

# Einfluss von schwindreduzierenden Zusatzmitteln auf das Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein, Teil 2

## The influence of shrinkage-reducing admixtures on the shrinkage and other properties of hardened cement paste, part 2

Patrick Schäffel, Jörg Rickert, Düsseldorf

### 5.4 Schwinden von Zementstein

#### 5.4.1 Autogenes Schwinden von Zementstein

In den Bildern 5 und 6 ist jeweils oben der Verlauf der autogenen Schwinddehnung von Zementstein und unten der Verlauf der Schwindreduzierung bezogen auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer dargestellt. Wie aus Bild 5 ( $w/z = 0,25$ ) und Bild 6 ( $w/z = 0,42$ ) hervorgeht, wurde das autogene Schwinden von Zementstein mit Portlandzement Z1 durch die Schwindreduzierer sowie durch die Wirkstoffe reduziert. Bei den Zementsteinen mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,25$  (s. Bild 5) trat die maximale schwindreduzierende Wirkung mit rd. 80 % bei Verwendung von SRA3 und SRA8 bereits direkt nach Messbeginn im jungen Alter auf. Die Wirkung nahm bis zum siebenten Tag auf rd. 45 % ab und verringerte sich dann nicht mehr signifikant. SRA1 bzw. SRA7 reduzierten das Schwinden zu Messbeginn um rd. 40 % und nach 91 Tagen um rd. 35 %. Wie Bild 6 zeigt, verminderten die Schwindreduzierer SRA1 und SRA3 sowie der Wirkstoff SRA8 das autogene Schwinden von Zementstein mit einem Wasserze-

mentwert  $w/z = 0,42$  zu Messbeginn im Alter von zwei Tagen um rd. 40 % bis rd. 50 %. Der Wirkstoff SRA7 reduzierte das autogene Schwinden von Zementstein im Alter von zwei Tagen um rd. 60 %. Der Schwindreduzierer SRA3 und der Wirkstoff SRA7 verminderten das autogene Schwinden relativ gleichbleibend über den gesamten Untersuchungszeitraum von 91 Tagen. Bei Verwendung von Schwindreduzierer SRA1 bzw. des Wirkstoffs SRA8 sank die schwindreduzierende Wirkung im Verlauf der 91 Tage auf rd. 10 % bzw. rd. 20 %.

In Tafel 4 ist die Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein mit Portlandzement Z1 mit Wasserzementwerten  $w/z = 0,25; 0,42$  und  $0,50$  in Abhängigkeit der Schwindreduzierer SRA1 bis SRA5 und der Wirkstoffe SRA6 bis SRA8 im Alter von 91 Tagen angegeben. Die jeweilige Reduzierung bezieht sich auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer.

Das Schwinden von Zementstein mit Portlandzement Z1 und mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,25$  wurde durch die Schwindreduzierer SRA1 und SRA3 sowie durch die Wirkstoffe

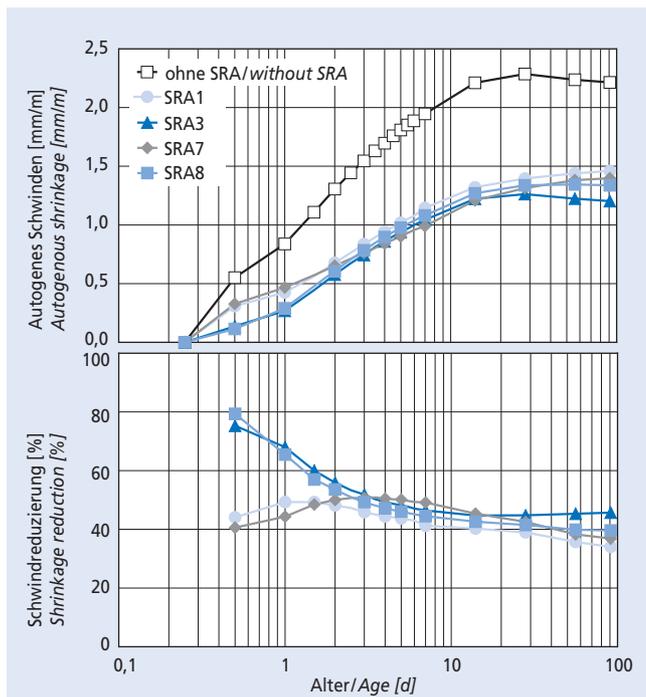


Bild 5: Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung von Zementstein bezogen auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer (unten), Portlandzement Z1;  $w/z = 0,25$ ; Dosierung: 4,5 M.-% v.v SRA1, SRA3, SRA7 und SRA8

Figure 5: Autogenous shrinkage (above) and shrinkage reduction of hardened cement paste relative to a reference sample without shrinkage reducer (below); Portland cement Z1,  $w/c = 0,25$ , dosage of SRA1, SRA3, SRA7 and SRA8 = 4.5 mass % w.r.t. water

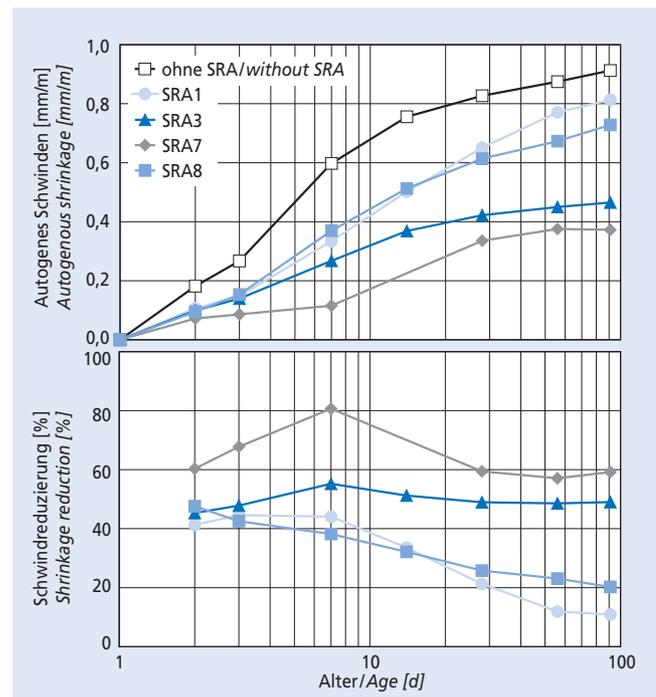


Bild 6: Autogenes Schwinden (oben) und Schwindreduzierung von Zementstein bezogen auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer (unten), Portlandzement Z1;  $w/z = 0,42$ ; Dosierung: 4,5 M.-% v.v SRA1, SRA3, SRA7 und SRA8

Figure 6: Autogenous shrinkage (above) and shrinkage reduction of hardened cement paste relative to a reference sample without shrinkage reducer (below); Portland cement Z1,  $w/c = 0,42$ , dosage of SRA1, SRA3, SRA7 and SRA8 = 4.5 mass % w.r.t. water

**Tafel 4: Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein im Alter von 91 Tagen durch Schwindreduzierer SRA1 bis SRA5 und Wirkstoffe SRA6 bis SRA8 bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer, Portlandzement Z1, w/z = 0,25; 0,42 und 0,50; Dosierung: 4,5 M.-% v.w**

**Table 4: Reduction in the autogenous shrinkage of hardened cement paste at 91 days by shrinkage reducers SRA1 to SRA5 and active substances SRA6 to SRA8 relative to the reference samples without shrinkage reducers; Portland cement Z1, w/c = 0.25, 0.42 and 0.50, dosage: 4.5 mass % w.r.t. water**

