40	0,5	CEN	1:3	0,044	0,064	0,111	0,189	0,233	0,342
	91									0,064	0,118	0,198	0,364	0,471	0,636
	14	0,040	0,064	0,120	0,182					0,231	0,327				
												-0,001	0,027	0,024	0,076
	28	1:2	0,060	0,093	0,158					0,251	0,318	0,456			
	91	1:4	0,047	0,107	0,153					0,269	0,360	0,498			
	CEM I 32,5 R-HS	14	-	0,4	CEN	1:3	0,062	0,109	0,231	0,378	0,429	0,524			
				0,5			0,047	0,069	0,104	0,171	0,282	0,491			
0,6				0,044			0,084	0,109	0,187	0,273	0,438				
0,7				0,084			0,124	0,167	0,256	0,342	0,467				
0,8				0,104			0,151	0,196	0,271	0,356	0,476				
0,6				0,111			0,151	0,176	0,267	0,351	0,484				
28		20	0,6	DIN 58 <sup>2)</sup>	1:3	0,051	0,113	0,156	0,287	0,380	0,509				
91						0,044	0,067	0,113	0,176	0,258	0,407				
14						0,033	0,069	0,113	0,187	0,271	0,389				
												1:2	0,047	0,084	0,149
14						1:4	0,031	0,062	0,087	0,207	0,267	0,400			

1) Flugasche gemäß DIN EN 450 (Trockenfeuerungsasche)

2) C<sub>3</sub>A-Gehalt rd. 8 M.-%

Tabelle A4.1: Zeitliche Entwicklung der Resonanzfrequenzen; Hauptlagerung in Ca(OH)<sub>2</sub>-Lösung (gesättigt)

Zement	SFA <sup>1)</sup>	w/(z+f)	Zement/ Sand	Resonanzfrequenz								
				7	14	28	44	56 d	140	173	222	252
-	M.-%	-	g	%								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
CEM I 32,5 R <sup>2)</sup>	-	0,5	1:3	12647	12668	12733	12811	12818	13136	13109	13163	13166
		0,6		12183	12227	12313	12366	12419	12523	12503	12555	12535
	20	0,5	1:4	12436	12459	12573	12647	12658	13096	13064	13129	13125
			1:3	12413	12467	12566	12709	12761	13027	13010	13095	13124
			1:4	12397	12457	12562	12679	12757	12865	12813	12930	12945
			1:3	11864	12099	12186	12299	12413	12831	12795	12914	12950
40	-	0,6	1:3	12320	12386	12514	12614	12644	13045	13000	13051	13094
-			0,6	11836	11945	12089	12207	12269	12444	12404	12505	12514
			0,5	1:4	12511	12548	12693	12742	12791	12911	12881	12967

1) eine Flugasche gemäß DIN EN 450 (Trockenfeuerungsflugasche)

2) C<sub>3</sub>A-Gehalt rd. 8 M.-%

Tabelle A4.2: Zeitliche Entwicklung der Resonanzfrequenzen; Hauptlagerung in Natriumsulfat-Lösung (4,4 M.-%)

Zement	SFA <sup>1)</sup>	w/(z+f)	Zement/ Sand	Resonanzfrequenz									
				7	14	28	44	56 d	140	173	222	252	
-	M.-%	-	g	%									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
CEM I 32,5 R <sup>2)</sup>	-	0,5	1:3	12710	12750	12837	12882	12924	12979	12677	11975	11455	
		0,6		12121	12202	12324	12380	12421	11146	10172	11383	10817	
	20	0,5	1:4	12477	12511	12626	12647	12679	Proben zerstört				
			1:3	12468	12567	12703	12826	12888	13298	13272	13337	13348	
			1:4	12491	12598	12745	12867	12973	13030	13021	11905	13130	
			1:3	12013	12246	12457	12607	12742	13125	13107	13154	13158	
40	-	0,6	1:3	12369	12445	12568	12641	12669	13104	13061	13150	13163	
-			0,6	12014	12158	12321	12395	12456	12407	12355	12428	12455	
			0,5	1:4	12512	12622	12726	12835	12839	12964	12954	12997	13005

1) eine Flugasche gemäß DIN EN 450 (Trockenfeuerungsflugasche)

2) C<sub>3</sub>A-Gehalt rd. 8 M.-%