

Selbstverdichtender Beton für den Einsatz im Betonstraßenbau

FA 8.213

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik (Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher)

Bearbeiter: Breitenbücher, R. / Holzmann, F. / Kunz, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juni 2014

1 Ausgangssituation und Problemstellung

In den nächsten Jahren wird in den Industrieländern eine deutliche Steigerung des Schwerverkehrs erwartet. Dadurch steigt auch die Belastung für die Fahrbahnbefestigungen. Um wirtschaftliche Nutzungszeiträume für Verkehrswege sicherzustellen, wird die Bedeutung des Betonstraßenbaus weiter zunehmen.

Bislang werden Betonfahrbahndecken mit Gleitschalungsfertigern hergestellt. Hierbei können jedoch ausschließlich steife bis sehr steife Betone verwendet werden, da nur diese bereits wenige Meter hinter der Einbaustelle eine ausreichende Formstabilität bzw. Grünstandfestigkeit aufweisen. Aufgrund ihrer Konsistenz müssen solche Betone jedoch intensiv verdichtet werden. Dazu werden Innenrüttler verwendet, die lokal eine hohe Verdichtungsenergie in den Beton eintragen. Diese hohe lokale Verdichtung kann zu einer Anreicherung von Feinmörtel in den Rüttelgassen führen, wodurch Schwachstellen im Betonquerschnitt entstehen können. Als Folge können sich bevorzugt in diesen Rüttelgassen Risse bilden (vgl. Bild 1).



Bild 1: Risse in einer Betonfahrbahndecke im Bereich von Rüttelgassen

Durch den Einsatz von selbstverdichtendem Beton (SVB) könnte dies vermieden werden. Konventioneller SVB ist aufgrund seiner hohen Fließfähigkeit allerdings nicht für die Verarbeitung mit einem Gleitschalungsfertiger geeignet, da er innerhalb kürzester Zeit mehr oder weniger konträre Eigenschaften aufweisen müsste. Auf der einen Seite muss der SVB beim Einbau eine ausreichend hohe Fließfähigkeit aufweisen und sich selbst verdichten bzw. entlüften. Auf der anderen Seite muss derselbe Beton nach Verlassen des Gleitschalungsfertigers – d. h. nach rund zwei bis fünf Minuten – eine ausreichende Grünstandfestigkeit bzw. Formstabilität besitzen.

In einem ersten orientierenden Forschungsprojekt FE 08.192/2007/LGB wurden bereits rheologische Untersuchungen an Bindemittelleimen sowie an Frischbetonen, die mit thixotrop eingestellten Bindemittelleimen hergestellt wurden, durchgeführt. Es zeigte sich, dass der Einbau von SVB für Betonfahrbahndecken mit Gleitschalungsfertigern möglich ist. Als maßgebliche Einflussgrößen stellten sich u. a. die Zementart, der Wassergehalt und die Art bzw. die Menge der (thixotropierenden) Zusatzmittel heraus. In weiteren Untersuchungen konnte eine Betonzusammensetzung entworfen werden, die den gewählten Anforderungen weitestgehend genügt.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen soll in dem vorliegenden Forschungsvorhaben einerseits der eben beschriebene Ansatz weiter verfolgt werden. Weiterhin soll die nachträgliche Zugabe von Additiven in einem separaten Mischprozess untersucht werden. Diese Additive sollen die Fließeigenschaften des Frischbetons dahingehend beeinflussen, dass die Fließfähigkeit des Frischbetons zeitabhängig reduziert wird, wodurch anschließend – nach einer gewissen Zeitspanne – eine hohe Grünstandfestigkeit bzw. Formstabilität erreicht werden kann. Als Additive sollen dabei verschiedene Superabsorber (Superabsorbent Polymers, SAP) sowie Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis (aufgrund ihrer Wechselwirkung mit PCE-Fließmitteln) verwendet werden.