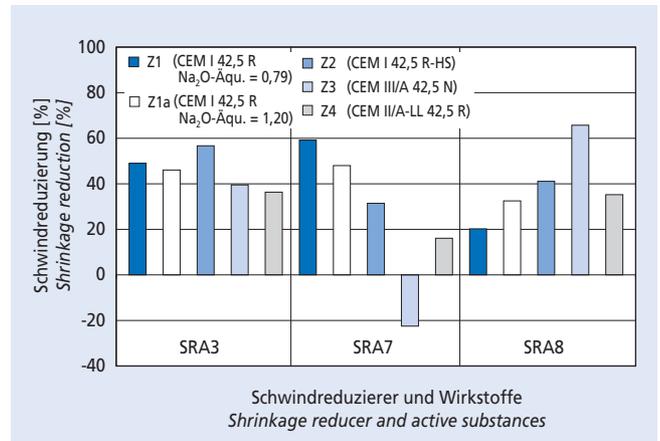
w/z w/c	Schwindreduzierung bezogen auf die Referenzprobe [%] Shrinkage reduction relative to the reference sample [%]							
	SRA1	SRA2 <sup>1)</sup>	SRA3	SRA4	SRA5	SRA6	SRA7	SRA8
0,25	34	n.b.	46	n.b.	n.b.	n.b.	37	40
0,42	11	20	50	52	25	10	59	20
0,50	20	n.b.	59	n.b.	n.b.	n.b.	54	-4

n.b. = nicht bestimmt / not determined

<sup>1)</sup> Dosierung: 3,5 M.-% v.w / dosage: 3.5 mass % w.r.t. water

SRA7 und SRA8 in etwa gleichem Maße reduziert. Mit steigendem Wasserzementwert wurden Unterschiede in der Wirkungsweise der untersuchten Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffe festgestellt. Insbesondere SRA1 und SRA8 wiesen bei Wasserzementwerten w/z = 0,42 und w/z = 0,50 jeweils eine geringere Wirkung auf als bei einem Wasserzementwert w/z = 0,25. Mit dem Wirkstoff SRA8 wurde bei einem Wasserzementwert w/z = 0,50 sogar eine geringfügig größere Schwinddehnung als bei der Referenzprobe ohne Schwindreduzierer ermittelt.

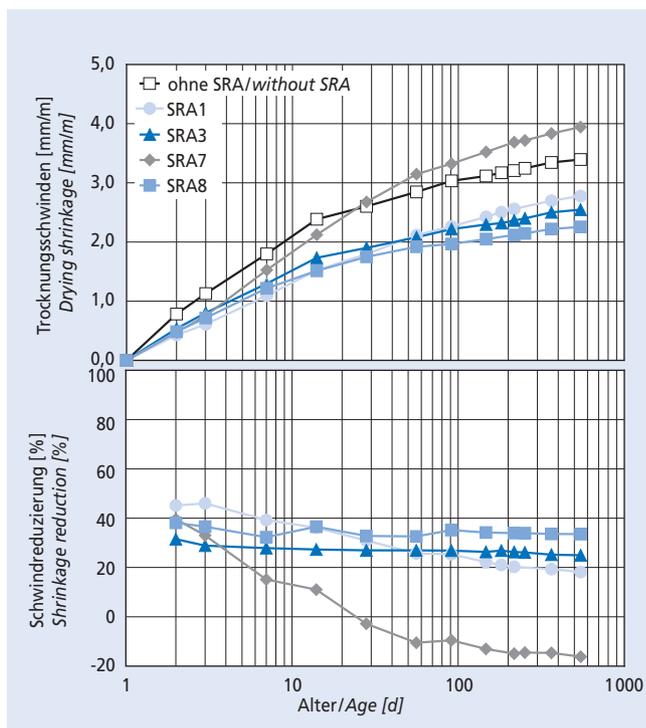
Der Einfluss des Schwindreduzierers SRA3 sowie der Wirkstoffe SRA7 und SRA8 auf das autogene Schwinden von Zementstein mit den Zementen Z1, Z1a, Z2, Z3 und Z4 bei einem Wasserzementwert w/z = 0,42 ist in Bild 7 dargestellt. Der handels-



**Bild 7: Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein im Alter von 91 Tagen durch Schwindreduzierer SRA3 und Wirkstoffe SRA7 und SRA8 bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer, Zement Z1, Z1a, Z2, Z3 und Z4, w/z = 0,42; Dosierung: 4,5 M.-% v.w**

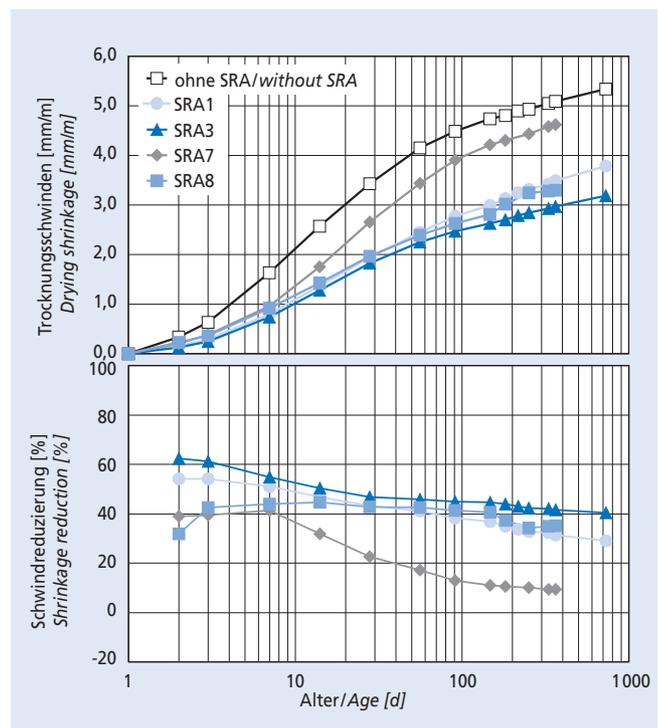
**Figure 7: Reduction of the autogenous shrinkage of hardened cement paste at 91 days by shrinkage reducer SRA3 and active substances SRA7 and SRA8 relative to reference samples without shrinkage reducer; cements Z1, Z1a, Z2, Z3 and Z4, w/c = 0.42, dosage = 4.5 mass % w.r.t. water**

übliche Schwindreduzierer SRA3 reduzierte das autogene Schwinden aller Zementsteine um rd. 36 % bis rd. 56 %. Die Wirkstoffe SRA7 und SRA8 wirkten je nach Zementart sehr unterschiedlich. Während der Wirkstoff SRA7 das Schwinden von Zementstein mit Portlandzement Z1 um rd. 59 % verringerte, wurde bei Zementstein mit Hochofenzement Z3 eine um rd. 23 % größere autogene Schwinddehnung als bei der Referenzprobe festgestellt.



**Bild 8: Trocknungsschwinden im Klima 20/65 (oben) und Schwindreduzierung von Zementstein bezogen auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer (unten), Portlandzement Z1, w/z = 0,25; Dosierung: 4,5 M.-% v.w SRA1, SRA3, SRA7 und SRA8**

**Figure 8: Drying shrinkage in a 20/65 climate (above) and shrinkage reduction of hardened cement paste relative to a reference sample without shrinkage reducer (below); Portland cement Z1, w/c = 0.25, dosage of SRA1, SRA3, SRA7 and SRA8 = 4.5 mass % w.r.t. water**



**Bild 9: Trocknungsschwinden im Klima 20/65 (oben) und Schwindreduzierung von Zementstein bezogen auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer (unten), Portlandzement Z1, w/z = 0,42; Dosierung: 4,5 M.-% v.w SRA1, SRA3, SRA7 und SRA8**

**Figure 9: Drying shrinkage in a 20/65 climate (above) and shrinkage reduction of hardened cement paste relative to a reference sample without shrinkage reducer (below); Portland cement Z1, w/c = 0.42, dosage of SRA1, SRA3, SRA7 and SRA8 = 4.5 mass % w.r.t. water**

Mit dem Wirkstoff SRA8 wurde das autogene Schwinden von Zementstein mit Portlandzement Z1 um rd. 20 % und das von Zementstein mit Hochofenzement Z3 um rd. 66 % vermindert.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Reduzierung des autogenen Schwindens von Zementstein unabhängig von der Reduzierung der Oberflächenspannung der Porenlösung erfolgte (s. Abschnitt 5.2.1).

