

Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwind- reduzierer

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 128

bast

Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwind- reduzierer

von

Rolf Breitenbücher
Joose Penttilä
Christoph Schulte-Schrepping

Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Baustofftechnik

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 128

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A – Allgemeines
B – Brücken- und Ingenieurbau
F – Fahrzeugtechnik
M – Mensch und Sicherheit
S – Straßenbau
V – Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 – 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 08.0231/2013/LGB
Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer

Fachbetreuung

Artur Gitzen

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 – 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 – 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 – 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-426-5

Bergisch Gladbach, Januar 2019

Kurzfassung – Abstract

Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer

Fahrbahndecken aus Beton werden neben den Verkehrslasten auch durch lastunabhängige Einwirkungen beansprucht. Hierzu zählen neben den thermischen Verformungen vor allem Schwindverformungen. Überschreiten die resultierenden Zwangsspannungen die Zugfestigkeit des Betons, kann es zu einer Rissbildung kommen. Daher werden i. d. R. in einem Abstand von rd. 5 m Fugen angeordnet, welche die Zwangsspannungen wirksam reduzieren.

Zur Reduktion von Zwangsspannungen infolge Schwindverformungen stehen seit geraumer Zeit sog. Schwindreduzierer (SRA) zur Verfügung, durch die sowohl die Schwindverformungen im jungen Alter als auch das Trocknungsschwinden vermindert werden können.

Ziel war es, zu eruieren, inwieweit durch SRA Schwindverformungen und damit potenzielle Risse effektiv vermindert werden können. Dazu waren insbesondere Schwinduntersuchungen sowohl im frischen/erhärtenden Beton als auch im späteren Alter am erhärteten Beton durchzuführen. Daneben war auch zu untersuchen, inwieweit die Frisch- und Festbetoneigenschaften potenziell beeinflusst werden.

Mit den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass SRA insbesondere die sich frühzeitig einstellenden Schwindverformungen reduzieren können. Besonders positiv wirkt sich dies auf die Vermeidung von Frühschwindrissen in den ersten Tagen aus. Die Schwindreduzierung war generell in der Anfangsphase stets größer und nahm nach 187 Tagen auf Werte zwischen 30 bis 50 % ab. Inwieweit das über Jahre ablaufende Trocknungsschwinden reduziert wird, kann aus diesen bis lediglich 6 Monate umfassenden Untersuchungen nicht abgeleitet werden. Die Frischbetoneigenschaften wurden durch die SRA nicht beeinflusst. Ebenso zeigten sich keine nennenswerten Änderungen in der Druckfestigkeit, der Spaltzugfestigkeit und im statischen Elastizitätsmodul. Hingegen zeigte sich, dass das Mikroluftporensystem in Betonen mit hohem Frost-Taumittelwi-

derstand durch die Zugabe von SRA auf Basis von Glykol und Polyglykol nachteilig beeinflusst werden kann.

Reducing of shrinkage-deformations of concrete pavements through new shrinkage-reducing agents

In addition to traffic-related stresses, concrete pavements primarily experience load-independent stresses. These are thermal deformations as well as shrinkage induced deformations. If these restraint stresses exceed the tensile strength of the concrete, cracks occur. Therefore, usually at a distance of approx. 5 m joints are installed, which effectively reduce the restraint stresses.

For some time, so-called shrinkage reducing agents (SRA) have been available for reducing restraint stresses as a result of shrinkage, thereby reducing both, the shrinkage deformations at a young age as well as the drying shrinkage.

The aim was to determine, to what extent shrinkage deformations and thus potential cracks can be effectively reduced with SRA. In detail, shrinkage tests in fresh/hardened concrete as well as later at a higher age were carried out on hardened concrete. In addition, it had to be examined to what extent the other concrete properties are potentially affected.

These investigations have shown that SRA can reduce shrinkage deformations, in particular those occurring at an early stage. This has a distinctly positive effect on the prevention of early shrinkage-cracks during the first few days. The shrinkage-reduction was generally larger in the initial phase and then decreased to values between 30 and 50% after 187 days. The extent to which the drying shrinkage is also reduced over long periods cannot be deduced from these tests, which lasted only six months. The fresh concrete properties were not affected by the use of SRA. Furthermore, there were no significant changes in compressive strength, splitting tensile strength and in the modulus of elasticity. On the other hand, it was observed, that the micro air void system in concretes with high freeze-thaw-resistance can be adversely affected by the addition of SRA on the basis of glycol and polyglycol.

Summary

Reducing of shrinkage-deformations of concrete pavements through new shrinkage-reducing agents

1 Research aim

In addition to traffic-related stresses, concrete pavements primarily experience load-independent stresses. These are thermal deformations as well as shrinkage-induced deformations, which lead to corresponding restraint stresses in the case of restricted deformations. If these restraint stresses exceed the tensile strength of the concrete, cracks occur. To counteract this cracking in concrete pavements, usually at a distance of approx. 5m joints are installed, which – if cut in time – effectively reduce the restraint stresses.

For some time, so-called shrinkage reducing agents (SRA) have been available as concrete admixtures for reducing restraint stresses as a result of shrinkage, thereby reducing both, the shrinkage deformations at a young age (autogenous shrinkage) as well as the drying shrinkage. Therefore, the resulting restraint stresses during hardening can be reduced.

The aim of this research project was to determine, to what extent shrinkage deformations and thus potential cracks can be effectively reduced with shrinkage-reducing agents under the given particular boundary conditions in concrete pavements. In detail, shrinkage tests in fresh/hardened concrete

as well as later at a higher age were carried out on hardened concrete with and without these additives. In addition it had to be examined to what extent the other relevant concrete properties, such as compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and freeze-thaw resistance are potentially affected by those SRA.

2 Approach

For investigations within this research project, 12 concretes were prepared and tested in total. These concretes were all designed as a common exposed aggregate concrete. In doing so, two cements of the same cement type and strength class (CEM I 42.5 N) but with different Na₂O-equivalent were used. All concretes were produced as air-entrained concretes. As aggregates sand (0/2mm) and basalt chippings (2/8mm) were used for every concrete. The consistence of concrete was uniformly set according to the consistence class C1/C2. As shrinkage reducing agents two fluent admixtures on the basis of glycol (SRA 1) or polyglycol (SRA 2) and one product on the basis of suspended or pre-swollen super-absorbing polymers (SRA 3) were used. In Table 1 the respective concrete variations and amounts of SRA are listed.

3 Results

With regard to the properties of fresh concrete, no remarkable changes could be detected due to the addition of SRA.

Concrete	Cement	SRA			amount [M.-%]			
		I (Glykol)	II (Polyglykol)	III (SAP)	0	1	2,5	5
A-Ref	A				x			
A-1	A	x				x		
A-2	A	x					x	
A-3	A	x					x	
A-4	A	x					x	
A-5	A		x			x		
A-6	A		x				x	
A-7	A			x			x	
A-8	A			x				x
B-Ref	B				x			
B-1	B	x				x		
B-2	B	x					x	

Table 1: material variations (amounts of SRA)

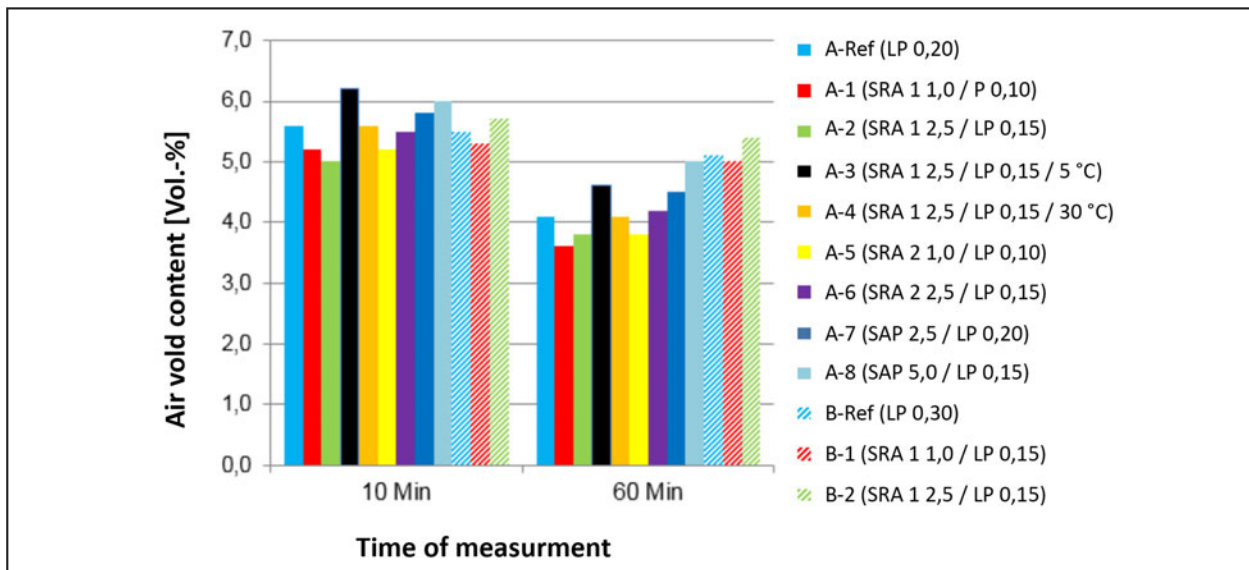


Fig. 1: Air void content in fresh concrete

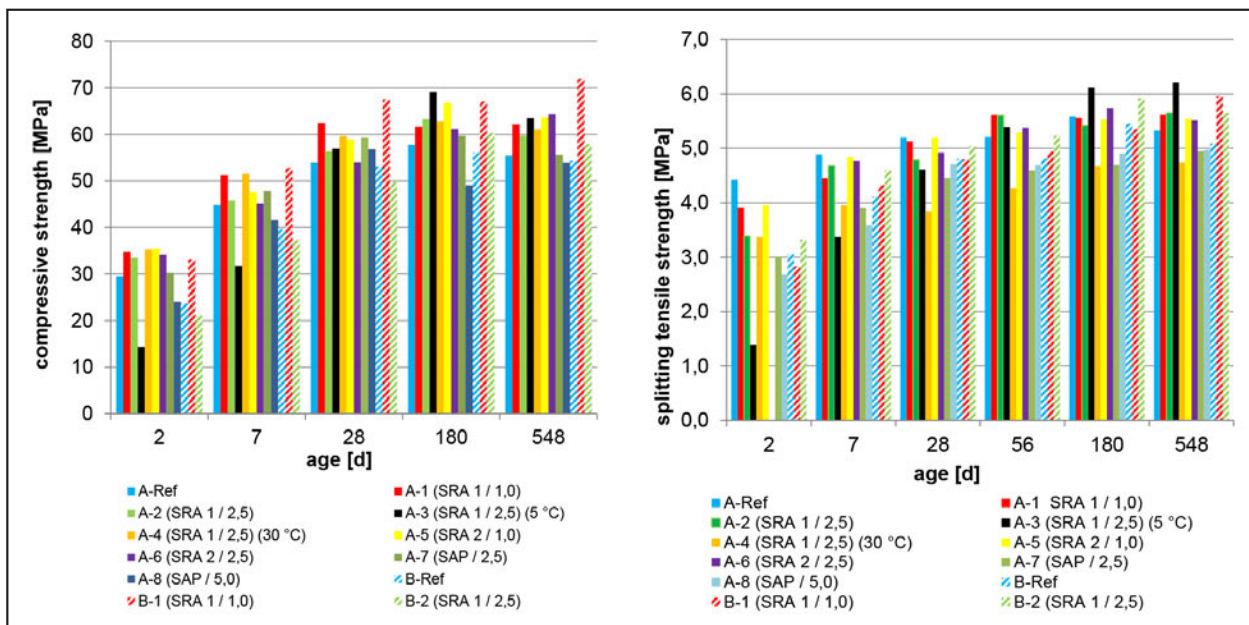


Fig. 2: Left: Compressive strength up to 548 d; Right: Splitting tensile strength up to 548 d

- The required consistency of the fresh concrete in the range of C1/C2 was achieved by all variants, also all fresh concretes stiffened within the usual extent. The consistency as well as the stiffening were not significantly affected by the SRA.
- The air content in the fresh concrete 10 minutes after production was consistently between 5.0 and 6.0% by volume. Within the next 50 minutes – as usual in practice – a slight drop in air content was observed (Figure 1). The addition of SRA did not affect the air void content measured in the fresh concrete.
- With regard to the properties of hardened concrete, the following was determined:
 - The compressive strength (including early strength), the splitting tensile strength and the modulus of elasticity were not significantly influenced by the SRA (Figure 2).
 - On the other hand, significantly less favourable micro air void parameters were found in the tested concretes with SRA based on glycol/polyglycol than in the corresponding reference concretes (Table 2). While the total air content did not differ significantly, the micro air void content A_{300} was partly significantly lower for the

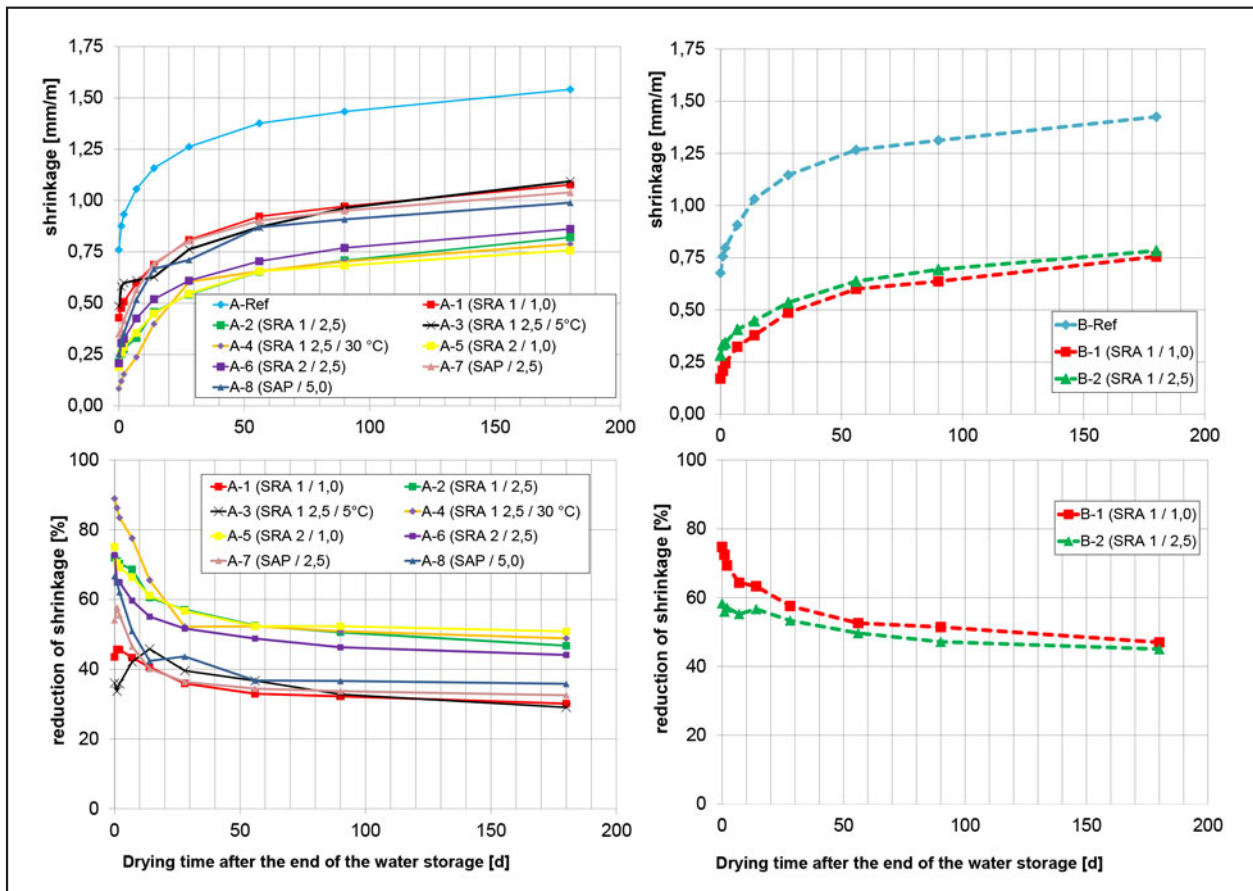


Fig. 3: shrinkage deformations on concrete with cement A (left) and cement B (right) including the early shrinkage

concretes with SRA, mostly even less than the required minimum value ($\geq 1,8$ vol.-%). The distance factor \bar{L} was significantly higher than in the reference concrete, mostly even above the maximum permissible value ($\leq 0,20$ mm).

- Accordingly, an unfavourable freeze-thaw resistance was found for the concretes with SRA in some cases as compared to the associated reference concretes. However, for the concretes with SAP the amount of mass loss in the CDF test could be reduced by approx. 15%, which can be linked to the micro air void system, which has been positively modified by the SAP.
- The shrinkage deformations of the concretes without SRA (reference concretes) after 187 days are in the range of approx. 1.5mm/m. The addition of SRA reduced this to approx. 0.75mm/m to 1.1mm/m, which corresponds to a shrinkage reduction of approx. 30% to 50%. A (slight) influence of the used cement was also shown.
- The shrinkage reduction in the initial phase was always higher and then decreased to the stated values within the course of measurement. It can

Concrete	Air void [Vol.-%]	A_{300} [Vol.-%]	\bar{L} [mm]
A-Ref	4,28	1,42	0,21
A-2 (SRA 1/2,5)	4,88	1,69	0,29
A-5 (SRA 2/1,0)	4,57	1,23	0,33
A-6 (SRA 2/2,5)	4,06	0,78	0,32
A-8 (SAP 5,0)	5,30	3,58	0,13
B-Ref	6,06	2,83	0,13
B-2 (SRA 1/2,5)	5,21	2,27	0,19

Table 2: Micro air void characteristics in hardened concrete

be inferred from this that the shrinkage reducing effect of the SRA shows itself especially during the early shrinkage and in the first days of drying of the hardened concrete. The shrinkage deformation had not reached a constant level after 187 days, so it cannot be excluded that the effect of the SRA for further drying is reducing itself even further.

- By the addition of SRA 1 based on glycol, the shrinkage deformations of the concrete (with ce-

ment A) at the same dosage (1.0 wt.-%/c.) were reduced less than by the addition of SRA 2 based on polyglycol.

- In the case of concrete with cement A (Na_{20} -equivalent: 0.75% by weight), the shrinkage deformations were, as expected, reduced more with an increasing dosage of one and the same SRA. When using SRA 2, the shrinkage reduction for both additions is approximately the same when taking into account the early shrinkage. For the concretes with cement B (Na_2O -equivalent: 0.40% by weight), the shrinkage deformations with an addition of 1.0% by weight, referred to the cement content, on SRA 1 were at the same level or even slightly lower than for an amount added of 2.5% by weight, referred to the cement content, of the same product. From this, it can be deduced that the optimum amount of SRA added – as also known from other concrete additives – is influenced by the chemical composition.
- The addition of 2.5% and 5% by weight of SAP, respectively referred to the cement content, resulted for concrete with cement A in a comparable reduction of the shrinkage (35% to 40%) as compared to the SRA based on glycol or polyglycol after 187 days.
- Furthermore, it became clear, that the shrinkage reduction is influenced by the production and storage temperature. In comparison of concrete A-2 (2.5 wt.-% SRA 1 at 20°C) and concrete A-4 (2.5 wt.-% SRA 1 at 30°C) only a small difference in the shrinking deformation and thus also in shrinkage reduction is shown. In contrast, in concrete A-3 (2.5 wt.-% SRA 1 at 5°C) compared to the 20°C concrete A-2 an approx. 0.2mm/m higher shrinkage was detected, which results in a 20% lower shrinkage reduction.
- The effect of the SRA could be seen most clearly during the examinations of restrained shrinkage. Within the observation period of 7 hours, only 3 to 7% of cracks occurred (assessed by the respective crack opening area) compared with the reference concretes without SRA (Fig. 4). This effect is primarily due to the reduction of the surface tension of water in the case of the use of SRA based on glycol/polyglycol, since

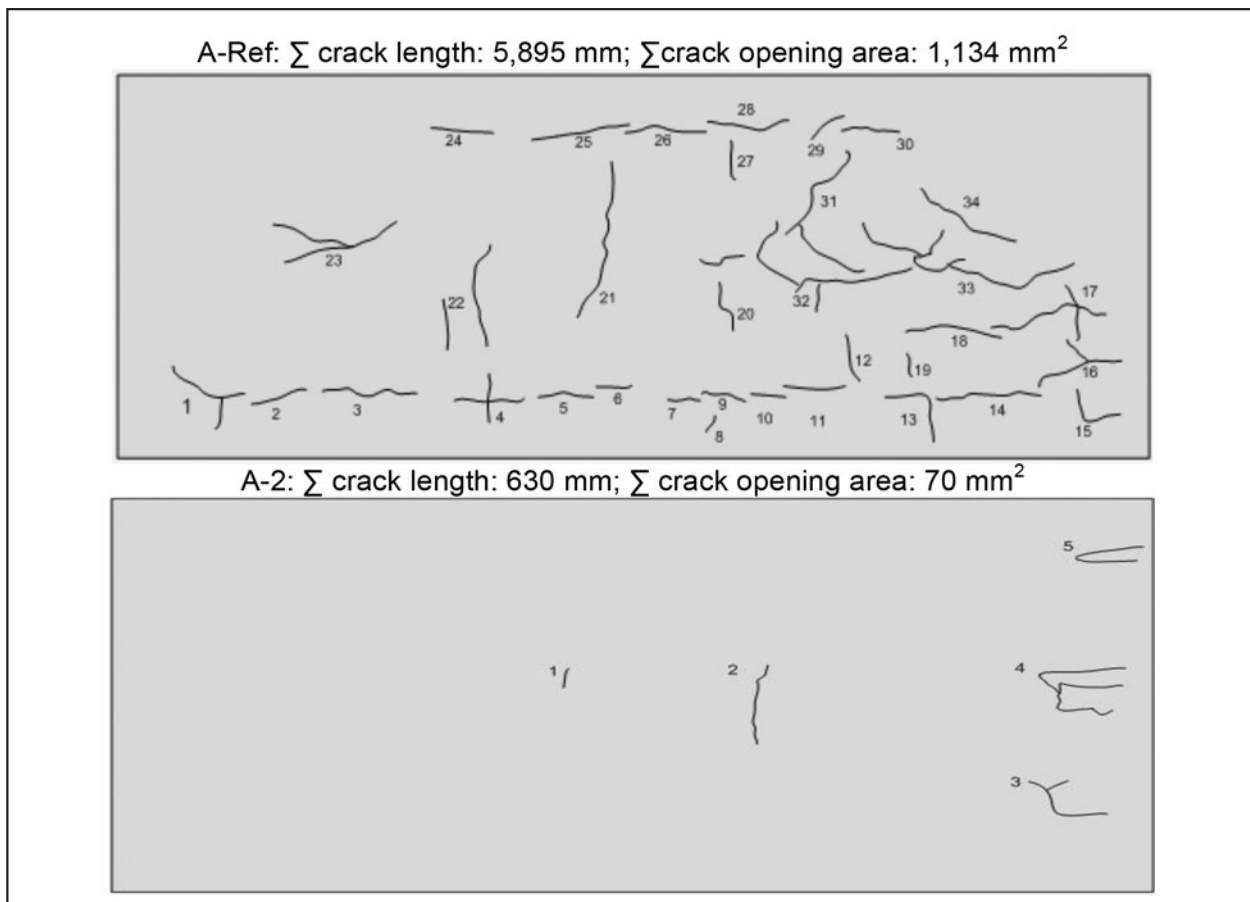


Fig. 4: crack state of the slabs (1600 x 600 x 80 mm³) A-Ref (top) and A-2 (bottom)

the parallel determined water losses between the concretes with/without SRA differed significantly less. Equally, positive effects on the crack formation during the restrained shrinkage were found when using the SAP (addition: 5,0 wt.-%/c). No cracks could be detected during the observation period.

These investigations have shown that shrinkage reducing agents can reduce shrinkage deformations, in particular those occurring at an early stage. This has a distinctly positive effect on the prevention of early shrinkage-cracks during the first few days. The shrinkage-reduction was generally larger in the initial phase and then decreased to values between 30 and 50% after 187 days. The extent to which the drying shrinkage that occurs over the years is also reduced over long periods cannot be deduced from these tests, which lasted only six months.

The fresh concrete properties were not affected by the use of SRA. Furthermore, there were no significant changes in compressive strength, splitting tensile strength and in the modulus of elasticity due to an addition of SRA to the concrete.

On the other hand, it was observed, that the micro air void system in concretes with high freeze-thaw-resistance can be adversely affected by the addition of SRA on the basis of glycol and polyglycol.

