

Verwendung von selbst- verdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 53



bast

Verwendung von selbst- verdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen

von

Franka Tauscher

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 53

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, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 01211 des Arbeitsprogrammes der Bundesanstalt für Straßenwesen:

Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 3-86509-563-1

Bergisch Gladbach, August 2006

Kurzfassung · Abstract

Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen

Im Rahmen des Projektes wurden bei zwei Maßnahmen die Herstellung von Bauwerksteilen in Ort beton und bei einer Maßnahme die Serienherstellung großformatiger Fertigteile aus selbstverdichtendem Beton (SVB) fachtechnisch begleitet. Die dabei gesammelten Erfahrungen konnten durch Auswertung von Fachveröffentlichungen bestätigt und vertieft werden.

Die Vorteile von SVB können auch für den Brücken- und Ingenieurbau genutzt werden. Durch das selbsttätige Fließen des SVB, das selbsttätige Entlüften und das Verteilen bis nahezu zum Niveaueausgleich können Schäden infolge nicht ausreichender Verdichtung des Betons vermieden und die Oberflächenqualität verbessert werden. Die für konventionellen Rüttelbeton typische, körperlich stark belastende, lärm- und zeitintensive Verdichtungsarbeit entfällt. Zur Herstellung von freien Oberflächen mit Gefälle, die sich bei Brücken und Unterführungen von Bundesfernstraßen aus der Trassierung ergeben oder zur Ableitung des Oberflächenwassers im Beton der Fahrbahntafel des Überbaus erforderlich sind, ist SVB jedoch nicht geeignet.

Die Herstellung von Bauteilen mit SVB erfordert einen erheblich größeren Aufwand bei Betonherstellung und bauvorbereitenden Maßnahmen als die Herstellung mit konventionellem Rüttelbeton. SVB ist wenig robust gegenüber baupraktischen Schwankungen von Ausgangsstoffen, Betonherstellung und Einbaubedingungen. Unerwartete Konsistenzschwankungen, Änderung der Verarbeitbarkeitsdauer und Sedimentieren der Gesteinskörnung können bisher nur unter sehr hohem Aufwand (z.B. umfangreiche Vorversuche) sicher vermieden werden. Zur Steigerung der Robustheit von SVB sind bisher schon einige Verbesserungen erkannt und umgesetzt worden. Von einem herkömmlichen „gutmütigen“ Rüttelbeton ist sie jedoch noch weit entfernt. Eine Schulung des Personals im Umgang mit dem neuen Baustoff ist unerlässlich. Dem Erfordernis der partnerschaftlichen Zusammenarbeit zwischen Herstellung und Einbau steht die heute übliche Trennung der Verantwortlichkeiten von Betonlieferant und Bauunternehmung gegenüber. Die sehr hohen Erwartungen an die Verbesserung der Sichtbetonqualität konnten

nicht immer erfüllt werden. Typische Verdichtungsfehler werden zwar vermieden. Vollständig lunkerfreie und vollständig gleichmäßig gefärbte glatte Oberflächen wurden an Bauwerken in der Praxis jedoch nicht beobachtet.

Der technologische, planerische und wirtschaftliche Aufwand für die Herstellung von Bauwerken mit SVB ist sehr hoch. SVB ist nicht für jedes Bauwerk im Zuge von Bundesfernstraßen geeignet. Die Wahl der Bauteile und die Einsatzbedingungen vor Ort verlangen deshalb eine umfassende Vorplanung. Die erwartete hohe Ausführungsqualität und der Wegfall der körperlich stark belastenden, lärm- und zeitintensiven Verdichtungsarbeit sind sehr von Vorteil und ein wichtiges Kriterium bei einer Entscheidung für die Verwendung von SVB.

Inhalt

1	Anlass	7	10	Literatur	49
2	Sachstand zu Beginn des Projekts	7			
3	Der neue Werkstoff SVB	8			
3.1	Einführung	8			
3.2	Mischungskonzepte.....	9			
3.3	Frischbetonentwurf.....	10			
3.4	Wirkungsweise der Fließmittel	12			
4	Begleitung von Bauwerken mit SVB im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall 13				
5	Geh- und Radwegunterführung bei Aubing	13			
5.1	Bauvorhaben	13			
5.2	Betonrezeptur und begleitendes Versuchsprogramm	14			
5.3	Verarbeitungsversuch	14			
5.4	Frisch- und Festbetoneigenschaften.....	17			
5.5	Maßnahmen zur Qualitätssicherung	17			
5.6	Betonage des Widerlagers Süd	18			
5.7	Sichtbetonqualität der Widerlagerwand	20			
6	Rasterdecke des Kappler Tunnels	22			
6.1	Bauvorhaben	22			
6.2	Betonrezeptur und begleitendes Versuchsprogramm	23			
6.3	Verarbeitungsversuch	25			
6.4	Frisch- und Festbetoneigenschaften.....	25			
6.5	Maßnahmen zur Qualitätssicherung	26			
6.6	Beobachtungen bei der Herstellung der Fertigteile	27			
6.7	Sichtbetonqualität der Fertigteile.....	29			
7	Bogenbrücke Wölkau	29			
7.1	Bauvorhaben	29			
7.2	Vorversuche zur Ausführbarkeit des Fahrbahnoberflächenprofils.....	31			
7.3	Hinweise zur Ausschreibung und ergänzende Festlegungen	31			
7.4	Durchführung der Baumaßnahme.....	33			
7.4.1	Konzeption des SVB 65 und Nachweis des Fahrbahnoberflächenprofils an gesonderten Probekörper	33			
7.4.2	Änderung der Ausführung	36			
7.4.3	Verarbeitungsversuch	37			
7.4.4	Herstellung der Bogenstiele	37			
7.4.5	Analyse des Schadensfalls	41			
7.5	Schlussbemerkungen zur Bogenbrücke Wölkau	44			
8	Schlussfolgerungen aus der Begleitung der Bauvorhaben	45			
9	Zusammenfassung und Ausblick	47			