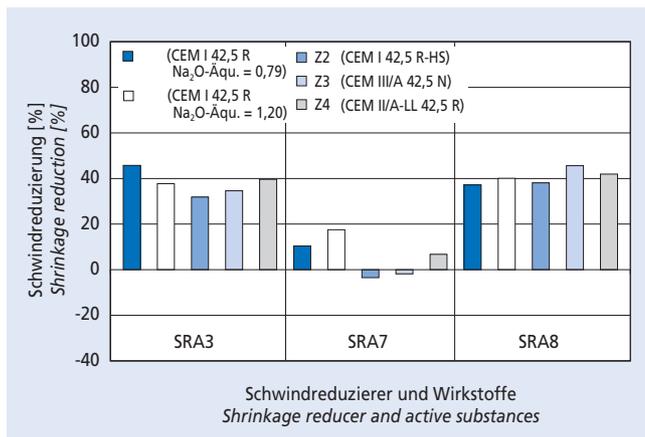
#### 5.4.2 Trocknungsschwinden von Zementstein im Klima 20/65 und bei Wasser-Luft-Wechselagerung

Bild 8 ( $w/z = 0,25$ ) und Bild 9 ( $w/z = 0,42$ ) zeigen, dass das Trocknungsschwinden von Zementstein mit Portlandzement Z1 durch die Schwindreduzierer SRA1 und SRA3 sowie den Wirkstoff SRA8 deutlich reduziert wurden. Die größte Schwindreduzierung wurde in den meisten Fällen jeweils zu Messbeginn ermittelt. Die Wirkung der Schwindreduzierer und Wirkstoffe, insbesondere von Wirkstoff SRA7, nahm mit zunehmender Trocknungsdauer ab.

In Tafel 5 ist die Reduzierung des Trocknungsschwindens von Zementstein im Klima 20/65 mit Portlandzement Z1 mit Wasserzementwerten  $w/z = 0,25; 0,42$  und  $0,50$  in Abhängigkeit der Schwindreduzierer und Wirkstoffe im Alter von einem Jahr angegeben. Die jeweilige Reduzierung bezieht sich auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer. Der Einfluss des Schwindreduzierers SRA3 sowie der Wirkstoffe SRA7 und SRA8 auf das Trocknungsschwinden im Klima 20/65 von Zementstein mit den Zementen Z1, Z1a, Z2, Z3 und Z4 bei einem Wasserzementwert  $w/z = 0,42$  im Alter von 182 Tagen ist in Bild 10 dargestellt. Aus Bild 10 und Tafel 5 geht hervor, dass der handelsübliche Schwindreduzierer SRA3 und der Wirkstoff SRA8 das Trocknungsschwinden aller Zementsteine unabhängig vom Wasserzementwert sowie unabhängig von der Zementart und -zusammensetzung relativ gleichmäßig reduzierten. Der Wirkstoff SRA7 verminderte das Trocknungsschwinden nur geringfügig und führte bei Zementsteinen mit den Portlandzementen Z1 und Z2 sowie dem Hochofenzement Z3 in Abhängigkeit des Wasserzementwerts teilweise zu größeren Schwinddehnungen.

Wie auch beim autogenen Schwinden erfolgte die Reduzierung des Trocknungsschwindens von Zementstein unabhängig von der Reduzierung der Oberflächenspannung der Porenlösung (s. Abschnitte 5.2.1 und 5.4.1).

Zementsteinproben mit Schwindreduzieren bzw. deren Wirkstoffen wiesen gegenüber Referenzproben ohne Schwindreduzierer eine um bis zu 25 % erhöhte Wasserabgabe auf. Die nach Abschluss der Wasser-Luft-Wechselagerung an Zementsteinprismen



**Bild 10:** Reduzierung des Trocknungsschwindens von Zementstein im Alter von 182 Tagen durch Schwindreduzierer SRA3 und Wirkstoffe SRA7 und SRA8 bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer im Klima 20/65; Zement Z1, Z1a, Z2, Z3 und Z4;  $w/z = 0,42$ ; Dosierung: 4,5 M.-% v.v

**Figure 10:** Reduction of the drying shrinkage of hardened cement paste at 182 days by shrinkage reducer SRA3 and active substances SRA7 and SRA8 relative to reference samples without shrinkage reducer in a 20/65 climate; cements Z1, Z1a, Z2, Z3 and Z4,  $w/c = 0,42$ , dosage = 4.5 mass % w.r.t. water

**Tafel 5:** Reduzierung des Trocknungsschwindens im Klima 20/65 von Zementstein im Alter von 364 Tagen durch Schwindreduzierer SRA1 bis SRA5 und Wirkstoffe SRA6 bis SRA8 bezogen auf Referenzproben ohne Schwindreduzierer, Portlandzement Z1,  $w/z = 0,25; 0,42$  und  $0,50$ ; Dosierung: 4,5 M.-% v.v

**Table 5:** Reduction in the drying shrinkage of hardened cement paste in a 20/65 climate at 364 days by shrinkage reducers SRA1 to SRA5 and active substances SRA6 to SRA8 relative to the reference samples without shrinkage reducers; Portland cement Z1,  $w/c = 0,25, 0,42$  and  $0,50$ , dosage: 4.5 mass % w.r.t. water

w/z w/c	Schwindreduzierung bezogen auf die Referenzprobe [%] Shrinkage reduction relative to the reference sample [%]							
	SRA1	SRA2 <sup>1)</sup>	SRA3	SRA4	SRA5	SRA6	SRA7	SRA8
0,25	20	n.b.	35	n.b.	n.b.	n.b.	-15	34
0,42	31	39	42	43	16	34	9	35
0,50	22	n.b.	40	n.b.	n.b.	n.b.	17	38

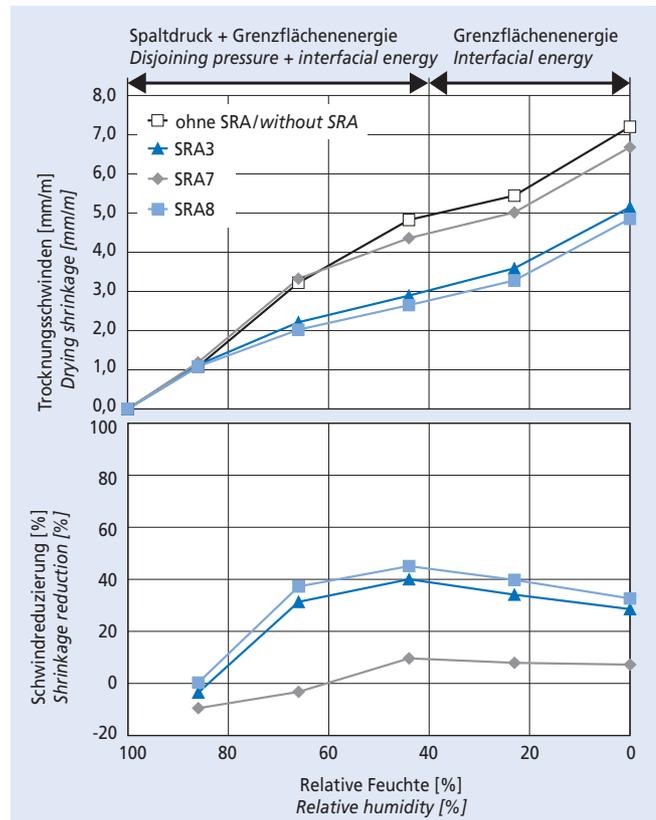
n.b. = nicht bestimmt / not determined

<sup>1)</sup> Dosierung: 3,5 M.-% v.v / dosage: 3.5 mass % w.r.t. water

ermittelten Schwindreduzierungen entsprachen im Wesentlichen denen, die beim Trocknungsschwinden im Alter von einem Jahr ermittelt wurden.

