

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 18024 N
Bewilligungszeitraum: 01.01.2014 – 30.06.2016

Forschungsthema:

Beurteilung des SVA-Flachprismenverfahrens zur Bestimmung des Sulfatwiderstands von Zementen und Ableitung eines modifizierten, praxisgerechten Prüfverfahrens

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Für Betonbauwerke bedeuten sulfathaltige Wässer und Böden einen Angriff auf die Dauerhaftigkeit, den sogenannten Sulfatangriff. Besitzt der Beton oder Mörtel keinen ausreichenden Widerstand gegenüber den angreifenden Sulfationen, sind Schädigungen die Folge. Durch Reaktionen von Sulfationen mit den unhydratisierten Klinkerphasen und den Hydratationsprodukten des Zements können neue Phasen gebildet werden, die entweder zu einer Entfestigung des Gefüges oder einer Gefügeänderung durch Treiben führen. Um dies zu vermeiden, enthalten die Regelwerke in Deutschland Festlegungen zur Herstellung und zum Einsatz von Beton mit hohem Sulfatwiderstand. Das in der Anwendungsnorm für Beton, der DIN EN 206-1/ DIN 1045-2, verankerte Sicherheitskonzept schreibt für die Expositionsklassen XA2, d.h. bei einem mäßigen Angriff, und für XA3, d.h. einem starken Angriff, sowohl die Verwendung von Zement mit hohem Sulfatwiderstand als auch die Herstellung von physikalisch dichtem Beton durch eine entsprechende Reduzierung des Wasserzementwertes vor.

Zemente mit hohem Sulfatwiderstand, sogenannte SR-Zemente, sind nach der in Deutschland, bzw. Europa gültigen DIN EN 197-1:2011 bestimmte Portland-, Hochofen- und Puzzolanzemente:

- CEM I-SR 0 Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand (C_3A -Gehalt des Klinkers = 0 %)
- CEM I-SR 3 Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand (C_3A -Gehalt des Klinkers \leq 3 %)
- CEM I-SR 5 Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand (C_3A -Gehalt des Klinkers \leq 5 %)
- CEM III/B-SR Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand (keine Anforderung an den C_3A -Gehalt des Klinkers)
- CEM III/C-SR Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand (keine Anforderung an den C_3A -Gehalt des Klinkers)
- CEM IV/A-SR Puzzolanzement mit hohem Sulfatwiderstand (C_3A -Gehalt des Klinkers \leq 9 %)
- CEM IV/B-SR Puzzolanzement mit hohem Sulfatwiderstand (C_3A -Gehalt des Klinkers \leq 9 %)

Nach der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 sind in Deutschland jedoch nur vier der sieben SR-Zemente, nämlich CEM I-SR 0, CEM I-SR 3, CEM III/B-SR und CEM III/C-SR, zur Herstellung von Beton für den Einsatz unter XA2 und XA3 vorgesehen. Neben den genormten SR-Zementen kann nach Betonnorm zur Betonherstellung auch ein Gemisch aus Zement und Steinkohlenflugasche als Bindemittel eingesetzt werden, wenn die Sulfatkonzentration im angreifenden Wasser auf 1500 mg/l beschränkt ist. Die Steinkohlenflugasche ist hierbei aber nicht Bestandteil des Zements, sondern ein Betonzusatzstoff. Je nach Zement muss der

Steinkohlenflugascheanteil im Gemisch mindestens 20 bzw. 30 M.-% betragen. Die Steinkohlenflugasche muss die Anforderungen der DIN EN 450 erfüllen.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit einen anderen Normalzement bei Sulfatangriff gemäß XA2 und XA3 einzusetzen, wenn für diesen eine bauaufsichtliche Zulassung als SR-Zement durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) vorliegt. Um eine entsprechende Zulassung zu erhalten, muss der Zement geprüft werden und verschiedene Anforderungen erfüllen. Über die Zulassung entscheidet nach Vorlage des Prüfberichts das DIBt in Abstimmung mit dem Sachverständigenausschuss (SVA).