1 Anlass

Trotz sorgfältiger Planung von Bauteilen, sorgfältiger Auswahl der Ausgangsstoffe und sachgerechter Zusammensetzung des Betons treten bei der Ausführung von Bauwerken häufig Mängel durch nicht ausreichende Verdichtung des Betons auf. Diese wirken sich insbesondere auf die Qualität der Sichtbetonoberflächen, die Tragfähigkeit sowie den Korrosionsschutz der Bewehrung in statisch hochbelasteten Stahl- und Spannbetonquerschnitten aus. Durch technische Weiterentwicklung bei Baustoffen und Bauverfahren wurde es möglich, einen selbstverdichtenden Beton herzustellen. Selbstverdichtender Beton (SVB) ist im Gegensatz zu konventionellem Rüttelbeton in der Lage, ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie allein unter dem Einfluss der Schwerkraft zu fließen, zu entlüften und zu verdichten, wobei jeder Hohlraum innerhalb der Schalung ausgefüllt wird. Selbst bei eng liegender Bewehrung findet eine fast niveaugleiche Verteilung selbsttätig statt. Neben einer Verbesserung der Oberflächenqualität, der höheren Widerstandsfähigkeit bei Umwelteinwirkungen, dem optimalen Korrosionsschutz der Bewehrung durch den sie vollständig umgebenden Beton und dem fehlerfreien Verbund von Stahl und Beton auch in Bereichen mit hohem Bewehrungsgrad, zählt der Wegfall der körperlich stark belastenden, lärm- und zeitintensiven Verdichtung des Betons im Bauwerk zu den herausragenden Vorteilen des SVB. Der Einsatz von SVB im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen kann die Qualität und Dauerhaftigkeit der Bauwerke verbessern und zu einer ökonomischeren Bauweise führen.

Die Entwicklung von SVB ist in den letzten Jahren schnell vorangeschritten, dennoch bestand bezüglich Entwurf, Verarbeitung, Festigkeitseigenschaften und speziellen Dauerhaftigkeitseigenschaften Forschungsbedarf, bevor eine breite Anwendung im Sinne des herkömmlichen „gutmütigen“ Betons möglich ist. Ziel des Projektes ist es, die Erfahrungen mit der Verwendung von SVB im konstruktiven Brücken- und Ingenieurbau zusammenzustellen und zu überprüfen, ob und in welchem Ausmaß die technologischen und wirtschaftlichen Vorteile in diesem Bereich nutzbar sind.

2 Sachstand zu Beginn des Projekts

Das AP-Projekt wurde im Jahr 2001 begonnen. Im Juni 2000 war mit dem DAfStb-Sachstandbericht „Selbstverdichtender Beton (SVB)“ der Stand der

Technik veröffentlicht worden. Zu dem neuen Werkstoff SVB gab es noch einige nicht ausreichend geklärte Fragen hinsichtlich der Frisch- und Festbetoneigenschaften. SVB weicht in seiner Zusammensetzung von der Norm ab, so dass die Anwendung im bauaufsichtlich relevanten Bereich nur mit einer Zustimmung im Einzelfall durch die zuständige Baubehörde/Bauaufsicht oder mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des Deutschen Instituts für Bautechnik möglich war.

Im Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) wurden im Sommer 2000 die ersten Anträge auf allgemeine bauaufsichtliche Zulassung gestellt. Mitte 2001 wurden die erste Zulassungen für SVB als Beton für Fertigteile und als Transportbeton erteilt [31].

Nahezu zeitgleich zu der Fertigstellung des Sachstandsberichts wurde die erste DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB) [1], noch auf Basis von DIN 1045:1988-07, erarbeitet und im Juni 2001 veröffentlicht. Diese Richtlinie wurde jedoch nicht bauaufsichtlich eingeführt, weil zu der Zeit nur sehr eingeschränkte Erfahrungen mit der baupraktischen Anwendung vorlagen.

In Deutschland wurden die ersten Bauteile aus SVB im Jahr 1999 als Fertigteile, z. B. Garagen, Trafohäuschen, Stützen, Rundbehälter, Schachtelemente, Halbschalen, Rohre oder auch als Garagenböden, hergestellt [2]. Im Jahr 2000 wurden mit Zustimmung im Einzelfall der jeweils zuständigen Baubehörden die ersten konstruktiven Ingenieurbauten bzw. Bauteile errichtet. So z. B. die großvolumigen Gründungen (modifizierter Bohrpfeilbeton) für ein Brückenbauwerk [3, 4], bewehrten Stahlbetonstützen eines Bevorratungssilos im Zementwerk Rohrdorf [5], das Obergeschoss eines Verwaltungsgebäudes in Wiesbaden [6] und im Jahresübergang 2000/2001 der Neubau eines Labor- und Schulungszentrums in Leverkusen [6]. Im Oktober 2000 wurde die erste Zustimmung im Einzelfall für einen SVB zur Verwendung im Fertigteilwerk Stockstadt ausgesprochen [7]. 2001/2002 wurde eine Fußgängerbrücke in SVB ausgeführt [60].

In Europa wurde SVB zuerst in den Niederlanden (ab ca. 1998 in Bauwerken/Bauwerksteilen [8, 58, 59]), Schweden (ab ca. 1998, z. B. in 3 Unterführungsbauwerke für Rad- und Fußwege [9], im Tunnelprojekt Södra Lanken, Stockholm [10]), in Österreich (ab ca. 1997 für die Verstärkung eines Unterzuges einer Autobahnbrücke [11], 1999 als Füllbeton von Stahlverbundstützen des Millenium-Towers in Wien, 2001 in einer Abfangkonstruktion der Wiener U-Bahn [12]) und in Dänemark [13] im konstruktiven Ingenieurbau verwendet. In den Nie-

derlanden stellten ab 2000 die in der Belton-Gruppe zusammengeschlossenen Fertigteilhersteller die Produktion vollständig auf SVB um. Die Vorbereitungen dazu haben allerdings auch mehrere Jahre gedauert [14, 15].

Im September 1999 fand das 1. Internationale RILEM Symposium zu SVB in Schweden statt. In Deutschland wurden auf den 45. Ulmer Beton- und Fertigteil-Tagen im Februar 2001 in größerem Umfang über Erfahrungen mit SVB berichtet.

Aufgrund der aus dem Ausland veröffentlichten Erfahrungen wurde in den Jahren 2000 und 2001 in der Öffentlichkeit heftig diskutiert, warum SVB in Deutschland über aufwändige Zulassungsverfahren geregelt werden müsse. In diesen Diskussionen wurde allerdings meist nicht ausreichend gewürdigt, dass zu den Projekten jeweils umfangreiche projektspezifische Vorversuche durchgeführt wurden und die Verwendung von SVB in keinem Land als „Regelbauweise“ betrachtet wurde [6, 8, 16, 17, 61]. Auch gab es nicht nur Erfolge und Vorteile mit SVB, sondern es wurde auch über Schwierigkeiten berichtet [5, 2].