#### 5.4.3 Schwinden von Zementsteinprismen bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten

In Bild 11 sind oben die Endschwindmaße von Zementstein mit Portlandzement Z1 mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,42$  sowie



**Bild 11:** Trocknungsschwinden (oben) und Reduzierung des Trocknungsschwindens von Zementstein im Alter von 91 Tagen bezogen auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer (unten) in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte, Zement Z1;  $w/z = 0,42$ ; Dosierung: 4,5 M.-% v.v

**Figure 11:** Drying shrinkage (above) and reduction of the drying shrinkage of hardened cement paste at 91 days relative to a reference sample without shrinkage reducer (below) as a function of the relative air humidity; cement Z1,  $w/c = 0,42$ , dosage = 4.5 mass % w.r.t. water

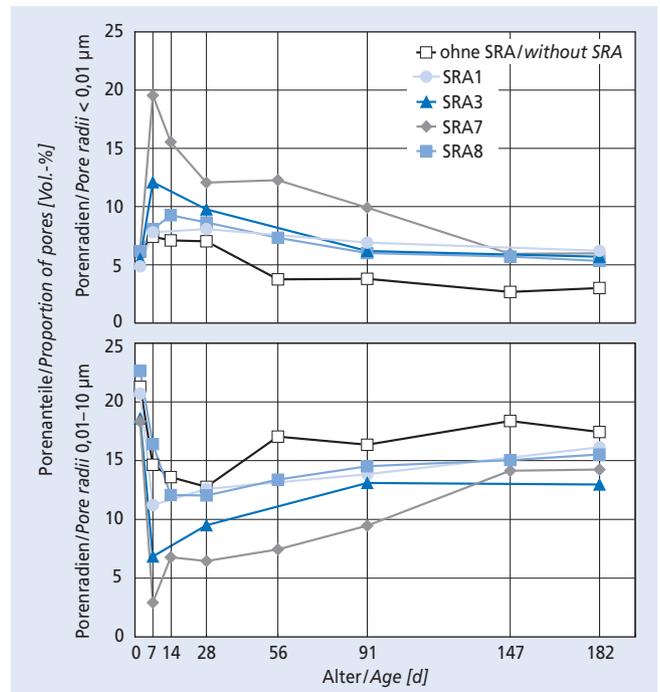
unten die Schwindreduzierungen nach jeweils 91-tägiger Lagerung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte dargestellt. Bei Trocknung bis zu einer relativen Luftfeuchte von rd. 86 % wurden zwischen den Prismen ohne und mit Schwindreduzierern bzw. Wirkstoffen keine unterschiedlichen Schwinddehnungen und somit auch keine Schwindreduzierungen festgestellt. In diesem Feuchtebereich verdunstete hauptsächlich überschüssiges Wasser aus den Kapillarporen, welches während der Vorlagerung aufgenommen wurde. Mit weiter sinkender relativer Luftfeuchte auf rd. 66 % verringerte sich bei den Proben mit SRA3 und SRA8 das Trocknungsschwinden von rd. 3,2 mm/m (Referenz) auf rd. 2,0 mm/m. Der Wirkstoff SRA7 reduzierte das Schwinden nicht. Bei weiter sinkender relativer Luftfeuchte auf rd. 44 % nahm die schwindreduzierende Wirkung von SRA3 und SRA8 in gleichem Maße weiter zu. Durch SRA7 wurde das Schwinden im Vergleich zur Referenz geringfügig verringert. Bei einer relativen Luftfeuchte von rd. 44 % betrug die jeweilige Schwindreduzierung durch SRA3 bzw. SRA8 rd. 40 % bzw. rd. 45 % und durch SRA7 rd. 10 %.

Es hat sich gezeigt, dass erst bei relativen Luftfeuchten von rd. 86 % bis rd. 44 %, in dem der Spaltdruck und die Van-der-Waals-Kräfte die Schwindverformung von Zementstein beeinflussen, der Schwindreduzierer SRA3 und der Wirkstoff SRA8 das Trocknungsschwinden reduzierten. Somit scheinen das schwindreduzierende Zusatzmittel SRA3 und der Wirkstoff SRA8 das Trocknungsschwinden von Zementstein im Wesentlichen durch Verringerung des Spaltdrucks zu vermindern. Der Wirkstoff SRA7 beeinflusste das Trocknungsschwinden unabhängig von der relativen Luftfeuchte nur geringfügig.

### 5.5 Quecksilberdruckporosimetrie und kapillare Wasseraufnahme

Bei allen untersuchten Wasserzementwerten und Zementen wurde festgestellt, dass sich durch die Verwendung der Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffe im Zementstein eine größere Gelporosität (Porenradien < 0,01 µm) ausbildete als bei Referenzproben ohne Schwindreduzierer. Gleichzeitig nahm die Kapillarporosität (Porenradien 0,01 µm bis 10 µm) ab. Die Gesamtporosität der Zementsteine wurde durch die Schwindreduzierer bzw. Wirkstoffe nicht signifikant beeinträchtigt. Die Entwicklung der Porosität bei Lagerung im Klima 20/65 über einen Zeitraum von 182 Tagen ist exemplarisch für Zementstein mit Portlandzement Z1 mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,42$  in Bild 12 dargestellt. Das Bild zeigt im oberen Bereich den Anteil an Gelporen und im unteren Bereich den Anteil an Kapillarporen von Zementstein mit Portlandzement Z1 und den Schwindreduzierern SRA1 und SRA3 sowie den Wirkstoffen SRA7 und SRA8. Die Referenzprobe wies in allen Fällen die geringsten Anteile an Gelporen und die höchsten Anteile an Kapillarporen auf. Infolge der Hydratation nahmen bei nahezu allen Proben in den ersten sieben bis zu teilweise 14 Tagen die Anteile an Gelporen zu und die an Kapillarporen ab. Im Gegensatz zur konservierenden Lagerung sanken bzw. stiegen die Anteile an Gelporen bzw. Kapillarporen im weiteren Verlauf infolge der Austrocknung. Zementsteine mit Portlandzement Z1 und dem Wirkstoff SRA7 wiesen nahezu über den gesamten Zeitraum die größte Gel- und die geringste Kapillarporosität auf. Bei diesen Proben wurde das autogene Schwinden im Alter von 91 Tagen um rd. 59 % vermindert, während das Trocknungsschwinden nach einem Jahr im Klima 20/65 nur um rd. 10 % reduziert wurde (s. Abschnitte 5.4.1 und 5.4.2).