Inhalt

1	Problemstellung und Zielsetzung . . .	13	4.2.5	Luftporenkennwerte	31
2	Allgemeine Grundlagen und Stand der Technik	13	4.2.6	Frost-Taumittel-Widerstand	33
2.1	Schwinden von Beton.	13	4.2.7	Schwinden	33
2.2	Einflüsse auf das Schwinden von Beton	15	4.2.8	Behindertes Frühschwinden.	39
2.2.1	Einflussgrößen	15	5	Zusammenfassung	41
2.3	Schwindreduzierende Zusatzmittel . . .	18	Literatur	44	
2.3.1	Aufbau	18	Normen	46	
2.3.2	Wirkungsweise schwindreduzierender Zusatzmittel	19	Bilder	47	
2.3.3	Zusammenfassung.	23	Tabellen	48	
2.4	Betone für Fahrbahndecken.	24			
2.5	Beanspruchungen von Fahrbahndecken aus Beton.	25			
2.5.1	Lastunabhängige Beanspruchungen: Temperatur und Feuchte	25			
3	Versuchsdurchführung	26			
3.1	Projektziel.	26			
3.2	Ausgangsstoffe.	26			
3.3	Betonzusammensetzung	26			
3.4	Mischregime.	26			
3.5	Untersuchungen.	26			
3.5.1	Untersuchungsmatrix	26			
3.5.2	Frischbetonuntersuchungen.	28			
3.5.3	Festbetonuntersuchungen	28			
4	Ergebnisse	30			
4.1	Frischbetonuntersuchungen.	30			
4.1.1	Luftgehalt im Frischbeton	30			
4.2	Festbetonuntersuchungen	30			
4.2.1	Druckfestigkeit	30			
4.2.2	Frühfestigkeit	31			
4.2.3	Spaltzugfestigkeit.	31			
4.2.4	Statischer E-Modul.	31			

1 Problemstellung und Zielsetzung

Fahrbahndecken aus Beton werden neben den überrollenden Verkehrslasten auch durch lastunabhängige Einwirkungen beansprucht. Hierzu zählen neben den thermischen Verformungen vor allem Schwindverformungen, die bei Verformungsbehinderung zu entsprechenden Zwangsspannungen führen. Überschreiten diese Zwangsspannungen die Zugfestigkeit des Betons, kann es zu einer Rissbildung kommen. Um dieser Rissbildung entgegenzuwirken, werden in Betonfahrbahndecken i. d. R. in einem Abstand von rd. 5 m Fugen angeordnet, die – werden sie rechtzeitig geschnitten – die Zwangsspannungen wirksam reduzieren.

Zur Reduktion von Zwangsspannungen infolge Schwindverformungen stehen seit geraumer Zeit sog. Schwindreduzierer (SRA) als Betonzusatzmittel zur Verfügung, durch die sowohl die Schwindverformungen im jungen Alter (autogenes Schwinden) als auch das Trocknungsschwinden und die daraus resultierenden Zwangsspannungen während der Erhärtung vermindert werden können. Noch offen ist, inwieweit die Schwindverformungen dabei auch langfristig (über Jahre hinweg) reduziert bleiben.

Ebenso ist unklar, inwieweit mit solchen schwindreduzierenden Betonzusatzmitteln Schwindverformungen und damit potenzielle Risse in Verkehrsflächen aus Beton unter deren besonderen Randbedingungen effektiv vermindert werden können. Dies zu eruieren, ist das maßgebliche Ziel dieses Forschungsprojekts. Dabei sind auch potenzielle Auswirkungen auf die weiteren maßgebenden Betoneigenschaften wie z. B. Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Elastizitätsmodul und Frost-Taumittel-Widerstand einzubeziehen.

Gelegentlich wurde im Zusammenhang mit dem Einsatz von Schwindreduzieren bei Fahrbahndecken aus Beton angeführt, dass bei verminderten Schwindverformungen der Fugenabstand zwischen einzelnen Platten vergrößert werden könnte, was technische und ökonomische Vorteile (geringerer Wartungsaufwand, reduzierte Lärmemission) mit sich bringen würde. Dem ist jedoch von vorne herein entgegen zu halten, dass sich der Fugenabstand primär aus den thermisch bedingten Zwangsspannungen im jungen Alter (abfließende Hydratationswärme, erste Tag-Nacht-Abkühlung) ableitet. Daher müssen die Fugen auch schon sehr frühzeitig, d. h.

mindestens innerhalb des ersten Tages geschnitten werden. Ansonsten ist bereits in dieser Phase mit einer ersten wilden Rissbildung zu rechnen. Und diese erste Maßnahme bestimmt letztendlich auch den Fugenabstand. Dennoch: Wenn durch Schwindreduzierer die Schwindverformung und in Folge Schwindrisse in Fahrbahndecken aus Beton dauerhaft vermindert werden können, lassen sich daraus langfristig Vorteile für die Fahrbahn als Ganzes, insbesondere im Hinblick auf deren Dauerhaftigkeit ableiten.

2 Allgemeine Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Schwinden von Beton

Als Schwinden von Beton werden lastunabhängige äußere Volumenänderungen des Baustoffs bezeichnet, die durch die Veränderung des Wasserhaushalts in den Poren des frischen und erhärtenden sowie erhärteten Betons verursacht werden [1]. Diese Volumenänderungen können durch äußere Umwelteinflüsse, aber auch durch innere Austrocknung ausgelöst werden. Das Schwindmaß des Betons hängt vor allem von der Feuchte und Temperatur der umgebenden Luft, den Bauteilabmessungen und der Zusammensetzung des Betons ab. Das Schwinden findet bei Normalbetonen praktisch nur in der Mörtelmatrix bzw. im Zementstein statt, weshalb die Schwindverformungen mit steigendem Zementleimgehalt zunehmen [1] [2].

- Vom Grundsatz her wird zwischen vier verschiedenen Arten von Schwinden differenziert:
- Kapillar- bzw. Frühschwinden
- Chemisches Schwinden bzw. autogenes Schwinden
- Trocknungsschwinden
- Karbonatisierungsschwinden

Das chemische Schwinden und das Karbonatisierungsschwinden sind bei herkömmlichen Betonen von untergeordneter Bedeutung.

Kapillar- bzw. Frühschwinden

Infolge Kapillar- bzw. Frühschwinden können sich bereits wenige Stunden nach dem Betoneinbau Risse in freien, d. h. nicht geschalteten Betonoberflächen bilden. In diesem Alter befindet sich der Beton gerade im Übergang vom plastischen in den festen

Zustand, d. h. er hat noch keine nennenswerte Festigkeit. Daher bilden sich diese Risse infolge des Kapillar- bzw. Fröhschwindens relativ breit (z. T. > 1 mm) aus (Bild 2–1). Gleichzeitig beschränkt sich ihre Tiefe in der Regel auf nur wenige cm. Hintergrund hierzu ist, dass sich zunächst ein dünner Wasserfilm auf der frischen Betonoberfläche bildet. Bei ungünstiger Witterung (warme, trockene Luft, leichter Wind) und ohne besondere Schutzvorkehrungen verdunstet dieses Wasser sehr schnell, wodurch sich in der Randzone ein kapillarer Unterdruck einstellt (Bild 2–2). Wenn diese kapillaren Spannungen nicht mehr aufgenommen werden können, reißt der noch frische Beton und der Kapillardruck fällt schlagartig ab.

Sowohl das Fröhschwinden, als auch die mit einem frühzeitigen Wasserverlust einhergehende Beeinträchtigung der Hydratation kann durch besondere Nachbehandlungsmaßnahmen verhindert bzw. minimiert werden. Hierzu zählen nach [3] u. a.:

- Abdecken mit Folie,
- Aufbringen von wasserspeichernden Abdeckungen,
- Aufbringen von flüssigen Nachbehandlungsmitteln, sowie
- das Besprühen mit Wasser.



Bild 2–1: Durch Fröhschwinden hervorgerufene Risse im Beton

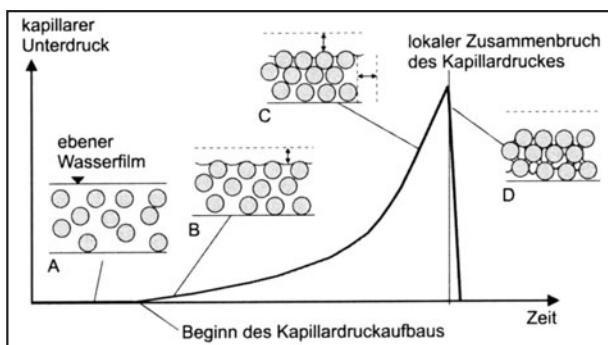


Bild 2–2: Entwicklung des Kapillardrucks infolge Verdunstung [50]

Des Weiteren kann das Fröhschwinden durch die Betonzusammensetzung beeinflusst werden. Zum einen bewirkt die Gesteinskörnung durch ihre Steifigkeit eine Verformungsbehinderung [4]. Zum anderen erläutert WITTMANN in [5] den Zusammenhang zwischen dem w/z-Wert des Betons und einer daraus resultierenden Fröhschwindverformung (Bild 2–3).

Es ist zu erkennen, dass die Fröhschwindverformung bei einem w/z-Wert von rd. 0,58 ihr Maximum erreicht. Im Vergleich dazu ist bei einem niedrigeren w/z-Wert, z. B. von rund 0,4, oder andererseits bei einem deutlich höheren w/z-Wert, z. B. von 0,7 eine erheblich geringere Fröhschwindverformung feststellbar. Bei niedrigem w/z-Wert stellt sich aufgrund des reduzierten Wassergehalts ein vergleichsweise geringes Fröhschwinden ein, bei sehr hohem w/z-Wert neigt der Beton zu relativ starkem Bluten, sodass sich über lange Zeit ein Wasserfilm auf der Betonoberfläche befindet, was den Aufbau von kapillaren Spannungen verhindert bzw. verzögert.

Chemisches bzw. autogenes Schwinden

Bei der Hydratation wird Wasser im Zementstein gebunden, welches, sobald es als Hydrat gebunden ist, eine höhere Dichte aufweist als in freier Form [4]. Die damit einhergehende Volumenverringerng wird als chemisches Schwinden oder autogenes Schwinden bezeichnet. Mit fortschreitender Hydratation kommt es infolge dieses Effekts zu einer inneren Austrocknung des Betons. Die zu Beginn der Hydratation noch wassergefüllten Poren entleeren

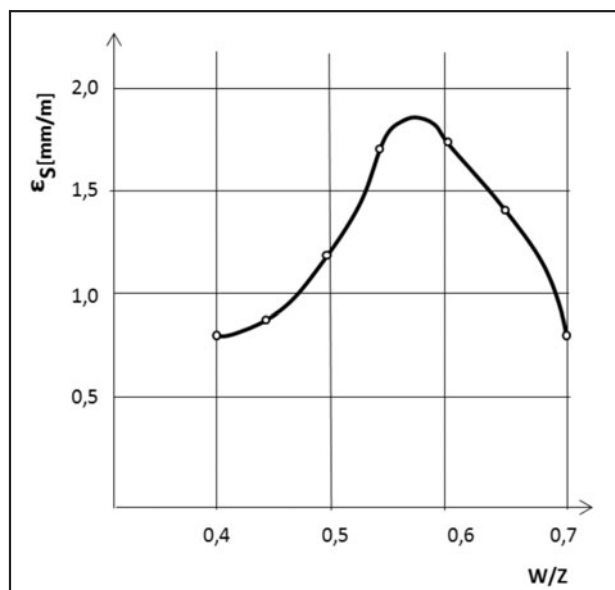


Bild 2–3: Maximal erreichte Fröhschwindverformung als Funktion des w/z-Wertes [5]

sich quasi fortschreitend. Bei Betonen mit w/z-Werten unter etwa 0,40 (z.B. Hochleistungsbetone) verbleiben bei der Hydratation mehr oder weniger keine Kapillarporen in der Matrix. Infolge des chemischen/autogenen Schwindens baut sich daher im Betongefüge ein Unterdruck auf, der in dieser Phase auch zu einer Verminderung der äußeren Abmessungen des Bauteils führt. Bei Betonen mit w/z-Werten über etwa 0,40, worunter auch meist Straßenbetone fallen, verbleiben im Betongefüge Kapillarporen, die sich bis an die Betonoberfläche durchziehen. Diese ermöglichen einen Ausgleich des sich einstellenden Unterdrucks, sodass sich die äußeren Abmessungen in diesem Fall nicht verändern. Daher ist das chemische/autogene Schwinden bei solchen Betonen in der Regel von untergeordneter Bedeutung.

Trocknungsschwinden

Beim Trocknungsschwinden (dem allgemein als Schwinden bezeichneten Vorgang) findet die Austrocknung erst im Laufe der Zeit im Festbeton – primär im Zementstein – statt. Im Beton behindert die Gesteinskörnung dieses freie Schwinden. Das sich im Beton einstellende Schwindmaß kann nach Pickett aus dem Grundswindmaß des Zementsteins ϵ_{sm} und dem Zementsteinanteil V_m wie folgt abgeschätzt werden:

$$\epsilon_{sb} = \epsilon_{sm} \cdot V_m^n \quad \text{Gl.1}$$

Der Exponent n berücksichtigt dabei die Steifigkeit der Gesteinskörnung, er kann für normalen Kies-sand mit 1,5 angenommen werden.

Da die Austrocknung zunächst in der oberflächennahen Randzone beginnt und allmählich in das Bauteilinnere vordringt, stellt sich über den Querschnitt ein Feuchtegradient ein. Dieser führt zu Eigenspannungen, aus denen sich netzartige Schwindrisse mit geringer Tiefe in der Randzone bilden können. Je nach den hygrischen Randbedingungen kann es sehr lange dauern bis ein Bauteil die Gleichgewichtsfeuchte erreicht hat und die Schwindverformungen zum Stillstand kommen. Nach CARLSON [6] benö-

Bauteildicke	Zeit bis zur Austrocknung
0,15 m	1 mon
0,45 m	1 a
1,20 m	10 a

Tab. 2–1: Zeit bis zur Austrocknung, abhängig von der Bauteildicke bei 50 % r. F. (nach [6])

tigen plattenförmige Bauteile bei 50 % r. F. die in Tabelle 2–1 angegebenen Zeiträume.

Die Verformungen infolge Trocknungsschwindens werden größer bei:

- höherem Wassergehalt im Frischbeton,
- höherem w/z-Wert (bei gleichem Zementgehalt),
- höherem Zementsteingehalt (bei gleichem w/z-Wert),
- höherer Schwindneigung des Zements (feine Mahlung, Zumahlstoffe),
- niedrigerem E-Modul der groben Gesteinskörnung,
- früherem Austrocknungsbeginn.

Karbonatisierungsschwinden

Als Karbonatisierung¹ wird die Reaktion von Kohlendioxid (CO₂) aus der Luft mit dem bei der Hydratation des Zements entstandenen Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) bezeichnet. Bei dieser Reaktion entstehen Calciumcarbonat (CaCO₃) und freies Wasser (H₂O). Durch die Karbonatisierung weist der Beton ein vergrößertes Gefüge auf [7]. Das vergrößerte Gefüge und die Freisetzung von zuvor molekular gebundenem Wasser bewirken, dass die innere Feuchtigkeit erhöht wird. Da in diesem Fall die Umgebungsfuchte niedriger ist als die innere Feuchte, verdunstet mehr Wasser. Die Umkristallisation und die Verdampfung des Wassers führen zu einer Volumenabnahme, die als Karbonatisierungsschwinden bezeichnet wird [1]. Es kann jedoch festgehalten werden, dass die Karbonatisierung nur in der Randzone von Betonbauteilen auftritt und daher praktisch keinen Einfluss auf die Volumenänderung eines Bauteils besitzt [2][8]. Dennoch können bereits bestehende Schwindrisse durch das Karbonatisierungsschwinden aufgeweitet werden bzw. neue, fein verteilte Netzrisse entstehen [2] [9].

2.2 Einflüsse auf das Schwinden von Beton

2.2.1 Einflussgrößen

Das Schwinden von Beton hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Zu den äußeren Einflüssen zählt u. a. die Witterung, innere Einflüsse werden insbesondere von den Betonausgangsstoffen und der Be-

¹ Formel Karbonatisierung: $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

tonzusammensetzung definiert. In Bild 2–4 ist eine Übersicht der Einflussgrößen dargestellt. Im Folgenden werden die wichtigsten Faktoren diskutiert, inwiefern diese das Schwinden (positiv oder negativ) beeinflussen können.

Einflüsse aus Nachbehandlung und Witterungsbedingungen wurden bereits in Abschnitt 2.1 erläutert und werden in den folgenden Ausführungen nicht erneut behandelt. Darüber hinaus wird auf den Einsatz von Zusatzmitteln explizit in Abschnitt 2.3 eingegangen.

Gesteinskörnung

Sowohl GRUBE [1] als auch WITTMANN [5] gehen davon aus, dass sich eine Gesteinskörnung aus dichtem, festem Gestein positiv auf jegliche Art des

Schwindens auswirkt. Dieser Effekt hängt insbesondere von der Behinderung der Schwindverformung ab, die vor allem von der Steifigkeit (E-Modul) der Gesteinskörnung bestimmt wird [1] [10]. Beispielsweise wies ein Beton mit wenig steifer Gesteinskörnung (E-Modul rd. 25 kN/mm²) mit 1,25‰ ein rd. 3 mal so hohes Endschwindmaß auf, als ein Beton mit steifer Gesteinskörnung (E-Modul rd. 100 kN/mm²; ϵ_{fin} rd. 0,40‰) [10]. Darüber hinaus nimmt bei nicht schwindender Gesteinskörnung, was den Regelfall darstellt, das Schwinden mit zunehmendem Gehalt an Gesteinskörnung, d. h. abnehmender Menge an schwindfähigem Zementstein ab [11].

Sandreiche Betone weisen bei gleichem Zementteingehalt gegenüber sandarmen Betonen ein geringeres Schwindmaß auf. Grund hierfür ist, dass

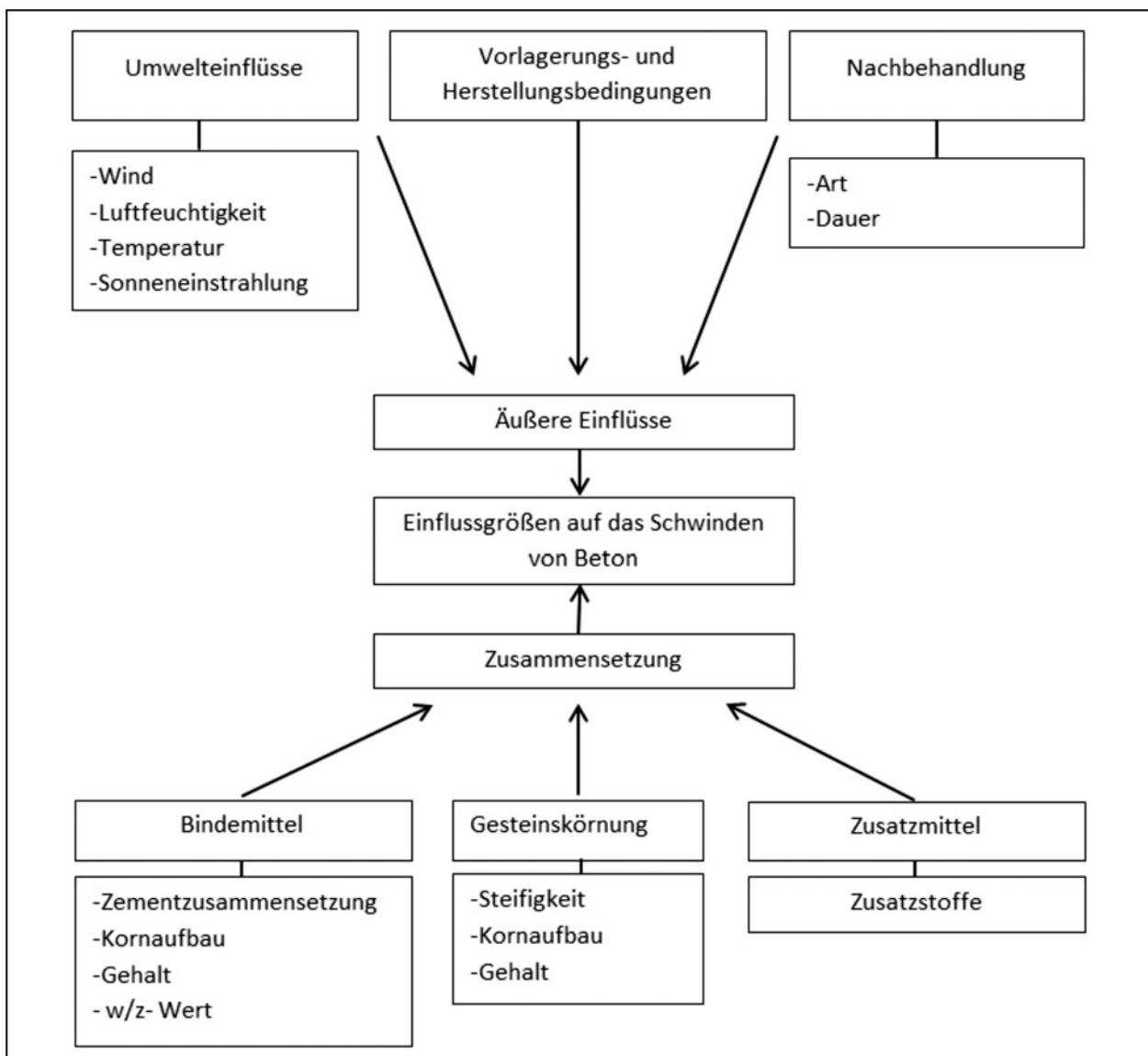


Bild 2–4: Einflussgrößen auf das Schwinden von Beton

feinere Gesteinskörnungen ein dichteres Gefüge der Matrix zur Folge haben und demnach wirkungsvoller aussteifen als z. B. gröbere Zuschläge mit einer möglichen größeren, wasserreicheren Kontaktzone [2].

Nach EICKSCHEN [12] beeinflussen poröse Gesteinskörnungen, die selbst schwinden und quellen, wie zum Beispiel rezyklierte Gesteinskörnungen, ebenfalls die hygrischen Verformungen der damit hergestellten Betone. Allerdings ist in diesem Falle eher von einem Quellen der Gesteinskörnung als von einem Schwinden in diesen auszugehen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Schwindmaß des Betons auch von der Art bzw. Steifigkeit und der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung beeinflusst werden kann.

Zementart

Der Einfluss der Zementart auf das Schwinden von Beton bzw. Mörtel wurde bereits mehrfach untersucht, u. a. von MILLS [13], WALZ [14], GRUBE [2] und FLEISCHER [15].

- MILLS [13] zeigte, dass hochofenzementhaltige Betone ein stärkeres Schwinden aufweisen als Betone mit Portlandzement. Er führte dies auf die höhere Mahlfeinheit der Hochofenzemente zurück. Von CZERNIN [16] und GRUBE [2] wurde dieser Einfluss hingegen auf Unterschiede im Hydratationsgrad zurückgeführt. Feinere Zemente hydratisieren schneller und bilden dabei mehr Zementgel mit kleineren Kapillarporen aus, die das Schwindmaß begünstigen [12]. Außerdem bleiben bei gröber gemahlene Zementen nach der Hydratation mehr unhydratisierte Zementpartikel zurück, die wie Gesteinskörner das Schwinden des umgebenden Zementsteins behindern [2].
- WALZ [14] konnte dagegen keinen klaren Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Zementarten und den Schwindverformungen des Zementsteins feststellen.
- Bei Zementen mit höheren C_3A -, C_4AF - und Alkali-Gehalten (Na_2O , K_2O) stellten sowohl GRUBE als auch FLEISCHER ein höheres Schwinden fest. Nach FLEISCHER [17] sind hierbei die Gelporen von größter Bedeutung, da sie für die spezifische Oberfläche des Zementsteins ausschlaggebend sind. Mit steigender spezifischer Oberfläche der Poren nehmen die hygrischen

Verformungen zu. Eine höhere Konzentration von Alkalien in der Porenlösung bewirkt einen niedrigen Dampfdruck in den Poren, was wiederum zu größeren hygrischen Verformungen führt. Dabei wiesen Hohlzylinder aus Beton, die in Luft mit 50 % r. F. gelagert wurden, unterschiedliche Schwindmaße auf. Bei einem Na_2O -Äquivalent der wasserlöslichen Alkalien von rd. 1,1 M.-% waren die Schwindverformungen um etwa 50 % größer als bei einem Na_2O -Äquivalent der wasserlöslichen Alkalien von rd. 0,3 M.-% [17].

- GRUBE verweist auf Untersuchungen von VENUAT [18], welche einen signifikanten Anstieg des Schwindens mit steigendem C_3A -Gehalt, steigendem Alkaligehalt und steigender Mahlfeinheit gezeigt haben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei steigender Mahlfeinheit, steigendem C_3A - und Alkali-Gehalt des Zementes das Schwinden zunimmt.