Vor diesem Hintergrund entschloss sich die BAST, ein Forschungsvorhaben mit dem Titel „Eigenschaften selbstverdichtender Betone“ zu vergeben, in dessen Mittelpunkt Untersuchungen zur Robustheit von SVB standen. Die Robustheit, d. h. die Unempfindlichkeit des SVB gegenüber Schwankungen in den Eigenschaften der Betonausgangsstoffe, waren eine zentrale Frage für die Verwendung. Nur dann, wenn es gelingt die Frischbetoneigenschaften von SVB zielsicher und reproduzierbar auch bei großen Betonmengen einzustellen, ist eine Verwendung im Brückenbau möglich. Die Ergebnisse wurden im Dezember 2004 [18] veröffentlicht.

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau-, und Wohnungswesen (BMVBW) entschloss sich im Jahr 2001, die neue Technologie zu fördern und schon zu diesem frühen Zeitpunkt SVB mit Zustimmung im Einzelfall verwenden zu lassen. Die fachtechnische Beratung des BMVBW und Begleitung der Baumaßnahmen erfolgte durch die BAST. Die aus den einzelnen Maßnahmen gesammelten Erfahrungen werden im vorliegenden Bericht zusammengestellt werden.

3 Der neue Werkstoff SVB

3.1 Einführung

Selbstverdichtender Beton (SVB) ist ein sehr fließfähiger Beton, der ohne Einwirkung von Ver-

dichtungsenergie allein unter dem Einfluss der Schwerkraft fließt, sich dabei entlüftet, jeden Hohlraum innerhalb der Schalung füllt und dennoch so Mischungsstabil ist, dass die groben Gesteinskörner im flüssigen Mörtel nicht absinken. Im Vergleich zu einem normalen Beton entfällt die Verdichtung beim Einbau vollständig, so dass

- die (Fach)Arbeiter keiner körperlich stark belastenden Vibrations- und Lärmbeanspruchung ausgesetzt sind
- die Lärmemission der Baustelle so weit reduziert wird, so dass auch Nachtbetonagen in eng besiedelten Ballungsräumen möglich erscheinen
- weder die Sichtbetonoberfläche noch der Korrosionsschutz der Bewehrung und der kraftschlüssige Verbund zwischen Bewehrung und Beton durch Verdichtungsfehler beeinträchtigt werden
- Rüttelgassen in der Bewehrungsführung nicht erforderlich sind
- der Zeitaufwand für die sachgerechte Verdichtung entfällt
- weniger (Fach)Arbeitskräfte eingesetzt werden müssen.

Die Technologie der heutigen selbstverdichtenden Betone wurde zusammen mit neuen Fließmitteln um 1990 in Japan entwickelt [16]. Der Bedarf für selbstverdichtenden Beton ergab sich aus der abnehmenden Anzahl an Facharbeitern in Japan. Das Konzept des selbstverdichtenden Betons beruht auf der Mischungsstabilität bei hoher Fließfähigkeit und ausreichend langer Verarbeitbarkeitszeit. Der Mischungsentwurf weicht von dem für normalen Beton ab, so dass SVB mit Recht als neuer, junger Werkstoff bezeichnet werden kann [19]. Selbstverdichtender Beton des Mehlkorntyps und des Kombinationstyps wird nach ähnlichen Verfahren entworfen. Der Stabilisierertyp, der sich durch höhere Mengen stabilisierender Zusatzmittel und geringeren Mehlkorngesamtgehalt von den anderen Typen unterscheidet, wird in der älteren Literatur zwar erwähnt, scheint jedoch wenig gebräuchlich zu sein.

Die besonderen Eigenschaften des selbstverdichtenden Betons des Mehlkorn- oder Kombinationstyps ergeben sich aus einer optimalen Kornzusammensetzung von Zement, Zusatzstoff und Gesteinskörnung und aus der Leistungsfähigkeit der Fließmittel der „neuen Generation“.

Die Mischungsstabilität des SVB resultiert aus der dichtesten Packung aller Körner, vom Zement mit

wenigen μm Durchmesser über die Zusatzstoffe – je nach Art mit noch geringeren Durchmessern als Zement – bis zu den Gesteinskörnern mit bis zu üblicherweise 16 mm Durchmesser [20]. Die Bewegung der Körner gegeneinander ist in einer solchen dichtesten Packung allerdings nicht mehr möglich. Nur dann, wenn zwischen die Körner ein Gleitmittel in solcher Menge eingebracht wird, dass der Abstand untereinander ausreichend groß ist, kann die Mischung fließen.

Für die größeren Gesteinskörner im selbstverdichtenden Frischbeton des so genannten Mehlkorntyps wirkt die Suspension aus Zement, mehlfine Zusatzstoffen, mehlfine Gesteinskörnern, Wasser und Zusatzmittel als Gleitmittel (vergleichbar dem Zementleim im normalen Beton); für den Zement und die weiteren mehlfine Ausgangsstoffe wirkt die Lösung von Wasser plus Zusatzmittel als Gleitmittel. Die erforderliche Fließfähigkeit und eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitsdauer kann mit den Fließmitteln der „neuen Generation“ erzielt werden. Das sind Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether, die vor etwa 10 Jahren in Japan auf den Markt gebracht wurden und seit 1997/98 auch in Deutschland angeboten werden [21]. Um Schwankungen der Ausgangsstoffe auszugleichen, werden zusätzlich organische oder anorganische Stabilisierer oder Sedimentationsreduzierer zugegeben [16]. Dann spricht man von SVB des Kombinationstyps [19, 22].

