

**Verbesserung des Prüfverfahrens zum
Nachweis des hohen Sulfatwiderstandes
von Zement/Flugasche-Gemischen**

T 2966

T 2966

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

2001, ISBN 3-8167-5989-0

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

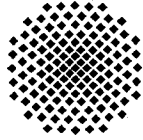
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

e-mail info@irb.fhg.de

URL <http://www.IRBbuch.de>



Forschungsvorhaben

Az.: IV 12-5-7.184.2-901/99

Verbesserung des Prüfverfahrens zum Nachweis des hohen Sulfatwiderstandes von Zement/Flugasche-Gemischen

Abschlußbericht

11-847022/Sche

Leiter:	Technischer Direktor Dipl.-Ing. K. Zeus
Sachbearbeiter:	Dipl.-Min. Dr. H. Schellhorn
Auftraggeber:	Deutsches Institut für Bautechnik Kolonnenstraße 30 L 10829 Berlin

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzfassung	1
2.	Abstract.....	2
3.	Einleitung	3
4.	Versuchsprogramm.....	4
5.	Diskussion der Ergebnisse	6
5.1	Einfluss des C ₃ A-Gehalts bei Variation der Prüfmörtels.....	6
5.2	Einfluss der Flugasche (SFA) bei Variation der Prüfmörtels	7
6.	Schlussfolgerungen.....	9
7.	Literatur.....	11
8.	Beilagen	Beilagen 1-8

1. Kurzfassung

Als Schnellprüfverfahren zum Nachweis des hohen Sulfatwiderstandes (HS) von hydraulischen Bindemitteln und Zement/Flugasche-Gemischen wird in Deutschland seit vielen Jahren das Flachprismenverfahren eingesetzt.

Seit der Veröffentlichung, vor rund 40 Jahren, wurden wesentliche Veränderungen am ursprünglichen Verfahren durchgeführt, die vornehmlich den Wasser/Bindemittel-Wert, den Normsand und die Dauer der Sulfatlagerung betrafen. In seiner jetzigen Form wird das Flachprismenverfahren in Prüfplänen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) bei Zulassungsprüfungen zur Prüfung der HS-Eigenschaften angewandt.

Der Sachverständigenausschuss „Betontechnologie“ (SVA-A) des DIBt empfahl, das Flachprismenverfahren hinsichtlich seiner Aussagekraft zu überprüfen.

Das Forschungsvorhaben soll zu Klärung der Frage beitragen, ob das Flachprismenverfahren in der bisherigen oder in modifizierter Form zur Beurteilung des Sulfatwiderstandes hydraulischer Bindemittel bzw. Zement/Flugasche-Gemischen geeignet ist.

Zu diesem Zweck wurden 5 Portlandzemente hinsichtlich des Einflusses ihres Gehalts an C_3A (0 M.-%, 4 M.-%, 8 M.-%, 11 M.-%, 12 M.-%) auf den Sulfatwiderstand geprüft. Hierzu wurden Flachprismen aus Mörteln der ursprünglichen Vorschrift (Normsand nach DIN 1164:1958-12, $w/z=0,60$) und des jetzigen Verfahrens (CEN-Normsand nach DIN EN 196-1:1990-3, $w/z=0,50$) bezüglich ihres Dehnungsverhaltens bei Sulfatlagerung bis zum Alter von 182 Tagen untersucht.

Außerdem wurde an den 4 C_3A -haltigen Zementen der Einfluss von Flugaschen aus 2 verschiedenen Werken auf den Sulfatwiderstand geprüft. Hierzu wurden jeweils 20% bzw. 40% des Zements gegen Flugasche ausgetauscht und Mörtel nach der Originalvorschrift und nach dem jetzigen Verfahren hergestellt. Auch diese Flachprismen wurden bis zum Alter von 182 d auf ihre Sulfatdehnung geprüft.

2. Abstract

The method of testing flat prisms is used for many years in Germany as accelerated test method to evaluate high sulfate resistance (HS) of hydraulic binders and cement/fly ash-mixtures.

Since it's publication, about 40 years ago, the method was subject to considerable amendments, concerning principally water/binder-ratio, standard sand and duration of sulfate attack. In its current version the method of testing flat prisms is used to evaluate HS-properties of new binder systems for approvals issued by the Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt). The expert group „concrete technology“ of the DIBt (SVA-A) recommended to examine the efficiency of this test method.

The aim of this research project is to determine, if the method of testing flat prisms in its original version or in its current version is more suitable to assess the HS-properties of binder systems.

The sulfate resistance of 5 Portland cements was tested with regard to their content of C_3A (0 wt.-%, 4 wt.-%, 8 wt.-%, 11 wt.-%, 12 wt.-%). For this purpose flat prisms were produced from mortar using standard sand DIN 1164:1958-12 and $w/c=0,60$ (original mortar) and from mortar using CEN standard sand DIN EN 196-1:1990-3 and $w/c=0,50$ (current mortar). These prisms were tested concerning sulfate attack by measuring their expansion during 182 days.

In addition the 4 Portland cements containing C_3A were used to test the influence of fly ashes from 2 manufacturers on sulfate resistance. 20 wt.-% and 40 wt.-% respectively of the cement were substituted by fly ash and original mortar prisms as well as current mortar prisms were produced. These prisms were also tested concerning sulfate attack by measuring their expansion during 182 days.

3. Einleitung

Bei Anwendung von Beton in sulfathaltigen Wässern oder Böden wird Beton mit hohem Sulfatwiderstand benötigt. Beton mit hohem Sulfatwiderstand ergibt sich durch eine Betonzusammensetzung mit niedrigem Wasserzementwert ($w/z \leq 0,50$) und durch die Verwendung eines Zements mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement gemäß DIN 1164:2000-11 [1]). Zur Festlegung der HS-Eigenschaften von Zement wurden langjährige Einlagerungsversuche von Beton in sulfathaltigen Wässern durchgeführt, andererseits wurden Kurzprüfverfahren (Schnellprüfverfahren) entwickelt. Hierbei sind vor allem das Kleinprismenverfahren nach KOCH UND STEINEGGER [2] und das Flachprismenverfahren nach WITTEKINDT [3] zu nennen.

Beide Verfahren bildeten die Grundlage für Prüfvorschriften, die das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) zur Prüfung der HS-Eigenschaften hydraulischer Bindemittel einsetzte ([4],[5]). Als Grenzwertkriterium für die Sulfatbeständigkeit gilt hierbei 70% relative Biegezugfestigkeit nach 56 d Sulfatlagerung beim Kleinprismenverfahren bzw. ein Dehnungsmaß von $\leq 0,50$ mm/m nach 91 d Sulfatlagerung beim Flachprismenverfahren.

Aufgrund der bei den Zulassungsprüfungen ermittelten Ergebnisse wurden vom DIBt bauaufsichtliche Zulassungen für die HS-Eigenschaften erteilt.