Wassergehalt, Zementgehalt und w/z-Wert

Die Parameter Wassergehalt, Zementgehalt und w/z-Wert stehen in direkter Abhängigkeit zueinander. Die Zusammenhänge dieser Parameter auf die hygrischen Verformungen wurden von CZERNIN [16] bereits in den 70er Jahren untersucht und in einem Diagramm zusammengefasst (Bild 2–5). Sowohl der Wassergehalt als auch der Zementgehalt haben demnach einen entscheidenden Einfluss auf das Schwinden. Durch einen erhöhten Wassergehalt steigen bei gleichbleibendem Zementgehalt der w/z-Wert und somit der Anteil an verdunstbarem Wasser an. In [11] wird dargestellt, dass beim Trocknungsschwinden die Größe der Schwindverkürzungen eines Betonbauteils primär von der Menge des freien Wassers abhängt.

Dies wird auch durch Untersuchungen von GRUBE [1] bestätigt (Tabelle 2–2). Diese Studien belegen insbesondere auch, wie der w/z-Wert das Trocknungsschwinden und das autogene Schwinden beeinflusst.

GRUBE [1] hat gezeigt, dass die Verformungen aus Trocknungsschwinden und autogenem Schwinden zusammen betrachtet im Endzustand (Tabelle 2–2) mehr oder weniger gleich groß sind. Je niedriger der w/z-Wert ist, umso größer sind die Verformungen infolge des autogenen Schwindens, die vorrangig in der frühen Phase der Hydratation auftreten. Gleichzeitig stellen sich in diesen Fällen nur gerin-

ge Verformungen durch das Trocknungsschwinden ein [1]. Mit zunehmendem w/z-Wert nimmt der Effekt des autogenen Schwindens ab, es bilden sich zunehmend Kapillarporen aus, die dazu beitragen, dass das Trocknungsschwinden, das über erheblich längere Zeit abläuft, zunehmend an Bedeutung gewinnt.

GRAF [19] erläutert, dass bei höherem w/z-Wert mehr Porenraum zur Wasserdiffusion zur Verfügung steht. Außerdem erhöht sich die Verformbarkeit des Zementsteins bei einem vergrößerten Kapillargefüge. Bei Betonen, die durch ihre Zusammensetzung insgesamt ein geringes Schwinden aufweisen, kann es allerdings dazu kommen, dass bei einem höheren w/z-Wert ein geringeres Schwinden auftritt. Grund hierfür ist, dass erst die Feuchte aus den Kapillarporen entweichen muss bevor die schwindwirksamen Gelporen entfeuchtet werden.

Mit steigendem Zementgehalt nimmt das chemische/autogene Schwinden aufgrund des damit verbundenem höheren Wasseranspruch und des gleichzeitig geringeren Blutens des Betons, zu [17]. In Übereinstimmung mit Bild 2–5 bestätigen EPPERS [20], GRUBE [1] [11] und JACOBS et al. [21] in ihren Arbeiten diese These und begründen die erhöhten Schwindverformungen nicht nur mit dem erhöhten Wasseranspruch, sondern auch mit der Zunahme des schwindfähigen Volumens.

Bei konstantem Wassergehalt führt nach GRAF [19] eine Erhöhung des Zementgehalts zu einem geringen Anstieg der hygri-schen Verformungen von Beton und Mörtel. Wird danach jedoch der Zementgehalt bis zu einem gewissen Punkt weiter erhöht, nimmt das Endschwindmaß, vor allem bei Betonen

bzw. Mörteln mit einem w/z-Wert $\leq 0,40$ wieder ab [17]. Durch die Erhöhung des Zementgehalts bei gleichzeitig konstantem Wassergehalt wird der w/z-Wert verringert, sodass sich später bei der Hydratation ein dichteres Porengefüge ausbilden kann. Der Anteil der Kapillarporen wird geringer, was zur Folge hat, dass der Zementstein weniger verformbar ist [19].

2.3 Schwindreduzierende Zusatzmittel

2.3.1 Aufbau

Schwindreduzierende Zusatzmittel (engl. Shrinkage Reducing Admixture – SRA, oftmals auch kurz als „Schwindreduzierer“ bezeichnet) zeichnen sich dadurch aus, dass sie die Schwindverformungen in zementösen Systemen reduzieren und nicht zwingend eine entsprechende konventionelle Anpassung

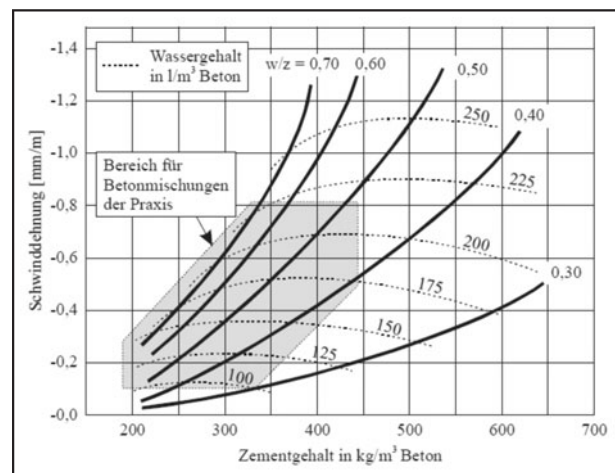


Bild 2–5: Einfluss des Zementgehaltes, des Wassergehaltes und des w/z-Wertes auf das Endschwindmaß von Beton und Mörtel (Prismen 10 x 10 x 40 cm, Lagerung bei 50% rel. F. nach 7 Tagen Feuchtlagerung) aus [8] nach [16]

Wasserzementwert w/z	Zementstein		Beton		Zementstein	Beton
	$\epsilon_{cds\infty}$ [‰]	$\epsilon_{cas\infty}$ [‰]	$\epsilon_{cds\infty}$ [‰]	$\epsilon_{cas\infty}$ [‰]	$\epsilon_{cws\infty}$ [‰]	
$\geq 0,70$	$< - 3,2$	≥ 0	$\sim 0,7$	~ 0	+ 0,5	+ 0,1
0,60	- 2,9	- 0,3	- 0,6	- 0,05	+ 0,5	+ 0,1
0,50	- 2,5	- 0,5	- 0,55	- 0,1	+ 0,6	+ 0,1
0,40	- 2,2	- 0,8	- 0,45	- 0,2	+ 0,8	(+ 0,1)
0,30	- 1,9	- 1,2	- 0,35	- 0,3	+ 0,9	(+ 0,1)
0,25	- 1,6	- 1,5	- 0,25	- 0,4	+ 1,3	(+ 0,1)

Autogenes Schwinden ($\epsilon_{cas\infty}$) für konservierende Lagerung bei 20 °C, Trocknungsschwinden ($\epsilon_{cds\infty}$) für Ausgleichsfeuchte 20 °C/65% rel. Luftf., Schwinden (Quellen) ($\epsilon_{cws\infty}$) infolge Wasserlagerung bei 20 °C. [1]

Tab. 2–2: Anhaltswerte für Endschwinddehnungen von Zementstein (ASTM-Prismen 25 x 25 x 285 mm²) und Beton (Probekörper mit d/h = 150/300) [1]

sung der Zusammensetzung des Betons notwendig ist. Schwindreduzierende Zusatzmittel wurden erstmals Anfang der 1980er-Jahre in Japan entwickelt und hinsichtlich ihrer Wirkung untersucht.

Schwindreduzierer gehören zur Gruppe der nichtionischen Tenside, welche wiederum aus kurz- und langkettigen Kohlenwasserstoffen bestehen. Ein wesentliches Charakteristikum aller Tenside ist ihr asymmetrischer, hydrophob-hydrophiler Molekülaufbau (Bild 2–6).

Nichtionisch bedeutet dabei, dass die hydrophile Gruppe keine Ladung trägt und nicht in der Lage ist, in Ionen zu dissoziieren. Durch den asymmetrischen Molekülaufbau verhalten sich die einzelnen Molekülbausteine unterschiedlich, sobald sie mit Wasser als Lösungsmittel in Verbindung geraten. Der hydrophile Teil ist stark hydratisiert und bewirkt durch die ausgeprägte Attraktion zu Wasser die Tensid-Löslichkeit. Die Anziehungskräfte zwischen den hydrophoben Molekülen sind wesentlich geringer als zwischen den Wassermolekülen untereinander. Das hat zur Folge, dass durch die große Attraktion der Wasserdipole zueinander die Tensid-Moleküle aus der wässrigen Lösung herausgedrängt werden [23]. Die Folge ist die Adsorption der Tensid-Moleküle an der Grenzfläche Wasser/Luft, wodurch die Oberflächenspannung von Wasser herabgesetzt wird. (Bild 2–7)

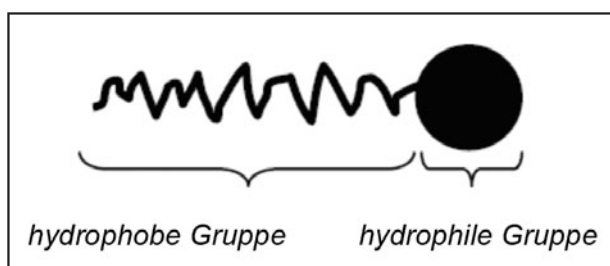


Bild 2–6: Schematischer Aufbau eines Tensid Moleküls (nach [22])

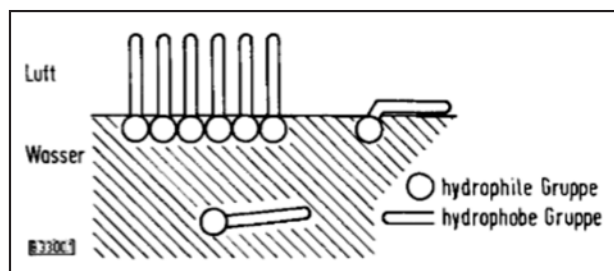


Bild 2–7: Schematische Darstellung der Tensid-Adsorption an der Grenzfläche von Wasser und Luft [23]

Bei einer relativ geringen Tensid-Konzentration agglomerieren die nichtionischen Tenside und nehmen i. d. R. eine Kugelgestalt an. Dabei orientieren sich die hydrophoben Gruppen zum Inneren der Kugel, während die hydrophilen Gruppen zum Wasser orientiert sind. Der Kern wird dabei auf Grund der hydrophilen Schale von der wässrigen Phase abgeschirmt. Auch bei hohen Tensid-Konzentrationen, bei denen sich die Kugelform verliert und in Plättchen oder Stäbchen übergeht, bleibt das beschriebene Bauprinzip erhalten. Bei weiterer Konzentrationssteigerung der Tenside ist keine weitere Veränderung der Oberflächenspannung zu verzeichnen [23].

2.3.2 Wirkungsweise schwindreduzierender Zusatzmittel

Einfluss auf die Oberflächenspannung der Porenlösung

In den meisten Literaturstellen wird hinsichtlich der Wirkung schwindreduzierender Zusatzmittel davon ausgegangen, dass diese im Wesentlichen auf die Verringerung der Oberflächenspannung der Porenlösung zurückzuführen ist [24]. Die Verringerung der Oberflächenspannung des Wassers führt dazu, dass die Ausbildung von Menisken, welche durch den Wasserverlust aus Poren ca. < 50 nm entstehen, abgemindert wird. Der normalerweise an der Grenzfläche von Wasser und Gas entstehende Kapillardruck, welcher auf die Porenwände übertragen wird und unter Anderem eine der Ursachen für das Schwinden von Beton ist, wird so geringer. Die Menisken bilden sich unter einem Randwinkel ϑ nur durch die Oberflächenspannung des Wassers aus. Der an der Grenzfläche von Wasser und Gas entstehende Kapillardruck ist die Differenz aus dem Druck in der Dampfphase (Gas) und dem Druck in der Flüssigphase (Wasser) [4].

Der Kapillardruck p_c bei einem sphärischen Meniskus wird mit folgender Young-Laplace-Gleichung beschrieben:

$$p_c = p_v - p_l = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\vartheta)}{r_m} \quad \text{Gl. 2}$$

Hierbei ist p_v (vapour) der Druck in der Dampfphase, p_l (liquid) der Druck in der Flüssigphase in N/m^2 , γ die Oberflächenspannung des Wassers in N/m , ϑ der Randwinkel der Menisken und r_m der mittlere Krümmungsradius des Meniskus. Eine Verringerung der Oberflächenspannung des Wassers führt demnach automatisch zu einer Verringerung der

Schwindverformungen des Betons bzw. Zementsteins, da der Kapillardruck sinkt.

Der Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Oberflächenspannung des Wassers und der Porenlösung wurde von SCHÄFFEL aus verschiedenen Quellen in [4] zusammengefasst (Tabelle 2–3).

Hierbei wird deutlich, dass Schwindreduzierer die Oberflächenspannung des Zugabewassers und der Porenlösung im jungen Alter (1 Tag) um 54 % bis 30 % senken. Je höher die Dosierung der SRA gewählt wurde, desto größer war die Reduzierung der Oberflächenspannung. Sofern in der Literatur keine Angaben zur Oberflächenspannung der Referenzprobe ohne SRA vorlagen, nahm SCHÄFFEL [4] die Oberflächenspannung von Wasser (72,5 mN/m) bei 20 °C an. Diese Ergebnisse werden durch jüngste Untersuchungen von EBERHARDT [22] bestätigt. Bei den Untersuchungen konnte eine Reduzierung der Oberflächenspannung während der Hydratation am ersten Tag von 72,5 mN/m auf rd. 30 mN/m, d.h.

um rd. 60 % festgestellt werden. Der Nachweis, ob die Oberflächenspannung im Zementstein bzw. Beton durch Schwindreduzierer auch über einen längeren Zeitraum vermindert werden kann, wurde bis jetzt nicht erbracht.

Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften

In diversen Veröffentlichungen [27], [28] wird dargestellt, dass der Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel auf die Frischbetoneigenschaften als gering zu beurteilen sei.

QUANGPHU et. al. [29] stellten bei einer SRA-Dosierung von 4 M.-% v. Z., im Vergleich zu einer Referenzprobe ohne SRA, eine Erhöhung des Setzmaßes nach ASTM C 143/C 143 M-03 (ASTM Committee C09 2003 a) um 2 cm von 21,4 cm auf 23,4 cm fest. Darüber hinaus verringerte sich die Rohdichte des Betons von 2.380 kg/m³ der Referenzprobe auf 2.150 kg/m³ bei der Probe mit SRA. Bei niedrigeren (praxisrelevanteren) Dosierungen von rd. 1 bis 2 M.-% v. Z. war der Einfluss jedoch

Literaturstelle	Zeitpunkt der Prüfung	Dosierung	Oberflächenspannung		
			Referenzprobe ohne SRA	Probe mit SRA	Reduzierung relativ zur Referenzprobe
			h	M.-% v. w	mN/m
1	2	3	4	5	6
[24]	<24	5 ²⁾	72,5	44,7	38
		10 ²⁾		42,2	42
		20 ²⁾		40	45
[22]		2 ²⁾		30	41
[51]	2	2,9 ²⁾	54,3	30	45
		5,7 ²⁾		27,5	49
[52]	0 ³⁾	~ 5,0	72	~38	47
[25]		6	76,5	32,5	48
[53]		1	72,5 ¹⁾	50,5	30
		10		33,5	54
[26]		~ 5,0	72,5 ¹⁾	~40	45
[54]		~ 0,6	72,5 ¹⁾	41,6	43
		~ 0,4		40	45

1) Es wurden die Oberflächenspannung von Wasser bei 20 °C angenommen, da keine Literaturdaten vorlagen
2) Da die Literaturstelle keine eindeutigen Angaben macht, wurde davon ausgegangen, dass sich die Dosiermenge der SRA auf die Zementmenge bezieht und eine entsprechende Dosierung bezogen auf das Zugabewasser berechnet
3) direkt nach der Herstellung des Zugabewasser-SRA-Gemisches

Tab. 2–3: Literaturangaben zur Oberflächenspannung von Zugabewasser-SRA-Gemischen und Porenlösung aus Zementleim und -stein mit SRA (nach [4])

wesentlich geringer, sodass insgesamt nur marginale Veränderungen der Frischbetoneigenschaften festgehalten wurden. Bei einer SRA-Dosierung von 1 M.-% v.Z. veränderte sich beispielsweise das Setzmaß im Vergleich zu der Referenzprobe ohne SRA gerade einmal um 0,4 cm von 21,4 cm auf 21,8 cm.

Diese Ergebnisse wurden von MORA-RUACHO et al. [30] bestätigt. Bei ihren Untersuchungen fand sie heraus, dass normalfeste Betone in Kombination mit SRA im Vergleich zu Betonen ohne SRA ein erhöhtes Ausbreitmaß aufweisen. Bei hochfesten Betonen mit SRA wurde ein geringfügig geringeres Ausbreitmaß festgestellt. Generell können die Unterschiede in der Konsistenz im Vergleich zu Betonen ohne SRA jedoch als minimal bezeichnet werden.

In Hinblick auf die Kombination von SRA und Luftporenbildner wurde teilweise ein deutlicher Rückgang des Luftgehalts im Frischbeton festgestellt [31]. Die Folge ist eine wesentliche Verschlechterung des Widerstandes gegenüber Frost- bzw. Frost-Tausalzeinwirkungen.

Einfluss auf das Schwinden von Zementstein, Mörtel und Beton

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, inwiefern SRA in der Lage sind, das Gesamtschwinden von Zementstein, Mörtel und Beton zu beeinflussen. Da SCHÄFFEL in [4] eine ausführliche Zusammenfassung veröffentlicht hat, werden hier primär nur Ergebnisse dargelegt, die auch für Straßenbetone relevant sind.

- Zementstein und Mörtel
SATO et al. [24] zeigten, dass – erwartungsgemäß – mit abnehmender Umgebungsfeuchte bis 45 % rel. F. die schwindreduzierende Wirkung zunahm. Unterhalb dieser rel. Luftfeuchte konnte keine weitere Verbesserung der schwindreduzierenden Wirkung festgestellt werden.

In Untersuchungen an Zementsteinen stellten MALTESE et al. [32] fest, dass das Trocknungsschwinden bei 23°C und 50% rel. Luftfeuchte durch die Zugabe von SRA um rd. 50% reduziert werden konnte. Diese Ergebnisse korrelieren mit jenen von RONGBING und JIAN [26], dass sich die Verformungen infolge Trocknungsschwindens bis zum Alter von 90 Tagen durch SRA-Dosierungen von 1, 2 bzw. 3 M.-%, jeweils bezogen auf den Zementgehalt, um 21,9%, 28,1% bzw. 44,2% verminderten.

Des Weiteren fand auch EBERHARDT [22] heraus, dass das Trocknungsschwinden mit zunehmender Dosierung von SRA deutlich reduziert werden kann (Bild 2–8). Das Schwinden von Zementstein konnte bei einer Zugabemenge von 4,0 M.-%, bez. auf den Zementgehalt, gegenüber der Referenzprobe ohne SRA um rd. 50% verringert werden. Dabei zeigte sich auch der Einfluss der relativen Luftfeuchtigkeit auf den Wirkungsgrad der SRA. Unterhalb von rd. 50% r.F. verminderte sich der Effekt der SRA, was sich mehr oder weniger unabhängig von der Dosierung der SRA in einem nahezu parallelen Verlauf der Schwindverformungen in diesem Feuchtebereich zeigte. Hingegen kam die Wirkung der SRA im Feuchtebereich zwischen etwa 90% r.F. und 50% r.F. sehr deutlich zur Geltung.

- Beton
Gegenüber Untersuchungen an Zementstein und Mörteln wurde die schwindreduzierende Wirkung der SRA in der Vergangenheit sehr häufig am Beton erforscht. Dabei wurden unterschiedliche Betonzusammensetzungen verwendet, bei denen oft gleichzeitig der w/z-Wert, die Zementart und die Art des Zusatzmittels variiert wurden, was die Interpretation und auch einen Vergleich mit heutigen Untersuchungen erschwert.

SCHÄFFEL [4] fasste die Ergebnisse seiner umfassenden Literaturrecherche zusammen. Schlussfolgernd hat er die einzelnen Einflussparameter auf die schwindreduzierende Wirkung der SRA an Betonen wie folgt charakterisiert:

Die schwindreduzierende Wirkung der SRA sinkt generell mit:

- zunehmendem Betonalter,
- abnehmender Dosiermenge,
- zunehmendem Wasserzementwert.

Des Weiteren beeinflussen

- der Leimgehalt,
- die Zementart,
- die Zusatzstoffe,
- die Nachbehandlung,
- und die chemische Zusammensetzung der Schwindreduzierer

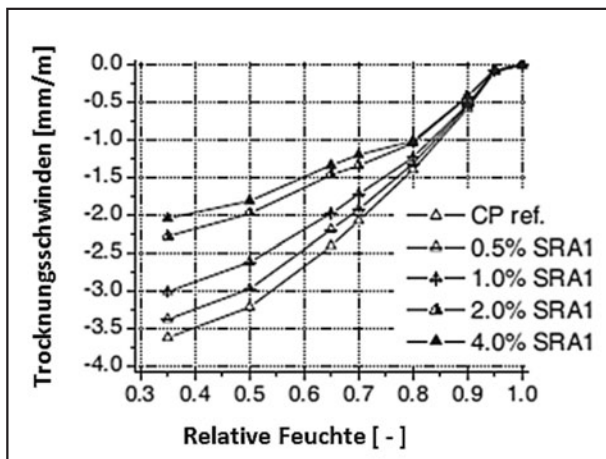


Bild 2-8: Trocknungsschwinden in Abhängigkeit der relativen Feuchte [22]

die Wirkung der SRA sowohl in normalfestem als auch in hochfestem Beton. Unter Berücksichtigung aller vorliegenden Literaturquellen kam SCHÄFFEL [4] zu dem Schluss, dass das Gesamtschwinden von Normalbetonen im Alter von 28 Tagen um rd. 40–50 % reduziert werden kann. Offen bleibt dabei aber die Frage, ob diese Verbesserung auch in späterem Alter erhalten bleibt, oder durch SRA lediglich eine (längere) Verzögerung des Schwindens erreicht wird und sich die Schwindverformungen der Betone mit und ohne SRA nach langen Zeiträumen (Jahren) angleichen.

SALIBA et al. [33] konnten bei Betonen (w/z -Wert = 0,43, SRA 1,0 M.-% v.Z., Lagerung nach 24h im Wasserbad bei 50 % rel. LF) eine Reduzierung des Trocknungsschwinden nach 7 Tagen um 56 % 31 % und nach 70 Tagen um 33 % 25 % feststellen. Außerdem wurde eine Reduzierung des frühen autogenen Schwindens von 14 % eruiert. BENTZ et al. [34] führten die Reduktion des autogenen Schwindens, ausgelöst durch den Einsatz von SRA, auf eine höhere Feuchte im Inneren des Zementsteins zurück. Da hierbei der Einfluss der anderen Schwindarten, wie z. B. dem Kapillarschwinden bzw. Frühschwinden vernachlässigt wurde, sind Werte um die 40 % 50 % Reduzierung des Gesamtschwindens nach 28 Tagen realistisch.

Einfluss auf die Druckfestigkeit und den Hydratationsgrad von Beton

Vielfach wurden neben dem Einfluss der SRA auf das Schwinden von Beton auch deren Auswirkungen auf die Druckfestigkeit untersucht. Im Vergleich

zu Probekörpern ohne SRA wiesen Probekörper mit SRA in den meisten Fällen eine niedrigere Druckfestigkeit auf. In Untersuchungen von QUANGPHU et al. [29] wurde durch SRA die Betondruckfestigkeit um bis zu 20 % vermindert. Der überwiegende Teil der diversen Studien zeigte jedoch, dass die Abnahme der Druckfestigkeit durch SRA zwischen rd. 5 bis 10 % liegt [35] [33] [29] [32] [30]. Dabei wird deutlich, dass die Ergebnisse in Abhängigkeit der Betonzusammensetzungen und der SRA (Art, Zugabemenge) stark variieren. In einigen Fällen wurde demgegenüber eine Erhöhung der Druckfestigkeit um bis zu 35 % festgestellt [36] [37]. Daraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss der SRA auf die Betondruckfestigkeit von zahlreichen Faktoren determiniert wird. Genauere Untersuchungen zur ganzheitlichen Klärung der Frage, wie und wodurch SRA die Betondruckfestigkeit beeinflussen, stehen noch aus. In der Literatur werden unterschiedliche Thesen zur Erklärung dieser Effekte aufgeführt, die im Folgenden dargestellt werden.

BENTZ et al. gehen davon aus, dass eine erhöhte innere Feuchte und somit eine bessere Nachbehandlung der Proben zu einer erhöhten Druckfestigkeit führt. Dabei bleibt jedoch unklar, warum dieser Effekt nur in bestimmten Fällen auftritt.