Die eigentliche Prüfung des Sulfatwiderstands erfolgt an Flachprismen aus Mörtel nach DIN EN 196-1. Daher wird die derzeit im Rahmen bauaufsichtlicher Zulassungen angewandte Methode als SVA-Flachprismenverfahren bezeichnet. Gleichzeitig mit dem zu prüfenden Zement sind zwei Referenzzemente, ein CEM I-SR und ein CEM III/B-SR der gleichen Festigkeitsklasse, mit zu prüfen. Zur Beurteilung der Widerstandsfähigkeit gegenüber Sulfatlagerung sind die Länge der Flachprismen und der dynamische Elastizitätsmodul der Flachprismen ohne Messzapfen nach einer Lagerungsdauer von 0, 14, 28, 56, 90 und 180 Tagen zu messen. Zu jedem Messtermin ist die Masse der Prüfkörper zu bestimmen und eine visuelle Begutachtung vorzunehmen. Dabei sind Rissbildungen, Verformungen und andere sichtbare Schäden aufzuzeichnen. Die Lagerung der Prüfkörper erfolgt sowohl in Natriumsulfatlösung (Prüflösung) als auch in gesättigter Calciumhydroxidlösung (Vergleichslösung/ Referenzlösung). Außerdem sind die Lagerungen sowohl bei 20 °C als auch bei 5 °C durchzuführen. Das wesentliche Prüfkriterium ist die relative Längenänderung der Flachprismen. Nach 90 Tagen sollte diese nicht mehr als 0,50 mm/m und nach 180 Tagen nicht mehr als 0,80 mm/m betragen. Bei den Referenzzementen wird davon ausgegangen, dass diese die Grenzwerte selbstverständlich einhalten.

Während der letzten Jahre hat sich jedoch wiederholt gezeigt, dass auch die Dehnungen von CEM I-SR-Zementen die Grenzwerte des Prüfkriteriums für die Längenänderung überschreiten können. Auch CEM III/B-SR Referenzzemente zeigten bei Prüfungen gemäß SVA-Verfahren verschiedentlich ein unerwartetes Verhalten, indem es zu einer signifikanten Abnahme des dynamischen Elastizitätsmoduls kam. Im Allgemeinen wird aus so einem Verhalten auf eine innere Schädigung der Prüfkörper geschlossen. Vor dem Hintergrund dieser Beobachtungen stellte sich den Unternehmen der Zementindustrie die Frage, wie aussagefähig die Messergebnisse des SVA-Verfahrens sind und was dies für die Beurteilung von Prüfergebnissen aus SR-Zulassungsprüfungen bedeutet. Sowohl CEM I-SR als auch CEM III/B-SR Zemente sind langjährig in der Praxis bewährte Zemente für Beton mit hohem Sulfatwiderstand. Das dieser Sachverhalt in einer nicht unwesentlichen Anzahl von Fällen im Labor durch das SVA-Verfahren nicht wiedergespiegelt wird, verdeutlicht, dass das Verfahren in Bezug auf die Beurteilung der Betoneigenschaften in der Praxis einige Schwächen aufweist.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

Im Forschungsvorhaben sollte herausgefunden werden, warum einige CEM I-SR und CEM III/B-SR-Zemente beim SVA-Flachprismenverfahren nicht unter allen Prüfbedingungen die Kriterien für einen hohen Sulfatwiderstand erfüllen. Auch sollte geprüft werden, ob sich dieses Verhalten ebenfalls bei praxisgerechteren Prüfbedingungen zeigt.

Ein weiteres Ziel war es, das Prüfverfahren so zu modifizieren, dass sich für genormte Zemente mit bekanntermaßen hohem und niedrigem Sulfatwiderstand eindeutige Prüfergebnisse erzielen lassen. In einem weiteren Schritt sollte dieses modifizierte Verfahren genutzt werden, in einer ersten Versuchsreihe auch den Sulfatwiderstand von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen zu prüfen.

Im Versuchsprogramm wurden zehn CEM I-SR-Zemente aus deutscher Produktion berücksichtigt und damit nahezu alle in Deutschland verfügbaren Portlandzemente mit hohem Sulfatwiderstand. Dazu kamen fünf CEM III/B-SR Zemente und fünf CEM I-Zemente ohne SR-Eigenschaft. Diese wurden zu Beginn umfangreich chemisch, mineralogisch und physikalisch charakterisiert. Zuerst wurde der Sulfatwiderstand der Zemente nach dem bisherigen SVA-Verfahren bestimmt. Hierzu wurden für die Längenänderungsmessungen Mörtelflachprismen mit Messzapfen und für die Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls Mörtelflachprismen ohne Messzapfen hergestellt. Parallel zu den SVA-Mörtelprüfkörpern wurden zusätzlich Zementsteinprüfkörper hergestellt und wie die Mörtelprüfkörper in Sulfat- und Referenzlösung gelagert. Prüfkörper, die ein untypisches und somit auffälliges Verhalten in der SVA-Prüfung zeigten wurden näher untersucht. Hierzu wurden die Mörtelgefüge rasterelektronenmikroskopisch begutachtet und die Zementsteingefüge mittels quantitativer Röntgendiffraktometrie mineralogisch analysiert. Sulfatwiderstandsprüfungen unter praxisnahen Prüfbedingungen, gemäß dem alternativen SVA-Prüfverfahren wurden ebenfalls mit allen zwanzig Zementen durchgeführt. Hierzu wurden Mörtelnormprismen bei 3.000 mg Sulfat über einen deutlich längeren Zeitraum (2 Jahre) gelagert. Parallel hierzu wurden Zemente mehreren modifizierten Prüfverfahrensvarianten (A bis E) unterzogen, um eine am besten geeignete Variante herauszuarbeiten. Als am günstigsten erwies sich die Variante E, bei der Mörtelzylinder, mit einem w/z-Wert von 0,60 hergestellt, 1d in Form bei 20 °C und 9d bei 40 °C vorgelagert und über 180 Tage in Sulfatlösung (2.125 mg CaSO₄, 1.035 mg Na₂SO₄, 1.000 mg MgSO₄ pro Liter) geprüft wurden. Mit dieser Variante des modifizierten Prüfverfahrens wurden zum Ende des Vorhabens auch Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen, insbesondere puzzolan- und hüttensandhaltige Zemente hinsichtlich ihres Sulfatwiderstands geprüft.