2 Untersuchungsmethodik

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus FE 08.192/2007/LGB "Selbstverdichtender Beton mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau" wurden folgende Variationen für die Untersuchung thixotrop eingestellter Betone festgelegt:

- Einsatz weiterer Zemente
- Einsatz weiterer PCE-Fließmittel
- Verwendung einer feineren Sieblinie (B8)
- Erhöhung des Verhältnisses Leim/Gesteinskörnung

Die genannten Variationen sind in Bild 2 dargestellt. Den Untersuchungen der thixotrop eingestellten Betone (Variante A) wurde eine Betonmischung (hier: M1) zugrunde gelegt, die sich in früheren Untersuchungen bewährt hatte. Entsprechend den Anforderungen an einen SVB für den Einsatz im Gleitschalungsfertiger wies diese Rezeptur sowohl eine ausreichende Fließfähigkeit (Setzfließmaß von ≥ 500 mm) als auch Formstabilität (Formstabilitätskoeffizient $0,90 \leq K \leq 1,00$) auf. Hinsicht-

lich der Formstabilität gilt: je näher der Wert bei 1,0 liegt, desto genauer wird die Form der Schalung beibehalten.

In vorhergehender Forschungsarbeit wurden direkt nach einem ersten Mischprozess Setzfließmaße von im Mittel 530 mm und Grünstandfestigkeiten von 0,066 N/mm² nach fünf Minuten und 0,110 N/mm² nach zehn Minuten Standzeit in der Schalung ermittelt. Im gleichen Prüfzeitraum lag der Formstabilitätskoeffi-

zient am Würfel bei etwa 0,97. Nach einem zweiten Mischzyklus von zehn Minuten nahm die Grünstandfestigkeit, geprüft nach einer Standzeit von 30 Minuten, jedoch signifikant um rund 97 % auf 0,003 N/mm² ab. Dies wurde auf eine teilweise Reversibilität der Thixotropie der Zementsuspension zurückgeführt. Die Anforderungen nach TL Beton-StB 07 an den Festbeton wurden jedoch weitestgehend eingehalten.

Rezeptur	Zement					Fließmittel			Sieblinie		Verhältnis Leim / Gesteinskörnung	
	CEM I 42,5 R		CEM I 42,5 N		CEM III/A 42,5 N	PCE 1	PCE 2	PCE 3	A/B 8	B 8	40/60	45/55
	Heidelberg Cement	Holcim	Heidelberg Cement	Holcim	CEMEX							
M1												
M2												
M3												
M4												
M5												
M6												
M7												
M8												
M9												
M10												
M11												
M12												
M13												
M14												

Ausgangsmischung

Bild 2: Variationsmatrix für thixotrop eingestellte Betone

Der Beton für die Untersuchungen nach Variante B orientierte sich an M1, enthielt jedoch keine thixotropierenden Zusatzmittel. Darüber hinaus wurde die Mischung so angepasst, dass sie eine deutlich geringere Ausgangsviskosität aufwies und dadurch einem herkömmlichen SVB mit einem Größtkorn von 5 mm entsprach. Den Betonen wurden nach der eigentlichen Betonherstellung in einem separaten Mischprozess die Additive – SAP oder Naphthalinsulfonat – zugegeben und eingemischt. Für SAP wurden Zugabemengen von 0,10–0,30 M.-% v. Z. untersucht, während für die Fließmittel auf Naphthalinsulfonat-Basis Mengen zwischen 0,25 und 1,50 M.-% v. Z. zugegeben wurden. Dabei wurden folgende Variationen untersucht:

- Variation des Additivprodukts (SAP oder Naphthalinsulfonat)
- Variation des Additivgehalts
- Variation der Einmischzeit und Mischenergie
- Variation des w/z-Werts (Steuerung über den Wassergehalt)
- Variation des PCE-Produkts und PCE-Gehalts
- Variation der Bindemittelzusammensetzung (bei Verwendung von SAP)
- Variation des Einmischzeitpunkts

Im Wesentlichen wurden dabei Setzfließmaße und Formstabilitätskoeffizienten am Haegermann-Trichter untersucht. Der Zielbereich war hier ein Setzfließmaß 30 Sekunden nach Additivzugabe von $S_{HT0,5} \geq 200$ mm und ein Formstabilitätskoeffizient fünf Minuten nach Additivzugabe von $0,90 \leq K_{HT,5} \leq 1,00$. Aufbauend auf diesen Versuchen wurden allerdings auch Setz-

fließmaße nach DIN EN 206-9 und Formstabilitätskoeffizienten am Würfel untersucht.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Thixotrop eingestellte Betone