Eine potenzielle Ursache für die Abnahme der Druckfestigkeit könnte der Einfluss der SRA auf den Hydratationsverlauf im Beton sein. In [22] wird beschrieben, dass mit dem Einsatz von SRA gleichzeitig eine Verzögerung der Hydratationsmechanismen einhergeht. Bei höherer Dosierung wird dieser Effekt verstärkt. Während die Reaktion der Aluminatphasen (C_3A , C_4AF) quasi unverändert bleibt, wird die Hydratation der Silicatphasen (C_3S , C_2S) bis zum Alter von 28 Tagen deutlich verringert. Diese Verzögerung findet unabhängig von der Art des Zementes statt. Erstaunlicherweise ist dabei die Menge des gebundenen Wassers unverhältnismäßig hoch, sodass EBERHARDT [22] vermutet, dass die Mikrostruktur der entstehenden Hydratphasen beeinflusst wird. Da der wahre Hydratationsgrad bei diesen Untersuchungen nicht genau bestimmt wurde, ist ein Rückschluss hieraus auf die verminderte Betondruckfestigkeit eher als fraglich anzusehen. Trotzdem wird in einigen Literaturquellen diese Verzögerung der Zementhydratation als Grund für die verminderte mechanische Leistungsfähigkeit des Betons vermutet [35] [33] [38].

Einfluss auf das Porengefüge

Der Einfluss der SRA auf das Porengefüge von Beton wurde in [22] [33] [32] untersucht.

EBERHARDT [22] stellte beim Einsatz von SRA eine ansteigende Kapillarporosität fest. Beim Einsatz von SRA bei Mörtelproben wurde eine erhöhte spezifische Oberfläche festgestellt, was auf einen erhöhten Anteil an feinsten Poren zurückzuführen ist. Allgemein geht Eberhardt davon aus, dass die Mikrostruktur von Portlanditkristallen im Zementstein beim Einsatz von SRA beeinflusst wird (Bild 2–9)

Der Referenzzementleim zeigt Portlandit mit einem kompakten Wuchs auf. Die Dicke der beschriebenen hexagonalen Platten im Referenzzementleim C0 (links) beträgt laut EBERHARDT [22] rund 10 µm während die Portlanditplatten im Zementleim C6 mit SRA eine Dicke unter 1 µm aufweisen. Dies würde wiederum die erhöhte spezifische Oberfläche des Portlandit erklären. Eine eingehende Analyse des Einflusses von SRA auf das Porengefüge von Zementstein ist in [22] dargestellt.

SALIBA et al. [33] untersuchten die Porenstruktur mit der Quecksilberdruckporosimetrie. Dabei wird von einem verminderten Anteil an Poren der Größenordnung 300–1000 nm bei einer gleichzeitigen Erhöhung der Gesamtporosität berichtet.

In [32] wurde ein erheblicher Unterschied der Morphologie des Zementsteins zwischen Probekörpern mit SRA im Vergleich zu SRA-freien Probekörpern festgestellt. Mit Hilfe der Röntgenbeugungsspektroskopie (X-ray diffraction spectroscopy – XRA) wurden prismatische Nadeln auf der Materialoberfläche beobachtet. Die Autoren schlossen daraus, dass

es sich dabei um hydratisierte Kalkkristalle handeln muss. Das Ungewöhnliche daran war, dass die kristalline Formation nicht wie normalerweise aus hexagonalen Platten bestand, sondern aus länglichen Prismen. MALTESE et al. [32] vermuteten, dass der Einsatz der SRA die Morphologie des ausgefällten Calciumhydroxid beeinflusst hat. Welchen genauen Einfluss diese Veränderung des Zementsteingefüges auf die Wirkung der SRA in Beton hat, konnte nicht weiter untersucht werden, da diese Kristalle für eine Analyse über Röntgenspektroskopie zu dünn waren.

2.3.3 Zusammenfassung

Zunächst ist festzuhalten, dass die genaue Wirkungsweise der SRA und deren Einfluss auf bestimmte Frisch- bzw. Festbetoneigenschaften bisher noch nicht abschließend erforscht sind. Die bisherigen Erkenntnisse sind noch lückenhaft und erfordern weitere Untersuchungen. Derzeit lässt sich Folgendes zusammenfassen:

- SRA reduzieren sowohl das Frühschwinden als auch das Trocknungsschwinden von normalfesten und hochfesten Betonen (Reduzierung um rd. 40% – 50%). Diese Nachweise erstrecken sich jedoch meist auf Untersuchungszeiträume bis ca. ein Jahr.
- SRA reduzieren die Oberflächenspannung des Wassers und der Porenlösung im jungen Alter (1 Tag) um 54% bis 30%. Ob der Effekt der reduzierten Oberflächenspannung im Zementstein bzw. Beton auch über einen größeren Zeitraum gegeben ist, konnte bis jetzt noch nicht bestätigt werden.

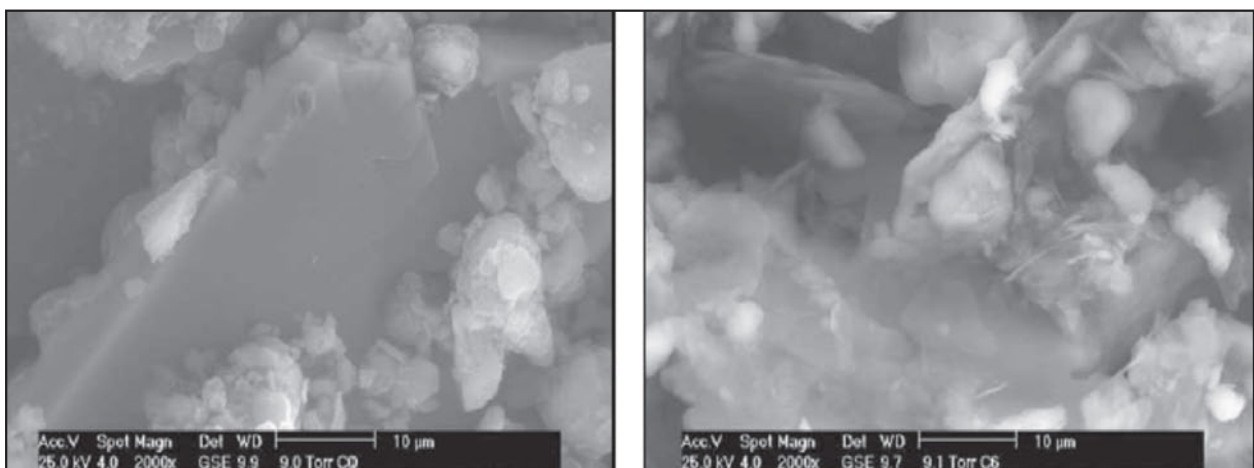


Bild 2–9: Mikrostruktur von Zementleim ohne SRA (C0, links) und Zementleim mit einer hohen SRA-Dosierung (C6= 384 mg/g C₃S, rechts) [22]

- SRA haben bei der bislang praxisüblichen Dosierung nur einen marginalen Einfluss auf die Frischbetoneigenschaften. Teilweise konnte ein vergrößertes Ausbreitmaß festgestellt werden.
- Bei gleichzeitiger Anwendung von Luftporenbildner kann der Frostwiderstand reduziert werden, da die Entwicklung der künstlich eingeführten Luftporen im Frischbeton negativ beeinflusst wird.
- Die 28-Tage-Druckfestigkeit von Beton wird durch den Einsatz von SRA in der Regel herabgesetzt. In einigen Fällen erhöhte sich die 28-Tage-Druckfestigkeit jedoch. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um zuverlässige Aussagen über den Einfluss der SRA auf die Druckfestigkeit machen zu können.
- Mit dem Einsatz der SRA geht eine gleichzeitige Verzögerung der Hydratationsmechanismen einher. Hierbei wird die Mikrostruktur der entstehenden Hydratphasen beeinflusst.

2.4 Betone für Fahrbahndecken

An Betone für Fahrbahndecken werden aufgrund der Vielzahl der Einwirkungen und der exponierten Lage hohe Anforderungen gestellt. Im Allgemeinen wird ein Beton der Festigkeitsklasse C30/37 nach DIN EN 206 [N 18] verwendet. Die Ausgangsstoffe, die Zusammensetzung und die für Betondecken wesentlichen Festbetoneigenschaften von herkömmlichem Straßenbeton sind in den TL Beton-StB-07 [N 7] geregelt. Dort können die aufgrund der hohen Beanspruchung abzuleitenden Anforderungen an Ausgangsstoffe und an die Betonzusammensetzung wie folgt zusammengefasst werden:

- Begrenzung des w/z- Wertes auf max. 0,45
- Mindestzementgehalt von 340 kg/m³
- Mindestluftporengehalt von 4,0 bis 5,5 Vol.-% (je nach Größtkorn)
- Begrenzung des Na₂O-Äquivalents im Zement auf max. 0,8 M.-%
- Verwendung alkaliunempfindlicher Gesteinskörnung
- Biegezugfestigkeit von min. 4,5 N/mm²

Als Regelbauweise für Fahrbahndecken aus Beton wurde bis vor wenigen Jahren ein einschichtiger Betoneinbau ausgeführt. Die Oberfläche wurde dabei

zur Lärminderung mit Jutetuch, Kunstrasen oder Stahlbesen texturiert. Aufgrund der zunehmenden Forderungen nach einer möglichst geräuscharmen Ausführung der Deckschicht wurde durch das ARS Nr. 5/2006 [N 3] der zweischichtige Aufbau mit einem Oberbeton in Waschbetonbauweise als Standardbauweise eingeführt. Die Dicke der Betondecke ist in Abhängigkeit der Belastungsklasse und Bauweise durch die „Richtlinien zur Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen 12“ (RStO 12) [N 5] festgelegt oder alternativ nach RDO Beton 09 [N 17] zu dimensionieren. Für eine Bundesautobahn der Belastungsklasse Bk 100 ist darin eine Dicke der Betondecke von 27 cm (über einer HGT) vorgeschrieben. Bei der zweischichtigen Waschbetonbauweise wird der Oberbeton mit einer Schichtdicke von rund 5 bis 8 cm mit einem Größtkorn von 5 bzw. 8 mm eingebaut. Für Waschbeton wird nach TL Beton-StB 07 [N 7] ein Mindestluftgehalt von 5,5 Vol.-% gefordert. Werden dem Beton aus verarbeitungstechnischen Gründen verflüssigende Zusatzmittel (Betonverflüssiger bzw. Fließmittel) zugegeben, erhöht sich der Mindestluftgehalt auf 6,5 Vol.-%. Einzelwerte dürfen die genannten Grenzen um maximal 0,5 Vol.-% unterschreiten. Für Waschbetone wurde diesbezüglich mit ARS Nr. 28/2012 [N 1] folgende Ausnahme getroffen:

„Wird Beton mit einem Größtkorn von 8 mm der Konsistenzklasse C1 mit Fließmittel oder Verflüssiger hergestellt, ist bereits ein Mindestwert von 4,5 Vol.-% für den mittleren Luftgehalt, für den Einzelwert von 4,0 Vol.-% ausreichend, wenn bei der Erstprüfung die Luftporenkennwerte bestimmt und der Mikro-Luftporengehalt von 1,8 Vol.-% nicht unterschritten sowie der Abstandsfaktor L von 0,20 mm nicht überschritten wird. Für diesen Nachweis bei der Erstprüfung darf der Luftgehalt des Frischbetons 5,0 Vol.-% nicht übersteigen.“

Der Mindestzementgehalt im Oberbeton beträgt nach den TL Beton-StB 07 [N 7] 420 kg/m³, der Wasserzementwert ist auf max. 0,45 beschränkt, in vielen Fällen beträgt dieser nur 0,40. Als Zement wird oftmals ein Portlandzement CEM I der Festigkeitsklasse 32,5 R oder 42,5 N eingesetzt. In den letzten Jahren haben aber auch CEM II-Zemente Eingang in den Straßenbeton gefunden. Die Zusammensetzung des Zements muss ferner den Anforderungen der TL Beton-StB 07 [N 7] entsprechen, worin u. a. der Gesamtalkaligehalt zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion auf unter 0,80 M.-% beschränkt ist. Die Gesteinskörnung muss

den Anforderungen der TL Gestein-StB 04 [N 16] entsprechen. Für den Oberbeton kommen dabei aufgrund der direkten Beanspruchung aus Verkehr nur Gesteinskörnungen mit erhöhtem Polierwiderstand zum Einsatz. Des Weiteren dürfen nach [N 3] nur Gesteinskörnungen eingesetzt werden, für die nachgewiesen wurde, dass sie nicht AKR-reaktiv sind. Der Frischbeton weist i. d. R. eine steife Konsistenz C1 auf.

2.5 Beanspruchungen von Fahrbahndecken aus Beton

Neben den witterungsbedingten Beanspruchungen werden Fahrbahndecken vor allem durch den Verkehr beansprucht. Gerade mit dem seit Jahren stetig ansteigenden Güterverkehr nehmen auch die Belastungen auf die Fahrbahndecke sukzessive zu. Die dabei durch die Achsübergänge, insbesondere des Schwerverkehrs zyklisch eingetragenen Spannungen überlagern sich mit den hygrischen und thermischen Zwangs- und Eigenspannungen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

2.5.1 Lastunabhängige Beanspruchungen: Temperatur und Feuchte

Fahrbahndecken aus Beton unterliegen über ihre gesamte Nutzungsdauer vergleichsweise starken Witterungseinflüssen. Eigenverformungen infolge Temperatur- und/oder Feuchteänderungen im Beton verursachen infolge der unabdingbaren Verformungsbehinderung mitunter hohe Zwangs- und Eigenspannungen, die letztendlich zur Rissbildung führen können. Bei der Charakterisierung dieser Zwangs- und Eigenspannungen sind zwei unterschiedliche Zustände zu betrachten, und zwar zum einen die Erhärtungsphase im jungen Alter und zum anderen der Gebrauchszustand.

Betone für den Bau von Fahrbahndecken weisen mit $\geq 340 \text{ kg/m}^3$ relativ hohe Zementgehalte auf. Bereits wenige Stunden nach dem Einbau setzt die Hydratationswärmeentwicklung ein, wobei das Temperaturmaximum in der Regel zwischen 4 und 20 Stunden erreicht wird. Unabhängig von Umwelteinflüssen kommt es dabei im Kern des Bauteils zu einer stärkeren Erwärmung als in den Randbereichen, da die entstehende Wärme im Kern nur langsam an die Umgebung abgeführt werden kann. Die starke Temperaturänderung hat eine Dehnung zur Folge, die infolge Verformungsbehinderung durch die Reibung/Verbund mit den darunter liegenden Tragschichten zu zentrischen Zwangsspannungen

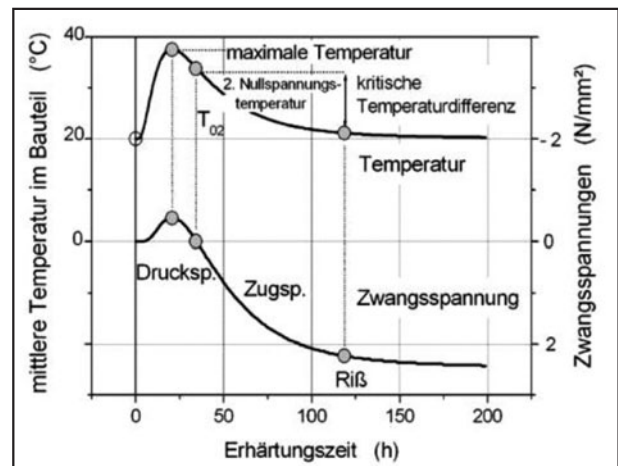


Bild 2–10: Temperaturverlauf und Entwicklung zentrischer Zwangsspannungen [43]

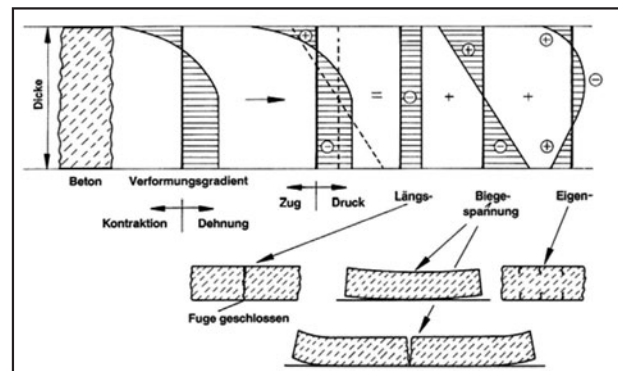


Bild 2–11: Spannungen und daraus resultierende Risse in Betonplatten infolge eines negativen Temperatur- oder Feuchtegradienten bei Abkühlung / Austrocknung der Oberfläche [51]

(Druck) in der Platte führt. Im jungen Beton bleiben diese Druckspannungen infolge des noch niedrigen Elastizitätsmoduls und der hohen Relaxation noch sehr gering (Bild 2–10).

Nach Überschreiten des Maximums der Bauteilmitteltemperatur und Abkühlung wird die noch vorhandene Druckspannung sehr schnell abgebaut. Unmittelbar nach dem Unterschreiten der Nullspannungstemperatur, die nur wenige Grad unter der Maximaltemperatur liegt, bauen sich bei weiterer Abkühlung über dem gesamten Querschnitt Zwangs-Zugspannungen auf, die bei Überschreitung der Zugfestigkeit zu durchgehenden Trennrissen führen. Diese zentrischen Zugspannungen können im Laufe der Zeit durch behinderte Schwindverformungen (Trocknungsschwinden) verstärkt werden.

In horizontalen Platten findet jedoch eine Abkühlung genauso wie eine Austrocknung primär nach oben hin statt, wodurch sich ein nicht-symmetrischer Ver-

formungszustand einstellt. Neben den gleichförmigen (zentrischen) Anteilen resultiert daraus noch ein linear veränderlicher und ein nicht-linearer Anteil (Bild 2–11). Infolge einer linearen Abkühlung bzw. einem linearen Schwinden möchte sich die Platte verwölben, dem wirkt jedoch das Eigengewicht entgegen. Die Folge sind Biegezugspannungen mit Zug an der Oberseite. Überschreiten diese die Biegezugfestigkeit des Betons entstehen keilförmige Biegerisse. Der am häufigsten zu beobachtende Fall einer ungleichmäßigen Feuchteverformung stellt sich ein, wenn die Fahrbahnoberseite austrocknet (Schwinden), die Unterseite jedoch wassergesättigt bleibt. In diesem Fall stellt sich in der Fahrbahndecke ein negativer Feuchtegradient ein [52] [53].

Die nicht-lineare Temperatur- bzw. Feuchteverteilung ruft zusätzliche Eigenspannungen hervor, die an der Oberfläche Zugspannungen aufweisen und beim Erreichen der Betonzugfestigkeit zu nur wenig tiefen Oberflächenrissen führen.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Projektziel

Ziel dieses Forschungsprojektes war es, zu eruiieren, inwieweit mit schwindreduzierenden Betonzusatzmitteln (SRA) Schwindverformungen und damit in Folge potenzielle Risse in Verkehrsflächen aus Beton unter deren besonderen Randbedingungen effektiv vermindert werden können. Dazu waren insbesondere Schwinduntersuchungen sowohl im frischen / erhärtenden Beton als auch im späteren Alter am erhärteten Beton mit und ohne dieser Zusätze anzustellen. Daneben war auch zu untersuchen, inwieweit die weiteren maßgebenden Betoneigenschaften wie z.B. Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Elastizitätsmodul und Frost-Taumittel-Widerstand durch SRA potenziell beeinflusst werden.

3.2 Ausgangsstoffe

Die im Rahmen dieser Untersuchungen eingesetzten Materialien sind der Tabelle 3–1 zu entnehmen.

Die beiden Zemente unterscheiden sich im Alkaligehalt. Zement A hat ein Na_2O -Äquivalent von 0,75 M.-%, während Zement B ein Na_2O -Äquivalent von 0,40 M.-% aufweist. Bei dem verwendeten Luftporenbildner handelt es sich um eine wässrige Tensidlösung.

Die beiden Schwindreduzierer sind auf Basis von Glykol (SRA 1) bzw. Polyglykol (SRA 2) hergestellt. Der Schwindreduzierer SAP besteht aus superabsorbierenden Polymeren. Die gegenseitige Verträglichkeit dieser Zusatzmittelkombinationen (SRA + LP-Bildner) wurde vom Hersteller bestätigt. Die Dosierung der verwendeten SRA-Zusatzmittel wurde in Abstimmung mit den Herstellern festgelegt. Die für den geforderten Luftgehalt (5,0 – 5,5 Vol.-%) notwendige Dosierung des Luftporenbildners wurde in Vorversuchen ermittelt.

3.3 Betonzusammensetzung

Als Basis für die Betonzusammensetzung wurde ein typischer Oberbeton (Waschbeton) mit einem Größtkorn von 8 mm zu Grunde gelegt, der die Anforderungen der TL Beton-StB 07 [N 7] erfüllt. Die Zusammensetzung des Betons einschl. der unterschiedlichen SRA-Dosierungen ist in Tabelle 3–2 dokumentiert.

3.4 Mischregime

Die Betone wurden im Betonlabor des Lehrstuhl Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum in einem Zyklus ZK 150 Zwangsmischer mit einem maximalen Mischvolumen von 150 Litern hergestellt. Das Mischregime war wie folgt:

- 30 s trockenes Vormischen der Gesteinskörnung und des Zements;
- Zugabe von 2/3 des Zugabewassers;
- weitere Mischdauer von 60 s;
- Zugabe des restlichen Drittels des Zugabewassers, dem der Schwindreduzierer beigemischt war;
- weitere Mischdauer von 60 s;
- Zugabe des Luftporenbildners;
- weitere Mischdauer von 60 s.

3.5 Untersuchungen

3.5.1 Untersuchungsmatrix

Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wurde insgesamt 12 Betone untersucht. Die dazugehörige Variationsmatrix ist in Tabelle 3–3 dargestellt. Die Aufschlüsselung der Betone zu den zugehörigen Frisch- und Festprüfungen ist in den Kapiteln 3.5.1 und 3.5.2 dokumentiert.

Material	Bezeichnung
Zement A	CEM I 42,5 N (sd)
Zement B	CEM I 42,5 N (sd)
Gesteinskörnung	Rheinsand 0/2 Basaltsplitt 2/8
Schwindreduzierer SRA 1	Basis: Glykol
Schwindreduzierer SRA 2	Basis: Polyglykol
Schwindreduzierer SAP	Basis: superabsorbierende Polymere
Luftporenbildner	Wässrige Tensidlösung / synthetischer Luftporenbildner

Tab. 3–1: Übersicht der Ausgangsstoffe

Zementgehalt	[kg/m³]	430
Zement	[-]	CEM I 42,5 N (sd)
w/z - Wert	[-]	0,43
Wassergehalt	[kg/m³]	185
Rheinsand 0/2 mm	[Vol.-%] / [kg/m³]	30 / 501
Basaltsplitt 2/8 mm	[Vol.-%] / [kg/m³]	70 / 1347
LP-Bildner	[M.-% v. Z.]	Produktabhängig
Schwindreduzierer / (SAP)	[M.-% v. Z.]	0 / 1,0 / 2,5 / (2,5 / 5,0)
Konsistenzklasse	[-]	C1 / C2
Luftgehalt	[Vol.-%]	5,0 - 5,5

Tab. 3–2: Betonzusammensetzung

Beton	Zement		Schwindreduzierer						Lagerungsbedingungen			
			Produkt			Zugabemenge [M.-%]				5 °C, 80 % rel. F.	20 °C, 65 % rel. F.	30 °C, 50 % rel. F.
			I (Glykol)	II (Polyglykol)	III (SAP)	0	1	2,5	5			
A-Ref	A	B				x					x	
A-1	x		x				x				x	
A-2	x		x					x			x	
A-3	x		x					x		x		
A-4	x		x					x				x
A-5	x			x			x				x	
A-6	x			x				x			x	
A-7	x				x			x			x	
A-8	x				x				x		x	
B-Ref		x				x					x	
B-1		x	x				x				x	
B-2		x	x					x			x	

Tab. 3–3: Variationsmatrix

Die Herstellung und Lagerung der Probekörper für die Festbetonprüfungen wurde gemäß der in Tabelle 3–3 genannten Temperaturen und rel. Luftfeuchten grundsätzlich in einer Klimakammer durchgeführt. Dabei wurden vor Betonherstellung die Ausgangs-

stoffe für mindestens 24 Stunden entsprechend der Herstell- und Lagerungstemperatur gelagert und somit vortemperiert. Die Proben wurden nach 24 Stunden ausgeschalt und im Wasserbad bis zum Betonalter von 7 Tagen bei den geforderten Tempe-

raturen gelagert. Anschließend wurden die Proben bis zur Prüfung an Luft (außer den Prüfkörpern zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit) bei den jeweiligen geforderten rel. Luftfeuchten und Temperaturen gelagert.

3.5.2 Frischbetonuntersuchungen

3.5.2.1 Konsistenzprüfung und Verarbeitbarkeitsdauer

Die Konsistenz des Frischbetons wurde anhand des Verdichtungsmaßes nach DIN EN 12350-4 [N 8] nach 10, 30 und 60 Minuten nach der Wasserzugabe an allen Betonen bestimmt.

3.5.2.2 Frischbetonrohddichte und -temperatur

Die Frischbetonrohddichte wurde nach DIN EN 12350-6 [N 9] innerhalb von 10 Minuten nach Betonherstellung an allen Betonen ermittelt. Parallel dazu wurde die Frischbetontemperatur mit einem Digital-Thermometer erfasst.