3 Ergebnisse

3.1 SVA-Verfahren

Die in dem Forschungsvorhaben durchgeführten Untersuchungen haben bestätigt, dass das Auftreten von relativ hohen Längenänderungen bei CEM I-SR-Zementen im SVA-Prüfverfahren nicht ungewöhnlich ist. Von den insgesamt 20 geprüften Zementen, fünf CEM III/B-SR, zehn CEM I-SR und fünf CEM I, wiesen nur acht Zemente ein erwartetes Dehnungsverhalten auf, also relative Längenänderungen unterhalb der Prüfkriterien bei den SR-Zementen und oberhalb der Prüfkriterien bei den gewöhnlichen CEM I. Bei zwei CEM I-SR-Zementen entsprach das Dehnungsverhalten nach allen drei Prüfkriterien nicht den Erwartungen. Bei den anderen zehn Zementen konnte anhand der relativen Längenänderungen nicht eindeutig abgeleitet werden, ob es sich um einen SR-Zement handelte oder um keinen, da die Prüfkriterien nur teilweise erfüllt wurden.

In **Tabelle 1** sind die relativen Längenänderungen der Zemente zum Prüfzeitpunkt angegeben. Dabei bedeutet ein grün unterlegtes Feld, dass die ermittelte relative Längenänderung

erwartungsgemäß ausgefallen war (höher als das Prüfkriterium bei Nicht-SR-Zementen und kleiner als das Prüfkriterium bei SR-Zementen). Ein rot unterlegtes Feld bedeutet das Gegenteil.

Tabelle 1 Relative Längenänderungen der Zemente Z1 bis Z20 beim SVA-Verfahren, Prüfkriterien: 0,50 mm/m nach 91 Tagen für beide Temperaturen und 0,80 mm/m nach 182 Tagen zusätzlich für 20 °C; rot unterlegtes Feld bedeutet, unerwartetes Dehnungsverhalten, grün unterlegtes Feld bedeutet, erwartetes Dehnungsverhalten

Zement	T	91 d	182 d
Z1 - CEM I 52,5 N-SR3/NA	5°C	0,78	
Z1 - CEM I 52,5 N-SR3/NA	20°C	0,48	0,73
Z2 - CEM I 42,5 R	5°C	1,54	
Z2 - CEM I 42,5 R	20°C	1,01	4,01
Z3 - CEM I 42,5 R-HS	5°C	0,33	
Z3 - CEM I 42,5 R-HS	20°C	0,73	1,06
Z4 - CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA	5°C	0,28	
Z4 - CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA	20°C	0,17	0,19
Z5 - CEM I 42,5R-SR 3/NA	5°C	0,31	
Z5 - CEM I 42,5R-SR 3/NA	20°C	0,38	0,64
Z6 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	5°C	0,15	
Z6 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	20°C	0,16	0,19
Z7 - CEM I 52,5 N-SR 3	5°C	0,16	
Z7 - CEM I 52,5 N-SR 4	20°C	0,33	1,02
Z8 - CEM I 52,5 R (C3S > 70%)	5°C	0,15	
Z8 - CEM I 52,5 R (C3S > 70%)	20°C	0,32	0,8
Z9 - CEM I 42,5 R (C3S < 60 %)	5°C	0,27	
Z9 - CEM I 42,5 R (C3S < 60 %)	20°C	0,36	0,55
Z10 - CEM I 42,5 R-HS/NA	5°C	0,75	
Z10 - CEM I 42,5 R-HS/NA	20°C	0,58	1,35
Z11 - CEM I 42,5 R	5°C	1,9	
Z11 - CEM I 42,5 R	20°C	0,79	3,89
Z12 - CEM I 52,5 N-NA	5°C	0,3	
Z12 - CEM I 52,5 N-NA	20°C	0,4	1,38
Z13 - CEM I 52,5 R-SR3/NA	5°C	0,3	
Z13 - CEM I 52,5 R-SR3/NA	20°C	0,44	1,57
Z14 - CEM I 52,5 R-SR3/NA	5°C	0,28	
Z14 - CEM I 52,5 R-SR3/NA	20°C	0,29	0,9
Z15 - CEM I 32,5 N-LH/SR 3	5°C	1,44	
Z15 - CEM I 32,5 N-LH/SR 4	20°C	0,6	1,11
Z16 - CEM I 42,5 R-SR 3	5°C	0,81	
Z16 - CEM I 42,5 R-SR 4	20°C	0,41	0,78
Z17 - CEM I 42,5 R-SR 3	5°C	0,35	
Z17 - CEM I 42,5 R-SR 4	20°C	0,19	0,34
Z18 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	5°C	0,14	
Z18 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	20°C	0,05	0,08
Z19 - CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA	5°C	0,09	
Z19 - CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA	20°C	0,15	0,12
Z20 - CEM III/B 42,5 N LH/HS/NA	5°C	0,52	
Z20 - CEM III/B 42,5 N LH/HS/NA	20°C	0,16	0,27