In den durchgeführten Untersuchungen wies M1 im Vergleich zu dem o. g. Beton nach einem ersten Mischzyklus bei einer Standzeit von fünf Minuten einen ähnlichen Formstabilitätskoeffizienten von 0,95 auf, jedoch lag die Grünstandfestigkeit mit 0,012 N/mm² um 82 % niedriger. Das Setzfließmaß lag mit 465 mm unter dem angestrebten Wert von ≥ 500 mm. Nach einem zweiten Mischzyklus nahm das Setzfließmaß um rund 41 % auf 655 mm zu. Infolge der höheren Fließfähigkeit des Betons wurde nach einer Standzeit von fünf Minuten keine ausreichende Formstabilität bzw. Grünstandfestigkeit festgestellt. Im Folgenden lag daher der Fokus auf dem Betonverhalten nach einem zweiten Mischzyklus, der als Aufmischen nach einer Transportphase kurz vor oder während des Einbaus verstanden werden kann.

Bei der Herstellung von Mischung M3 wurde statt eines CEM I 42,5 R ein CEM I 42,5 N verwendet. Nach dem zweiten Mischzyklus wurde mit 450 mm ein Setzfließmaß ermittelt, das 31 % unter dem Setzfließmaß von M1 lag. Trotz des geringen Setzfließmaßes wurde jedoch nach einer Standzeit von fünf Minuten keine ausreichende Formstabilität bzw. Grünstandfestigkeit erzielt. Erst nach einer Standzeit von zehn Minuten wurde ein Formstabilitätskoeffizient von 0,73 festgestellt, der mit einer Grünstandfestigkeit von 0,003 N/mm² korrespondierte.

Für Mischung M11, Herstellung mit CEM I 42,5 R und PCE3, wurde ebenfalls mit 478 mm ein Setzfließmaß ermittelt, das

knapp unter dem angestrebten Minimalwert von 500 mm lag. Allerdings wurden mit 0,93 nach fünf Minuten und 0,98 nach zehn Minuten Standzeit Formstabilitätskoeffizienten $> 0,90$ ermittelt. Korrespondierend wurden Grünstandfestigkeiten von 0,008 N/mm² und 0,013 N/mm² erzielt, die 166 % bzw. 333 % über der aus der Literatur bekannten Grünstandfestigkeit von 0,003 N/mm² nach einem 2. Mischzyklus lagen.

Mit einem Setzfließmaß von 585 mm wies Mischung M12 (CEM III/A 42,5 N und PCE3) nach einem zweiten Mischzyklus das höchste Setzfließmaß der vier Betone auf. Trotz dieses relativ hohen Setzfließmaßes wurde nach einer Standzeit von fünf Minuten mit einem Formstabilitätskoeffizienten von 0,87 der Minimalwert von 0,90 nur knapp unterschritten. Nach einer Standzeit von zehn Minuten wies der Beton einen Formstabilitätskoeffizienten von 0,94 auf. Die parallel ermittelte Grünstandfestigkeit betrug 0,009 N/mm² bzw. 0,015 N/mm² und lag damit in etwa in dem Bereich von M11.

M14, mit einem Leim-/Gesteinskörnungsverhältnis von 45/55 (+5 % mehr Leim i. V. zu den anderen Betonen), wies zwar im Vergleich zu M11 aufgrund des höheren Leimgehalts ein um 3,6 % höheres Setzfließmaß von 495 mm auf, jedoch wurde das Mindestsetzfließmaß von 500 mm nicht vollständig erreicht. Nach Standzeiten von fünf bzw. zehn Minuten wurden Formstabilitätskoeffizienten von 0,94 und im Vergleich zu M11 mit 0,009 N/mm² und 0,012 N/mm² ähnliche Grünstandfestigkeiten ermittelt. Zusammengefasst sind die Ergebnisse in Bild 3 dargestellt.