3.5.2.3 Luftgehalt

Der Luftgehalt wurde nach DIN EN 12350-7 [N 10] mit einem LP-Topf nach dem Druckausgleichsverfahren 10 und 60 Minuten nach Wasserzugabe an allen Frischbetonen bestimmt.

3.5.3 Festbetonuntersuchungen

3.5.3.1 Druckfestigkeit

Die Ermittlung der Druckfestigkeit erfolgte für alle Betone im Alter von 2, 7, 28, 180 Tagen sowie nach 1,5 Jahren (548 Tagen) an jeweils 3 Würfeln gemäß DIN EN 12390-3 [N 4] in einer Universalprüfmaschine mit einer Höchstlast von 5000 kN. Als Probekörper wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm nach DIN EN 12390-1 [N 11] herangezogen. Zusätzlich wurde an den Betonen A-Ref, B-Ref, A-2 und B-2 die Frühfestigkeit nach 6, 9 und 12 Stunden bei 20 °C, ebenfalls an Würfeln mit $a = 150 \text{ mm}$, bestimmt.

3.5.3.2 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde an allen Betonen im Alter von 2, 7, 28, 56 und 180 Tagen sowie nach 1,5 Jahren nach AL Sp-Beton [N 2] an einer Universalprüfmaschine mit einer Höchstlast von 250 kN ermittelt. Die Probekörper hierfür wurden als Scheiben (je drei Proben, $d = 100 \text{ mm}$, $h = 50 \text{ mm}$), aus den unteren Bereichen von Zylindern ($d = 100 \text{ mm}/h = 200 \text{ mm}$) gewonnen.

3.5.3.3 Statischer Elastizitätsmodul

Die Ermittlung des statischen E-Moduls erfolgte nach DIN EN 12390-13 [N 15] im Alter von 28 Tagen an Zylindern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm aus den Betonen A-Ref, A-1, A-2, A-5, A-6, A-8 und B-Ref sowie B-1 und B-2 gemäß DIN EN 12390-1 [N 11]. Die Prüfungen erfolgten an einer Universalprüfmaschine mit einer Höchstlast von 5000 kN. Die Verformungen der Proben wurden mit zwei gegenüberliegenden Dehnungsaufnehmern (DD1 der Fa. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) erfasst.

3.5.3.4 Luftporenkennwerte

Die Luftporenkennwerte (Luftgehalt A , Mikroluftporengehalt A_{300} , Abstandsfaktor \bar{L}) wurden im Alter von mindestens 28 Tagen gemäß DIN EN 480-11 an Feinschliffen aus Proben der Betone A-Ref, A-2, A-6, A-8 und B-Ref sowie B-2 bestimmt.

3.5.3.5 Widerstand gegen Frost-Taumittelbeanspruchung

Der Widerstand gegen Frost-Taumittelbeanspruchung wurde an den Betonen A-Ref, A-2, A-6, A-8 und B-Ref sowie B-2 in der CDF-Prüfung gemäß BAW Richtlinie [N 13] ermittelt.

3.5.3.6 Schwindverformungen im jungen Alter (Frühschwinden)

Die Schwindverformungen im jungen Alter bis 2 Tage (Frühschwinden) wurden an allen Betonen mit Hilfe des Schwindkegels bestimmt. Hierbei handelt es sich um ein Prüfsystem der Fa. Schleibinger (Bild 3–1), das eine berührungslose und kontinuierliche Messung der Schwindverformungen durch einen Laserstrahl über den gesamten Messzeitraum ermöglicht. Hierbei wird eine Kegelform mit Frischbeton gefüllt. Auf der Betonoberfläche wird mittig ein mattes Plättchen schwimmend aufgelegt, das als Reflektor für den Laserstrahl dient. Die Probenoberfläche wird durch Auflegen einer Folie gegen Austrocknung geschützt. Die Messwerte werden direkt über ein Datenerfassungssystem digitalisiert und in einem PC gespeichert.

3.5.3.7 Schwindverformungen (Trocknungsschwinden)

Die Ermittlung der Verformungen infolge Trocknungsschwinden erfolgte bei allen Betonen an je drei Zylindern ($d = 75 \text{ mm}/h = 300 \text{ mm}$) mit jeweils



Bild 3-1: Schwindkegel von Schleibinger [54]



Bild 3-2: Messrahmen zur Bestimmung der Längenänderung infolge Trocknungsschwinden

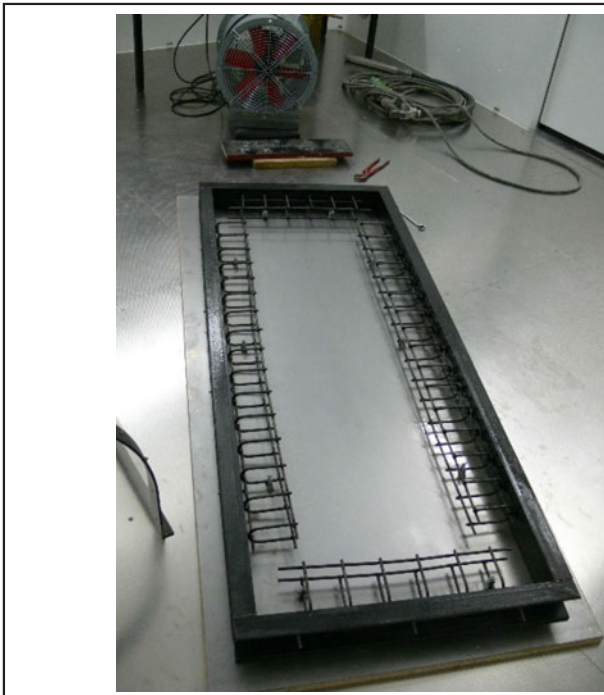


Bild 3-3: Untersuchung der Schrupfrissneigung (links: Schwindrahmen, rechts: betonierte Platte im Windkanal)

zwei Messstrecken über die Zylinderhöhe (Bild 3-2). Die Zylinder wurden 1 Tag nach der Herstellung ausgeschalt und für sechs weitere Tage unter Wasser gelagert. Am 7. Tag wurden diese aus dem Wasserbad entnommen und in einer Klimakammer bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagert. Zu die-

sem Zeitpunkt wurden die Messmarken auf die beiden Stirnflächen der Probekörper geklebt und die Nullmessung durchgeführt. Die weiteren Längenmessungen erfolgten im Anschluss nach 2, 7, 14, 28, 56, 90 und 180 Tagen.

3.5.3.8 Zyklisches Schwinden

An den Betonen A-Ref, A-2, A-6, A-8 und B-Ref sowie B-2 wurde nach einer 90-tägigen Vorlagerung bei 20 °C und 65% rel. Feuchte durch vier Zyklen (4 Tage bei 20 °C, 99% rel. F.; 14 Tage bei 20 °C und 65% rel. F.) der Einfluss veränderlicher, hygrischer Randbedingungen auf die Größe des Schwindmaßes an Probekörpern wie in 3.5.3.7 beschrieben untersucht.

3.5.3.9 Behindertes Frühschwinden

Bei der Untersuchung des behinderten Schwindens wurde die Neigung zur Rissbildung infolge Frühschwinden an einer Platte (1600x600x80mm³) geprüft, die zuvor in einen Schwindrahmen mit umlaufender Bewehrung (Bild 3–3, links) betoniert worden war. Diese Untersuchung wurde an den Betonen A-Ref, A-2, A-6, A-8 und B-Ref sowie B-2 durchgeführt. Nach der Verdichtung des Frischbetons wurde die Platte in einem Windkanal einer Windgeschwindigkeit von rd. 5m/s sowie einem Umgebungsklima von 30 °C und 50% rel. Feuchte ausgesetzt (Bild 3–3, rechts). In Anlehnung an das Heft 302 des DAfStb [55] wurde die Rissbildung über einen Zeitraum von 7 Stunden visuell verfolgt und dokumentiert. Die Auswertung des Rissbildes erfolgte über die Rissöffnungsfläche, dem Produkt von Rissbreite und -länge. Parallel dazu wurden über einen Zeitraum von 7 Stunden an gesondert hergestellten Platten (300x300x80mm³) die Verdunstung aus dem Frischbeton durch Wägung bestimmt.

4 Ergebnisse

4.1 Frischbetonuntersuchungen

4.1.1 Luftgehalt im Frischbeton

Der im Frischbeton ermittelte Luftgehalt lag für alle untersuchten Frischbetone 10 Min nach Herstellung zwischen 5,0 Vol.-% und 6,2 Vol.-% (Bild 4–1). Bis zum Zeitpunkt 60 Min nach Herstellung nahmen die Luftgehalte ab. Vor allem die Betone mit Zement A wiesen einen deutlichen Rückgang im Luftgehalt (stets mind. 1,1 Vol.-%) auf.

Durch die SRA-Zugabe (SRA 1/SRA 2 auf Basis Glykol bzw. Polyglykol) wurde der Luftgehalt im Frischbeton zu keinem der beiden Prüfzeitpunkte merklich beeinflusst.

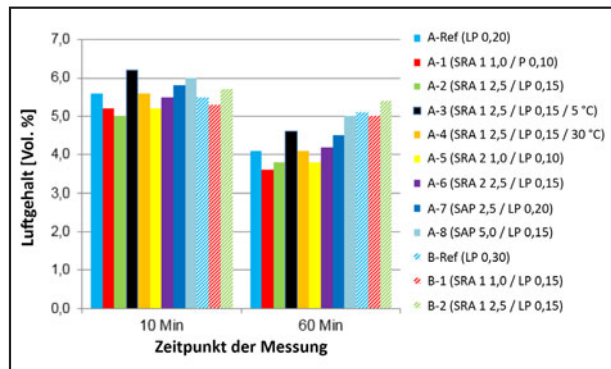


Bild 4–1: Luftgehalte im Frischbeton aller Betone nach 10 und 60 Minuten nach Herstellung

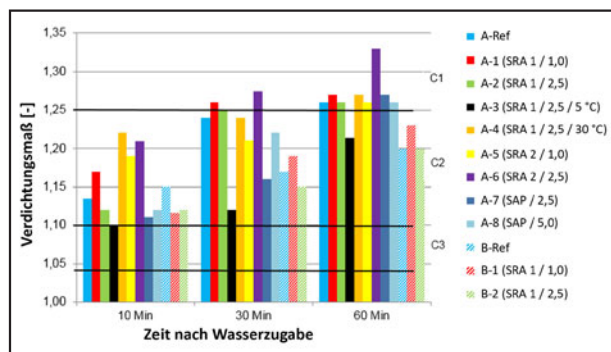


Bild 4–2: Konsistenzentwicklung aller Betone nach 10, 30 und 60 Minuten nach Herstellung

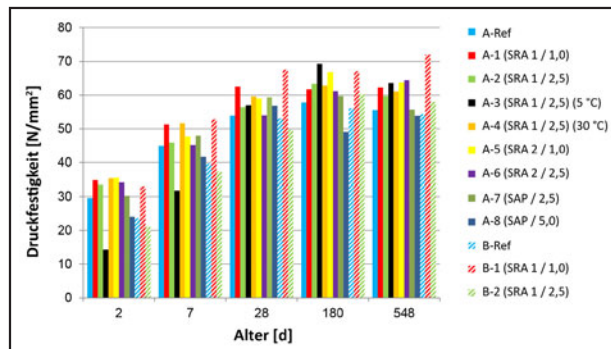


Bild 4–3: Mittlere Druckfestigkeiten aller Betone

4.1.2 Konsistenz (Verdichtungsmaß)

Hinsichtlich der Konsistenz lagen die Verdichtungsmaße zwischen den Klassen C1 und C2 (Bild 4–2). Das Ansteifverhalten bis zum Alter von 60 Minuten war bei sämtlichen Betonen vergleichbar und wies keine signifikanten Unterschiede auf.

4.2 Festbetonuntersuchungen

4.2.1 Druckfestigkeit

In Bild 4–3 sind die Druckfestigkeiten aller Betone bis zu einem Alter von 548 Tagen dargestellt. Die Ergebnisse stellen jeweils Mittelwerte aus drei Einzelwerten dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass kein signifikanter Einfluss der verwendeten SRA (vor allem in Verbindung mit Zement A und mit Ausnahme der Festigkeiten des Betons A-3 im Alter von 2 und 7 Tagen) feststellbar war. Die geringfügig erhöhte Festigkeit des Betons A-1 kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den vergleichsweise niedrigen Luftgehalt im Festbeton (3,34 Vol.-%) zurückgeführt werden. Die Ursache für die abweichende Druckfestigkeit des Betons B-1 konnte nicht abschließend geklärt werden. Die deutlich langsamere Festigkeitsbildung des Betons A-3 bis zum Alter von 7 Tagen hängt mit der planmäßig niedrigeren Herstell- und Lagerungstemperatur von 5 °C zusammen.

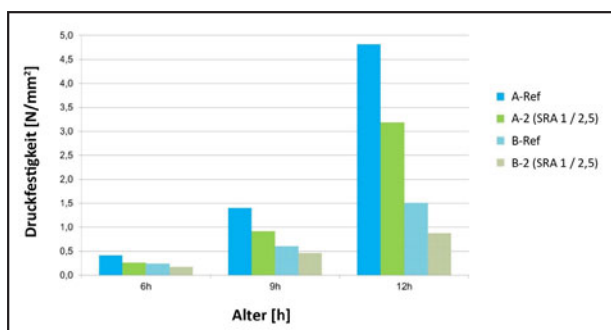


Bild 4-4: Frühfestigkeiten der Betone A-Ref, A-2, B-Ref und B-2

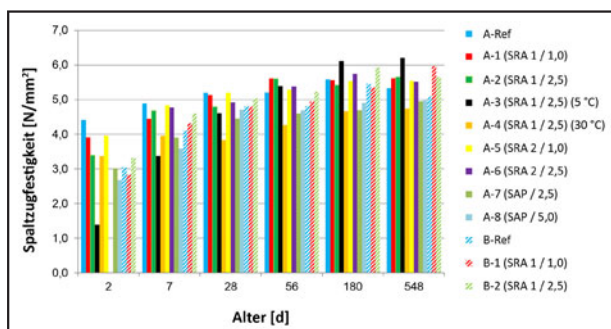


Bild 4-5: Mittlere Spaltzugfestigkeiten aller Betone

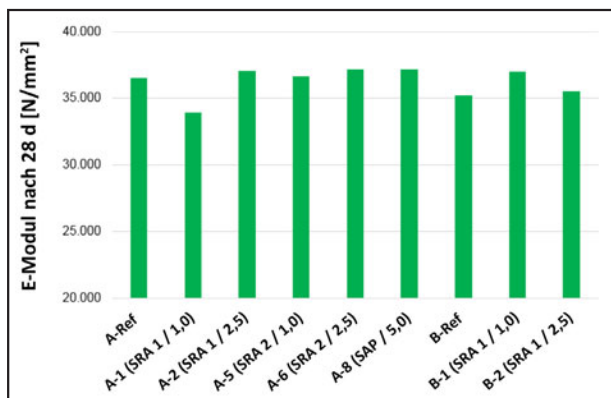


Bild 4-6: Statische E-Moduln nach 28 Tagen

4.2.2 Frühfestigkeit

In Bild 4-4 sind die Frühfestigkeiten der Betone A-Ref, A-2, B-Ref und B-2 nach 6, 9 und 12 Stunden dargestellt. Die Ergebnisse stellen jeweils Mittelwerte aus drei Einzelwerten dar.

Bei Betrachtung der jeweiligen Betone mit dem gleichen Zement wird deutlich, dass die Zugabe von SRA die Frühfestigkeiten verminderten. Der Unterschied in der Frühfestigkeit bis zum Alter von 12 Stunden lag sowohl bei den Betonen mit Zement A als auch bei jenen mit Zement B gegenüber den jeweiligen Referenzbetonen bei rd. 30%.

4.2.3 Spaltzugfestigkeit

In Bild 4-5 sind die ermittelten Spaltzugfestigkeiten dargestellt. Nach 28 Tagen lag die Spaltzugfestigkeit aller Betone mit Werten zwischen 4,8 und 5,1 N/mm² sehr dicht beieinander. Erwartungsgemäß wies der Beton A-3 (planmäßige Herstell- und Lagerungstemperatur: 5 °C) im Vergleich zu den Betonen, welche bei 20 °C hergestellt und gelagert wurden, innerhalb der ersten 7 Tage die geringste Spaltzugfestigkeit auf. Im Alter von 28 Tagen lag die Spaltzugfestigkeit des Betons A-3 auf mehr oder weniger gleichem Niveau, nach 180 Tagen und 1,5 Jahren wies dieser Beton sogar eine höhere Spaltzugfestigkeit auf als die 20 °C-Betone. Ein genau gegenläufiges Verhalten wie der Beton A-3 zeigte – erwartungsgemäß – der Beton A4 (Herstellung- und Lagerungstemperatur: 30 °C). Global betrachtet konnte bei diesen Untersuchungen kein signifikanter Einfluss der SRA auf die Spaltzugfestigkeit festgestellt werden.

4.2.4 Statischer E-Modul

In Bild 4-6 sind die im Alter von 28 Tagen ermittelten E-Moduln der Betone A-Ref, A-1, A-2, A-5, A-6, A-8 und B-Ref sowie B-1 und B-2 dargestellt. Alle E-Moduln lagen im erwarteten Bereich zwischen ca. 34.000 und 36.500 N/mm². Wie bei den Untersuchungen der Druck- sowie Spaltzugfestigkeit waren auch hier keine größeren Abweichungen untereinander festzustellen und auch kein bemerkenswerter Einfluss der SRA auf diesen Kennwert zu detektieren.

4.2.5 Luftporenkennwerte

In Tabelle 4-1 sind die an ausgewählten Betonen am Festbeton ermittelten charakteristischen Luftporen-

Beton	Luftgehalt A [Vol.-%]	A ₃₀₀ [Vol.-%]	Abstandsfaktor \bar{L} [mm]
A-Ref	4,28	1,42	0,21
A-2 (SRA 1 / 2,5)	4,88	1,69	0,29
A-5 (SRA 2 / 1,0)	4,57	1,23	0,33
A-6 (SRA 2 / 2,5)	4,06	0,78	0,32
A-8 (SAP 5,0)	5,30	3,58	0,13
B-Ref	6,06	2,83	0,13
B-2 (SRA 1 / 2,5)	5,21	2,27	0,19

Tab. 4–1: Ergebnisse der mikroskopischen Ermittlung der Luftporenkennwerte im Festbeton

Art der Prüfung	Mikroluftporengehalt A ₃₀₀ [Vol.-%]	Abstandsfaktor \bar{L} [mm]
Eignungs-/Erstprüfung	≥ 1,8	≤ 0,20
Bauwerksprüfung	≥ 1,5	≤ 0,24

Tab. 4–2: Anforderung an Luftporenkennwerte im Festbeton aus [N 14]

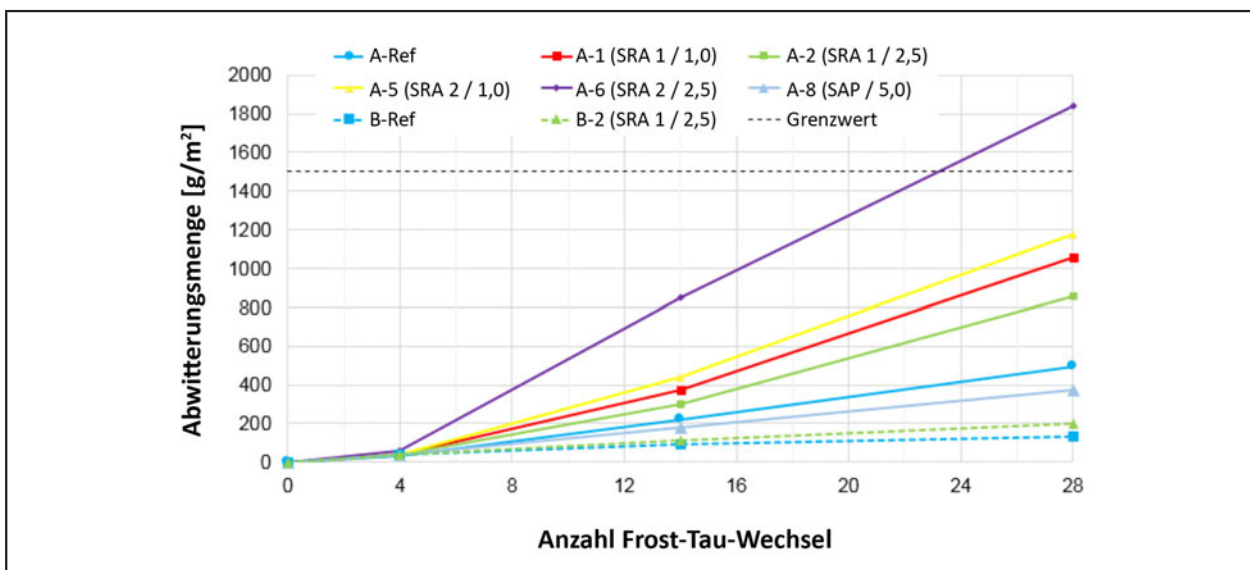


Bild 4–7: Abwitterungsmengen im CDF-Prüfverfahren nach [N 13]

kennwerte (Luftgehalt A, Mikroluftgehalt A₃₀₀ und Abstandsfaktor \bar{L}) im Festbeton dargestellt.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Gesamtluftgehalt A im Festbeton durch die SRA 1 und 2 auf Glykol- bzw. Polyglykolbasis nicht merklich beeinflusst wird. Dies korreliert auch mit den Feststellungen bei der Prüfung des Luftgehalts im Frischbeton (vgl. Abschnitt 4.1.1). Hingegen wurden die Mikroluftporenkennwerte (Mikroluftporengehalt A₃₀₀ und insbesondere der Abstandsfaktor \bar{L}) durch diese SRA-Zusätze gegenüber dem jeweiligen Referenzbeton zum Teil so signifikant beeinträchtigt, dass die

Anforderungen an die Luftporenkennwerte (Tabelle 4–2) nicht mehr erfüllt werden konnten. Somit ist auch davon auszugehen, dass ein ausreichender Frost-Taumittelwiderstand nicht mehr sichergestellt werden kann.

Durch die Zugabe von 5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt, an SAP (Beton A-8) wurde im Festbeton ein um rd. 0,5 bis 1 Vol.-% höherer Gesamtluftgehalt festgestellt. Dies ist nicht zuletzt auf die Struktur dieses Zusatzes zurückzuführen. Aufgrund der hohlkugelartigen Mikrostruktur wurden durch diese SAP quasi zusätzlich Mikroluftporen in das Betongefüge

eingbracht. Daher wurden auch insbesondere der Mikroluftporengehalt und der Abstandsfaktor gegenüber dem Referenzbeton noch erheblich verbessert.

4.2.6 Frost-Taumittel-Widerstand

Die Abwitterungsmengen der Betone, die in CDF-Prüfungen nach dem BAW Merkblatt [N 13] untersucht worden waren, sind in Bild 4–7 dargestellt. Gleichzeitig ist dort der für einen ausreichenden Frost-Taumittel-Widerstand allgemein anerkannte Grenzwert von 1500 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln dargestellt (gestrichelte horizontale Linie). Die eingetragenen Messwerte stellen das arithmetische Mittel aus fünf Einzelproben (Gesamtprüffläche > 800 cm²) dar.

Zunächst kann festgehalten werden, dass die untersuchten Betone mit Ausnahme des Betons A-6 den o. g. Grenzwert eingehalten haben. Bei den Betonen mit Zement A wies der Referenzbeton nach 28 FTW mit rd. 500 g/m² für einen Luftporenbeton schon vergleichsweise hohe Abwitterungen auf. Durch die Zugabe der SRA-Zusätze wurden diese Abwitterungen noch erhöht, wobei der Beton mit 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SRA 2 (Beton A-6) mit Abwitterungsmengen nach 28 FTW von über 1800 g/m² den Grenzwert von 1500 g/m² deutlich überschritt. Die Zunahme in den Abwitterungsmengen durch die Zugabe von SRA korreliert sehr gut mit den ungünstigeren Mikroluftporenkennwerten dieser Betone; so wies Beton A-6 mit den höchsten Abwitterungsmengen den niedrigsten Mikroluftporengehalt A₃₀₀

(0,78 Vol.-%) und mit 0,32 mm mit den höchsten Abstandsfaktor auf (Bild 4–8; vgl. Tabelle 4–1).

Somit kann davon ausgegangen werden, dass der teilweise reduzierte Frost-Taumittel-Widerstand der Betone mit SRA auf deren ungünstiges Mikroluftporensystem zurückzuführen ist.

Wenngleich die Betone B-Ref und B-2 die geringsten Abwitterungsmengen der untersuchten Betone aufwiesen, zeigte sich auch hier, dass sich die Abwitterungen nach 28 FTW durch die Zugabe von 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SRA 1 gegenüber dem Referenzbeton um rd. 25 % erhöhten.

Demgegenüber wurde bei Beton mit Zement A durch die Zugabe von 5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SAP die Abwitterungsmenge nach 28 FTW gegenüber dem Referenzbeton um rd. 15 % vermindert. Dies kann mit dem hier durch die SAP positiv veränderte Mikroluftporensystem in Verbindung gebracht werden.