Die Erhöhung der Gelporenanteile führte zu einer deutlich verminderten kapillaren Wasseraufnahme der Zementsteine mit Schwindreduzierer. Bezogen auf eine Referenzprobe ohne Schwindreduzierer wurde die kapillare Wasseraufnahme bei konservierender Lagerung im Alter von sieben Tagen um rd. 30 % (SRA2) bis rd. 60 % (SRA7) reduziert. Im Alter von 91 Tagen wurde die kapillare Wasseraufnahme um rd. 35 % (SRA8) bis 50 % (SRA3 und SRA7) herabgesetzt. Die geringsten Wasseraufnahmen wurden bei den Proben mit dem Schwindreduzierer SRA3 und mit dem Wirkstoff SRA7 ermittelt. Dies korreliert mit der an den Proben mit SRA3 und SRA7 ermittelten sehr geringen Kapillarporosität bzw. hohen Gelporosität.



**Bild 12:** Gelporenanteile (Porenradien < 0,01 µm) und Kapillarporenanteile (Porenradien 0,01 µm bis 10 µm) von Zementstein mit Portlandzement Z1 bei einem Wasserzementwert  $w/z = 0,42$  im Klima 20/65 in Abhängigkeit der Lagerungsdauer

**Figure 12:** Proportion of gel pores (pore radii < 0.01 µm) and of capillary pores (pore radii 0.01 µm to 10 µm) of hardened cement paste made with Portland cement Z1 with a water/cement ratio of 0.42 in a 20/65 climate as a function of the length of storage

Bei Lagerung im Klima 20/65 reduzierte sich die kapillare Wasseraufnahme gegenüber der Referenzprobe im Alter von sieben Tagen um 40 % (SRA2) bis rd. 70 % (SRA7). Im Alter von 91 Tagen wurde die kapillare Wasseraufnahme im Klima 20/65 mit SRA1 und SRA7 um rd. 60 % und mit SRA2, SRA8 bzw. SRA3 um rd. 40 % bzw. 30 % gesenkt. Auch im Klima 20/65 wiesen die Proben mit SRA7 die geringste kapillare Wasseraufnahme auf.

### 5.6 Innere relative Feuchte von Zementstein

Zementsteine mit Portlandzement Z1 mit Wasserzementwerten  $w/z = 0,25$  bzw.  $w/z = 0,42$  wiesen eine Ausgleichsfeuchte von rd. 80 % bzw. 92 % auf. Durch die Wirkstoffe SRA7 bzw. SRA8 wurden bei einem Wasserzementwert  $w/z = 0,25$  Ausgleichsfeuchten von 90 % bzw. 92 % bestimmt. Bei einem Wasserzementwert  $w/z = 0,42$  betrug die Ausgleichsfeuchten 95 % bzw. 98 %.

Unter konservierenden Lagerungsbedingungen kann davon ausgegangen werden, dass eine durch Schwindreduzierer hervorgerufene erhöhte innere relative Feuchte im Zementstein zu einer geringeren Selbsttrocknung führt. Wie die Untersuchungen mit den Wirkstoffen SRA7 und SRA8 mit Wasserzementwerten  $w/z = 0,25$  und  $w/z = 0,42$  zeigten, kann dies zu einer Reduzierung des autogenen Schwindens beitragen.

### 5.7 Druckfestigkeit von Zementstein

Die Druckfestigkeit von konserviert gelagerten Zementsteinprismen mit Portlandzement Z1 im Alter von zwei Tagen wurde durch den Schwindreduzierer SRA1 um rd. 35 % und durch die Schwindreduzierer SRA2 und SRA3 sowie den Wirkstoff SRA7 um rd. 10 % vermindert. Im Alter von 28 Tagen lagen die Druckfestigkeiten der Prismen unabhängig vom eingesetzten Schwindreduzierer bzw. Wirkstoff rd. 20 % unter der Druckfestigkeit der Referenzprobe ohne Schwindreduzierer. Schwindreduzierer SRA3 führte bei Prismen mit den Portlandzementen Z1a und Z2 sowie mit dem Hochfenzement Z3 im Alter von 28 Tagen zu einer Verminderung der Druckfestigkeit um rd. 5 % und bei Prismen mit Zement Z4 zu einer Reduzierung von rd. 20 %.

Bei Lagerung im Klima 20/65 wurde die Druckfestigkeit von Zementstein mit Portlandzement Z1 im Alter von zwei Tagen durch den Schwindreduzierer SRA1 und durch den Wirkstoff SRA8 um rd. 30 % und durch SRA2 und SRA7 um rd. 20 % herabgesetzt. Schwindreduzierer SRA3 beeinträchtigte die Druckfestigkeit nicht. Im Alter von 28 Tagen wiesen Zementsteinprismen mit SRA2 und SRA3 nahezu identische Druckfestigkeiten wie die Referenzprobe auf. SRA1, SRA7 und SRA8 verminderten die Druckfestigkeit um bis zu rd. 20 %. Bei Zementsteinen mit den Zementen Z1a, Z2, Z3 und Z4 führte die Verwendung von SRA3 im Alter von zwei Tagen zu rd. 10 % geringeren Druckfestigkeiten. Bis auf die Prismen mit Portlandkalksteinzement Z4 entsprachen die Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen der jeweiligen Referenzprobe. Schwindreduzierer SRA3 führte bei Prismen mit Portlandkalksteinzement Z4 unabhängig vom Alter zu einer Verringerung der Druckfestigkeit um rd. 10 %. Warum Zementsteine mit schwindreduzierenden Zusatzmitteln bzw. Wirkstoffen trotz verminderter Kapillarporosität meist eine geringere Druckfestigkeit als die jeweiligen Referenzproben ohne Schwindreduzierer aufwiesen, wird derzeit im FIZ untersucht.

## 6 Zusammenfassung

Um den Erkenntnisstand zur Wirkungsweise von schwindreduzierenden Zusatzmitteln zu erweitern, wurde der Einfluss von fünf auf dem Markt erhältlichen Schwindreduzierern (SRA1 bis SRA5) sowie von drei darin enthaltenen Wirkstoffen (SRA6: Ethylenglykol, SRA7: Propylenglykol und SRA8: Propylenglykoether) auf das autogene und das Trocknungsschwinden von Zementstein bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten untersucht. Dazu wurden Zementsteinproben aus insgesamt vier verschiedenen Zementen (zwei Portlandzemente, ein Hochofenzement, ein Portlandkalksteinzement) mit Wasserzementwerten  $w/z = 0,25; 0,42$  und  $0,50$  hergestellt und bis zu zwei Jahre gelagert. Die Auswirkungen der Schwindreduzierer auf die Zusammensetzung und die Oberflächenspannung der Porenlösung, auf die Hydratation, die Porosität, die relative Feuchte und auf die Druckfestigkeit von Zementstein wurden untersucht. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

### Autogenes Schwinden

Die Schwindreduzierer (SRA1 bis SRA5) verringerten das autogene Schwinden von Zementstein im Vergleich zu Mischungen ohne Schwindreduzierer im Alter von 91 Tagen um rd. 11 % bis rd. 60 %. Teilweise variierte die Wirkungsweise der Schwindreduzierer in Abhängigkeit vom Wasserzementwert, der Zementart und der Zementzusammensetzung. Schwindreduzierer SRA3 verminderte das autogene Schwinden von Zementstein im Alter von 91 Tagen weitgehend unabhängig vom Wasserzementwert sowie unabhängig von der Zementart und -zusammensetzung um rd. 36 % bis rd. 56 %. Die im Schwindreduzierer SRA3 enthaltenen Wirkstoffe SRA7 und SRA8 wirkten je nach Zementart und Wasserzementwert sehr unterschiedlich. Während der Wirkstoff SRA7 das Schwinden von Zementstein mit Portlandzement Z1 und einem Wasserzementwert  $w/z = 0,42$  im Alter von 91 Tagen um rd. 60 % verringerte, wurde bei Zementstein mit Hochofenzement Z3 eine um rd. 23 % größere autogene Schwinddehnung als bei der entsprechenden Referenzprobe festgestellt. Im gleichen Betrachtungszeitraum verminderte der Wirkstoff SRA8 das autogene Schwinden von Zementstein mit Portlandzement Z1 bzw. Hochofenzement Z3 und einem Wasserzementwert  $w/z = 0,42$  um rd. 20 % bzw. rd. 66 %. Bei einem Wasserzementwert  $w/z = 0,50$  wiesen Proben mit SRA8 teilweise eine geringfügig größere Schwinddehnung auf als Referenzproben ohne Schwindreduzierer.