Das Kleinprismenverfahren hat sich allerdings als sehr empfindlich gegenüber Fehlern bei der Herstellung der Probekörper (Abmessungen 10 mm x 10 mm x 60 mm) und deren Prüfung erwiesen.

Deshalb wurde begonnen, die HS-Eigenschaften von Zement/Flugasche-Mischungen allein mit dem Flachprismenverfahren zu untersuchen. Hierfür wurde eine Prüfvorschrift vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DafStb) [6] vorgeschlagen. Als Grenzwertkriterium gilt hier ebenfalls ein Dehnungsmaß von $\leq 0,50$ mm/m nach 91 d Sulfatlagerung bei Austausch von 20% bzw. 40% Zement gegen Flugasche.

Allerdings wurde festgestellt, dass auch dieses Prüfverfahren an verschiedenen Prüfstellen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führten, was unter anderem durch einen Ringversuch nachgewiesen wurde (WIENS ET. AL [7]).

Beide Schnellprüfverfahren nach [2] und [3] wurden ursprünglich an Normmörtel gemäß DIN 1164:1958-12 [8] mit einem Wasserzementwert von 0,60 und Normsand der

Körnung I (fein) und der Körnung II (grob) hergestellt („DIN-Normmörtel“). Hierbei werden die Sande im Verhältnis fein:grob = 1:2 zugegeben. Das Mischungsverhältnis Zement zu Sand beträgt 1:3.

Mit Einführung der DIN 1164-7:1970-06 [9] wurde die Zusammensetzung des Normmörtels geändert. Der Wasserzementwert wurde auf 0,50 gesenkt und ein DIN-Normsand mit stetiger Sieblinie verwendet, der seit Einführung der DIN EN 196-1:1990-03 [10] als CEN-Normsand¹⁾ bezeichnet wird. Das Mischungsverhältnis Zement zu Sand wurde weiterhin bei 1:3 belassen („CEN-Normmörtel“). Dieser CEN-Normmörtel wurde nun auch für die Schnellprüfverfahren und somit auch für die bauaufsichtlichen Zulassungsprüfungen eingesetzt.

Da nach Auffassung des Sachverständigenausschusses „Betontechnologie“ (SVA A) berechnete Zweifel bestehen, ob die HS-Prüfungen mit beiden Normmörteln vergleichbare Ergebnisse erzielen, soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens geklärt werden, ob das **Flachprismenverfahren** in seiner jetzigen oder in modifizierter Form bei der Beurteilung des Sulfatwiderstandes von Zement/Flugasche-Gemischen oder neu entwickelter Bindemittel geeignet ist.

4. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm sollte den Einfluss folgender Prüfparameter klären:

1. C₃A-Gehalt der Zemente
2. Art des Normmörtels
 - a) DIN-Normmörtel (w/z=0,60, DIN-Normsand fein : DIN-Normsand grob = 1:2)
 - b) CEN-Normmörtel (w/z=0,50, CEN-Normsand mit stetiger Sieblinie)
3. Gehalt der Flugasche

Zur Klärung des Einflusses des C₃A-Gehalts auf den Sulfatwiderstand von Zementen wurden 5 Portlandzemente DIN 1164 ausgewählt bzw. hergestellt. Ein HS-Zement mit 0% C₃A (Zement A), ein Zement mit etwa 8 % C₃A (Zement C) sowie 2 Zemente mit

¹⁾ CEN-Normsand unterscheidet sich von Normsand nach DIN 1164-7: 1970-6 nur durch die Anforderung für den Rückstand auf dem Sieb der Maschenweite 1,60 mm (DIN-Normsand: 9±5 M.-%, CEN-Normsand: 7±5 M.-%)

jeweils etwa 11 bzw. 12% C_3A (Zement D und E). Durch Mischen der Zemente A und C im Verhältnis 1:1 wurde schließlich ein Zement mit $C_3A \approx 4$ % (Zement B) hergestellt:

- A CEM I 32,5 R-HS mit $C_3A = 0$ %
- B CEM I 32,5 R mit $C_3A \approx 4$ %
- C CEM I 32,5 R mit $C_3A \approx 8$ %
- D CEM I 32,5 R mit $C_3A \approx 11$ %
- E CEM I 42,5 R mit $C_3A \approx 12$ %

Die chemische Analyse der Zemente (A, C, D und E) einschließlich des nach Bogue berechneten C_3A -Gehalts zeigt Tabelle 1, Beilage 1.

Mit diesen Zementen wurden jeweils CEN- und DIN-Normmörtel hergestellt und mit dem Flachprismenverfahren geprüft.

Um den Einfluss von Flugasche (Flugasche für Beton nach DIN EN 450) zu untersuchen, wurden Flugaschen aus 2 verschiedenen Werken (SFA 1, SFA 2) verwendet. Beide stammen aus Trockenfeuerung. Die chemische Analyse, sowie Feinheitsparameter und Kornrohdichte zeigt Tabelle 2, Beilage 2.

Mit einigen der o.g. Zemente (B-E) wurden sowohl CEN- als auch DIN-Normmörtel hergestellt wobei 20% bzw. 40% des Zements gegen Flugasche ausgetauscht wurde.

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit wurden die Nullmischungen der Zemente D und E jeweils wiederholt.

In Tabelle 3, Beilage 3, ist das Versuchsprogramm zusammengefasst.

Hierbei ist anzumerken, dass Vergleichsversuche an den Mörteln mit Zement A und den Mörteln mit Zement C und SFA 1 parallel zu den Versuchen am Otto-Graf-Institut auch im Rahmen eines Forschungsvorhaben am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) durchgeführt wurden, um Informationen über die Streuung der Prüfergebnisse zwischen den Prüfstellen zu erhalten. Zement A, Zement C und SFA 1 wurden dem Otto-Graf-Institut vom ibac zugeschickt.

An den in Tabelle 3, Beilage 3, gelisteten Mischungen wurden Flachprismen der Abmessungen 10 mm x 40 mm x 160 mm in Anlehnung an DIN EN 196-1 mit Meßzapfen hergestellt und mit dem Vibrationstisch nach DIN EN 196-1 (Nationaler Anhang) verdichtet. Sie verblieben danach 2 d in den Formen im Klima 20 °C /95 % r.F. Nach dem Entformen lagerten die Prüfkörper 12 d in gesättigter $Ca(OH)_2$ -Lösung bei

20 °C hochkant auf Rosten stehend (**Vorlagerung**). Im Alter von 14 d wurde eine Serie von 3 Flachprismen in 4,4%ige Na₂SO₄-Lösung bei 20 °C hochkant auf Rosten stehend gelagert (**Sulfatlagerung**). Die 2. Serie von 3 Flachprismen verblieb weiter in gesättigter Ca(OH)₂-Lösung bei 20 °C (**Vergleichslagerung**).