4.2.7 Schwinden

4.2.7.1 Frühschwinden

Die mit dem Schwindkegel der Fa. Schleibinger bis zum Alter von 96 Stunden ermittelten Verformungen infolge Frühschwinden sind in Bild 4-9 dargestellt.

Eindrucksvoll zeigte sich bei allen Betonen (mit / ohne SRA), dass sich der Großteil der Verformungen je nach Zement-SRA-Kombination innerhalb

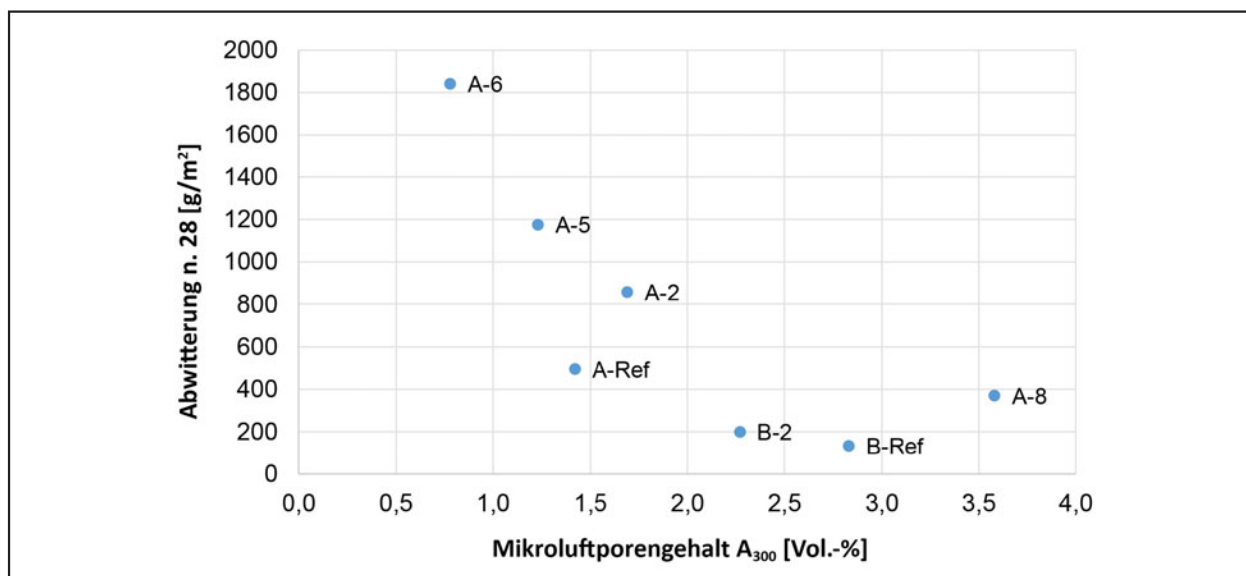


Bild 4–8: Gegenüberstellung der Abwitterungsmengen (nach 28 Frost-Tau-Wechseln) im CDF-Prüfverfahren nach [N 13] und dem Mikroluftporengehalt A₃₀₀

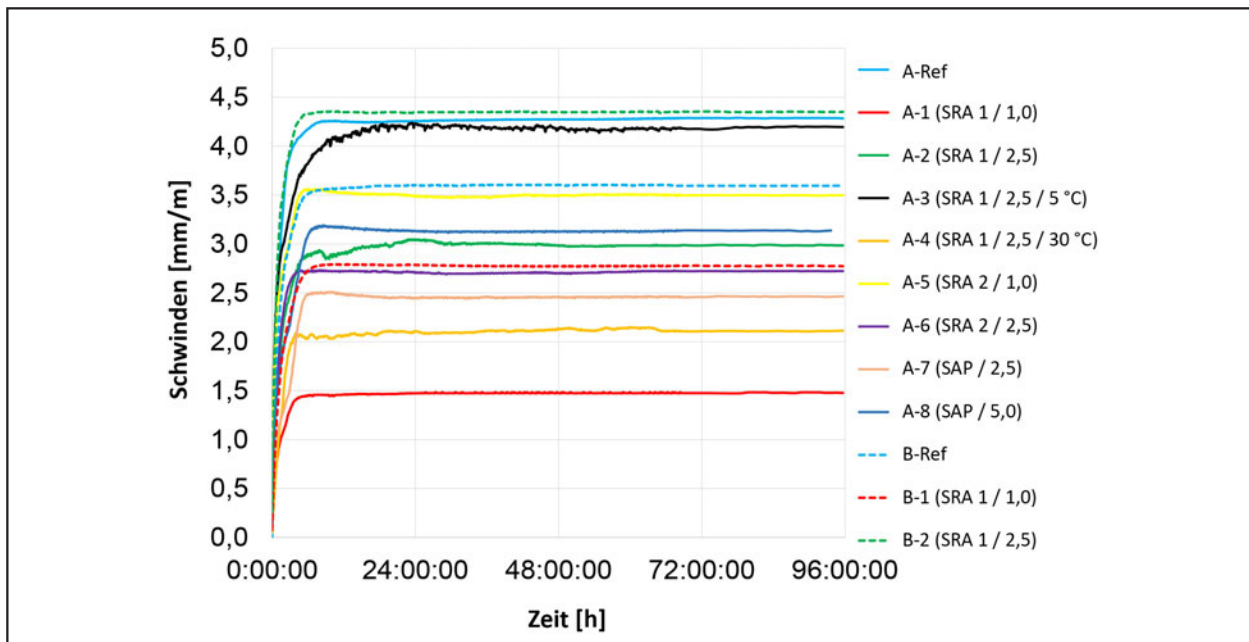


Bild 4–9: Frühschwinden ohne Berücksichtigung des Erstarrungsbeginns

der ersten zwei bis vier Stunden einstellte. In der anschließenden Phase bis zum Alter von 96 Stunden nahmen die Verformungen nur noch marginal zu. Gleichzeitig ist festzustellen, dass die Verformungen innerhalb dieser ersten zwei bis vier Stunden mit Werten zwischen 1,5 und 4,5 mm/m extrem hoch waren. Nachdem die Oberfläche der Proben im Schwindkegel durch die aufgelegte Folie gegen Austrocknung geschützt war und in dieser allerersten Phase auch ein chemisches Schwinden nur bedingt aufgetreten sein kann, muss davon ausgegangen werden, dass der größte Teil dieser anfänglich gemessenen Verformungen nicht primär durch Frühschwinden generiert wurde, sondern vielmehr auf ein Nachsacken des Frischbetons im Schwindkegel zurückzuführen ist. Um diesen Effekt bei der Bewertung des Frühschwindens zu eliminieren wurden die Schwindverformungen ansatzweise erst ab dem Zeitpunkt betrachtet, ab dem ein Nachsacken nicht mehr zu befürchten war. Näherungsweise kann man davon ausgehen, dass dies nach dem Erstarrungsbeginn des Zementleims der Fall ist.

Dazu wurde zunächst der Erstarrungsbeginn an den Zementleimen mit dem jeweiligen SRA nach DIN EN 196-3 bestimmt. Anschließend wurde der Messbeginn der Verformungsmessungen aus Bild 4–9 auf den jeweiligen Erstarrungsbeginn gelegt. Der Erstarrungsbeginn bei den Betonen mit Zement A variierte von 102 Minuten (A-1) bis 315 Minuten (A-8) und bei den Betonen mit Zement B von 160 (B-Ref) Minuten bis 282 (B-1) Minuten. Diese Ergebnisse

Beton	Erstarrungsbeginn [min]	abgezogener Setzungswert [mm/m]
A-Ref	120	3,528
A-1	102	1,053
A-2	287	2,833
A-3	302	3,753
A-4	227	2,065
A-5	237	3,373
A-6	152	2,524
A-7	257	2,160
A-8	315	2,938
B-Ref	160	2,928
B-1	282	2,622
B-2	207	4,085

Tab. 4–3: Erstarrungsbeginn der Leime der Betone mit SRA und dazugehöriger Setzungswert

liegen hierbei noch im üblichen Bereich, wobei eine leichte und nicht signifikante Verzögerung des Erstarrungsbeginns durch den Einsatz von SRA tendenziell zu erkennen ist. Die Tabelle 4–3 zeigt die Erstarrungszeiten und den Messwert der Kurven als Schnittpunkt im Rahmen der Bereinigung um das Nachsacken des Betons im Schwindkegel. Die so angepassten Kurven sind in Bild 4–10 dargestellt.

Durch diese Modifikation hat sich zum einen die Reihenfolge der Betone in den erreichten Schwindverformungen geändert, zum anderen lagen die

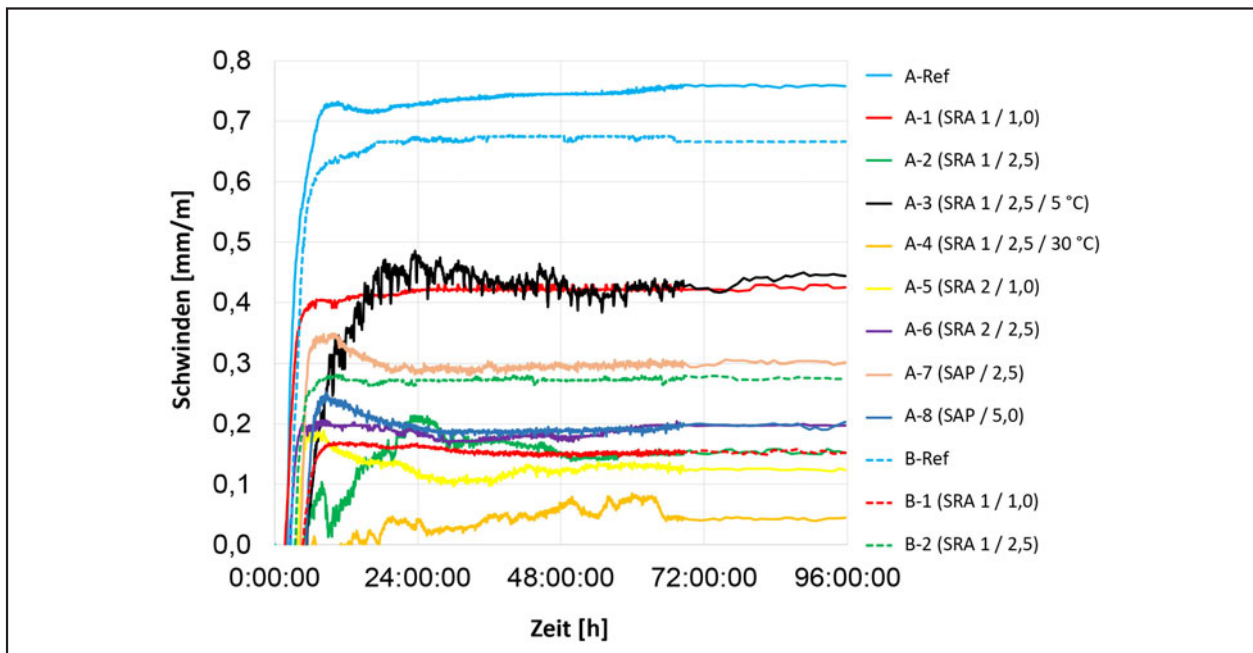


Bild 4–10: Frühschwinden mit Berücksichtigung des Erstarrungsbeginns

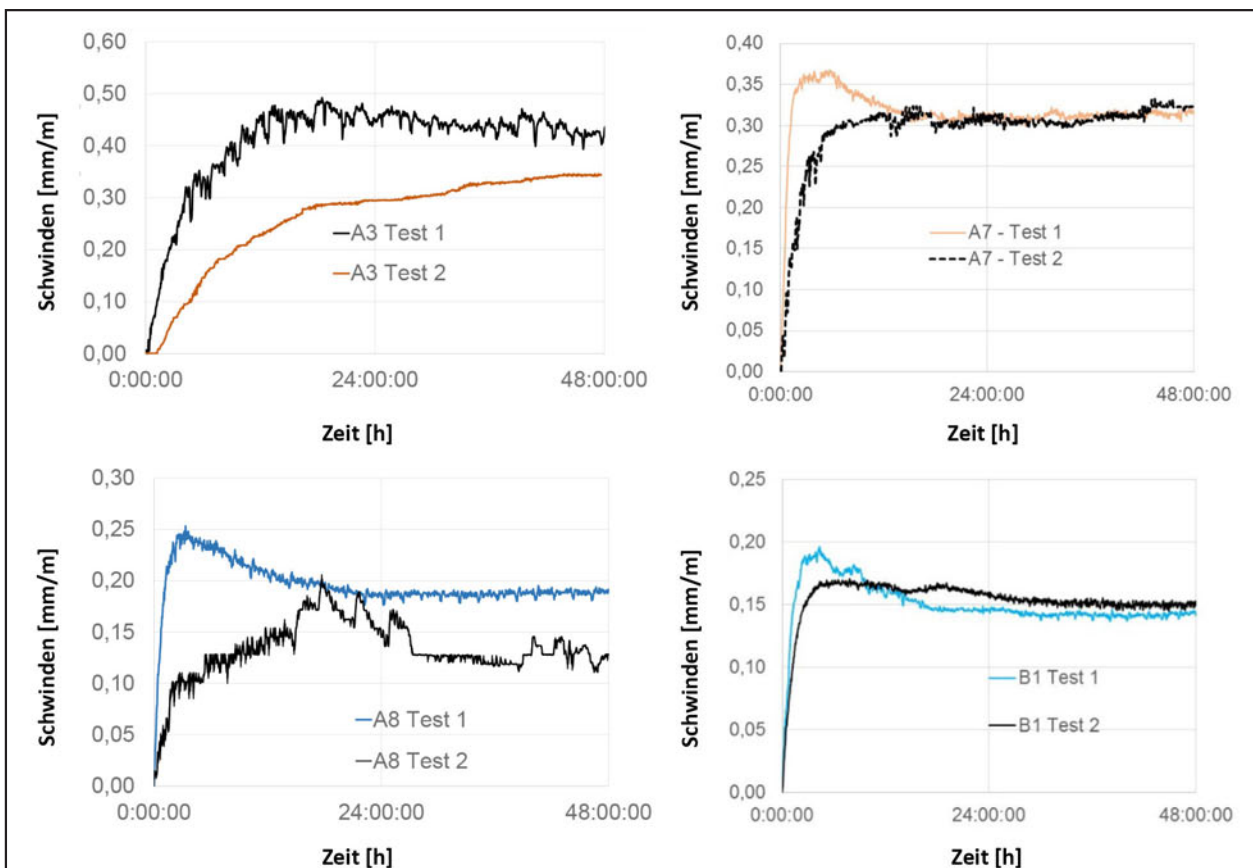


Bild 4–11: Reproduzierbarkeit der Frühschwindmaße am Beispiel der Betone A3, A7, A8 und B1

Schwindverformungen mit Werten zwischen rd. 0,05 mm/m und 0,7 mm/m in einer anderen Größenordnung als ohne diese Anpassung. Gleichzeitig kann festgehalten werden, dass das Frühschwin-

den der Betone mit SRA im Vergleich zu jeweiligen Referenzbetone ohne SRA zum Teil deutlich reduziert wurde. Ein geringeres Na_2O -Äquivalent führt normalerweise zu einem geringeren Schwinden.

Dies konnte für das Fröhschwinden für die beiden Zemente (Na_2O -Äquiv.: Zement B: 0,40 M.-%; Zement A: 0,75 M.-%), jeweils mit SRA-Zugabe, nicht vollumfänglich bestätigt werden.

Das Fröhschwinden wurde für die Betone A-3, A-7, A-8 und B-1 in jeweils einem weiteren Wiederholversuch bis zum Alter von 2 Tagen erneut bestimmt. Wie aus Bild 4–11 zu erkennen ist, wurden bei den Betonen A-7 und B-1 zumindest ab einem Alter von rd. 6 Stunden nahezu deckungsgleiche Schwindverformungen ermittelt. Hingegen stellten sich bei den Betonen A-3 und A-8 zwischen den beiden Versuchsreihen größere Unterschiede in den Prüfergebnisse ein. Dies dokumentiert, dass diese Prüfmethode ein vergleichsweise sensibles Verfahren darstellt. Dabei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass die Verformungsprozesse im jungen Beton in dieser Phase selbst nur bedingt gleichartig und damit reproduzierbar ablaufen. Gleichzeitig sind nur wenige Prüfverfahren verfügbar, mit denen diese Fröhschwindverformungen erfasst werden können. Der hier eingesetzte Schwindkegel zählt derzeit zu dem am meist verwendeten Verfahren.

4.2.7.2 Schwindverformungen an Festbetonen (Trocknungsschwinden)

In Bild 4–12 sind die an den Zylindern bis zum Alter von 180 Tagen ermittelten Schwindverformun-

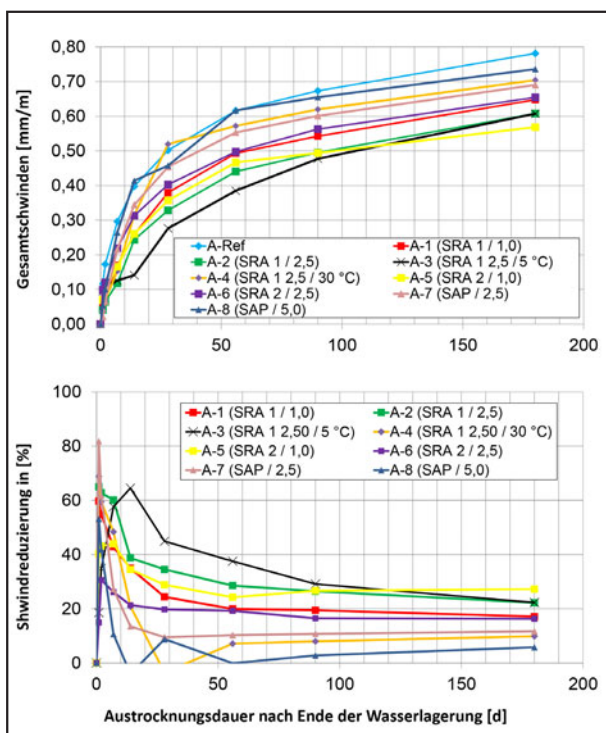


Bild 4–12: Schwindverformungen an Betonen mit Zement A

gen infolge Trocknungsschwinden, beginnend ab dem Ende der Wasserlagerung im Alter von 7 Tagen, (vgl. Abschnitt 3.5.3.7) für die Betone mit Zement A, in Bild 4–13 diejenigen für die Betone mit Zement B dargestellt. In der oberen Bildhälfte sind jeweils die gemessenen Schwindverformungen in mm/m dokumentiert, in der unteren Bildhälfte ist die zugehörige Schwindreduzierung in % infolge der SRA dargestellt. Letztere ergibt sich aus der Differenz der Schwindverformungen der Betone mit SRA zum zugehörigen Referenzbeton, bezogen auf die Schwindverformung des Referenzbetons.

Bei beiden Betonen zeigte sich, dass durch die Zugabe von SRA die Schwindverformungen reduziert werden konnten. Nach 180 Tagen wiesen die beiden Referenzbetone (ohne SRA) Schwindverkürzungen infolge Trocknungsschwinden von rd. 0,75 bis 0,8 mm/m auf. Demgegenüber lagen die Schwindverformungen bei den Betonen mit Zement A und SRA überwiegend zwischen 0,6 und 0,7 mm/m, bei den Betonen mit Zement B und SRA zwischen 0,5 und 0,6 mm/m. Dementsprechend ergab sich bei alleiniger Betrachtung des Trocknungsschwindens bei den Betonen mit Zement A eine Schwindreduzierung infolge SRA lediglich in der Größenordnung von ca. 10% bis 30%, bei den Betonen mit Zement B und SRA von 20% bzw. 35%, bezogen auf die Schwindverformung des jeweiligen Referenzbetons.

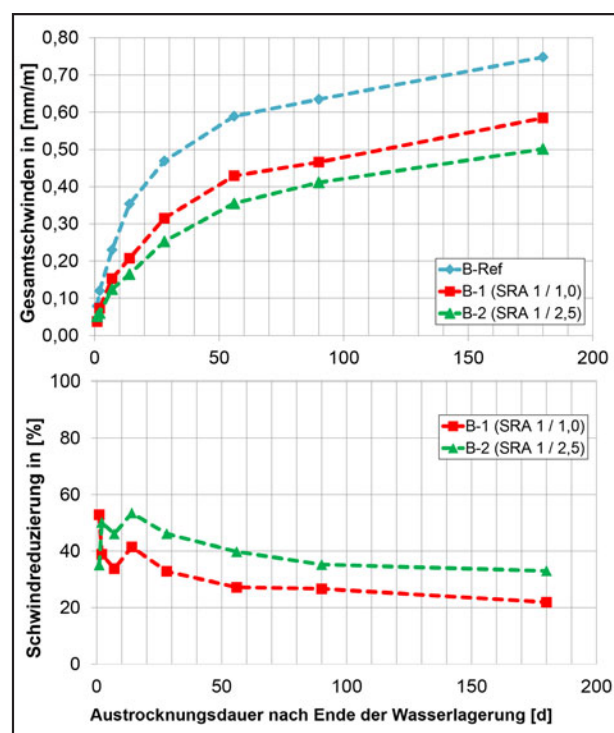


Bild 4–13: Schwindverformungen an Betonen mit Zement B

Bei diesen Betrachtungen ist zu berücksichtigen dass der Beton zum Zeitpunkt des Beginns dieser Schwindmessungen bereits 7 Tage alt war. Somit sind Schwindverformungen, die zuvor auftreten können, hier nicht berücksichtigt. Hingegen haben die Untersuchungen zum Frühschwinden gezeigt, dass sich in den ersten Tagen bereits erhebliche Schwindverformungen einstellen, die durch SRA durchaus vermindert werden können (vgl. Bild 4–10).

Um eine ganzheitliche Betrachtung der Auswirkungen von SRA auf die Schwindverformungen vornehmen zu können, wurden die Verformungen infolge Trocknungsschwinden denen infolge Frühschwinden überlagert. Dazu wurde der Maximalwert des Frühschwindens bei Berücksichtigung des Erstarungsbeginns als Ausgangswert der Schwindverformungen angesetzt, die Verformungen infolge Trocknungsschwinden wurden entsprechend darauf zuaddiert. Diese so überlagerten Verformungen infolge Gesamtschwinden sind für die Betone mit Zement A in Bild 4–14, für die Betone mit Zement B in Bild 4–15 dargestellt. Analog den obigen Bildern sind im oberen Teil jeweils die Schwindverformungen in mm/m, im unteren Teil die zugehörige Schwindreduzierung durch die SRA in % dokumentiert.