Zwischen den relativen Längenänderungen und den relativen dynamischen E-Modulwerten ergab sich keine gute Korrelation (**Bild 1**). Zwar waren höhere Dehnungen mit einem Abfall des E-Moduls verbunden, allerdings konnte gerade für den Bereich kleinerer Dehnungen, im Bereich der Prüfkriterien, kein korrelativer Zusammenhang abgeleitet werden.

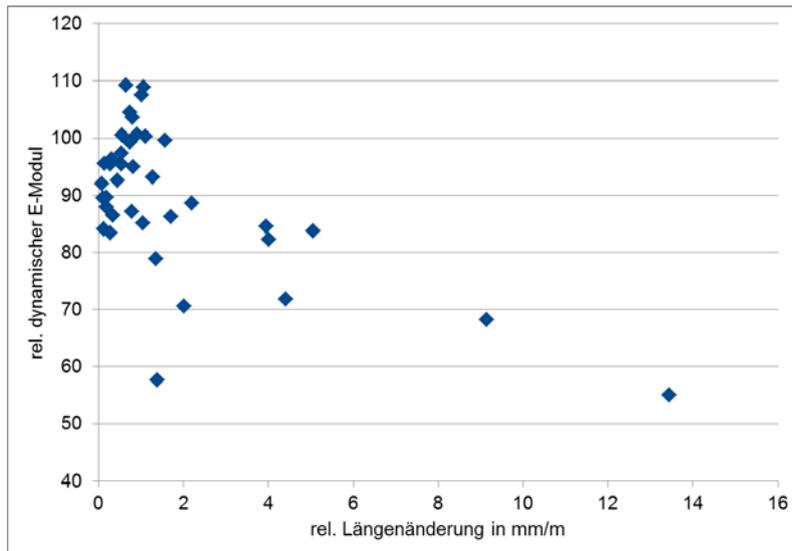


Bild 1 Zusammenhang zwischen rel. Längenänderung und rel. dynamischen E-Modul

Die rasterelektronenmikroskopischen Gefügeuntersuchungen in Kombination mit den röntgendiffraktometrischen Phasenuntersuchungen ergaben, dass bei den stark gedehnten Prüfkörpern sekundärer Gips, vielfach auch in Form von Gipsbändern, gebildet wurde. Jedoch konnte keine Korrelation zwischen den röntgenographisch bestimmten Gips- und Alit- oder C_3A -Gehalten der Zemente abgeleitet werden. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in der Probenauswahl. Für ein unterschiedliches Dehnungsverhalten, insbesondere im Bereich um die Prüfkriterien von 0,5 bzw. 0,8 mm/m, sind wahrscheinlich Unterschiede in der oberflächennahen Sekundärphasenbildung ausreichend. Für die röntgenographische Phasenanalyse wurden jedoch jeweils Teile des Mörtelprüfkörpers im gesamten Querschnitt aufbereitet und analysiert. Darüber hinaus war von vornherein bei der Quantifizierung von einem nicht unwesentlichen relativen Fehler auszugehen. Beides zusammen führte vermutlich zu den wenig aussagefähigen Ergebnissen der Phasenquantifizierung. Möglicherweise wäre es zielführender gewesen, nur die oberflächennahe Zone der Mörtelprüfkörper für die Phasenanalyse aufzubereiten.

Eine nennenswerte Menge an Thaumasit wurde nur bei einer Probe festgestellt. Erwartungsgemäß wurden die Prüfkörper dieser Probe bei 5 °C gelagert und waren zum Prüfzeitpunkt deutlich geschädigt. Der Ausgangszement dieser Probe wies mit rd. 11 M.-% den höchsten C_3A -Gehalt auf. Erfahrungsgemäß war der hierbei gebildete Thaumasit aber kein direktes Reaktionsprodukt durch das angreifende Sulfat, sondern erst über die Zwischenstufe sekundärer Ettringit gebildet worden.