Die Dehnungsmessungen, sowie die Wägungen erfolgten im Alter von 0, 7, 14, 28, 56, 91 und 182 d der Sulfatlagerung mit dem Meßgerät B nach DIN 52450:1985-08 [11].

Die Ergebnisse sind in Tabelle 4, Beilage 4, zusammengefasst.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Einfluss des C₃A-Gehalts bei Variation der Prüfmörtels

Bild 1, Beilage 5, stellt den Verlauf der Sulfatdehnung der verschiedenen Portlandzementmörtel, hergestellt mit CEN-Normsand und w/z=0,50 (CEN-Mörtel), graphisch dar. Bei den Zementen D und E sind die Mittelwerte der zweimal durchgeführte Prüfung eingezeichnet. Wie ersichtlich ist, haben die Zemente mit 0% C₃A bzw. 4 % C₃A das HS-Kriterium des DIBt erfüllt ($\leq 0,50$ mm/m nach 91 d), es wird sogar nach 182 d noch eingehalten. Dies trifft für die anderen Zemente nicht zu. Während die Zemente mit 8% C₃A bzw. 11 % C₃A nach 91 d knapp über dem Grenzwert liegen und nach 182 d etwa 1,5 mm/m erreichen, hat der Zement mit 12% C₃A nach 91 d bereits 1 mm/m erreicht. Nach 182 d waren diese Flachprismen zerfallen.

Stellt man den Dehnungsverlauf für die Flachprismen aus DIN-Mörtel im gleichen Maßstab dar, Bild 2, Beilage 5, so fällt auf, dass hier die Unterschiede im C₃A-Gehalt bereits nach 56 d deutlich werden.

Der HS-Zement liegt mit 0,25 mm/m deutlich unter dem von LOCHER [12] festgelegten Grenzwertkriterium von 0,5 mm/m für dieses Prüfalter.

Die Zemente mit 4 bzw. 8% C₃A erfüllen diese Anforderungen gerade noch, während die Zemente mit höheren C₃A-Gehalten den Grenzwert bei weitem überschreiten. Nach 91 bzw. 182 d erfüllt der HS-Zement immer noch das Kriterium, während der Zement

mit 4% C_3A nach 91 bereits über dem Grenzwert und nach 182 d über 1 mm/m liegt. Der Zement mit 8% C_3A erreicht 1 mm/m bereits nach 91 d und die Dehnung seiner Mörtelprismen liegt nach 182 d mit 6,74 mm/m bereits außerhalb des dargestellten Bereichs. Dies trifft für die Zemente mit $C_3A > 10\%$ bereits nach 91 d zu. Nach 182 d sind ihre Flachprismen zerfallen.

Insgesamt zeigt sich das Verfahren mit dem DIN-Mörtel prägnanter und differenzierter als das mit dem CEN-Mörtel, wobei schon nach 56 d eine Aussage zum Sulfatwiderstand möglich wäre.

5.2 Einfluss der Flugasche (SFA) bei Variation der Prüfmörtels

Bild 3, Beilage 6, stellt den Verlauf der Sulfatdehnung für die Mörtelmischungen mit dem Zement B (4% C_3A) ohne und mit SFA 1 dar. Dabei wird deutlich, dass bei dem geringen C_3A -Gehalt des Zements der Ersatz von Zement durch Flugasche der Sulfatwiderstand des CEN-Mörtels nur geringfügig verbessert wird. Der Zement erfüllt auch bei der Nullmischung bereits die Kriterien des DIBt.

Anders beim DIN-Mörtel. Hier steigt die Sulfatdehnung bei der Nullmischung linear mit der Hauptlagerungsdauer an. Der Austausch von 20% Zement durch Flugasche führt zu einer deutlichen Abschwächung des Quellens, allerdings auch linear ansteigend.

Obwohl der Austausch von 40% Zement durch Flugasche zunächst zu einer absolut höheren Dehnung führt, zeigt der Verlauf der Kurve ein Abflachen im höheren Alter.

In Bild 4 ist der Verlauf der Sulfatdehnung für die Mörtelmischungen des Zements C (8% C_3A) ohne und mit SFA 1 dargestellt.

Der Effekt des Austausches von Zement gegen Flugasche deutet sich beim CEN-Mörtel bereits nach 91 Tagen an, wird aber erst in höherem Alter deutlich sichtbar. Die Dehnung nach 182 Tagen wird durch Austausch von 20% bzw. 40% Zement gegen Flugasche auf rund ein Drittel gegenüber der Nullmischung reduziert.

Beim DIN-Mörtel wird das Kriterium nach Locher [12] im Prüfalter von 56 d noch erfüllt, steigt dann aber über 1 mm im Alter von 90 d auf 6,74 mm nach 182 d an.

Durch den Austausch von 20% Zement gegen Flugasche wird der Grenzwert auch noch nach 91 d Sulfatlagerung erfüllt und überschreitet ihn erst nach etwa 120 d.

Für den Austausch von 40% Zement durch Flugasche zeigt sich ein ähnlicher Verlauf wie beim Mörtel aus Zement B, zunächst relativ starkes Quellen, in höherem Alter Abflachen der Kurve.

Der Effekt des Austausches von Zement gegen Flugasche ist beim DIN-Mörtel ausgeprägter als beim CEN-Mörtel. Die Dehnung nach 182 Tagen wird durch Austausch von 20% bzw. 40% Zement durch Flugasche auf rund 10-15% der Nullmischung herabgesetzt.

Bild 5, Beilage 7, zeigt, dass der CEN-Mörtel aus Portlandzement D mit etwa 11% C₃A im Alter von 91 d die Kriterien des DIBt nicht erfüllt und linear weiter bis auf über 1mm/m nach 182 d ansteigt, was vermuten lässt, dass die Prismen in noch höherem Alter zerfallen. Durch den Zusatz von Flugasche wird das Kriterium nach 91 d erfüllt und steigt auch danach nicht mehr signifikant an.

Beim DIN-Mörtel wird das Kriterium nach 56 d bereits nicht mehr erfüllt und das Dehnungsmaß steigt bei 91 d auf etwa 5 mm/m an. Nach 182 d waren die Prismen zerfallen.

Der Austausch von Zement gegen Flugasche bewirkt ein deutlich reduziertes Ansteigen des Dehnungsmaßes ab 56 d. Es beträgt nach 91 d mit etwa 1,5 mm/m nur 30% der Nullmischung. Der Ersatz von 20% Zement bewirkt, dass das Quellen nach 182 d 2,20 mm/m nicht überschreitet.

Beim Ersatz von 40% Zement, flacht die Kurve nach zunächst starkem Anstieg, in höherem Alter erheblich ab. Das Dehnungsmaß beträgt auch nach 182 d nur 1,5 mm/m.