3.2 Mischungskonzepte

Im Mittelpunkt des Mischungsentwurfs eines konventionellem Rüttelbetons stehen eher die Eigenschaften des Festbetons, Druckfestigkeit und Wasserzementwert, als die Frischbetoneigenschaften. Der Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Wasserzementwert besteht über die Zementfestigkeitsklasse (z. B. die Walz-Kurve [23]). Eine gute Verarbeitbarkeit des Frischbetons ergibt sich aus der Abstimmung der Kornzusammensetzung (Sieblinie, Körnungsziffer) mit dem Zementleimgehalt und aus der Begrenzung des Mehlkorngehaltes. Falls erforderlich, wird die Konsistenz anschließend mit Zusatzmitteln auf das erforderliche Maß eingestellt. Nach diesem Konzept werden auch Fließbetone entworfen. Die Richtlinie für Fließbeton¹ [24] gibt ergänzende Hinweise, damit sich der flüssige Frischbeton nicht entmischt: Der Mehlkorngehalt muss ausreichend hoch sein, und

vor Zugabe der Fließmittel muss der Beton steife Konsistenz (KS oder KP, heute: C1 oder F2) und gutes Zusammenhaltevermögen aufweisen. Das höchste Ausbreitmaß von Fließbeton betrug 600 mm, bestimmt am Ausbreittisch nach 15-maligem Aufschlagen der Platte. Fließbeton muss durch geeignete Maßnahmen, wie z. B. Stochern, entlüftet werden.

Im Mittelpunkt des Mischungsentwurfs von selbstverdichtendem Beton stehen die Frischbetoneigenschaften hohe Fließfähigkeit, gute Selbstentlüftung und ausreichende Mischungsstabilität. Der Wassergehalt und die Druckfestigkeit müssen dann in Bezug auf die zulässigen Werte überprüft werden. Die Druckfestigkeit des SVB ist in der Regel höher, als bei einem Rüttelbeton gleichen w/z-Wertes zu erwarten wäre. Auch die Verarbeitbarkeitszeit muss schon bei der Auswahl der Ausgangsstoffe und im Mischungsentwurf berücksichtigt werden, denn das Fließ- und Entlüftungsverhalten muss so lange gut sein, bis der Beton vollständig eingebaut ist.

Die selbstverdichtende Eigenschaft des Betons wird von den Eigenschaften des Mörtels bestimmt: das Fließen, das Mitnehmen der groben Gesteinskörnung (ohne dass diese in der Bewehrung blockiert), das vollständige Entlüften und das Nicht-Sedimentieren [16]. Nach OKAMURA [25] wird zunächst das Volumen der groben Gesteinskörnung begrenzt. Das Volumen darf nicht zu groß sein, damit die groben Körner vom Mörtel in Schwebelage gehalten werden und nicht nach unten sinken.

Der viskose Mörtel setzt sich zusammen aus dem feinen Zuschlag ($> 0,125$ mm), Mehlkorn ($< 0,125$ mm), Wasser und Fließmittel. Im Mörtel wird das Volumen des feinen Zuschlags begrenzt. Der Mehlkorngehalt von ca. $500 - 600 \text{ kg/m}^3$ [19] setzt sich aus Zement, Mehlkorn der Gesteinskörnung und anderen Feinststoffen, wie z. B. Kalksteinmehl, Flugasche, Quarzmehl und ggf. stabilisierend wirkenden Zusatzstoffen, wie Silikastaub oder synthetischer Kieselsäure, zusammen. Der Zementgehalt ist ähnlich dem in normalem oder hochfestem Rüttelbeton.

Der weitere Mischungsentwurf orientiert sich am Fließvermögen und der Viskosität des SVB, beginnend mit Leimversuchen über Mörtelversuche bis zu den Betonversuchen. In den Betonversuchen wird dann auch das Sedimentieren und Blockieren der groben Gesteinskörnung im Bewehrungsgeflecht überprüft. Das Fließvermögen wird durch das Setzfließmaß (s_m), die Viskosität durch die Trichterauslaufzeit (t_{Tr}) [1, 16, 25, 26] oder durch die Fließzeit (t_{500}) des Frischbetonkuchens auf einen Durchmesser von 500 mm charakterisiert [1, 26].

¹ Die DAfStb-Richtlinie für Fließbeton war mit Beton nach DIN 1045:1988-07 (alt) anzuwenden. Nach DIN 1045 (alt) war der höchstzulässige Mehlkorngehalt auf kleinere Werte als nach DIN 1045-2 (neu) begrenzt.

3.3 Frischbetonentwurf

Das Vorgehen beim Mischungsentwurf richtet sich nach dem beschriebenen Konzept von OKAMURA. Die Umsetzung des Konzeptes in die Praxis wird im Folgenden erläutert, um einen Überblick über die erforderlichen Versuche und den damit verbundenen Aufwand zu geben. Ausführliche Erläuterungen zum Vorgehen werden in [19, 20, 27] gegeben. Dort finden sich auch Hinweise auf die unterschiedliche Belegung gleicher Begriffe in verschiedenen Ländern, wie z. B. die Definition von Sand und Mehlkorn, die für rheologische Eigenschaften wesentlich sein können: Die Korngröße von Sand ist in Deutschland (D) und den Niederlanden (NL) mit 0,125 mm - 4 mm und in Japan (J) mit 0,09 mm - 5 mm definiert. Die Korngröße von Mehlkorn ist in D und NL mit $< 0,125$ mm und in J mit $< 0,09$ mm definiert.

Nachdem die Ausgangsstoffe für den SVB festgelegt sind, wird die Zusammensetzung des Mehlkorngemisches gewählt. Dann wird zunächst der optimale Wasseranspruch des Mehlkorngemisches (im englischen: Powder) mit Hilfe des relativen Setzfließmaßes des Zementleims bestimmt. Dazu wird Leim mit verschiedenen Verhältnissen von Wasser und Mehlkorn (V_W/V_P) hergestellt. Von jedem Leim wird das Setzfließmaß bestimmt und das relative Setzfließmaß des Leims (Γ_P) berechnet. Das Setzfließmaß ist der Durchmesser des Leimkuchens, der sich ergibt, wenn ein mit Leim gefüllter Kegelstumpf mit definierten Abmessungen angehoben wird. Für das relative Setzfließmaß wird der Durchmesser des Leimkuchens dann auf den größeren Durchmesser des Kegelstumpfes bezogen [s. z. B. 20]. Aus dem Zusammenhang zwischen Verhältnis von Wasser und Mehlkorn (V_W/V_P) und dem relativen Setzfließmaß (Γ_P) folgt der Wasseranspruch des Mehlkorngemisches (β_P) beim relativen Setzfließmaß von Null. Für den optimalen Wasseranspruch werden unterschiedliche Werte benannt, die bei ca. $0,9 \beta_P$ [20], zwischen $0,8$ und $0,9 \beta_P$ [18, 19] oder zwischen $0,9$ und $1,0 \beta_P$ [16] liegen. Art und Zusammensetzung des Mehlkorns können hierauf einen Einfluss haben.