3.2 Alternatives SVA-Verfahren

Für das alternative SVA-Verfahren, bei dem eine praxisrelevantere Sulfatkonzentration von 3 g/l zum Einsatz kam, lagen zu Beginn des Forschungsprojekts keinerlei Erfahrungen vor. Alle 20 Zemente wurden über einen Zeitraum von 728 Tagen gelagert und in regelmäßigen Abständen von drei Monaten geprüft.

Die beste Differenzierung zwischen Zementen mit und ohne SR-Eigenschaft ergab sich für ein Prüfkriterium von 0,60 mm/m nach 364 Tagen Lagerung (**Tabelle 2**). Danach kam es nur

bei drei Zementen und jeweils einer Prüfbedingung zu nicht adäquaten Längenänderungen. Bei 5 °C- und bei 20 °C-Lagerung zeigte jeweils ein CEM I-SR eine zu hohe Dehnung. Bei 20°C Lagerung zeigte zudem ein CEM I eine zu geringe Dehnung. Auch hier bedeutet ein grün unterlegtes Feld, dass die ermittelte relative Längenänderung erwartungsgemäß ausgefallen war (höher als das Prüfkriterium bei Nicht-SR-Zementen und kleiner als das Prüfkriterium bei SR-Zementen) und ein rot unterlegtes Feld, den umgekehrten Fall.

Tabelle 2 Relative Längenänderung der Prüfkörper nach 364 Tagen Lagerung bei 5°C (grau) und 20°C (weiß) gemäß alternativem SVA-Verfahren; Prüfkriterium 0,60 mm/m

Zement	364d	
Z1 - CEM I 52,5 N-SR3/NA	0,73	
Z1 - CEM I 52,5 N-SR3/NA	0,47	
Z2 - CEM I 42,5 R	1,24	
Z2 - CEM I 42,5 R	1,3	
Z3 - CEM I 42,5 R-HS	0,5	
Z3 - CEM I 42,5 R-HS	0,46	
Z4 - CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA	0,14	
Z4 - CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA	0,15	
Z5 - CEM I 42,5R-SR 3/NA	0,45	
Z5 - CEM I 42,5R-SR 3/NA	0,23	
Z6 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	0,08	
Z6 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	0,14	
Z7 - CEM I 52,5 N-SR 3	0,44	
Z7 - CEM I 52,5 N-SR 4	0,18	
Z8 - CEM I 52,5 R (C3S > 70%)	0,71	
Z8 - CEM I 52,5 R (C3S > 70%)	1,25	
Z9 - CEM I 42,5 R (C3S < 60 %)	0,69	
Z9 - CEM I 42,5 R (C3S < 60 %)	0,17	
Z10 - CEM I 42,5 R-HS/NA	0,38	
Z10 - CEM I 42,5 R-HS/NA	0,22	
Z11 - CEM I 42,5 R	defekt	
Z11 - CEM I 42,5 R	1,57	
Z12 - CEM I 52,5 N-NA	defekt	
Z12 - CEM I 52,5 N-NA	0,98	
Z13 - CEM I 52,5 R-SR3/NA	0,25	
Z13 - CEM I 52,5 R-SR3/NA	0,39	
Z14 - CEM I 52,5 R-SR3/NA (2)	0,39	
Z14 - CEM I 52,5 R-SR3/NA (2)	1,91	
Z15 - CEM I 32,5 N-LH/SR 3	0,55	
Z15 - CEM I 32,5 N-LH/SR 4	0,15	
Z16 - CEM I 42,5 R-SR 3	0,59	
Z16 - CEM I 42,5 R-SR 4	0,25	
Z17 - CEM I 42,5 R-SR 3	0,27	
Z17 - CEM I 42,5 R-SR 4	0,13	
Z18 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	0,02	
Z18 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	0,03	
Z19 - CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA	0,06	
Z19 - CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA	0,06	
Z20 - CEM III/B 42,5 N LH/HS/NA	0,32	
Z20 - CEM III/B 42,5 N LH/HS/NA	0,13	

Im Vergleich zum eigentlichen SVA-Verfahren konnte mit der praxisnahen Variante eine deutlich verbesserte Differenzierung zwischen den beiden Zementtypen erzielt werden.

3.3 Modifiziertes Verfahren

Auch beim modifizierten Verfahren kam eine praxisnahe Sulfatkonzentration von 3 g/l zum Einsatz. Zudem bestand die Prüflösung aus einem Gemisch aus Calcium-, Natrium- und Magnesiumsulfat und sollte damit noch praxisgerechter sein. Die Wahl der zylindrischen Prüfkörpergeometrie und die Vorbehandlung der Prüfkörper, durch Bewegung im Taumelmischer bis zur Erhärtung, sollten homogenere Prüfkörper ermöglichen. Der Wassermenge-Wert von 0,60 sollte verstärkt dem chemischen Widerstand und weniger dem physikalischen Widerstand des Zements Bedeutung einräumen.