Aus Bild 6, Beilage 7, wird ersichtlich, dass der höhere C₃A-Gehalt des Portlandzements E (etwa 12%) erwartungsgemäß zu noch stärkerem Quellen führt.

Das Dehnungsmaß der Nullmischung des CEN-Mörtels hat nach 91 d bereits nahezu 1 mm/m erreicht. Nach 182 d sind die Flachprismen zerfallen.

Der Ersatz von Zement durch Flugasche bewirkt jedoch auch hier ab 91 d eine deutliche Steigerung des Sulfatwiderstands. Sowohl bei 20% als auch bei 40% Ersatz

wird ein Dehnungsmaß von 1 mm/m nach 182 d nicht überschritten, wobei der Austausch von 40% wieder ein deutliches Abflachen der Kurve bewirkt.

Das Dehnungsverhalten der DIN-Mörtelprismen macht bereits nach 56 d deutlich, dass das Grenzwertkriterium nicht eingehalten wird. Die Nullmischung und der Mörtel mit 40% Ersatz von Zement durch Flugasche zeigen ein Dehnungsmaß von etwa 2 mm/m, während die Flachprismen mit 20% Flugasche bereits 3,1 mm/m erreicht haben. Nach 91 bzw. 182 d liegen die Prüfergebnisse dieser Mischung mit 3,10 bzw. 4,94 mm/m bereits außerhalb des dargestellten Bereichs.

Die Nullmischung hat nach 91 d bereits 9 mm/m erreicht und ist nach 182 d zerfallen.

Auch hier zeigt der Mörtel mit 40% Ersatz die beste Sulfatbeständigkeit im höheren Alter mit asymptotischem Abflachen der Kurve.

Wie bereits erwähnt wurde der Einfluss der Flugasche auf die Sulfatdehnung der Mörtel aus den Zementen mit $C_3A > 10\%$ (Zement D und E) noch mit einer zweiten Flugasche nach DIN EN 450, ebenfalls aus Trockenfeuerung, geprüft.

Der Verlauf der Sulfatdehnungen des Zements D mit SFA 2 ist in Bild 7, Beilage 8, dargestellt. Wie ersichtlich ist, entspricht der Verlauf im wesentlichen dem Verlauf der mit SFA 1 festgestellt wurde.

Wie aus Bild 7, Beilage 9, deutlich wird, gilt dies in analoger Weise auch für den Zement E und die Flugasche SFA 2.

6 Schlussfolgerungen

Aufgrund der Untersuchungen wurde belegt, dass der Sulfatwiderstand eines Portlandzements mit dem C_3A -Gehalt abnimmt. Dieser Effekt zeigt sich beim Verfahren nach WITTEKINDT [3] deutlicher und früher als beim DIBT-VERFAHREN [4][5], was auf den höheren w/z-Wert des Mörtels beim ersten Verfahren zurückzuführen ist.

Deshalb scheint es einerseits angebracht dieses Verfahren anzuwenden, um relativ kurzfristig Prüfergebnisse zu erhalten. Andererseits erscheint ein w/z=0,60 im Zusammenhang von sulfatbeständigem Beton nicht praxismäßig, da hier üblicherweise Wasserzementwerte $< 0,50$ angesetzt werden.

Der Ersatz von Zement durch Flugasche erhöht den Sulfatwiderstand der Mörtel beträchtlich. Insbesondere bei den Zementen mit höherem C_3A -Gehalt (ab etwa 8 %) konnte durch Austausch von 20% und in noch größerem Umfang bei Austausch von 40% das Dehnungsmaß beträchtlich verkleinert werden. Nach Einsetzen der puzzolanischen Reaktion, ab etwa 90 d nähert sich das Dehnungsmaß bis zu 180 d asymptotisch einem Grenzwert. Dieses Verhalten wird auch von BRAMESHUBER ET AL. [13] berichtet.

Anfänglich, d.h. in den ersten Tagen und Wochen nach der 14tägigen Vorlagerung steigt das Dehnungsmaß der Zement/Flugasche-Gemische stärker an als die Nullmischung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Flugasche, beim Austausch 1:1 (Wirksamkeitsfaktor $k=1$) anfangs nur wie feinkörniger Zuschlag wirkt und somit zunächst nicht zur Festigkeitsentwicklung beiträgt.

In der Praxis allerdings wird gemäß der derzeit gültigen Richtlinie des DAFSTB [14] die Flugasche mit 40% auf den Wasserbindemittelwert ($k=0,4$) angerechnet, wobei maximal 25% Zement ausgetauscht werden dürfen. Führt man die Prüfungen an Mörteln durch, die unter dieser Prämisse hergestellt wurden, so führt dies aufgrund der höheren Dichtigkeit des Gefüges zu einer weiteren Abnahme des Dehnungsmaßes wie Versuche beim VDZ/FIZ [15] gezeigt haben.

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse und der Literaturlauswertung wird vorgeschlagen, das Verfahren zum Nachweis des hohen Sulfatwiderstands von Zement/Flugasche-Gemischen folgendermaßen zu ändern:

- 1 Verlängerung der Sulfatlagerung auf 182 d
- 2a) Anhebung des Grenzwertkriteriums auf $\leq 0,70$ mm/m unter Weiterverwendung der Mörtelmischung gemäß Richtlinienentwurf des DAFSTB [6]
- oder
- 2b) Beibehaltung des Grenzwertkriteriums von $\leq 0,50$ mm/m unter Verwendung eines Mörtels gemäß Richtlinie des DAFSTB [14]

7. Literatur

- [1] DIN 1164:2000-11: Zement mit besonderen Eigenschaften – Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis

- [2] KOCH, A. UND STEINEGGER, H.: Ein Schnellprüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff.- Zement-Kalk-Gips 13 (1960), Nr. 7, S. 314-324

- [3] WITTEKINDT, W.: Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung.- Zement-Kalk-Gips 13 (1960), Nr. 12, S. 565-572

- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (DIBT): Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Ölschieferzement ÖZ 35 L-NW/HS – Fassung April 1989-

- [5] DEUTSCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK (DIBT): Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Trasshochofenzement TrHOZ 35 L-NW/HS – Fassung November 1989-

- [6] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB): DafStb-Richtlinie Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau, Entwurf: Dezember 1995

- [7] WIENS, U., VANNAHME, ST. UND PIRKES, R.: Ringversuch zur Prüfung des Sulfatwiderstandes von Zement-Flugasche-Gemischen – Ergebnisfortschreibung. Aachen: Institut für Bauforschung (1999) - Prüfbericht Nr. M 14