Aus dieser Gesamtbetrachtung wird Folgendes deutlich:

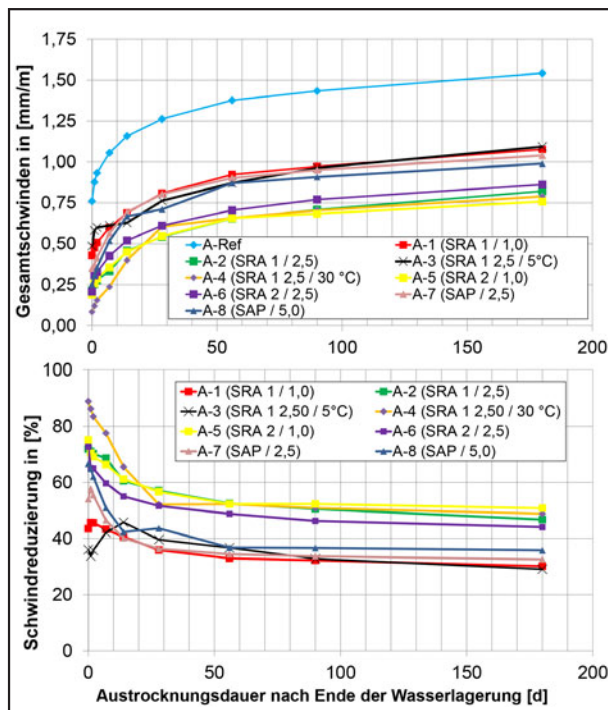


Bild 4–14: Überlagerte Schwindverformungen (aus Frühschwinden (=Startwert) und Trocknungsschwinden) an den Betonen mit Zement A

- Die Schwindverformungen der Betone ohne SRA (Referenzbetone) liegen nach insgesamt 187 Tagen in der Größenordnung von rd. 1,5 mm/m.
- Durch die Zugabe von SRA reduzierten sich diese bei Beton mit Zement A global betrachtet auf rd. 0,75 mm/m bis 1,1 mm/m bzw. auf rd. 0,75 mm/m bei Beton mit Zement B. Dementsprechend wurde nach 187 Tagen eine Schwindreduzierung durch diese Zusätze von rd. 30 % bis 50 % erreicht.
- Die Schwindreduzierung war in der Anfangsphase stets größer und nahm dann im Lauf der Zeit auf die genannten Werte ab. Daraus kann abgeleitet werden, dass die schwindreduzierende Wirkung der SRA sich vor allem beim Frühschwinden und in den ersten Tagen einer Austrocknung des Festbetons zeigt. Der Verlauf dieser Schwindreduzierungskurven war nach 187 Tagen noch nicht horizontal, d. h. es kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Effekt der SRA bei weiterer Austrocknung noch weiter zurückgeht.
- Die Schwindverformungen des Referenzbetons mit Zement B lagen nur marginal unter denen des Referenzbetons mit Zement A. Hingegen zeigte sich bei den Betonen mit Zement B (bei einem Na_2O -Äquivalent von 0,40 M.-%) eine grö-

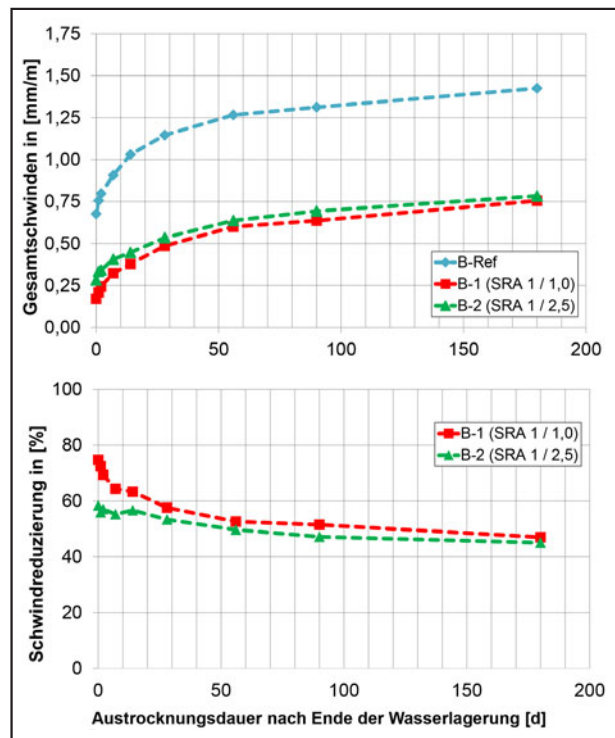


Bild 4–15: Überlagerte Schwindverformungen (aus Frühschwinden (=Startwert) und Trocknungsschwinden) an den Betonen mit Zement B unter Hinzunahme des Frühschwindens

ßere Verminderung der Schwindverformungen durch SRA als bei den Betonen mit Zement A (bei einem Na_2O -Äquivalent von 0,75 M.-%).

- Durch die Zugabe von SRA 1 auf Basis Glykol wurden die Schwindverformungen des Betons (mit Zement A) bei einer Dosierung 1,0 M.-%/Z. weniger reduziert als durch die Zugabe von SRA 2 auf Basis Polyglykol.
- Bei Beton mit Zement A (Na_2O -Äquivalent: 0,75 M.-%) wurden die Schwindverformungen erwartungsgemäß bei dem SRA 1 mit zunehmender Dosierung ein- und desselben SRA-Zusatzes stärker reduziert. Bei Einsatz von SRA 2 liegt die Schwindreduktion bei Berücksichtigung des Fröhschwindens in etwa auf gleichem Niveau. Bei Beton mit Zement B (Na_2O -Äquivalent: 0,40 M.-%) lagen die Schwindverformungen bei einer Zugabe von 1,0 M.-%, bez. auf den Zementgehalt, an SRA 1 in gleicher Höhe bzw. sogar geringfügig niedriger als bei einer Zugabemenge von 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt, desselben Produkts. Daraus lässt sich ableiten, dass die optimale Zugabemenge von SRA – wie auch von anderen Betonzusatzmitteln bekannt – von der chemischen Zusammensetzung beeinflusst wird.
- Die Zugabe von 2,5 M.-% bzw. 5,0 M.-%, jeweils bez. auf den Zementgehalt, an SAP führte bei Beton mit Zement A nach 187 Tagen zu einer vergleichbaren Verminderung der Schwindverformungen (35 % bis 40 %) wie die SRA auf Basis Glykol bzw. Polyglykol.
- Weiterhin zeigte sich, dass die Schwindreduzierung durch die Herstell- bzw. Lagerungstemperatur beeinflusst wird. Im Vergleich von Beton A-2 (2,5 M.-% SRA 1 bei 20 °C) und Beton A-4

(2,5 M.-% SRA 1 bei 30 °C) zeigt sich nur ein geringer Unterschied in den Schwindverformungen und somit auch in der Schwindreduzierung. Hingegen wurden bei Beton A-3 (2,5 M.-% SRA 1 bei 5 °C) gegenüber dem 20 °C-Beton A-2 um rd. 0,2 mm/m höhere Schwindverformungen festgestellt, was in einer rd. 20 % geringeren Schwindreduzierung resultierte.

Ergänzend zum Trocknungsschwinden wurden an vier ausgewählten Betonen (A-3, A-4, A-7, A-8) die Quellverformungen während der vorherigen 7-tägigen Wasserlagerung erfasst. Die Messungen erfolgten hierbei zum einen unmittelbar nach dem Ausschalen (Nullmessung), zum andern im Zuge der Umlagerung im Alter von 7 Tagen. Die daraus ermittelten Quellverformungen lagen in einem sehr engen Bereich von 0,06 bis 0,08 mm/m, im Mittel bei 0,067 mm/m. Im Vergleich zu den anschließend ermittelten Verformungen infolge Trocknungsschwindens sind die Quellverformungen bei ganzheitlicher Betrachtung von untergeordneter Bedeutung, dementsprechend wurden diese in der Auswertung der Schwindverformungen nicht weiter berücksichtigt.

4.2.7.3 Zyklisches Schwindverhalten

In Bild 4–16 sind die Verformungen an den Proben mit den Betonen A-Ref, A-2, A-6, A-8 und B-Ref sowie B-2 infolge der zyklischen Änderungen der relativen Luftfeuchte nach dem 90. Tag (jeweils 4 Tage bei 20 °C, 99 % rel. F.; 14 Tage bei 20 °C und 65 % rel. F.; vgl. Abschnitt 3.5.3.8) dargestellt. Zu Vergleichszwecken ist in Bild 4–16 der Verlauf des Schwindmaßes des Betons A-REF bei über 180 Tage konstanter Temperatur von 20 °C und einer rel. Luftfeuchte von 65 % dargestellt.

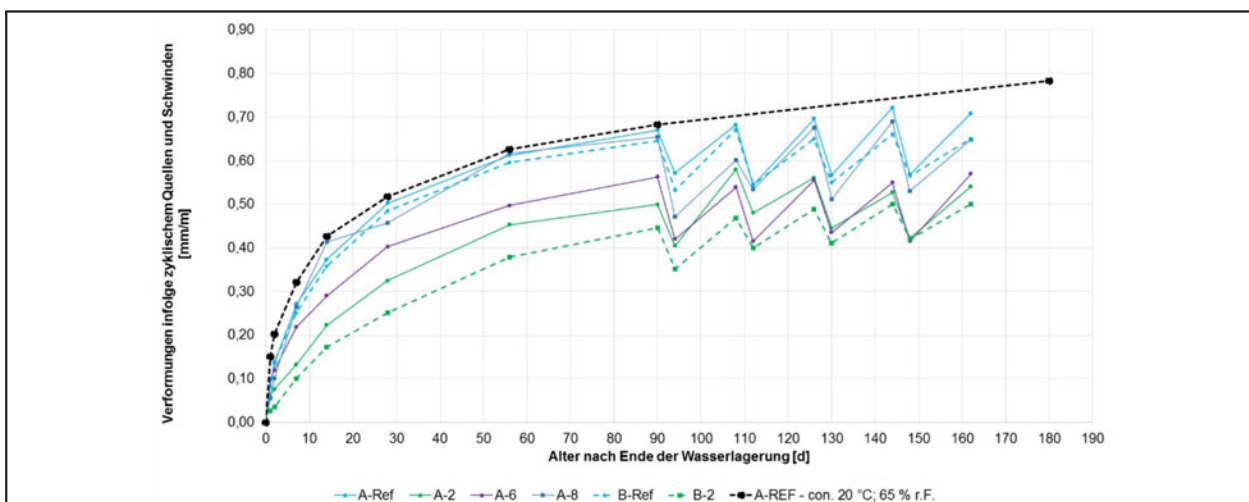


Bild 4–16: Zyklische Schwind- und Quellverformungen an ausgesuchten Betonen A und B

Innerhalb der 4-tägigen Feuchtlagerung der Proben bei 99% rel. F. gingen bei allen Betonen die bis dahin aufgebauten Schwindverformungen in jedem Zyklus um rd. 0,1 bis 0,15 mm/m zurück. In der anschließenden Trockenlagerung bei 65% rel. F. wurde am Ende der 14-tägigen Trocknungsphase das Quellen jeweils wieder vollständig ausgeglichen. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Schwindverformungen bei zyklischer Befeuchtung sich nach entsprechend längerer Trockenphase denen angleichen, die sich in Betonen ohne diese zyklische Befeuchtung eingestellt hätten. Durch die zyklisch veränderten hygrischen Randbedingungen wurden in keinem Fall höhere Schwindverformungen hervorgerufen.

4.2.8 Behindertes Frühschwinden

In Bild 4–17 sind die Rissbilder infolge behinderter Frühschwinden bis zum Alter von 7 Stunden in den Platten für die Betone B-Ref und B-2 dargestellt (vgl. Abschnitt 3.5.3.9). Des Weiteren sind die Riss-

längen, Rissbreiten sowie die Rissöffnungsflächen für diese beiden Betone in Tabelle 4–4 und Tabelle 4–5 zusammengestellt.

Es kann eindeutig festgehalten werden, dass die Rissbildung infolge Frühschwinden unter verschärften Bedingungen (scharfes Austrocknen des Betons

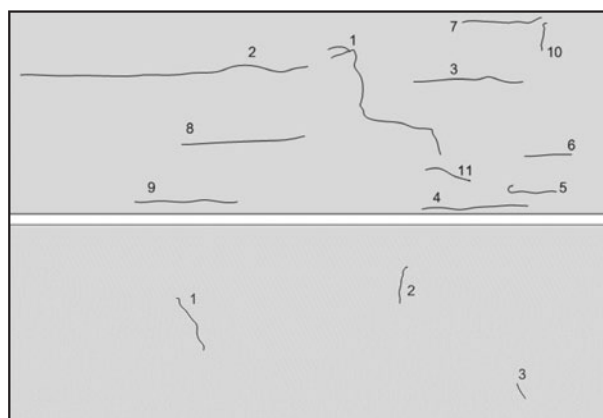


Bild 4–17: Rissbilder in den Schwindplatten mit Beton B-Ref (oben) und Beton B-2 (unten)

Riss Nr.	Risslänge		Rissbreite (Abschnitt)		Länge (Abschnitt) [mm]	Rissöffnungsfläche	
	Einzelwerte	Summe	Anfang	Ende		Abschnitt	Summe
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		[mm²]	[mm²]
1	470	3430	0,7	0,65	235	158,6	1246,5
			0,65	0,6	235	146,9	
2	780	3430	0,3	0,6	390	175,5	
			0,6	0,5	390	214,5	
3	440	3430	0,4	0,3	220	77,0	
			0,3	0,25	220	60,5	
4	350	3430	0,4	0,5	125	56,3	
			0,5	0,2	125	43,8	
5	140	3430	0,2	0,3	70	17,5	
			0,3	0,1	70	14,0	
6	180	3430	0,3	0,35	90	29,3	
			0,35	0,3	90	29,3	
7	220	3430	0,1	0,1	110	11,0	
			0,1	0,1	110	11,0	
8	290	3430	0,2	0,25	145	32,6	
			0,25	0,2	145	32,6	
9	280	3430	0,3	0,25	140	38,5	
			0,25	0,2	140	31,5	
10	130	3430	0,3	0,25	65	17,9	
			0,25	0,2	65	14,6	
11	150	3430	0,2	0,25	75	16,9	
			0,25	0,2	75	16,9	

Tab. 4–4: Rissanzahl, Risslängen, Rissbreiten und Rissöffnungsflächen in der behinderten Schwindplatte mit Beton B-Ref (ohne SRA)

Riss Nr.	Risslänge		Rissbreite (Abschnitt)		Länge (Abschnitt)	Rissöffnungsfläche	
	Einzelwerte	Summe	Anfang	Ende		Abschnitt	Summe
	[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm ²]
1	174	354	0,1	0,1	153	15,3	36,5
			0,15	0,15	21	3,15	
2	93		0,1	0,1	93	9,3	
			-	-	-	-	
3	87		0,1	0,1	87	8,7	
			-	-	-	-	

Tab. 4–5: Rissanzahl, Risslängen, Rissbreiten und Rissöffnungsflächen in der behinderten Schwindplatte mit Beton B-2 (mit 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SRA 1)

Riss Nr.	Risslänge		Rissbreite (Abschnitt)		Länge (Abschnitt)	Rissöffnungsfläche
	Einzelwerte	Summe	Anfang	Ende		Abschnitt
	[mm]	[mm]	[mm]			[mm]
1	15	630	0,1	0,1	15	1,5
			-	-	-	-
2	235		0,1	0,1	235	23,5
			-	-	-	-
3	70		0,2	0,2	70	14
			-	-	-	-
4	185		0,1	0,1	60	6
			0,1	0,1	65	6,5
			0,1	0,1	60	6
						0
5	125	0,1	0,1	60	6	
		0,1	0,1	65	6,5	

Tab. 4–6: Rissanzahl, Risslängen, Rissbreiten und Rissöffnungsflächen in der behinderten Schwindplatte mit Beton A-2 (mit 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SRA 1)

Riss Nr.	Risslänge		Rissbreite (Abschnitt)		Länge (Abschnitt)	Rissöffnungsfläche	
	Einzelwerte	Summe	Anfang	Ende		Abschnitt	Summe
	[mm]	[mm]	[mm]			[mm]	[mm ²]
1-34	-	5895	-	-		-	1.134

Tab. 4–7: Gesamttrissanzahl, Gesamttrisslänge und Rissöffnungsfläche in der behinderten Schwindplatte mit Beton A-Ref

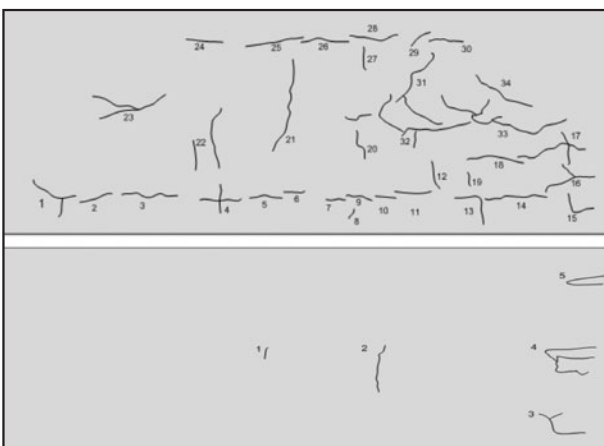


Bild 4–18: Rissbilder in den Schwindplatten mit Beton A-Ref (oben) und mit Beton A-2 (unten)

im frühen Alter) durch die Zugabe des Schwindreduzierers SRA 1 signifikant abnahm. Während in der Platte mit Beton B-Ref (ohne SRA) insgesamt 11 Risse auftraten, konnten in der Platte mit Beton B-2 (mit 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SRA 1) lediglich 3 Risse festgestellt werden. Die gesamte Risslänge nahm durch die Zugabe des SRA 1 von 3.430 mm auf 354 mm ab, die gesamte Rissöffnungsfläche reduzierte sich sogar von 1.246,5 mm² auf 36,5 mm².

In Bild 4–18 sind die Rissbilder infolge behindertem Frühschwinden in den Platten für die Betone A-Ref und A-2 dargestellt. Die Risslängen, Rissbreiten sowie die Rissöffnungsflächen für den Beton A-2 sind in Tabelle 4–6 zusammengestellt, die Risscharakte-

ristika für den Beton A-Ref sind aufsummiert in Tabelle 4–7 dokumentiert.

Analog zu dem Vergleich zwischen den Betonen B-Ref und B-2 konnte auch hier für die Betone A-Ref und A-2 durch die Zugabe des SRA 1 eine deutlich reduzierte Rissbildung festgestellt werden. Während sich in der Platte mit Beton A-Ref insgesamt 34 Risse gebildet hatten, wurden in der Platte mit dem Beton A-2 unter sonst gleichen Randbedingungen lediglich 5 Risse festgestellt. Die Risslänge nahm von 5895 mm auf 630 mm und die Rissöffnungsfläche von 1134 mm² auf 70 mm² ab.

In den Platten mit den Betonen A-6 (SRA 2/2,5) und A-8 (SAP / 5,0) konnten innerhalb des Prüfzeitraums von 7 Stunden überhaupt keine Risse detektiert werden (Bild 4–19).

Parallel zu den Untersuchungen des behinderten Fröhschwindens wurde an Parallelproben der Wasserverlust der Betone unter denselben klimatischen Randbedingungen bestimmt. Dieser ist für die Betone A-Ref, A-2, A-6, A-8, sowie B-Ref und B-2 für den Prüfzeitraum bis 7 Stunden nach der Herstellung in Bild 4–20 dargestellt.

Global betrachtet lagen die Wasserabgabemengen nach 7 Stunden für alle Betone in der Größenordnung zwischen 0,8 M.-% und 1,2 M.-%. Vergleicht man die Wasserabgabemengen der Betone mit SRA bzw. SAP mit denen der jeweiligen Referenzbetone, so werden die Unterschiede noch geringer. So betrug der Unterschied in der Wasserabgabe zwischen dem Beton B-2 mit 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SRA 1 und dem zugehörigen Referenzbeton B-Ref ohne SRA nach 7 Stunden lediglich 0,12 M.-%, bezogen auf den Referenzbeton wurde die Wasserabgabe durch die SRA um lediglich 12% reduziert. Vergleichbares gilt für die Betone der Serie A. Diese geringen Unterschiede in der Wasserabgabe stehen nicht im Einklang mit der signifikanten Reduzierung der Fröhschwindrisse. Daraus lässt sich ableiten bzw. bestätigen, dass der wesentliche Effekt der SRA nicht in einer Reduzierung der Wasserabgabe, sondern in einer Herabsetzung der Oberflächenspannung des Wassers liegt, was auch aus anderen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 2.3.2) bekannt ist, und dadurch die Schwindverformungen bzw. die Schwindrisse neigung reduziert wird.

Bei Zugabe von SAP (Beton A-8) war die Wasserabgabe mit 1,23 M.-% größer als die des Referenzbetons A-Ref ohne SAP). Dies beruht auf einer gegenüber SRA auf Glykolbasis gänzlich anderen Wirkungsweise. Bei SAP wird die Oberflächenspannung des Wassers nicht oder zumindest nicht signifikant beeinflusst. Vielmehr nehmen SAP rasch Wasser aus dem Frischbeton auf, das bei der frühen Austrocknung zunächst nicht verdunsten kann. Allerdings wird das in den SAP gespeicherte Wasser dann quasi als innere wasserzuführende Nachbehandlung allmählich wieder in den Frischbeton abgegeben, das dann doch – bei entsprechend ungünstigen Randbedingungen wie niedrige Luftfeuchte, hohe Lufttemperatur und Wind – für die weitere Austrocknung zur Verfügung steht.



Bild 4–19: Behinderte Fröhschwindplatte mit Beton A-8 (mit SAP) – keine Risse festzustellen

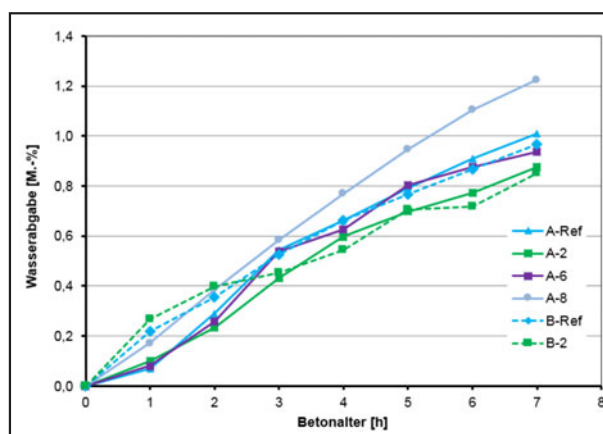


Bild 4–20: Wasserabgabe der Betone A-Ref, A-2, A-6, A-8, sowie B-Ref und B-2

5 Zusammenfassung

In Fahrbahndecken aus Beton sind neben Spannungen durch den überrollenden Verkehr vor allem Zwangsspannungen maßgebliche Beanspruchungen und damit für die Nutzungsdauer entscheidend. Zwangsspannungen bauen sich bei Behinderungen von Eigenverformungen auf. Für Letztere sind neben thermisch bedingten Verformungen zu einem gewissen Teil auch Schwindverformungen relevant. Überschreiten die resultierenden Gesamtspannungen die Zugfestigkeit des Betons, kommt es zur

Rissbildung. Um dem entgegenzuwirken, werden in Betonfahrbahndecken i.d.R. Fugen in einem Abstand von rd. 5 m angeordnet, die – werden sie rechtzeitig geschnitten – die Verformungsbehinderung und damit in Folge die Zwangsspannungen wirksam reduzieren.

Alternativ hierzu könnten Zwangsspannungen infolge Schwinden durch Schwindreduzierer (SRA) verringert werden. Diesbezüglich werden seit einiger Zeit neuartige Produkte angeboten. Jedoch sind bis zum jetzigen Zeitpunkt weder deren Wirkungsgrad unter speziellen Randbedingungen von Betonfahrbahndecken noch das Langzeitverhalten und deren Auswirkungen auf andere Betoneigenschaften genauer untersucht worden. Um nachteilige Nebenwirkungen, insbesondere die Dauerhaftigkeit betreffend, auszuschließen sind einschlägige Untersuchungen vor weiteren Anwendungen geboten.

Ziel des Forschungsprojekts war es, die Wirkung von Schwindreduzieren als Betonzusatzmittel auf das Schwindverhalten bzw. die Verringerung der Schwindrissbildung in Waschbetonen für Betonfahrbahndecken genauer zu erfassen. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen solcher Zusätze auf die Druckfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit, den E-Modul und den Frost-Taumittelwiderstand untersucht. In diese Untersuchungsreihen wurden insgesamt 12 Betone (Waschbetone) einbezogen. Dabei kamen zwei Zemente der gleichen Zementart und Festigkeitsklasse (CEM I 42,5 N), jedoch mit unterschiedlichem Na_2O -Äquivalent zum Einsatz. Als Schwindreduzierer wurden zwei flüssige Produkte auf Glykolbasis und ein Produkt auf Basis suspendierter bzw. vorgequollener superabsorbierender Polymere (SAP) verwendet, wobei zusätzlich die Zugabemengen variiert wurden. Alle Betone wurden als Luftporenbetone hergestellt, als Gesteinskörnung kam durchweg Rheinsand (0/2 mm) und Basaltsplitt (2/8 mm) zum Einsatz. Die Konsistenz lag bei allen Betonen in der Konsistenzklasse C1 / C2.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

A) Frischbeton

- Die angestrebte Konsistenz des Frischbetons im Bereich C1 / C2 wurde von allen Varianten erreicht, ebenso steiften alle Frischbetone im gewohnten Maße an. Die Konsistenz wurde ebenso wie das Ansteifen durch die SRA nicht signifikant beeinflusst.

- Der Luftgehalt im Frischbeton lag 10 Minuten nach Betonherstellung durchweg zwischen 5,0 und 6,0 Vol.-%. Innerhalb der nächsten 50 Minuten war – wie in der Praxis üblich – ein geringfügiger Abfall im Luftgehalt zu verzeichnen. Die Zugabe von SRA beeinflusste den im Frischbeton gemessenen Luftgehalt nicht.