An die Leimversuche schließen die Mörtelversuche an. Der Mörtel wird mit dem optimalen Wassergehalt so zusammengesetzt, dass der feine Sand größer als $0,125$ mm ca. 40 % des Mörtelvolumens ausmacht. Damit ist der Mehlkorn-, Wasser- und Sandgehalt des Mörtels festgelegt. Das Fließverhalten und die Viskosität werden nun durch Fließmittelzugabe abgestimmt. Dem Mörtel wird so viel Fließmittel zugegeben, bis das relative Setzfließmaß des Mörtels $\Gamma_m = 5$ (entspricht nach [20] einem Setzfließmaß von 245 mm) und die Auslauf-

zeit aus dem Mörteltrichter ca. 10 sec beträgt. Die angegebenen Zielwerte beruhen auf den Erfahrungen nach [16]. In [18, 20] werden auch etwas kürzere oder längere Zeiten berichtet.

Streng genommen könnte die Viskosität des Mörtels nur durch die Art des Fließmittels und die Zugabemenge eingestellt werden. Aber auch der Gehalt an Feinsand und dessen Kornform können die Viskosität beeinflussen [16]. Nach [20] muss der Aufsteller der Rezeptur zur Abstimmung von Fließverhalten und Viskosität hier nach seinen Erfahrungen handeln. Wenn andere Ausgangsstoffe, z. B. ein anderes Kalksteinmehl oder eine andere Flugasche, gewählt werden müssen, um eine Abstimmung von Fließverhalten und Viskosität des Mörtels in den von OKAMURA genannten Grenzen zu erreichen, oder wenn der Hersteller oder die Herstellcharge gewechselt werden oder wenn die Zusammensetzung des Mehlkorns verändert wird, z. B. der Zementgehalt, sollten nicht nur die Beton- und Mörtelversuche sondern auch die Leimversuche wiederholt werden.

Der Einfluss der Ausgangsstoffe auf die rheologischen Zusammenhänge für den Mörtel in SVB sind in Bild 1 skizziert. Bis die optimale Kombination der Ausgangsstoffe gefunden ist, kann es erforderlich sein, die Schritte Leimversuche – Mörtelversuche mehrfach zu wiederholen [20].

Der Übergang vom Mörtel zum Beton erfolgt über die Zugabe der groben Gesteinskörnung, deren Volumen durch die Vorgaben von [25] begrenzt ist. Der Mörtel selbst darf in den Betonversuchen nicht mehr verändert werden [16, 25]. Geringfügige Änderungen der Fließmitteldosierung sind nach [20] praktikabel. Die Prüfverfahren für Fließverhalten und Viskosität des Betons sind ähnlich denen aus der Mörtelprüfung, allerdings sind die Abmessungen der Prüfgeräte größer und der Gesteinskörnung angepasst. In anderen europäischen Ländern wird anstelle des Betontrichters auch ein sich nach unten verjüngendes Rohr (Orimet-Versuch) [19] verwendet.

Ergänzend zu den rheologischen Eigenschaften wird in den Betonversuchen auch das Blockieren der Gesteinskörnung in der Bewehrung und das Selbstnivellieren im Bewehrungsnetz geprüft.

Das Blockieren der Gesteinskörnung wird z. B. mit dem Blockiering (J-Ring) nach Bild 2 überprüft, der nach SVB-Richtlinie [1, 26] auch während der laufenden Produktionskontrolle verwendet wird. Das Selbstnivellieren in der Bewehrung kann z. B. mit dem U-Kasten-Versuch (Box-test), der Fließschikane, dem L-Kasten-Versuch oder dem Durchfließversuch [19] überprüft werden. Dabei muss

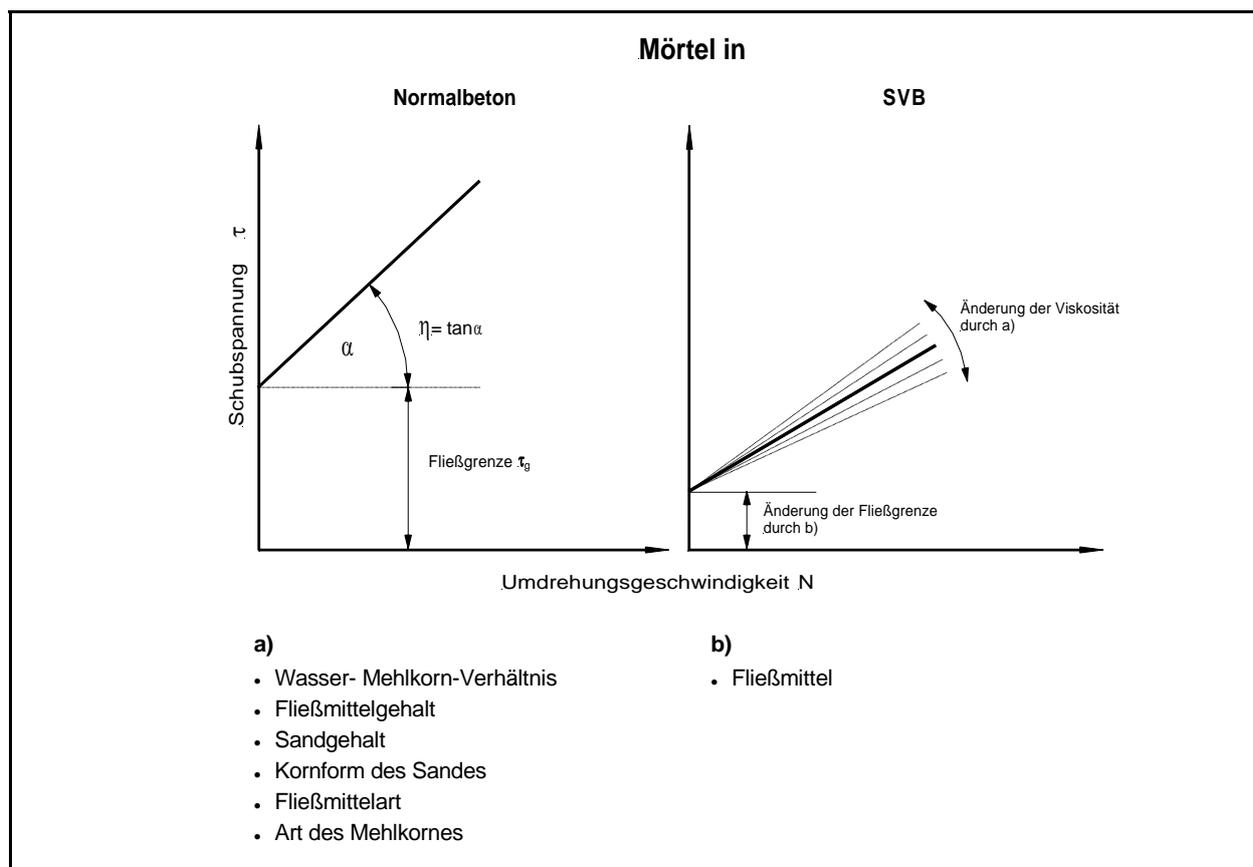


Bild 1: Rheologische Zusammenhänge für den Mörtel in selbstverdichtendem Beton [nach 28]