Tabelle 3 Rel. Längenänderung der Prüfkörper nach 182 Tagen Lagerung bei 5°C (grau) und 20°C (weiß) gemäß modifiziertem Verfahren; Prüfkriterium 0,60 mm/m

Zement	182d	
Z1 - CEM I-SR	0,54	
Z1 - CEM I-SR	0,28	
Z2 CEM I	0,79	
Z2 CEM I	0,69	
Z3 - CEM I-SR	0,34	
Z3 - CEM I-SR	0,2	
Z5 - CEM I-SR	0,28	
Z5 - CEM I-SR	0,18	
Z8 - CEM I	0,82	
Z8 - CEM I	0,48	
Z9 - CEM I	0,38	
Z9 - CEM I	0,33	
Z10 - CEM I-SR	0,33	
Z10 - CEM I-SR	0,2	
Z11 - CEM I	defekt	
Z11 - CEM I	4,86	
Z12 - CEM I	1,36	
Z12 - CEM I	1,03	
Z14 - CEM I-SR	0,29	
Z14 - CEM I-SR	0,02	
Z15 - CEM I-SR	0,25	
Z15 - CEM I-SR	0,2	
Z20 - CEM III/B-SR	0,07	
Z20 - CEM III/B-SR	0,2	
Z21 - CEM III/A-SR	0,14	
Z21 - CEM III/A-SR	0,21	
Z22 - CEM III/A	0,26	
Z22 - CEM III/A	0,22	
Z23 - CEM II/B-V-SR	0,36	
Z23 - CEM II/B-V-SR	0,2	

Sowohl zwölf der zwanzig Zemente aus den SVA-Prüfungen als auch drei weitere Zemente, zwei CEM III/A und ein CEM II/B-V wurden mit dem modifizierten Verfahren geprüft (**Tabelle 3**). Bei einem Prüfkriterium von 0,60 mm/m nach 182 Tagen Lagerung gab es nur bei zwei CEM I-Zementen nicht adäquate rel. Längenänderungen. Die geprüften CEM I-SR zeigten

durchweg nur niedrige Dehnungen. Das gleiche galt auch für die mitgeprüften CEM III/A und CEM II/B-V Zemente, die quasi SR-Zemente waren, obwohl einer der beiden CEM III/A-Zemente keine SR-Zulassung des DIBt besaß.

3.4 Vergleich der Verfahren

In **Tabelle 4** werden die Prüfverfahren verglichen. Berücksichtigt sind die jeweils besten abgeleiteten Prüfzeitpunkte und Prüfkriterien. In der Tabelle bedeuten ein rot hinterlegtes Feld, dass die ermittelte relative Längenänderung nicht zum Zementtyp passt und ein grünes Feld, dass sie passt. Das ungünstige Abschneiden des SVA-Verfahrens wird anhand der vielen roten Felder ersichtlich. Eine Differenzierung zwischen CEM I mit und ohne SR-Eigenschaft war hiermit nicht eindeutig möglich. Die beiden praxisnäheren Verfahren ermöglichten hingegen eine deutlich bessere Differenzierung. Beim alternativen SVA-Verfahren gab es nur noch zwei Ausreißer bei den CEM I-SR-Zementen und einen bei den CEM I-Zementen. Noch günstiger fiel das modifizierte Verfahren aus. Bei den CEM I-SR-Zementen gab es keinen Ausreißer und bei den CEM I-Zementen zwei. Betrachtet man die mineralogische Zusammensetzung dieser beiden Portlandzemente, die sowohl beim SVA-Verfahren als auch beim modifizierten Verfahren nur geringe Dehnungen aufwiesen und somit als Ausreißer gewertet wurden, so stellt man fest, dass sie mit C_3A -Gehalten von rd. 6 M.-% (rd. 6,3 M.-% gemäß Bogue-Berechnung und 5,5 bzw. 5,9 M.-% gemäß RBA mit Rietveld-Quantifizierung) nur knapp nicht unter die SR-Zemente der europäischen Zementnorm fallen. Nach ASTM Norm würden die beiden CEM I als moderat sulfatbeständig gelten. Somit sind die gefundenen niedrigen Dehnungen der beiden CEM I begründbar und stellen keine Prüfartefakte dar.