### Trocknungsschwinden

Die Schwindreduzierer (SRA1 bis SRA5) verringerten je nach Wirkstoffzusammensetzung das Trocknungsschwinden von Zementstein im Alter von zwei Tagen bzw. von einem Jahr bei einer Lagerung im Klima 20 °C und 65 % relative Luftfeuchte (Klima 20/65) um rd. 30 % bis rd. 63 % bzw. um rd. 16 % bis rd. 42 %. Der auf dem Markt erhältliche Schwindreduzierer SRA3 und der

Wirkstoff SRA8 reduzierten das Trocknungsschwinden aller Zementsteine im Alter von einem Jahr unabhängig vom Wasserzementwert sowie unabhängig von der Zementart und -zusammensetzung relativ gleichmäßig um rd. 35 % bis rd. 42 %. Der Wirkstoff SRA7 verminderte das Trocknungsschwinden nur geringfügig und führte bei Zementsteinen mit den Portlandzementen Z1 und Z2 sowie dem Hochofenzement Z3, insbesondere bei einem Wasserzementwert  $w/z = 0,25$ , zu größeren Schwinddehnungen im Vergleich zu den Referenzproben ohne Schwindreduzierer.

Die größte Reduzierung des Schwindens bzw. die stärkste Wirkung der Schwindreduzierer trat stets im Alter von wenigen Tagen auf. Die schwindreduzierende Wirkung, bezogen auf das autogene und das Trocknungsschwinden, nahm je nach Zusatzmittel bzw. Wirkstoff mit zunehmendem Alter des Zementsteins in Abhängigkeit des Wasserzementwerts ab. So reduzierte der Wirkstoff SRA7 das Trocknungsschwinden von Zementstein mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,25$  im Alter von zwei Tagen im Klima 20/65 um rd. 40 %. Nach fast zwei Jahren wies die gleiche Probe eine rd. 20 % größere Schwinddehnung auf als die Referenzprobe. Bei Zementstein mit einem Wasserzementwert  $w/z = 0,42$  sank die schwindreduzierende Wirkung im gleichen Zeitraum von rd. 40 % auf rd. 10 % ab.

Die Wirkung der Schwindreduzierer war in gewissem Umfang von der relativen Luftfeuchte abhängig. Der handelsübliche Schwindreduzierer SRA3 und der Wirkstoff SRA8 zeigten mit abnehmender relativer Luftfeuchte im Bereich von rd. 66 % bis rd. 44 % relativer Luftfeuchte die größte Wirkung und reduzierten das Trocknungsschwinden von Zementstein um rd. 45 %. Der Wirkstoff SRA7 zeigte im gleichen Feuchtebereich nur eine geringe schwindreduzierende Wirkung von rd. 10 %. Bei relativen Luftfeuchten unter 44 % führten die Schwindreduzierer und Wirkstoffe zu keiner weiteren Schwindreduzierung.

### Porenlösung

Die untersuchten handelsüblichen Schwindreduzierer setzten die Oberflächenspannung der Porenlösung dauerhaft herab, teilweise um bis zu 60 %. Ab einem Alter von sieben Tagen veränderte sich die Oberflächenspannung der Porenlösung nicht mehr wesentlich. Die Wirkung einiger Schwindreduzierer nahm jedoch mit zunehmendem Alter erheblich ab. Aufgrund der Einbindung von Wasser infolge der fortschreitenden Hydratation stieg die Konzentration der Schwindreduzierer in der Porenlösung innerhalb von sieben Tagen von 3,5 M.-% bis 4,5 M.-% auf rd. 14 M.-% bezogen auf die Porenlösung an. Der Anstieg zeigt, dass die Moleküle der Schwindreduzierer nur unwesentlich an den Hydratationsprodukten des Zements adsorbiert bzw. in diese eingebunden werden. Die teilweise hohen Gehalte an Schwindreduzierer in der Porenlösung führten zu einer Verringerung der absoluten Gehalte an gelösten Alkalien (Verdünnung). Zusätzlich vermindern Schwindreduzierer die Löslichkeit von Salzen, sodass der Alkaligehalt der Porenlösung dadurch weiter verringert wurde.

### Hydratation, Porosität, Feuchte

Die Hydratation von Zement wurde bei praxisüblichen Dosierungen der Schwindreduzierer nur in geringem Maße verzögert. Die Verwendung der Schwindreduzierer führte bei jeweils gleichbleibender Gesamtporosität stets zu einer größeren Gelporosität (Porenradien  $< 0,01 \mu\text{m}$ ) und geringeren Kapillarporosität (Porenradien  $0,01 \mu\text{m}$  bis  $10 \mu\text{m}$ ) der Zementsteine. Dadurch wurde die kapillare Wasseraufnahme der Zementsteine deutlich vermindert. Zementsteine mit Schwindreduzierern wiesen eine um bis zu rd. 12 % höhere innere relative Feuchte auf als die jeweiligen Referenzproben ohne Schwindreduzierer. Bei Lagerung im Klima 20/65 gaben Zementsteine mit Schwindreduzierern bis zu rd. 25 % mehr Wasser an die Umgebung ab als Referenzproben ohne Schwindreduzierer.

### Druckfestigkeit

Trotz verminderter Kapillarporosität lag die Zementsteindruckfestigkeit im Alter von 28 bzw. 91 Tagen bei Verwendung einiger schwindreduzierender Zusatzmittel rd. 20 % bzw. 10 % unter der

von Referenzproben ohne Schwindreduzierer. Als mögliche Ursachen werden tribologische Effekte durch die Schwindreduzierer in der Porenlösung sowie die erhöhte innere relative Feuchte diskutiert und derzeit im FIZ untersucht.

### Schlussfolgerungen

Entgegen der bisherigen Annahmen, ist die Verminderung der Oberflächenspannung der Porenlösung durch die Schwindreduzierer nicht die alleinige Ursache für deren schwindreduzierende Wirkung. Vermutlich führt die verminderte Oberflächenspannung der Porenlösung in Kombination mit der Ausbildung eines feineren Porensystems zu höheren relativen Feuchtegehalten im Zementstein. Hierbei wird vermutlich der durch die Selbsttaustrocknung hervorgerufene Spaltdruck im Zementsteingefüge abgemindert. Dadurch wird das autogene Schwinden vermindert, insbesondere von Zementstein mit sehr geringen Wasserzementwerten. Auf der anderen Seite kann die durch Schwindreduzierer erhöhte Gelporosität unter Trocknungsbedingungen die Wirkung des Schwindreduzierers aufheben und teilweise zu größerem Trocknungsschwinden führen. Schwindreduzierer, die die Gelporosität nur geringfügig erhöhten, verminderten das Trocknungsschwinden von Zementstein deutlich.

Ob und wie die Schwindreduzierer unter Trocknungsbedingungen den Spaltdruck und somit das Trocknungsschwinden beeinflussen wird derzeit im FIZ untersucht. Dabei wird auch dem Einfluss der Oberflächenspannung und der Zusammensetzung der Porenlösung auf die Porosität des Zementsteingefüges nachgegangen.