B) Festbeton

- Die Druckfestigkeit (einschl. Frühfestigkeit), die Spaltzugfestigkeit und der statische Elastizitätsmodul wurden durch die SRA nicht maßgeblich beeinflusst.
- Die Schwindverformungen der Betone ohne SRA (Referenzbetone) liegen nach insgesamt 187 Tagen in der Größenordnung von rd. 1,5 mm/m. Durch die Zugabe von SRA reduzierten sich diese auf rd. 0,75 mm/m bis 1,1 mm/m, was einer Schwindreduzierung durch diese Zusätze von rd. 30% bis 50% entsprach. Dabei zeigte sich auch ein (geringer) Einfluss des verwendeten Zements.
- Die Schwindreduzierung war in der Anfangsphase stets größer und nahm dann im Lauf der Zeit auf die genannten Werte ab. Daraus kann abgeleitet werden, dass die schwindreduzierende Wirkung der SRA sich vor allem beim Frühschwinden und in den ersten Tagen einer Austrocknung des Festbetons zeigt. Die Schwindverformungen hatten nach 187 Tagen noch kein konstant bleibendes Niveau erreicht, sodass nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich der Effekt der SRA bei weiterer Austrocknung noch weiter verringert.
- Durch die Zugabe von SRA 1 auf Basis Glykol wurden die Schwindverformungen des Betons (mit Zement A) bei gleicher Dosierung (hier 1,0 M.-%/Z.) weniger reduziert als durch die Zugabe von SRA 2 auf Basis Polyglykol.
- Bei Beton mit Zement A (Na_2O -Äquivalent: 0,75 M.-%) wurden die Schwindverformungen erwartungsgemäß bei dem SRA 1 mit zunehmender Dosierung stärker reduziert. Bei Einsatz von SRA 2 liegt die Schwindreduktion bei beiden Zugabemengen bei Berücksichtigung des Frühschwindens in etwa auf gleichem Niveau. Bei Beton mit Zement B (Na_2O -Äquivalent: 0,40 M.-%) lagen die Schwindverformungen bei einer Zugabe von 1,0 M.-%, bez. auf den Zementgehalt, an SRA 1 in gleicher Höhe bzw. sogar geringfügig niedriger als bei einer Zugabemenge von

- 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt, desselben Produkts. Daraus lässt sich ableiten, dass die optimale Zugabemenge von SRA – wie auch von anderen Betonzusatzmitteln bekannt – von der chemischen Zusammensetzung beeinflusst wird.
- Die Zugabe von 2,5 M.-% bzw. 5 M.-%, jeweils bez. auf den Zementgehalt, an SAP führte bei Beton mit Zement A nach 187 Tagen zu einer vergleichbaren Verminderung der Schwindverformungen (35 % bis 40 %) wie die SRA auf Basis Glykol bzw. Polyglykol.
 - Weiterhin zeigte sich, dass die Schwindreduzierung durch die Herstell- bzw. Lagerungstemperatur beeinflusst wird. Unter sonst gleichen Randbedingungen wurde zwischen einer Herstell- und Lagerungstemperatur von 20 °C nur ein geringer Unterschied in der Schwindreduzierung gegenüber 30 °C festgestellt. Hingegen konnten die Schwindverformungen der Beton mit SRA bei 5 °C um rd. 20 % weniger reduziert werden als bei 20 °C.
 - Am deutlichsten zeigte sich die Wirkung der SRA bei den Untersuchungen des behinderten Schwindens. Innerhalb der Beobachtungszeit von 7 Stunden stellten sich gegenüber dem Referenzbeton ohne SRA nur 3 bis 7 % an Rissen ein (bewertet anhand der jeweiligen Rissöffnungsfläche). Dieser Effekt ist bei den SRA auf Glykol-/Polyglykolbasis primär auf eine Reduzierung der Oberflächenspannung des Wassers zurückzuführen, da sich die parallel ermittelten Wasserverluste zwischen den Betonen mit / ohne SRA deutlich weniger unterschieden. Gleichmaßen positive Effekte auf die Rissbildung während des behinderten Schwindens waren bei Einsatz von SAP (Zugabemenge: 5 M.-%/Z.) festzustellen. Dabei konnten im Beobachtungszeitraum keine Risse festgestellt werden.
 - In den untersuchten Betonen mit SRA auf Glykol-/Polyglykolbasis wurden deutlich ungünstigere Mikroluftporenkennwerte festgestellt als in den zugehörigen Referenzbetonen. Während der Gesamtluftgehalt sich nicht signifikant unterschied, war der Luftporengehalt und Mikroluftgehalt A_{300} bei den Betonen mit SRA deutlich niedriger, Großteils sogar unter dem geforderten Mindestwert, und der Abstandsfaktor L deutlich höher als im Referenzbeton, großteils sogar über dem maximalen zulässigen Wert.
 - Dementsprechend stellte sich bei den Betonen mit SRA teilweise auch ein ungünstigerer Frost-Taumittelwiderstand ein als bei den zugehörigen Referenzbetonen. Bei den Betonen mit SAP konnten die Abwitterungsmengen in der CDF-Prüfung hingegen um rd. 15 % vermindert werden, was mit dem durch die SAP positiv veränderten Mikroluftporensystem in Verbindung gebracht werden kann.
- Mit den hier beschriebenen Untersuchungsreihen konnte gezeigt werden, dass Schwindreduzierer insbesondere die sich frühzeitig einstellenden Schwindverformungen reduzieren können. Besonders positiv wirkt sich dies auf die Vermeidung von Frühschwindrissen in den ersten Tagen aus. Inwieweit das über Jahre ablaufende Trocknungsschwinden auch über lange Zeiten reduziert wird, kann aus diesen bis lediglich 6 Monate umfassenden Untersuchungen nicht abgeleitet werden.
- Um bewerten zu können, inwieweit mit SRA sich in Fahrbahndecken aus Beton unter den realen Randbedingungen in Praxis (Einbaubedingungen, Verkehrsbeanspruchungen, Witterungseinflüsse usw.) entsprechende Vorteile erreichen lassen, wäre nach diesen Laborstudien zu empfehlen, mit mehreren Varianten solcher modifizierten Betone Teststrecken (z. B. im Bereich von Rastanlagen) herzustellen und diese messtechnisch entsprechend zu begleiten.
- Eine Erweiterung des derzeitigen Abstands der Quertugen von 5 m ist nicht zu empfehlen, da sich dieser primär aus den Zwangsspannungen infolge abfließender Hydratationswärme und nur sekundär aus dem Frühschwinden ableitet.
- Schwindreduzierer auf Basis Glykol/Polyglykol können in Luftporenbetonen das Mikroluftporensystem nachteilig beeinflussen. Bei einer Verwendung solcher Produkte in der Praxis ist hierauf bereits in der Erstprüfung besonderes Augenmerk zu legen. Dabei reicht die Überprüfung des Luftgehalts im Frischbeton nicht aus, da sich bei ausreichendem Gesamtluftgehalt dennoch ein unzureichendes Mikroluftporensystem einstellen kann.

Literatur

- [1] GRUBE, H.: Die Schwindverformungen des Betons, 2003.
- [2] GRUBE, H.: Ursachen des Schwindens von Beton und Auswirkungen auf Betonbauteile. Beton-Verlag. Düsseldorf, 1991.
- [3] WEBER, R.: Guter Beton. Verlag Bau + Technik. Düsseldorf. 23., überarb. Aufl, 2010.
- [4] SCHÄFFEL, P.: Zum Einfluss schwindreduzierender Zusatzmittel und Wirkstoffe auf das autogene Schwinden und weitere Eigenschaften von Zementstein. Verlag Bau + Technik. Düsseldorf, 2013.
- [5] WITTMANN, F.: Zur Ursache der so genannten Schrumpfrisse. In: Zement und Beton. Nr. 85/86, S. 10–16, 1975.
- [6] CARLSON, R. W.: Drying shrinkage of large concrete members. In: J. of the Am. Concrete Inst., 33: 327–336
- [7] LUDWIG, H.-M.; STARK, J.: Frost- und Frost-Tausalz widerstand von hüttensandreichen HOZ-Betonen. Hochschule für Architektur und Bauwesen. Weimar, 1994.
- [8] ALAWIEH, H.: Zur experimentellen Bestimmung der Schwindverformungen von Zementstein. Ruhr-Universität Bochum, Universität Duisburg-Essen. Bochum, 2006.
- [9] SCHWARZ, P.: Schwinden, 2007, Online: <http://www.concrete.de/Schwinden.pdf>. Abgerufen am: 08.06.2015.
- [10] RÜSCH, H.; KORDINA, K.: Der Einfluß der mineralogischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, S. 19–133, 1962.
- [11] GRÜBL, P.; KARL, S.; WEIGLER, H.: Beton. Ernst. Berlin. 2. Aufl., 2001.
- [12] EICKSCHEN, E.; SIEBEL, E.: Einfluß der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung auf das Schwinden und Quellen von Straßenbeton. In: Betontechnische Berichte, S. 580–586, 1998.
- [13] MILLS, R.: Shrinkage of concrete containing blast furnace slag. Colloque International sur le retrait des bétons hydrauliques. Madrid. Vol I., II-J, 1968.
- [14] WALZ, K.: Bewertung des Schwindmaßes verschiedener Zemente. Beton technische Berichte. Beton-Verlag. Düsseldorf, 1961.
- [15] FLEISCHER, R.: Untersuchung der Ursache von Oberflächenrissen (Netzrissen) in Betondecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. TU München, 1992.
- [16] CZERNIN, W.: Zementchemie für Bauingenieure. In: Materials and Corrosion/Werkstoffe und Korrosion. Nr. 6, S. 462, 1977.
- [17] FLEISCHER, W.: Einfluß des Zements auf Schwinden und Quellen von Beton. Technische Universität München, 1992.
- [18] VENUAT, M.: Influence du ciment sur le retrait hydraulique après prise. Colloque International sur le retrait des bétons hydrauliques. Nr. Vol I., Paris, 1968.
- [19] GRAF, O.; ALBRECHT, W.; SCHÄFFLER, H.: Die Eigenschaften des Betons. Springer-Verlag. Berlin. 2. Auflage, 1960.
- [20] EPPERS, S.; MÜLLER, C.: Zur Prüfung der autogenen Schwindrissneigung mit dem Ring-Test unter besonderen Berücksichtigung von Temperatureinflüssen. Verein Deutscher Zementwerke e. V. Bau+ Technik GmbH. Düsseldorf, 2010.
- [21] JACOBS, F.; HUNKELER, F.; LORENZO, C.; GERMANN, A.; HIRSCHI, T.: Schwinden von Beton, 2008, Online: http://www.fshbz.ch/dokumente/bauingenieur08_schwinden.pdf. Abgerufen am: 05.11.2015.
- [22] EBERHARDT, A.: On the mechanisms of shrinkage reducing admixtures in self consolidating mortars and concretes. Bauhaus Universität. Weimar, 2010.
- [23] SCHWUGER, M.: Zur Wirkungsweise von Tensiden in technischen Prozessen. In: Chemie Ingenieur Technik. Nr. 6, S. 374–378, 1972.
- [24] SATO, T.; GOTO, T.; SAKAI, K.: Mechanisms for reducing drying shrinkage of hardened cement by organic additives. In: Review of the general meeting, technical session 1983, S. 52–55, 1983.
- [25] BENTZ, D.; GEIKER, M.; HANSEN, K.: Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. In:

- In: Cement and Concrete Research, S. 1075–1085, 2001.
- [26] RONGBING, B.; JIAN S.: Synthesis and evaluation of shrinkage-reducing admixture for cementitious materials. In: Cement and Concrete Research, S. 445–448, 2005.
- [27] MÜLLER, H.: Betonverformungen beherrschen – Grundlagen für schadensfreie Bauwerke. KIT Scientific Publishing. Karlsruhe, Baden, 2015.
- [28] COLLEPARDI, A.; BORSOI, A.; COLLEPARDI, S.; TROLI, R.; VALENTE, M.: Self-Curing, Shrinkage-Free Concrete. In: American Concrete Institute, S. 237–247, 2006.
- [29] QUANGPHU, N.; LINHUA, J.; JIAPING, L.; QIAN, T.; TIENQUAN, D.: Influence of shrinkage-reducing admixture on drying shrinkage and mechanical properties of high-performance concrete. In: Water Science and Engineering. Nr. 4, S. 67–74, 2008.
- [30] MORA-RUACHO, J.; GETTU, R.; AGUADO, A.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete. In: Cement and Concrete Research. Nr. 39, S. 141–146, 2009.
- [31] BERKE, N.; LI, L.; HICKS, M.; BAE, J.: Improving concrete performance with shrinkage-reducing admixtures. American Concrete Institute, S. 37–50, 2003.
- [32] MALTESE, C.; PISTOLESI, A.; LOLLI, A.; BRAVO, A.; CERULLI, T.; SALVIONI, D.: Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars. In: Cement and Concrete Research. Nr. 35, S. 2244–2251, 2005.
- [33] SALIBA, J.; ROZIÈRE, E.; GRONDIN, A.; LOUKILI, A.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage. In: Cement & Concrete Composites. Nr. 33, S. 209–217, 2011.
- [34] BENTZ, D.; GEIKER, M.; HANSEN, K.: Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars. In: Cement and Concrete Research, S. 1075–1085, 2001.
- [35] DANG, Y.; QIAN, J.; QU, Y.; ZHANG, L.; WANG, Z.; QIAO, D.; JIA, X.: Curing cement concrete by using shrinkage reducing admixture and curing compound. In: Construction and Building Materials, S. 993–997, 2013.
- [36] Buffenbarger, J.; Nmai, C.; Miltenberger, M.: Improving Watertightness of Reinforced Concrete Structures With Shrinkage-Reducing Admixtures. National Symposium of the American Concrete Institute; San Diego, S. 217–236, 2000.
- [37] BAE, J.; BERKE, N.; HOOPES, R.; MALONE, J.: Freezing and thawing resistance of concretes with shrinkage reducing admixtures. In: Proceedings of the international RILEM workshop; Essen, S. 327–344, 2002.
- [38] RAJABIPOUR, F.; SANT, G.; WEISS, J.: Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution. In: Cement and Concrete Research. Nr. 38, S. 606–615, 2008.
- [39] BREITENBÜCHER R.: Maßnahmen zur Sicherstellung dauerhafter Betondecken, In: Straße + Autobahn, Heft 12, S. 729–735, 2006
- [40] SULTEN, P., WOLF, T.: Waschbeton – Eine alternative Betonoberfläche, In: Straße und Autobahn 4/2006, S. 210 – 218
- [41] EHRLICH, N., HERSEL, O.: Straßenbau heute – Betondecken, Schriftenreihe der Zement- und Betonindustrie
- [42] WERNER, R. : Whitetopping – die weiße Alternative zur Sanierung von Asphaltbelägen, update 4/200
- [43] Verband Deutscher Betoningenieure e. V.: Maßnahmen zur Verminderung der Zwangsbeanspruchungen infolge Hydratationswärme. Report 12, Empfehlungen des AK Zwangsspannungen des VDB. Selbstverlag 2005
- [44] Müller, H.S., HAIST, M.: Industrieböden aus Beton im Überblick, S.1–10, 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 2007
- [45] NÖBI – Neue österreichische Betondecken-Instandsetzungsmethode DI Stefan Spalt, ASFINAG Baumanagement GmbH, Österreichischer Betonstraßentag 2012, Betonstraßenbau: heute und morgen

- [46] EID, J.; FREUDENSTEIN, S.: Whitetopping - Erprobungsstrecke im Zuge einer Erneuerung In: Straße + Autobahn, Jg.:63, Nr.6, 2012
- [47] BLAB, R.: Einflussgrößen bei der Bemessung hochbelasteter Betonstraßen, Österreichische Betonstraßentagung 2005, Wien, 2005
- [48] MÜLLER, A. J.: Zum Zug- und Schubtragverhalten von Betonfugen. Dissertation, TU München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, München 2009
- [49] MÜLLER, H.S., HAIST, M.: Industrieböden aus Beton im Überblick, S.1 – 10, 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 2007
- [50] SCHMIDT, D., SLOWIK, V.: Auf Kapillardruckmessung basierende Nachbehandlung von Betonflächen im plastischen Materialzustand. In: Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 11. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2007
- [51] SPRINGENSCHMID, R., FLEISCHER, W.: Oberflächenrisse in älteren Betonfahrbahndecken. In: Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau 1993, Heft 10, S. 724–732
- [52] SODEIKAT, C.: Beanspruchung von Betonfahrbahnen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften von Ober- und Unterbeton unter besonderer Berücksichtigung von Feuchte- und Temperaturänderungen, Dissertation, Technische Universität München, München, 2000
- [53] SPRINGENSCHMID, R.: Betontechnologie für die Praxis. Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 2007
- [54] Patent DE 10046284 „Vorrichtung zum Erfassen des frühen Dehn- und Schwindverhaltens von Baustoffen“ Erfinder und Anmelder: GREIM, M. und TEUBERT, O. (Online: <http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Schwinden:Schwindkegel>. Abgerufen am: 24.11.2015)
- [55] MANNS, W., ZEUS, K.: Einfluß von Zusatzmitteln auf den Widerstand von jungem Beton gegen Rißbildung bei scharfem Austrocknen. In: DAfStb Heft 302, Ernst & Sohn, Berlin 1979

Normen

- [N 1] ARS Nr. 28/2012, Allgemeines Rundschreiben Straßenbau, Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
- [N 2] AL Sp-Beton, Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Ausgabe 2006
- [N 3] ARS Nr. 5/2006, Allgemeines Rundschreiben Straßenbau, Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
- [N 4] DIN EN 12390-3, Prüfung von Festbeton, Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Ausgabe 2009
- [N 5] RStO, Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2012
- [N 6] DAfStb Heft 422, Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1991
- [N 7] TL Beton-StB, Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2007
- [N 8] DIN EN 12350-4, Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß, Ausgabe 2009
- [N 9] DIN EN 12350-6, Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte, Ausgabe 2009
- [N 10] DIN EN 12350-7, Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren, Ausgabe 2009
- [N 11] DIN EN 12390-1, Prüfung von Festbeton, Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen, Ausgabe 2001
- [N 12] DIN EN 12390-3, Prüfung von Festbeton, Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Ausgabe 2009

- [N 13] BAW Merkblatt, Frostprüfung von Beton, Bundesanstalt für Wasserbau, Ausgabe 2012
- [N 14] FGSV, Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Ausgabe 2004
- [N 15] DIN EN 12390-13, Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul), Ausgabe 2014
- [N 16] TL Gestein-StB 04, Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2004
- [N 17] RDO Beton 09, Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2009
- [N 18] DIN EN 206, Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Ausgabe 2014
- Bild 2–8: Trocknungsschwinden in Abhängigkeit der relativen Feuchte [22]
- Bild 2–9: Mikrostruktur von Zementleim ohne SRA (C0, links) und Zementleim mit einer hohen SRA-Dosierung (C6=384 mg/g C3S, rechts) [22]
- Bild 2–10: Temperaturverlauf und Entwicklung zentrischer Zwangsspannungen [43]
- Bild 2–11: Spannungen und daraus resultierende Risse in Betonplatten infolge eines negativen Temperatur- oder Feuchtegradienten bei Abkühlung/Austrocknung der Oberfläche [51]
- Bild 3–1: Schwindkegel von Schleibinger [54] (Quelle: Patent DE 10046284 „Vorrichtung zum Erfassen des frühen Dehn- und Schwindverhaltens von Baustoffen“ Erfinder und Anmelder: GREIM, MARKUS UND TEUBERT, OLIVER)
- Bild 3–2: Messrahmen zur Bestimmung der Längenänderung infolge Trocknungsschwinden

Bilder

- Bild 2–1: Durch Frühschwinden hervorgerufene Risse im Beton
- Bild 2–2: Entwicklung des Kapillardrucks infolge Verdunstung [50]
- Bild 2–3: Maximal erreichte Frühschwindverformung als Funktion des w/z-Wertes [5]
- Bild 2–4: Einflussgrößen auf das Schwinden von Beton
- Bild 2–5: Einfluss des Zementgehaltes, des Wassergehaltes und des w/z-Wertes auf das Endschwindmaß von Beton und Mörtel (Prismen 10 x 10 x 40 cm, Lagerung bei 50 % rel. F. nach 7 Tagen Feuchtlagerung) aus [8] nach [16]
- Bild 2–6: Schematischer Aufbau eines Tensidmoleküls (nach [22])
- Bild 2–7: Schematische Darstellung der Tensidadsorption an der Grenzfläche von Wasser und Luft [23]
- Bild 3–3: Untersuchung der Schrumpfrissneigung (links: Schwindrahmen, rechts: betonierete Platte im Windkanal)
- Bild 4–1: Luftgehalte im Frischbeton aller Betone nach 10 und 60 Minuten nach Herstellung
- Bild 4–2: Konsistenzentwicklung aller Betone nach 10, 30 und 60 Minuten nach Herstellung
- Bild 4–3: Mittlere Druckfestigkeiten aller Betone
- Bild 4–4: Frühfestigkeiten der Betone A-Ref, A-2, B-Ref und B-2
- Bild 4–5: Mittlere Spaltzugfestigkeiten aller Betone
- Bild 4–6: Statische E-Moduln nach 28 Tagen
- Bild 4–7: Abwitterungsmengen im CDF-Prüfverfahren nach [N 13]
- Bild 4–8: Gegenüberstellung der Abwitterungsmengen (nach 28 Frost-Tauwechseln) im CDF-Prüfverfahren nach [N 13] und dem Mikroluftporengehalt A300

- Bild 4–9: Frühschwinden ohne Berücksichtigung des Erstarrungsbeginns
- Bild 4–10: Frühschwinden mit Berücksichtigung des Erstarrungsbeginns
- Bild 4–11: Reproduzierbarkeit der Frühschwindmaße am Beispiel der Betone A3, A7, A8 und B1
- Bild 4–12: Schwindverformungen an Betonen mit Zement A
- Bild 4–13: Schwindverformungen an Betonen mit Zement B
- Bild 4–14: Überlagerte Schwindverformungen (aus Frühschwinden (= Startwert) und Trocknungsschwinden) an den Betonen mit Zement A
- Bild 4–15: Überlagerte Schwindverformungen (aus Frühschwinden (= Startwert) und Trocknungsschwinden) an den Betonen mit Zement B unter Hinzunahme des Frühschwindens
- Bild 4–16: Zyklische Schwind- und Quellverformungen an ausgesuchten Betonen A und B
- Bild 4–17: Rissbilder in den Schwindplatten mit Beton B-Ref (oben) und Beton B-2 (unten)
- Bild 4–18: Rissbilder in den Schwindplatten mit Beton A-Ref (oben) und mit Beton A-2 (unten)
- Bild 4–19: Behinderte Frühschwindplatte mit Beton A-8 (mit SAP) – keine Risse festzustellen
- Bild 4–20: Wasserabgabe der Betone A-Ref, A-2, A-6, A-8, sowie B-Ref und B-2
- Tabelle 2–3: Literaturangaben zur Oberflächenspannung von Zugabewasser-SRA-Gemischen und Porenlösung aus Zementleim und -stein mit SRA (nach [4])
- Tabelle 3–1: Übersicht der Ausgangsstoffe
- Tabelle 3–2: Betonzusammensetzung
- Tabelle 3–3: Variationsmatrix
- Tabelle 4–1: Ergebnisse der mikroskopischen Ermittlung der Luftporenkennwerte im Festbeton
- Tabelle 4–2: Anforderung an Luftporenkennwerte im Festbeton aus [N 14]
- Tabelle 4–3: Erstarrungsbeginn der Leime der Betone mit SRA und dazugehöriger Setzungswert
- Tabelle 4–4: Rissanzahl, Risslängen, Rissbreiten und Rissöffnungsflächen in der behinderten Schwindplatte mit Beton B-Ref (ohne SRA)
- Tabelle 4–5: Rissanzahl, Risslängen, Rissbreiten und Rissöffnungsflächen in der behinderten Schwindplatte mit Beton B-2 (mit 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SRA 1)
- Tabelle 4–6: Rissanzahl, Risslängen, Rissbreiten und Rissöffnungsflächen in der behinderten Schwindplatte mit Beton A-2 (mit 2,5 M.-%, bez. auf den Zementgehalt an SRA 1)
- Tabelle 4–7: Gesamtrissanzahl, Gesamtrisslänge und Rissöffnungsfläche in der behinderten Schwindplatte mit Beton A-Ref

Tabellen

- Tabelle 2–1: Zeit bis zur Austrocknung, abhängig von der Bauteildicke bei 50 % r. F. (nach [6])
- Tabelle 2–2: Anhaltswerte für Endschwinddehnungen von Zementstein (ASTM-Prismen 25x25x285 mm²) und Beton (Probekörper mit d/h = 150/300) [1]

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht

Radenberg, Miljković, Schäfer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung

Müller, Seidel, Böhm

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten

Hunger, Börner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten

Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche

Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger

Dürner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenenmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)

Neubeck, Wiesebrock

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen

Weise, Schrang

€ 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarekeit temporärer Fahrbahnmarkierung

Kemper, Schacht, Klapproth, Oeser, Beyer

€ 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel

Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt

Böhm, Beara

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

Wistuba, Alisov, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen

R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb

Wacker, Scherkenbach, Rabe, Golkowski

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erd- bau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial

Kellermann-Kinner, Bürger, Marks

€ 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erd- bau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysime- tern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 – 2013

Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher

€ 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglö- chern

Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe

€ 15,00

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt

€ 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und stra- ßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer

€ 15,50

S 108: **Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn**

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: **RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels**

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: **Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)**

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: **Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester(Kokosester)**

Alisov, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: **Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt**

Zander, Buch, Birbaum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: **Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen**

Schellenberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: **Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt**

Mollenhauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

S 115: **Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisingerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes**

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: **Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein**

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miebling

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: **Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau**

Böhm, Tiemann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: **Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte**

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: **Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels**

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: **Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme**

Wacker, Scherkenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: **Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen**

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: **Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in**

Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer € 18,50

S 123: **Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils**

Stephan, Weigel € 19,00

S 124: **Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte**

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: **Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie**

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: **Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke**

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**

Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Zu beziehen über:

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax+(0)421/3 69 03-63

Alternativ können alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website gesucht und bestellt werden:

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können auf Anfrage als »Book on Demand« hergestellt werden.