Tabelle 4 Rel. Längenänderung der Prüfkörper bei 5°C (grau) und 20°C (weiß) gemäß SVA, alternativem SVA und modifiziertem Prüfverfahren

Zement	SVA 91 d	SVA 182 d	alternat. SVA 364 d	modif. Verf. 182 d
Prüfkriterium	0,50 mm/m	0,80 mm/m	0,60 mm/m	0,60 mm/m
Z2 - CEM I 42,5 R	1,54		1,24	0,79
Z2 - CEM I 42,5 R	1,01	4,01	1,30	0,69
Z8 - CEM I 52,5 R (C3S > 70%)	0,15		0,71	0,82
Z8 - CEM I 52,5 R (C3S > 70%)	0,32	0,80	1,25	0,48
Z9 - CEM I 42,5 R (C3S < 60 %)	0,27		0,69	0,38
Z9 - CEM I 42,5 R (C3S < 60 %)	0,36	0,55	0,17	0,33
Z11 - CEM I 42,5 R	1,90		defekt	defekt
Z11 - CEM I 42,5 R	0,79	3,89	1,57	4,86
Z12 - CEM I 52,5 N-NA	0,30		defekt	1,36
Z12 - CEM I 52,5 N-NA	0,40	1,38	0,98	1,03
Z1 - CEM I 52,5 N-SR3/NA	0,78		0,73	0,54
Z1 - CEM I 52,5 N-SR3/NA	0,48	0,73	0,47	0,28
Z3 - CEM I 42,5 R-HS	0,33		0,50	0,34
Z3 - CEM I 42,5 R-HS	0,73	1,06	0,46	0,20
Z5 - CEM I 42,5 R-SR 3/NA	0,31		0,45	0,28
Z5 - CEM I 42,5 R-SR 3/NA	0,38	0,64	0,23	0,18
Z7 - CEM I 52,5 N-SR 3	0,16		0,44	
Z7 - CEM I 52,5 N-SR 4	0,33	1,02	0,18	
Z10 - CEM I 42,5 R-HS/NA	0,75		0,38	0,33
Z10 - CEM I 42,5 R-HS/NA	0,58	1,35	0,22	0,20
Z13 - CEM I 52,5 R-SR3/NA	0,30		0,25	
Z13 - CEM I 52,5 R-SR3/NA	0,44	1,57	0,39	
Z14 - CEM I 52,5 R-SR3/NA (2)	0,28		0,39	0,29
Z14 - CEM I 52,5 R-SR3/NA (2)	0,29	0,90	1,91	0,02
Z15 - CEM I 32,5 N-LH/SR 3	1,44		0,55	0,25
Z15 - CEM I 32,5 N-LH/SR 4	0,60	1,11	0,15	0,20
Z16 - CEM I 42,5 R-SR 3	0,81		0,59	
Z16 - CEM I 42,5 R-SR 4	0,41	0,78	0,25	
Z17 - CEM I 42,5 R-SR 3	0,35		0,27	
Z17 - CEM I 42,5 R-SR 4	0,19	0,34	0,13	
Z4 - CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA	0,28		0,14	
Z4 - CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA	0,17	0,19	0,15	
Z6 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	0,15		0,08	
Z6 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	0,16	0,19	0,14	
Z18 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	0,14		0,02	
Z18 - CEM III/B 32,5 N-LH/SR/NA	0,05	0,08	0,03	
Z19 - CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA	0,09		0,06	
Z19 - CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA	0,15	0,12	0,06	
Z20 - CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA	0,52		0,32	0,07
Z20 - CEM III/B 42,5 N-LH/HS/NA	0,16	0,27	0,13	0,20

3.5 Empfehlungen für die weitere Prüfpraxis

Mit dem 2014 vom DIBt-Sachverständigenausschuss vorgeschlagenen alternativem Prüfverfahren existiert bereits eine Methode, mit der zwischen CEM I und CEM I-SR Zementen deutlich besser differenziert werden kann, als mit dem bisher üblichen SVA-Verfahren. Nach den hier im Forschungsvorhaben gemachten Erfahrungen reicht dazu eine Prüfdauer von einem Jahr aus. Die vom SVA getroffene Vorgabe von mindestens 2 Jahren Prüfdauer erscheint nicht erforderlich und somit auch zu lang. Hiervon würden auch die Zulassungsverfahren profitieren, die nicht unnötig in die Länge gezogen würden. Allerdings sollten auch mit

dieser Prüfvariante gezielt Versuche mit anderen Zementtypen, insbesondere mit mehreren Hauptbestandteilen, vorgenommen werden. Diese Versuche waren im abgeschlossenen Forschungsvorhaben nicht vorgesehen und auch zeitlich und budgetmäßig nicht darstellbar.