*Das Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministers für Wirtschaft und Technologie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert.*

### 6 Summary

The influence of five commercially available shrinkage-reducing admixtures (SRA1 to SRA5) and of three of the active substances contained in them (SRA6: ethylene glycol, SRA7: propylene glycol, SRA8: propylene glycol ether) on the autogenous shrinkage and drying shrinkage of hardened cement paste was investigated at different relative air humidities in order to extend the understanding of the working mechanisms of shrinkage reducers. Samples of hardened cement paste were prepared from four different cements (two Portland cements, a blastfurnace cement and a Portland-limestone cement) with water/cement ratios of 0.25, 0.42 and 0.50, and were then stored for up to two years. The effects of the shrinkage reducers on the composition and surface tension of the pore solution, on the hydration, the porosity, the relative moisture content and the compressive strength of the hardened cement paste were examined. The results are summarized below.

#### Autogenous shrinkage

The shrinkage reducers (SRA1 to SRA5) reduced the autogenous shrinkage of hardened cement paste at 91 days by about 11 % to about 60 % when compared with mixes without shrinkage reducers. In some cases the mode of operation of the shrinkage reducer varied depending on the water/cement ratio, the type of cement and the cement composition. Shrinkage reducer SRA3 reduced the autogenous shrinkage of hardened cement paste at 91 days by about 36 % to about 56 %, largely independently of the water/cement ratio and of the type and composition of the cement. The active substances SRA7 and SRA8 contained in shrinkage reducer SRA3 acted very differently depending on the type of cement and the water/cement ratio. Active substance SRA7 reduced the shrinkage of hardened cement paste made with Portland cement Z1 and a water/cement ratio of 0.42 by about 60 % at 91 days, but with hardened cement paste made with blastfurnace cement Z3 the autogenous shrinkage was found to be about 23 % greater than that of the corresponding reference sample. During the same observation period the active substance SRA8 reduced the autogenous shrinkage of hardened cement paste made with Portland cement Z1 and with blastfurnace cement Z3 and a water/cement ratio of 0.42 % by

about 20 % and 66 % respectively. In some cases the samples made with SRA8 with a water/cement ratio of 0.50 showed a slightly larger shrinkage than the reference samples without shrinkage reducers.

#### Drying shrinkage

Depending on the composition of the active substances the shrinkage reducers (SRA1 to SRA5) reduced the drying shrinkage of hardened cement paste at two days and at one year by about 30 % to about 63 % and by about 16 % to about 42 % respectively during storage in a 20/65 climate (20 °C and 65 % relative air humidity). The commercially available shrinkage reducer SRA3 and the active substance SRA8 reduced the drying shrinkage of all the hardened cement pastes relatively uniformly by about 35 % to about 42 % at one year, regardless of the water/cement ratio and of the type and composition of the cement. The active substance SRA7 reduced the drying shrinkage only slightly and with hardened cement pastes made with Portland cements Z1 and Z2 and the blastfurnace cement Z3 led to larger shrinkages than the reference samples made without shrinkage reducers, especially at a water/cement ratio of 0.25.

The greatest reduction in shrinkage and the greatest effect of the shrinkage reducers always occurred at the age of a few days. The shrinkage-reducing effect, relative to the autogenous shrinkage and drying shrinkage, decreased with increasing age of the hardened cement paste as a function of the water/cement ratio and to an extent that depended on the admixture or the active substance. The active substance SRA7, for example, reduced the drying shrinkage of the hardened cement paste made with a water/cement ratio of 0.25 by about 40 % after two days in the 20/65 climate. After almost two years the same sample exhibited a drying shrinkage that was about 20 % larger than that of the reference sample. With hardened cement paste with a water/cement ratio of 0.42 the shrinkage-reducing effect in the same period dropped from about 40 % to about 10 %.

The effect of the shrinkage reducer was to a certain extent dependent on the relative air humidity. With decreasing relative air humidity in the range from about 66 % down to 44 % relative air humidity the normal commercial shrinkage reducer SRA3 and the active substance SRA8 exhibited the greatest effect and reduced the drying shrinkage of the hardened cement paste by about 45 %. In the same humidity range the active substance SRA7 exhibited only a slight shrinkage-reducing effect of about 10 %. The shrinkage reducers and active substances produced no further shrinkage reduction at relative air humidities below 44 %.

#### Pore solution

The normal commercial shrinkage reducers investigated lowered the surface tension of the pore solution permanently, in some cases by as much as 60 %. From an age of seven days there was no further substantial change in the surface tension of the pore solution. However, the effect of some shrinkage reducers fell considerably with increasing age. Because of the fixation of water caused by advancing hydration the concentration of the shrinkage reducer in the pore solution increased within seven days from 3.5 mass % to 4.5 mass % up to about 14 mass % relative to the pore solution. The increase shows that the molecules of the shrinkage reducers are adsorbed on the cement hydration products, or incorporated in them, to only an insignificant extent. The sometimes high levels of shrinkage reducer in the pore solution led to a reduction in the absolute levels of the dissolved alkalis (dilution). Shrinkage reducers also reduce the solubility of salts, with the result that the alkali content of the pore solution was reduced still further.

#### Hydration, porosity, moisture

At the addition levels of the shrinkage reducers normally used in practice the hydration of the cement was retarded to only a slight extent. At constant total porosity the use of the shrinkage reducers always led to a greater gel porosity (pore radius < 0.01 µm) and lower capillary porosity (pore radius 0.01 µm to 10 µm) of the hardened cement pastes. This reduced the capillary water absorption of

the hardened cement pastes to a significant extent. Hardened cement pastes made with shrinkage reducers have an internal relative moisture content that is up to about 12 % higher than that of the respective reference samples without shrinkage reducers.

During storage in a 20/65 climate hardened cement pastes made with shrinkage reducers released up to about 25 % more water to the surroundings than the reference samples without shrinkage reducers.

### Compressive strength

In spite of the reduced capillary porosity, with some shrinkage reducing admixtures the compressive strengths of the hardened cement paste at 28 and 91 days were about 20 % and 10 % respectively below those of the reference samples without shrinkage reducers. Tribological effects caused by the shrinkage reducers in the pore solution and the increased relative internal moisture content are being discussed as possible reasons, and are currently being examined at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry).

### Conclusions

Contrary to former assumptions the reduction in surface tension of the pore solution by shrinkage reducers is not the sole cause of their shrinkage-reducing effect. The reduced surface tension of the pore solution combined with the formation of a finer pore system probably leads to higher relative moisture contents in the hardened cement paste. This presumably reduces the disjoining pressure in the microstructure of the hardened cement paste caused by self-drying, which reduces the autogenous shrinkage, especially in hardened cement pastes with very low water/cement ratios. On the other hand the gel porosity, which is increased by shrinkage reducers, can neutralize the effect of the shrinkage reducer under drying conditions and in some cases lead to greater drying shrinkages. The drying shrinkage of hardened cement paste is significantly reduced by those shrinkage reducers that cause only a slight increase in the gel porosity.

Whether and how the shrinkage reducers influence the disjoining pressure, and therefore the drying shrinkage, under drying conditions is currently being investigated at the FIZ. The influence of the surface tension and the composition of the pore solution on the porosity of the microstructure of the hardened cement paste is also being examined.