- [8] DIN 1164:1958-12 [7]: Portlandzement, Eisenportlandzement, Hochofenzement

- [9] DIN 1164-7:1970-6 : Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement – Bestimmung der Festigkeit
- [10] DIN EN 196-1:1990-3: Prüfverfahren für Zement- Bestimmung der Festigkeit
- [11] DIN 52450:1985-08: Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern
- [12] LOCHER, F.W.: Zur Frage des Sulfatwiderstandes von Hüttenzementen - Zement-Kalk-Gips 19 (1966), Nr. 9, S. 395-401
- [13] BRAMESHUBER, W., PIERKES, R. & WIENS, U.: Untersuchungen zum Langzeitverhalten von flugaschehaltigen Mörteln in Sulfatlösung. Aachen: Institut für Bauforschung (1999) – Forschungsbericht Nr. F 729.
- [14] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB): DafStb-Richtlinie Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau, September 1996
- [15] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E.V. / FORSCHUNGSINSTITUT DER ZEMENTINDUSTRIE: Sulfatwiderstand. In: Tätigkeitsbericht 1999-2001 (2001), S. 62-64

Tabelle 1: Chemische Analyse der Zemente

Angaben in M.-% bezogen auf die Substanz im Anlieferungszustand

Zement	CEM I 32,5 R-HS A	CEM I 32,5 R C	CEM I 32,5 R D	CEM I 42,5 R E
Bestandteil				
SiO ₂	19,0	19,1	20,0	19,8
TiO ₂	0,2	0,2	0,3	0,3
Al ₂ O ₃	4,0	5,1	5,8	5,7
Fe ₂ O ₃	6,4	3,0	2,4	2,0
CaO	61,5	64,3	63,6	63,0
MgO	2,3	1,5	1,3	2,9
Na ₂ O	<0,1	0,1	0,1	0,1
K ₂ O	0,8	1,1	0,9	0,8
SO ₃	2,5	2,4	2,7	3,2
FeO	n.g. ^a	n.g. ^a	0,04	0,03
Glühverlust	2,5	3,1	2,2	1,9
CO ₂	1,8	2,3	1,4	0,9
C ₃ A ^b	0	8,4	11,3	11,7
^a n.g.: nicht geprüft ^b Berechnet nach BOGUE				

Tabelle 2: Chemische Analyse, Feinheit und Kornrohdichten der Flugaschen
Angaben bezogen auf die bei 105 °C getrocknete Substanz

Flugasche	Einheit	SFA 1	SFA 2
Bestandteil			
SiO ₂	M.-%	47,8	51,7
TiO ₂	M.-%	1,4	1,0
Al ₂ O ₃	M.-%	33,6	23,2
Fe ₂ O ₃	M.-%	6,6	7,5
CaO	M.-%	2,3	4,9
MgO	M.-%	1,1	2,4
Na ₂ O	M.-%	0,3	0,6
K ₂ O	M.-%	2,4	1,9
SO ₃	M.-%	0,9	0,7
Glühverlust	M.-%	5,9	3,3
CaO _{frei}	M.-%	0,4	0,7
Chlorid	M.-%	<0,01	0,01
Unlösliches	M.-%	82,2	77,8
Feinheit ^a	M.-%	24,3	12,2
Kornrohdichte	kg/m ³	2230	2390

^a Rückstand auf dem Sieb 45 µm bei Naßsiebung

Tabelle 3: Schematische Darstellung des Versuchsprogramms

Portlandzement CEM I	SFA 1 Austausch in M.-%			SFA 2 Austausch in M.-%			Mörtel	
	0	20	40	0	20	40	CEN	DIN
A: C ₃ A ≈ 0 M.-%	+	-	-	-	-	-	+	+
B: C ₃ A ≈ 4 M.-%	+	+	+	-	-	-	+	+
C: C ₃ A ≈ 8 M.-%	+	+	+	-	-	-	+	+
D: C ₃ A ≈ 11 M.-%	+	+	+	+ ^a	+	+	+	+
E: C ₃ A ≈ 12 M.-%	+	+	+	+ ^a	+	+	+	+
^a Wiederholungsprüfung								

Tabelle 4: Zeitliche Entwicklung der Dehnungsdifferenzen

Portlandzement CEM I	Flugasche		Mörtel ^a	Dehnungsdifferenz in mm/m nach					
	SFA 1	SFA 2		7	14	28	56	91	182
	in M.-%			d Hauptlagerung ^b					
A C ₃ A 0 M.-%			CEN	0,05	0,06	0,12	0,20	0,27	0,37
			DIN	0,04	0,12	0,16	0,25	0,33	0,46
B^c C ₃ A 4,2 M.-%	0		CEN	0,01	0,11	0,16	0,20	0,26	0,39
			DIN	0,01	0,20	0,26	0,43	0,64	1,24
	20		CEN	0,00	0,13	0,16	0,21	0,22	0,25
			DIN	0,07	0,25	0,33	0,47	0,58	0,80
	40		CEN	0,05	0,18	0,25	0,30	0,30	0,31
			DIN	0,12	0,30	0,51	0,74	0,89	1,13
C C ₃ A 8,4 M.-%	0		CEN	0,14	0,19	0,21	0,35	0,57	1,73
			DIN	0,11	0,15	0,26	0,48	1,00	6,74
	20		CEN	0,12	0,16	0,18	0,30	0,34	0,44
			DIN	0,14	0,18	0,30	0,34	0,45	0,69
	40		CEN	0,16	0,22	0,29	0,39	0,45	0,55
			DIN	0,19	0,28	0,49	0,68	0,81	0,96
D C ₃ A 11,3 M.-%	0		CEN	0,06	0,12	0,22	0,34	0,54	1,13
			DIN	0,11	0,23	0,54	1,45	4,98	zerf.
	20		CEN	0,10	0,14	0,19	0,30	0,34	0,38
			DIN	0,16	0,33	0,78	1,27	1,64	2,20
	40		CEN	0,12	0,20	0,28	0,35	0,40	0,43
			DIN	0,24	0,57	1,01	1,27	1,39	1,53
	0		CEN	0,06	0,11	0,20	0,37	0,61	1,43
			DIN	0,11	0,22	0,53	1,52	5,34	zerf.
	20		CEN	0,07	0,12	0,20	0,31	0,37	0,48
			DIN	0,15	0,30	0,65	1,07	1,38	1,99
	40		CEN	0,14	0,22	0,34	0,44	0,48	0,51
			DIN	0,28	0,55	0,92	1,14	1,28	1,36
E C ₃ A 11,7 M.-%	0		CEN	0,05	0,06	0,15	0,36	0,94	zerf.
			DIN	0,08	0,14	0,39	1,88	9,11	zerf.
	20		CEN	0,06	0,07	0,18	0,37	0,54	1,00
			DIN	0,08	0,22	0,84	3,10	4,94	6,57
	40		CEN	0,11	0,17	0,40	0,60	0,74	0,87
			DIN	0,14	0,51	1,38	2,01	2,19	2,27
	0		CEN	0,06	0,08	0,18	0,36	1,08	zerf.
			DIN	0,08	0,18	0,41	2,14	21,60	zerf.
	20		CEN	0,07	0,13	0,25	0,44	0,67	1,29
			DIN	0,12	0,28	0,87	3,06	4,88	6,82
	40		CEN	0,11	0,19	0,45	0,69	0,86	1,06
			DIN	0,19	0,60	1,44	2,04	2,26	2,36