Anhand der im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse erscheint das durch den VDZ vorgeschlagene modifizierte Prüfverfahren (Variante E) als sehr vielversprechend. Alle geprüften SR-Zemente zeigten keine überhöhten Dehnungen. CEM I-Zemente mit C_3A -Gehalten von mehr als 7 M.-% wiesen hingegen erwartungsgemäß höhere Dehnungen auf. Als Prüfkriterium wird eine relative Längenänderung von 0,60 mm/m vorgeschlagen. Positiv ist darüber hinaus, dass eine Prüfdauer von 6 oder 9 Monaten vermutlich ausreichend ist und somit keine wesentlich längere Prüfdauer als beim bisherigen SVA-Verfahren erforderlich wäre. Auch mit dem modifizierten Prüfverfahren sollten unbedingt weitere Versuche zur weiteren Verifizierung der bisherigen Ergebnisse durchgeführt werden. Hierzu gehören zum einen noch weitere Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen, insbesondere die keine SR-Eigenschaft aufweisen, wie z.B. CEM II/A und CEM II/B Zemente mit Kalksteinmehl oder Hüttensand und zum anderen Zement/Flugasche-Gemische mit $k=0,4$, denen ein erhöhter Sulfatwiderstand zugesprochen wird. Einige von diesen Versuchen hat das Forschungsinstitut der Zementindustrie bereits aus eigenen Mitteln begonnen. Mit Ergebnissen ist aber erst Anfang 2017 zu rechnen.

Beim SVA-Verfahren ergaben auch die Messergebnisse zum relativen dynamischen Elastizitätsmodul, genau wie die zur relativen Längenänderung, keine gute Unterscheidungsmöglichkeit zwischen Zementen mit und ohne SR-Eigenschaft. Anders beim alternativen SVA-Verfahren und beim modifizierten Prüfverfahren. Einen deutlichen Einbruch des E-Moduls zeigten nur die Zemente, die auch hohe Dehnungen aufwiesen. Die CEM III/B-SR wiesen somit bei diesen beiden Verfahren im Gegensatz zum SVA-Verfahren keinen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf.

Beim modifizierten Prüfverfahren scheint auch die relative Biegezugfestigkeit ein aussagefähiges Prüfkriterium zu sein. Allerdings beruht diese Aussage bisher nur auf einer kleinen Versuchsmatrix und bedarf daher noch weiterer Absicherung.

Mit der Anwendung des neuen praxisrelevanteren Prüfverfahrens auf Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen zur Prüfung des Sulfatwiderstands werden sicherlich wieder begleitende Auslagerungsversuche mit Betonprüfkörpern über einen längeren Prüfzeitraum erforderlich werden. Eine Abstimmung hierüber wird zeitnah mit den zuständigen Gremien des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) und des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) angestrebt.

Ein weiterer wichtiger Punkt der in der näheren Zukunft untersucht werden sollte, ist die Robustheit des modifizierten Prüfverfahrens. Es ist nachzuweisen, dass eine zufriedenstellende Wiederhol- und Vergleichspräzision mit dem Prüfverfahren erzielt werden kann.

4 Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben konnten folgende Erkenntnisse erzielt werden.

Mit dem bisher üblichen SVA-Flachprismenverfahren ist keine gute Differenzierung zwischen Portlandzementen mit und ohne SR-Eigenschaft möglich, da mehrheitlich auch SR-Zemente höhere Längenänderungen zeigten, als die in den Prüfkriterien festgelegten Werte. Die beim

SVA-Flachprismenverfahren auftretenden relativ hohen Längenänderungen der CEM I-SR-Zemente sind primär auf die Bildung von sekundärem Gips zurückzuführen.

Das erst kürzlich vom DIBt-Sachverständigenausschuss definierte alternative SVA-Verfahren ermöglicht eine bessere Differenzierung zwischen Zementen mit und ohne SR-Eigenschaft als das bisherige SVA-Verfahren. Hierbei ist die Verwendung von nur 3000 mg Sulfat pro Liter in der Prüflösung die entscheidende Größe. Allerdings ist eine Prüfdauer von etwa einem Jahr erforderlich.

Mit dem vorgestellten modifizierten Prüfverfahren konnte eine noch bessere Differenzierung zwischen Zementen mit und ohne SR-Eigenschaft erreicht werden. CEM I-SR-Zemente zeigten hierbei quasi keine unerwartet hohen Längenänderungen. Die ersten Versuche mit Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen waren ebenfalls positiv. Mit dem modifizierten Prüfverfahren sollten auch für diese Zemente belastbare Aussagen zum Sulfatwiderstandverhalten abgeleitet werden können.

Die Ergebnisse sollen dem DIBt-Sachverständigenausschuss vorgestellt werden. Dieser könnte das modifizierte Prüfverfahren als zukünftiges Prüfverfahren für SR-Zulassungsuntersuchungen übernehmen. Darüber hinaus soll das Prüfverfahren auch der CEN TC51/WG12/TG1 vorgestellt werden, der europäischen Arbeitsgruppe, die sich derzeit mit einem europäischen Prüfverfahren für SR-Zemente beschäftigt. Mittel- bis langfristig könnten die Ergebnisse des Forschungsprojekts somit zur Definition eines neuen europäischen Prüfverfahrens für SR-Zemente beitragen.

5 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 18024 N der Forschungsvereinigung VDZ gemeinnützige GmbH – VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.