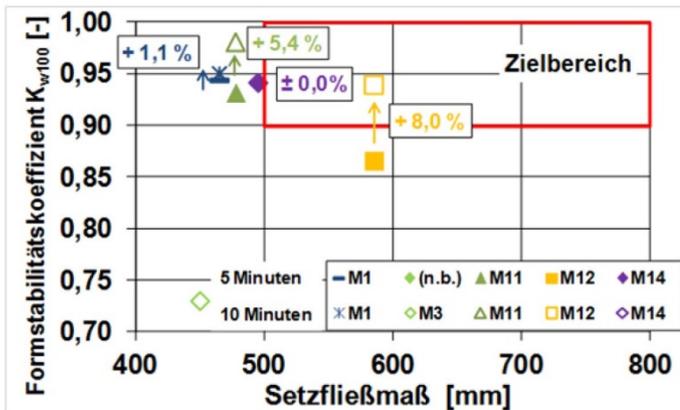


Bild 3: Formstabilitätskoeffizient (K_{w100}) in Abhängigkeit vom Setzfließmaß nach dem ersten (M1) bzw. zweiten Mischzyklus

Somit wurden in der vorliegenden Versuchsserie trotz der beschriebenen Reversibilität der Thixotropie der Zementsuspension nach einem zweiten Mischzyklus, die auch bei Mischung M1 beobachtet wurde, Prüfwerte für das Setzfließmaß (S_m) und den Formstabilitätskoeffizienten (K_w) ermittelt, die nah am oder im Zielbereich von $S_m \geq 500$ mm und $0,90 \leq K_w \leq 1,00$ lagen. Darüber hinaus wurden Grünstandfestigkeiten nach Standzeiten von fünf und zehn Minuten in der Schalung ermittelt, die z. T. deutlich über den Grünstandfestigkeiten nach einem zweiten Mischzyklus nach einer Standzeit von 30 Minuten aus bisherigen Forschungsarbeiten lagen.

3.2 Nachträgliche Additivzugabe

Bei einer Superabsorberzugabe unverzüglich nach Betonherstellung wurde für die Zugabe des Superabsorbers S1 bei einer Zugabemenge von 0,125 M.-% v. Z. und einer Einmischzeit von 15 Sekunden bei 280 min⁻¹ ein Setzfließmaß von $S_{HT,0,5} = 200$ mm bei einem Formstabilitätskoeffizienten von $K_{HT,5} = 0,95$ ermittelt. Am Würfel ergab sich im Mittel ein Formstabilitätskoeffizient von 0,94 bei einer Grünstandfestigkeit von 0,006 N/mm² nach einer Standzeit von fünf Minuten in der Schalung. Damit lag die Grünstandfestigkeit um 100 % höher als bei der aus der Literatur bekannten thixotrop eingestellten Betonmischung mit einer Grünstandfestigkeit von 0,003 N/mm² nach einem zweiten Mischprozess und einer Standzeit von 30 Minuten in der Schalung. Wurde der Superabsorber S1 dem Beton jedoch erst mit einer Verzögerung von 15 Minuten untergemischt, so konnte fünf Minuten nach Superabsorberzugabe, ähnlich wie bei M1, keine ausreichende Formstabilität ermittelt werden. Das Setzfließmaß nach fünf Minuten $S_{HT,5}$ nahm von 103 mm auf im Mittel 178 mm um rund 73 % zu. Ähnliche Beobachtungen konnten auch für weitere Superabsorber gemacht werden. Dementsprechend konnte somit keine Grünstandfestigkeit ermittelt werden. Die Ergebnisse zeigen also, dass die Wirkung der Superabsorber im Beton vom Zugabezeitpunkt abhängig ist. Eine kontinuierliche Änderung der Zugabemenge in Abhängigkeit vom Betonalter scheint erforderlich. Allerdings zeigte eine systematische Erhöhung der Superabsorberzugabe nicht den gewünschten Effekt. Entweder wies die Betonmischung bereits nach Superabsorberzugabe ein deutlich zu steifes Frischbetonverhalten auf oder die Fließfähigkeit blieb über einen längeren Zeitraum deutlich zu hoch, um eine ausreichende Formstabilität sicherzustellen.