der Frischbeton ein Bewehrungshindernis aus Stahlstäben durchlaufen. Die Abstände und Durchmesser der Stahlstäbe, die vom SVB in den Prüfgeräten durchfließen werden müssen, können verändert werden. So können die Überprüfung des Selbstnivellierens und das Nichtblockierens dem Größtkorn und der Bauteilgeometrie angepasst überprüft werden.

In Europa wurde im Laufe der Zeit die Erfahrung gemacht, dass das Sedimentieren der groben Gesteinskörnung im Beton nicht mit den Prüfverfahren für Fließverhalten und der Viskosität erfasst wird und deshalb einer gesonderten Prüfung bedarf [29, 30, 31]. Das Sedimentationsverhalten wird nach der SVB-Richtlinie [26] am Frischbeton mit Hilfe eines dreigeteilten Rohrs und am Festbeton durch Schnitt- oder Spaltbilder überprüft. In anderen europäischen Ländern wird auch ein Siebttest am Frischbeton (stability sieving test (GTM)) verwendet [29, 30]. Beim Rohrversuch nach [26], wird der Frischbeton in ein dreigeteiltes Rohr eingefüllt. Bevor der Frischbeton erhärtet, werden 2 Schieber eingeschoben, so dass der Frischbeton im oberen, im mittleren und im unteren Drittel des Rohres in jeweils gleich große Mengen geteilt wird. Die Frischbeton aus jedem Rohr-

abschnitt wird auf ein Sieb mit 8 mm Maschenweite gegeben. Der Zementmörtel wird ausgewaschen, und die Gesteinskörnung größer als 8 mm wird gewogen. Wenn so viel grobe Gesteinskörnung absinkt, dass im unteren Rohrabchnitt mehr als 20 % Körner größer als 8 mm mehr enthalten sind als im Mittel über alle drei Rohrabchnitte, spricht man von ausgeprägtem Sedimentieren. Der Mischungsentwurf muss dann so verändert werden, dass nur geringe Unterschiede des Grobkorngehalts in den Rohrabchnitten gemessen werden. Auf der Baustelle darf ein SVB mit einem Anteil von 20 % mehr groben Körnern im unteren Drittel des Rohrversuchs als im oberen Drittel nicht eingebaut werden [26].

Neben einer guten Abstimmung von Fließverhalten und Viskosität ist, wenn Bauteile oder Bauwerke aus SVB hergestellt werden, auch eine ausreichend lange Verarbeitbarkeitszeit erforderlich. Die Verarbeitbarkeitszeit t_{VB} - das ist der Zeitraum, in dem der SVB gutes Fließverhalten und gute Selbstverdichtung sowie Selbstentlüftung aufweist - kann ebenfalls von den Ausgangsstoffen bzw. der Ausgangsstoffkombination wesentlich beeinflusst werden [32]. So wird in [5] berichtet, dass für eine vorgegebene Zement-Flugaschekombination auch

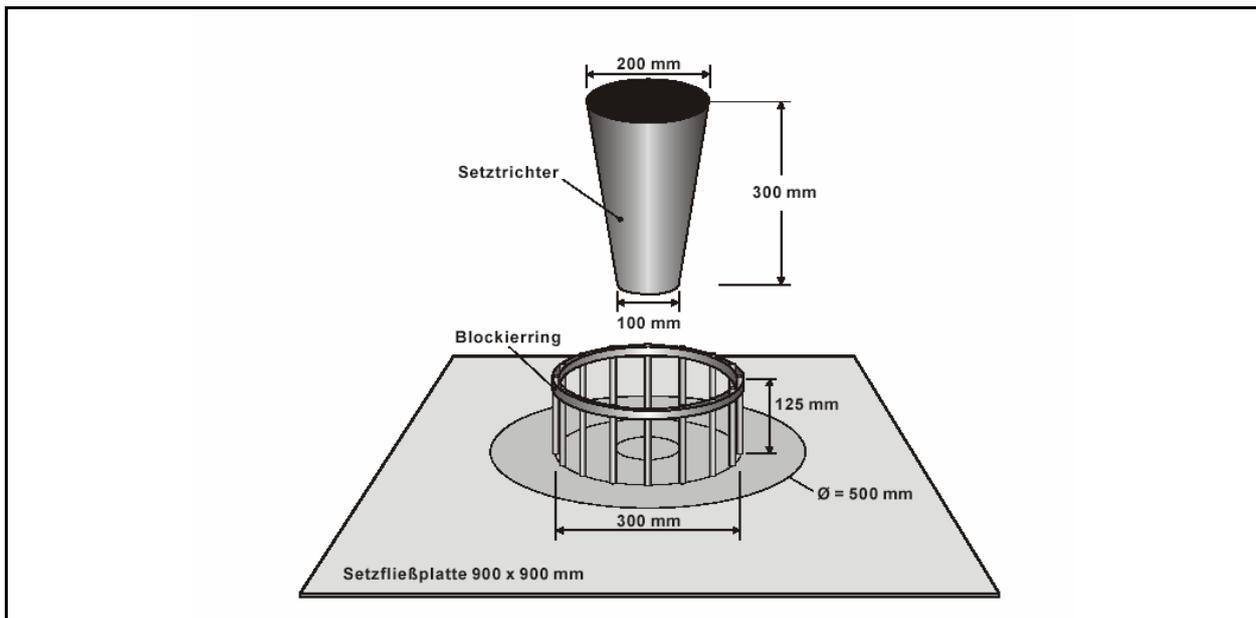


Bild 2: Blockiererring für die Prüfung des Blockierverhaltens von selbstverdichtendem Beton. Hier gezeigt in der Anordnung für die Bestimmung des Setzfließmaß [26]

mit 12 unterschiedlichen Fließmitteln auf PCE-Basis nur eine Verarbeitbarkeitszeit von maximal 40 – 45 Minuten erreicht werden konnte. Nach unseren Erfahrungen (Kapitel 8 und [18]) sollte die Verarbeitbarkeitszeit und auch die Temperaturempfindlichkeit des Frischbetons schon bei der Auswahl der Ausgangsstoffe, also im Frischbetonentwurf berücksichtigt werden.