^a CEN: Mörtel mit CEN-Normsand, w/z=0,50

DIN: Mörtel mit DIN-Normsand, 12.58, w/z=0,60

^b Vorlagerung : 2 d in der Form, 12 d in ges. Ca(OH)₂-Lösung

^c Hergestellt durch Mischen von Zement A und Zement B im Verhältnis 1:1

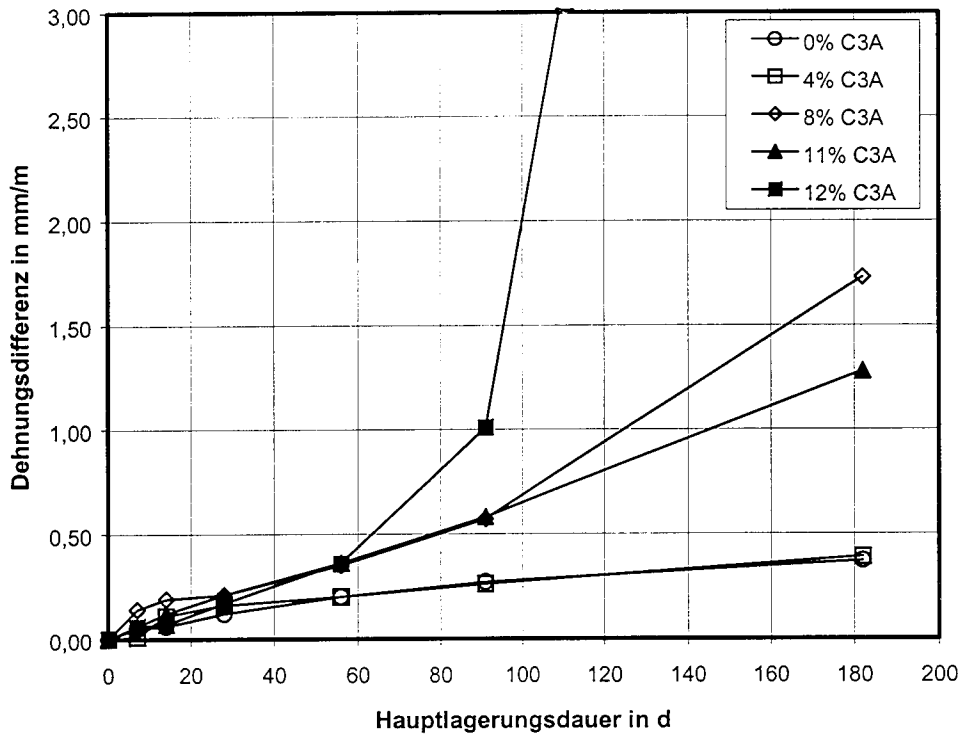


Bild 1 – Sulfatdehnungen der CEN-Mörtelmischungen

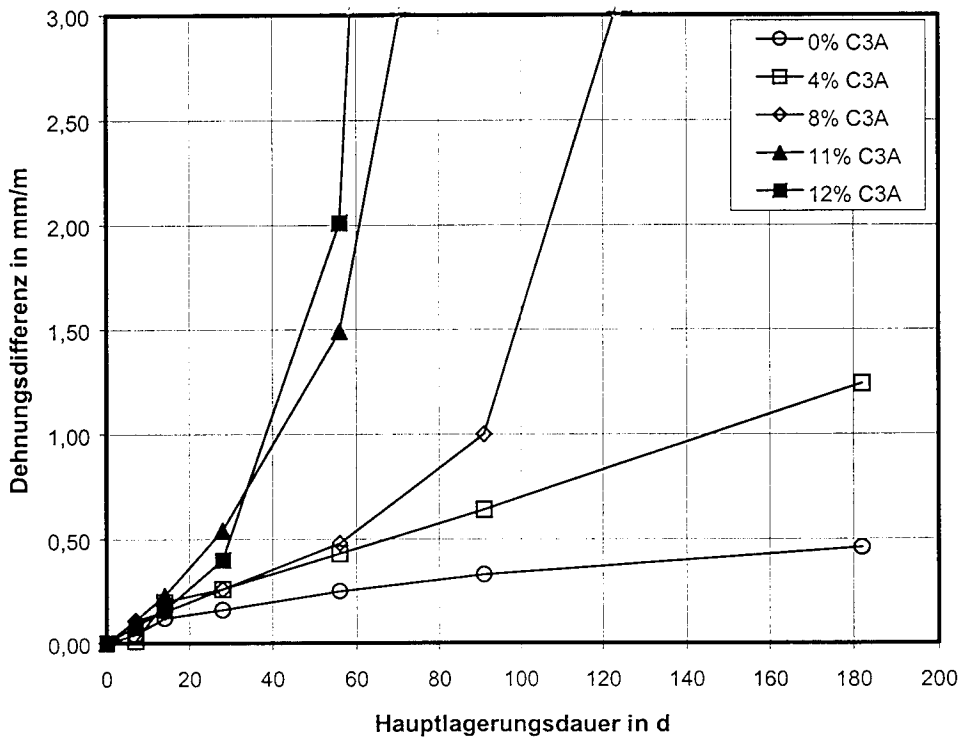