Bei nachträglicher Zugabe von Fließmitteln auf Naphthalinsulfonat-Basis konnte ein sehr viel geringerer Einfluss des Zugabezeitpunkts festgestellt werden. Auf Grundlage der Vorversuche und der Untersuchungen des Fließ- bzw. Formstabilitätsverhaltens am Hägermann-Trichter wurden daher zwei Betone bei nachträglichen Naphthalinsulfonatzugaben von 0,70 M.-% v. Z. untersucht, die zum einen ein Größtkorn von 5 mm (Mischung FBQ_N1) und von 8 mm (Mischung BQ_N1) aufwiesen. Mit Setzfließmaßen von 465 mm bzw. 450 mm unterschritten diese Betone das minimal angestrebte Setzfließmaß von 500 mm nur knapp. Korrespondierend wurden fünf Minuten bzw. zehn Minuten nach Naphthalinsulfonatzugabe Formstabilitätskoeffizienten von 0,91 (GK 5 mm, fünf Minuten) bzw. 0,90 (GK 8 mm, fünf Minuten) und 0,91 (GK 5 mm und 8 mm, zehn Minuten) ermittelt. Diese Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt.

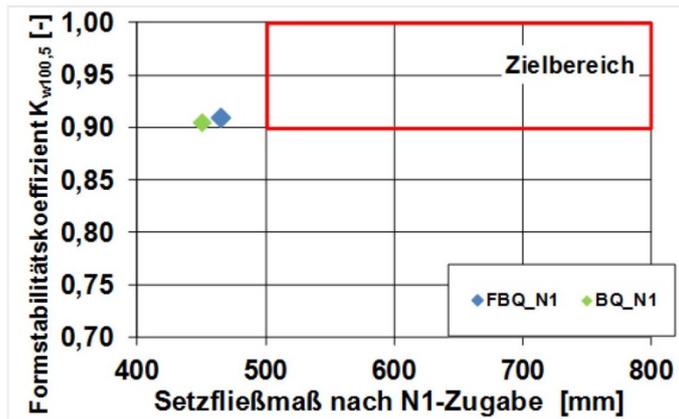


Bild 4: Formstabilitätskoeffizienten und Setzfließmaße nach Naphthalinsulfonatzugabe der Betonmischungen FBQ_N1 und BQ_N1

Bereits fünf Minuten nach Naphthalinsulfonatzugabe wurden Grünstandfestigkeiten von $0,006 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,0012 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Diese Werte sind vergleichbar mit denen, die auch mit den thixotrop eingestellten Betonen erzielt wurden. Orientierend wurde auch die Verarbeitung des Betons mit einem GK von 5 mm mit einem Mini-Paver untersucht. Dabei stellte sich jedoch heraus, dass das Einbringen und die Durchmischung des Frischbetons mit Naphthalinsulfonat Schwierigkeiten bei der Plattenherstellung bereitete. Es konnten jeweils nur kleine Betonmengen hergestellt werden, damit eine zeitnahe Verarbeitung des Frischbetons sichergestellt werden konnte. Ansonsten steifte der Beton unplanmäßig an und war kaum oder nicht mehr zu verarbeiten. Die definierte Additiveinbringung im Gleitschalungsfertiger sollte somit in weiterer Forschungsarbeit hinsichtlich der Maschinenteknik in den Vordergrund rücken, um die Herstellung von homogenen Betonplatten über die gesamte Plattenlänge sicherzustellen. Insgesamt konnte aber gezeigt werden, dass auch durch die nachträgliche Zugabe von Additiven die Fließeigenschaften des Frischbetons beeinflusst werden können. Durch die Zugabe von Naphthalinsulfonat konnten darüber hinaus zwei Betone entwickelt werden, deren Frischbetoneigenschaften nah an den angestrebten Frischbetoneigenschaften lagen und mit denen der thixotrop eingestellten Betone vergleichbar waren. Nichtsdestotrotz erfordert die Verarbeitung mit einem Gleitschalungsfertiger sowohl der thixotrop eingestellten Betone als auch der Betone mit nachträglicher Additivzugabe in der Praxis eine grundlegende Modifikation des Gleitschalungsfertigers. Des Weiteren ist eine weitergehende Untersuchung der Festbetoneigenschaften der Betone unumgänglich, um zu festzustellen, ob die Anforderungen an den Festbeton nach TL-Beton StB 07 insgesamt sicher erreicht werden können. Eigene Versuchsergebnisse zeigen, dass dies weitgehend möglich scheint.