Auch das Verhalten des SVB beim Pumpen sollte überprüft werden. Der Pumpvorgang führt dem SVB Energie zu, und die Fließfähigkeit kann beeinflusst werden. Die speziellen Fließmittel können bei Energiezuführung, wie z. B. durch den Pumpvorgang, nachverflüssigen. Ein solches Verhalten ist auch vom Mischen im Fahrmischer beim Transport vom Herstellwerk zur Baustelle bekannt. Die Gefahr des Sedimentierens ist größer, je flüssiger der SVB ist. Es sollte aber auch überprüft werden, ob der SVB beim Pumpen möglicherweise ansteift.

Das Fließ- und Entlüftungsverhalten muss an die Bauteilgeometrie und das Einbauverfahren angepasst werden (z. B. Kapitel 6.6).

3.4 Wirkungsweise der Fließmittel

Die Herstellung von selbstverdichtendem Beton ist nur mit speziellen Fließmitteln möglich. Fließmittel auf Melaminsulfonat- oder Naphthalinsulfonat-Basis können den Frischbeton zwar auch sehr stark verflüssigen. Eine für den Einsatz auf der Baustelle ausreichend lange Verarbeitbarkeitsdauer bei gleichzeitig stark verflüssigender Wirkung und ausreichender Frühfestigkeit kann aber nur mit Fließmitteln der „neuen Generation“ erzielt werden. Das

sind Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE), die vor etwa 10 Jahren in Japan auf den Markt gebracht wurden und seit 1997/98 auch in Deutschland angeboten werden [21]. Die besondere Wirkungsweise dieser Fließmittel beruht darauf, dass neben elektrostatischen Abstoßungskräften zusätzlich auch sterische Abstoßungskräfte zwischen den mehlfinen Körnern wirken [19, 20, 21]. Diese sterischen Abstoßungskräfte halten die Zementkörner auch dann noch auf Distanz, wenn deren Oberfläche durch eine erste, dünne Schicht von Hydratationsprodukten bedeckt ist. Dieser Wirkungsmechanismus wird auch „sterischen Dispergierung“ genannt [21].

Zu den Vorteilen der PCE zählt nach [21] neben der sterischen Dispergierung auch die geringe Beladung der Oberfläche der Zementkörner. Die Hydratation wird nur geringfügig verzögert. Die Frühfestigkeit des Betons wird nicht reduziert.

Die Wirksamkeit von PCE-Fließmitteln - die verflüssigende Wirkung, die Verarbeitbarkeitsdauer und der Einfluss auf die Frühfestigkeit - kann über die chemische Zusammensetzung der Moleküle und die Strukturmerkmale, wie Länge der Hauptkette, Länge der Seitenkette, Verhältnis der Kettenlängen und Ladungsdichte, gesteuert werden. So ist es auch möglich, das Adsorptions-/Desorptionsverhalten der PCE-Moleküle an den Zementkörnern und damit die Verarbeitbarkeitszeit gezielt zu steuern. Entscheidenden Einfluss auf den Adsorptionsgrad hat die Oberflächenbeschaffenheit der Zementpartikel bzw. der Hydratationsprodukte. In Bezug auf eine lange Verarbeitbarkeitszeit des Betons ist es von großem Vorteil,

wenn Fließmittel und Zement gut aufeinander abgestimmt sind [21]. Von Nachteil ist, dass dann nicht jedes PCE mit jedem Zement funktioniert.

Die Möglichkeit mit PCE maßgeschneiderte Fließmittel für die jeweilige Betonzusammensetzung und den Einsatzbereich herzustellen hat den Nachteil, dass nicht jedes PCE mit den zur Verfügung stehenden Betonausgangstoffen die erwartete Wirkung hat.

4 Begleitung von Bauwerken mit SVB im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall

Die Erfahrungen wurden durch die fachtechnische Begleitung von einzelnen Baumaßnahmen gesammelt. Alle Baumaßnahmen wurden, wie auch seit 2003 durch ZTV-ING, Teil 3 Massivbau, Abschnitt 1 Beton, Nr. 1, gefordert, mit einer Zustimmung im Einzelfall durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) durchgeführt. Das jeweilige Bundesland beantragte die Zustimmung im Einzelfall unter Beteiligung von Gutachtern mit besonderen Kenntnissen und Erfahrungen. Die BASt war als unabhängiger Beobachter und fachtechnischer Berater für das BMVBS eingebunden.

5 Geh- und Radwegunterführung bei Aubing

5.1 Bauvorhaben

Im Zuge der Neubaumaßnahme Bundesautobahn A 99 (Westring München) wurde eine Geh- und Radwegunterführung bei Aubing (BW92-5s) mit selbstverdichtendem Beton (SVB) ausgeschrieben. Die Bundesanstalt für Straßenwesen wurde unmittelbar vor der Betonage des zweiten Widerlagers Süd im April 2001 über das Bauvorhaben informiert. Dies Bauvorhaben war in der Straßenbauverwaltung das erste in einem offenen Verfahren ausgeschriebenene Projekt mit SVB. Die Ausschreibung wurde zwischen der obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern (OBB) und der TU München vorab abgestimmt [33].

Im ersten Halbjahr 2001 sollten ca. 150 m³ Fundamentbeton und ca. 270 m³ Beton für die Rahmenkonstruktion der Unterführung als SVB der Festigkeitsklasse B 25 hergestellt werden. Die Aufsicht auf die Unterführung ist in Bild 3 dargestellt. Eine besondere Herausforderung stellte die Oberfläche des Überbaus mit einer Querneigung von 2,5 % und einer Längsneigung von rd. 2,7 % dar.