Bild 2 – Sulfatdehnungen der DIN-Mörtelmischungen

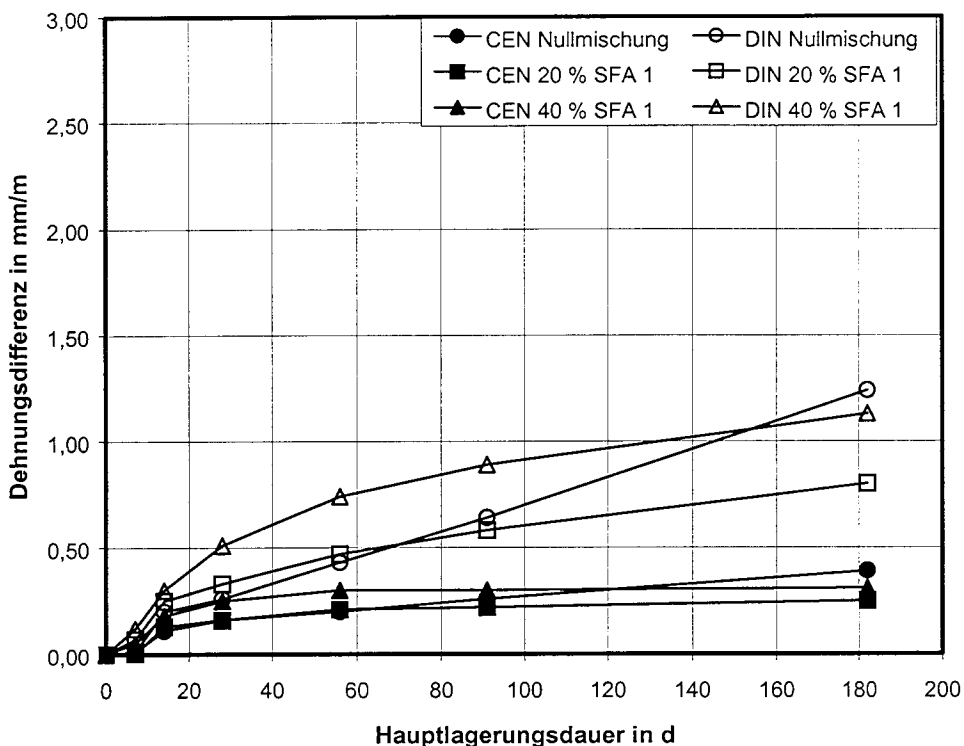


Bild 3 – Sulfatdehnungen der Mörtelmischungen des Zements B (4% C₃A) mit SFA 1

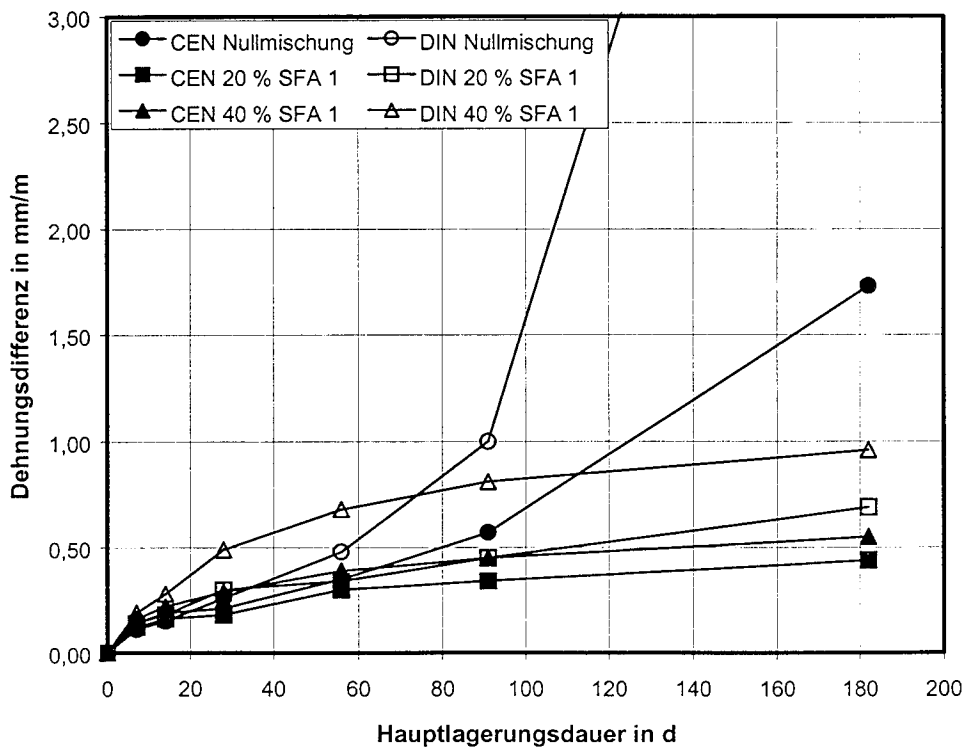


Bild 4 – Sulfatdehnungen der Mörtelmischungen des Zements C (8% C₃A) mit SFA 1

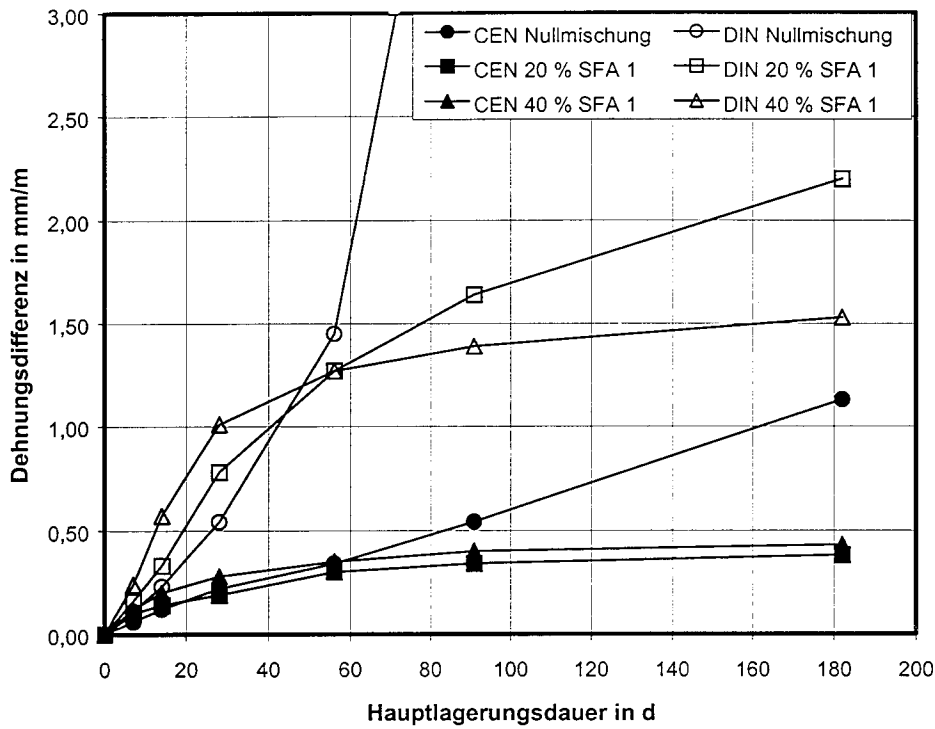


Bild 5 – Sulfatdehnungen der Mörtelmischungen des Zements D (11% C₃A) mit SFA 1