*This research project was supported by the AiF ("Otto von Guericke" Federation of Industrial Research Associations) from funds provided by the Federal Minister for Commerce and Technology.*

### Literatur

[1] Grube, H.: Definition der verschiedenen Schwindarten, Ursachen, Größe der Verformungen und baupraktische Bedeutung. *beton* 53 (2003) H. 12, S. 598–603

[2] Wittmann, F. H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1977) H. 290, S. 43–101

[3] Grube, H.: Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 52, Beton-Verlag, Düsseldorf 1991

[4] Norm DIN 4227-1 1988-07. Spannbeton: Teil 1: Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung

[5] Thielen, G.; Alonso, M. T.: Festigkeitsentwicklung und Schwinden von hochfestem Beton. *Massivbau* 2002, Forschung, Entwicklung und Anwendung, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf 2002, S. 159–183

[6] Baroghel-Bouny, V.; Mainguy, M.; Lassabatere, T.; Coussy, O.: Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials. *Cement and Concrete Research* 29 (1999) No. 8, S. 1225–1238

[7] Jensen, O. M.: Thermodynamic limitation of self-dessication. *Cement and Concrete Research* 25 (1995) No. 1, S. 157–164

[8] Powers, T. C.; Brownard, T. L.: Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. *Journal of the American Concrete Institute* 18 (1946) No. 4, S. 469–504

[9] Barcelo, L.; Boivin, S.; Acker, P.; Toupin, J.; Clavoud, B.: Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanisms. *Concrete Science and Engineering* (2001) No. 10, S. 85–91

[10] Hua, C.; Acker, P.; Ehrlicher, A.: Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research* 25 (1995) No. 7, S. 1457–1468

[11] Persson, B.: On the under-pressure in the pore water of sealed high performance concrete, HPC. *Concrete Science and Engineering* (2000) No. 8, S. 213–221

[12] Tazawa, E.; Miyazawa, S.: Influence of constituents and composition on autogenous shrinkage of cementitious materials. *Magazine of Concrete Research* 49 (1997) No. 178, S. 15–22

[13] Alonso, M. T.: *Hochfester Beton*. *beton* 52 (2002) H. 11, S.563–567 und H. 12, S. 621–624

[14] Baroghel-Bouny, V.; Kheirbek, A.: Effect of mix-parameters on autogenous deformation of cement pastes – Microstructural interpretation. *Proceedings of the international RILEM Workshop, Paris 2000*, S. 115–141

[15] Persson, B.: Eight-year exploration of shrinkage in high-performance concrete. *Cement and Concrete Research* 32 (2002) No. 8, S. 1229–1237

[16] Aitzin, P. C.: *Nachbehandlung von Hochleistungsbeton zur Minimierung der frühen Rissbildung*. *Beton- und Stahlbetonbau* 97 (2002) H. 6, S. 292–296.

[17] Berke, N.; Dallaire, M.; Simpson, B.: Performance of shrinkage reducing admixture. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> European ready mixed concrete congress, Lissabon 1998*, S. 904–913

[18] Shah, S. P.; Karaguler, M. E.; Sarigaphuti, M.: Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete. *ACI Materials Journal* 89 (1992) No. 5+6, S. 289–295

[19] Sato, T.; Goto, T.; Sakai, K.: Mechanism for reducing drying shrinkage of hardened cement by organic additives. *Review of the general meeting, technical session* (1983), S. 52–55

[20] Bentz, D. P.; Geiker, M. R.; Hansen, K. K.: Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research* 31 (2001) No. 7, S. 1075–1085

[21] Nmai, C.; Tomita, R.; Hondo, F.; Buffenbarger, J.: Shrinkage-reducing admixtures. *Concrete International* 20 (1998) No. 4, S. 31–37

[22] Shoya, M.; Sugita, S.; Sugawara, T.: Improvement of drying shrinkage and shrinkage cracking of concrete by special surfactants. *Admixtures for concrete. Improvements of properties. Proceedings of the international RILEM-Symposium, Barcelona 1990*, S. 484–495

[23] Weiss, W.; Borichevsky, B.; Shah, S.: The influence of a shrinkage reducing admixture on the early-age shrinkage behaviour of high performance concrete. *5<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High Strength Concrete/High Performance Concrete, Sædefjord 1999*, S. 1339–1350

[24] Weiss, W.; Schießl, A.; Yang, W.; Shah, S.: Shrinkage cracking potential, permeability and strength of HPC: Influence of w/c, silica fume, latex and shrinkage reducing admixtures. *International Symposium of High Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke 1998*, S. 349–365

[25] Weiss, W.: Prediction of early-age shrinkage cracking in concrete elements. *Dissertation, Northwestern Univ., Evanston 1999*

[26] Balogh, A.: New Admixture combats concrete shrinkage: At last, a liquid admixture that's designed to reduce materials shrinkage due to drying. *Concrete Construction* (1996) No. 7, S. 546–551

[27] Bentur, A.; Berke, N. S.; Dallaire, M. P.; Durning, T. A.: Crack mitigation effects of shrinkage reducing admixtures. *Nawy, E. G. (Ed.): Design and construction practices to mitigate cracking: National Symposium of the American Concrete Institute (ACI International SP 204), San Diego 2001*, S. 155–170

[28] Cope, B. L.; Ramey, G. E.: Reducing Drying Shrinkage of Bridge-Deck Concrete. *Concrete International* 23 (2001) No. 8, S. 76–82

[29] Folliard, K. J.; Berke, N. S.: Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture. *Cement and Concrete Research* 27 (1997) No. 9, S. 1357–1364

[30] Fujiwara, H.; Tomita, R.; Shimoyama, Y.: A study of frost resistance of concrete using an organic shrinkage-reducing agent. *3<sup>rd</sup> International Conference on Durability of Concrete, Nice 1994*, American Concrete Institute, ACI Publication 145, Detroit 1994, S. 643–655

[31] Mora, J.; Martin, M. A.; Gettu, R.; Aguado, A.: Studio della fessurazione per ritiro plastico nel calcestruzzo e influenza delle fibre e di additivi per la riduzione del ritiro *Industria Italiana del cemento* 75 (2001) No. 11, S. 828–837

[32] Folliard, K. J.; Berke, N. S.: Properties of high-performance concrete containing shrinkage reducing admixture. *Cement and Concrete Research* 27 (1997) No. 9, S. 1357–1364

[33] Buffenbarger, J. K.; Nmai, C. K.; Miltenberger, M. A.: Improving Watertightness of Reinforced Concrete Structures With Shrinkage-Reducing Admixtures. *Design and construction practices to mitigate cracking: National Symposium of the American Concrete Institute (ACI International SP 204), San Diego 2001*, S. 217–236

[34] Ai, H.; Young, F. J.: Mechanism of shrinkage reduction using a chemical admixture. *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Volume 3, Göteborg 1997*, 3iii018, 8 S.

[35] Gettu, R.; Roncero, J.; Martín, M.Á.: Evaluation of the long-term behavior of concretes incorporating a shrinkage reducing admixture. *Report C3885/1, Barcelona 2002* [36] Berke, N. S.; Dallaire, M. P.; Hicks, M. C.; Kerker, A.: New developments in shrinkage-reducing admixtures. Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. *Proceedings 5<sup>th</sup> CANMET/ACI International conference (ACI International SP 173), Rome 1997*, S. 971–997

[37] Bigley, C.: Controlling shrinkage in concretes mixes. *Concrete* (1999) April, S. 38–39

[38] Wittmann, F. H.; Trausch, L.: Hygromechanisches Verhalten von zementgebundenen Werkstoffen: Forschungsbericht des Instituts für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion. *Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich 1999*

[39] Brooks, J. J.; Jiang, X.: The influence of chemical admixtures on re-stained drying shrinkage of concrete. Superplasticizers and other chemical admixtures in concrete. *Proceedings 5<sup>th</sup> CANMET/ACI International conference (ACI International SP 173), Rome 1997*, S. 249–265

[40] Bunke, N.: Prüfung von Beton. Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 422*, Beuth Verlag, Berlin 1991