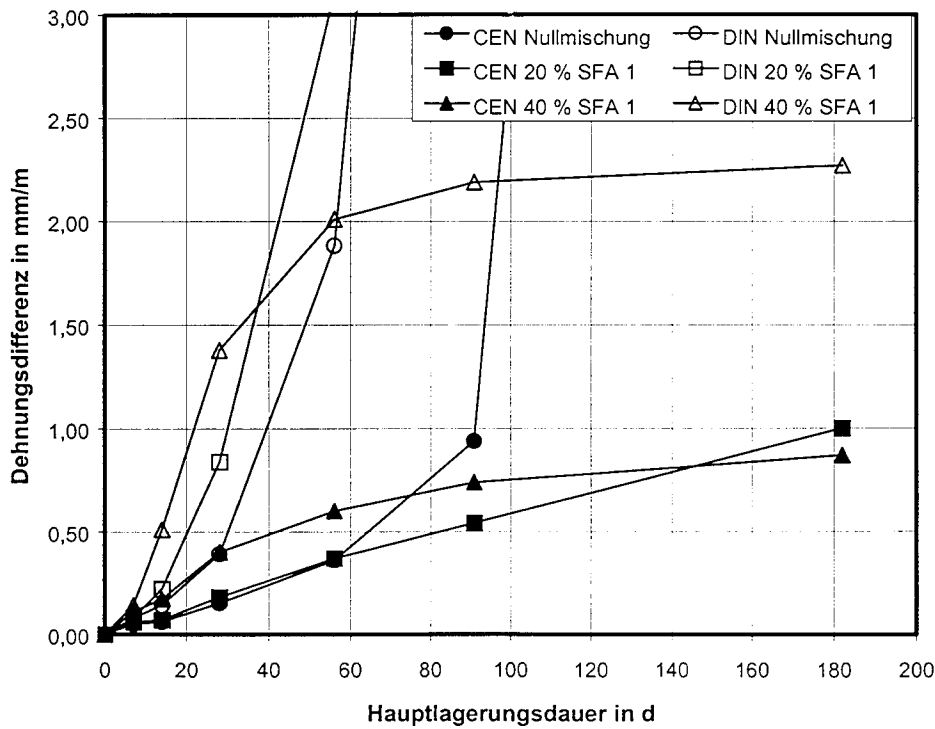


Bild 6 – Sulfatdehnungen der Mörtelmischungen des Zements E (12% C₃A) mit SFA 1

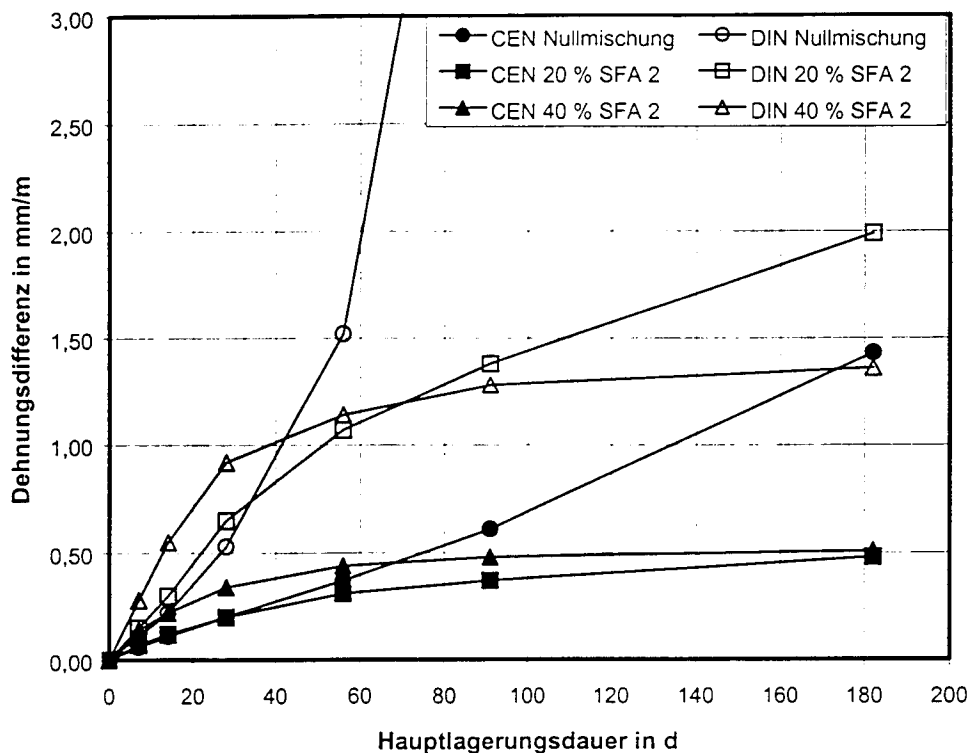


Bild 7 – Sulfatdehnungen der Mörtelmischungen des Zements D (11% C₃A) mit SFA 2

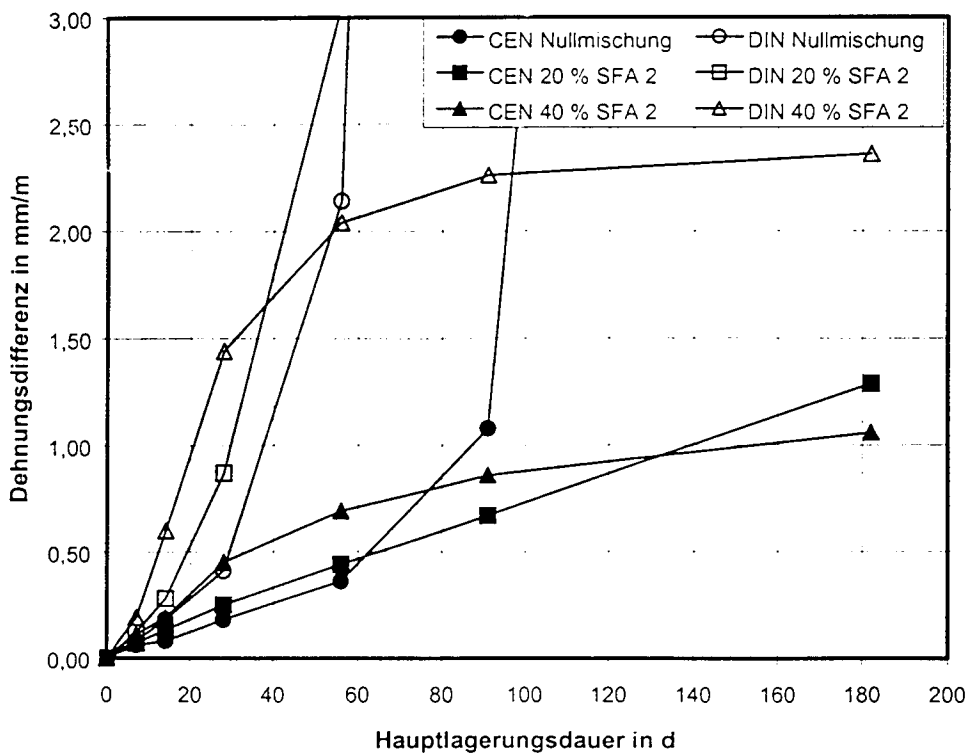


Bild 8 – Sulfatdehnungen der Mörtelmischungen des Zements E (12% C₃A) mit SFA 2