Bei Aufforderung zur Angebotsabgabe durch die Autobahndirektion Südbayern im Juli 2000 wurde gerade der DAfStb-Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB) [19] und die gleichnamige DAfStb-Richtlinie zu DIN 1045:88-07 [1] erarbeitet. Der erste Prüfplan für eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung von SVB wurde in diesem Zeitraum im Sachverständigenausschuss des DIBT

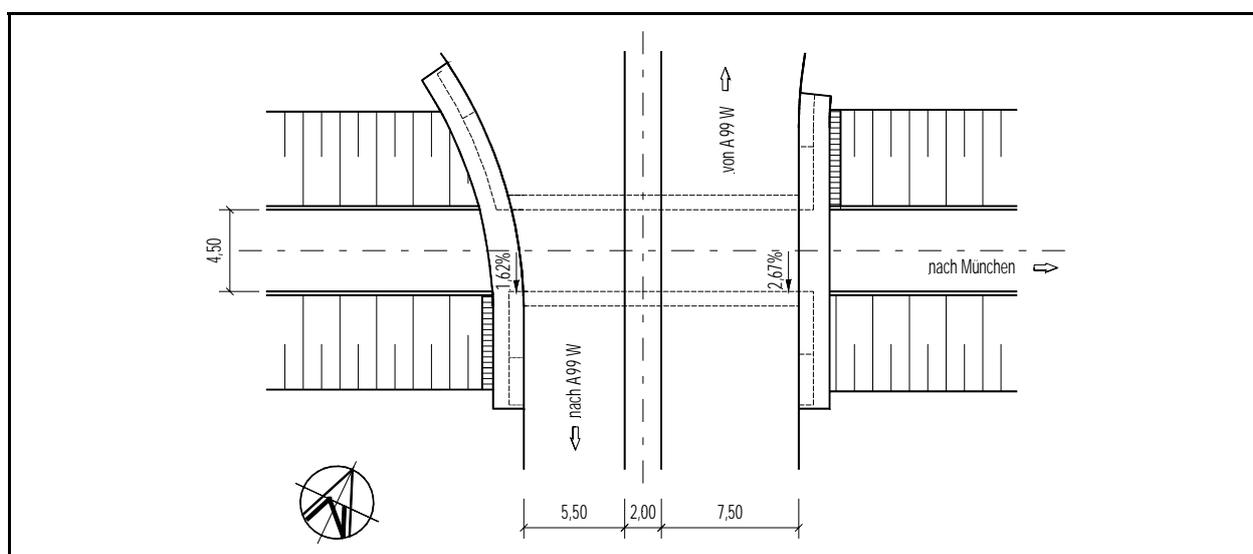


Bild 3: Aufsicht auf die Geh- und Radwegunterführung bei Aubing

beraten. Die Beratung der OBB zur Erteilung der Zustimmung im Einzelfall für den SVB erfolgte durch die TU München.

Die wissenschaftliche Begleitung der Baustoffeigenschaften und der Ausführung erfolgte durch den Lehrstuhl für Baustoffkunde, die Bemessungsgrundlagen wurden vom Lehrstuhl für Massivbau der TU München betreut. Die Bauleitung und die Bauaufsicht des Auftraggebers wurde von der Autobahndirektion Süd, Bauleitung Maisach, wahrgenommen.

Als die BASt informiert wurde, war die Entscheidung gefallen, den Überbau nicht in SVB sondern in konventionellem Beton herzustellen. Das erste Widerlager, das Widerlager Nord, war kurz vorher in SVB betoniert worden. Damit war es möglich, die Betonage des Widerlagers Süd mit SVB am 05.05.2001 vor Ort zu beobachten. Die Festbetonoberfläche konnte ca. 2 Wochen später (14.05.2001) in Augenschein genommen werden.

5.2 Betonrezeptur und begleitendes Versuchsprogramm

Die vorgelegte Betonrezeptur wurde im Oktober 2000 hinsichtlich der Frisch- und Festbetoneigenschaften und im November 2000 hinsichtlich der Bemessungskennwerte durch die TU München überprüft.

Es wurde ein SVB mit Portlandzement CEM I 32.5 R, Flugasche als Mehlkorn und Größtkorn 16 mm vorgeschlagen. Neben Fließmittel wurde ein Stabilisierer als Betonzusatzmittel eingesetzt (s. Tabelle 1). Die SVB-Rezeptur war nach der Methode von OKAMURA entwickelt worden, das Wasser/Mehlkornverhältnis wurde über den β_p -Wert ermittelt. So ergab sich ein w/z -Wert von 0,47 ohne Anrechnung von Flugasche. Der SVB wies in der Eignungsprüfung eine mittlere Druckfestigkeit von 69 N/mm² auf (s. Tabelle 3) [35, 36].

Den zur Verfügung gestellten Unterlagen konnte entnommen werden, dass der Verarbeitungsversuch mit 6 m³ SVB nach Tabelle 3 in dem Werk durchgeführt wurde, das den Beton für das Bauwerk liefern sollte. Weil die Frischbetoneigenschaften von SVB wesentlich vom Mischvorgang und der Dosierung der Ausgangsstoffe beeinflusst werden, wurde die Erstprüfung mit Beton aus diesem Verarbeitungsversuch durchgeführt. Der Umfang der Erstprüfung war, im Vergleich zu solchen im Jahr 2005, relativ groß, weil die entsprechenden Erfahrungen noch fehlten. So wurden neben Setzfließmaß mit und ohne Blockierring, s_m und $s_{m,b}$, und Fließzeit t_{500} auch das Selbstnivellierungsvermögen in der L-Box und der U-Box über

einen Zeitraum von 2 Stunden bestimmt (s. Tabelle 2). Das Entmischungsverhalten wurde visuell, durch Beobachtung der Versuche, beurteilt. Als Festbetoneigenschaften wurden die Druckfestigkeitsentwicklung, statischer E-Modul, Biegezugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Schwind- und Kriechverhalten, Karbonatisierungsfortschritt, Wasserundurchlässigkeit, Frostwiderstand mit Würfel- und CIF-Verfahren, Chloriddiffusion und die Gaspermeabilität ermittelt (s. Tabellen 2 und 3) [35, 36].

Der SVB zeigte bei Setzfließmaßen s_m zwischen 700 und 730 gute selbstentlüftende (LP-Topf) und selbstnivellierende Eigenschaften. Er war Mischungsstabil. Grober Zuschlag blockierte beim Durchfließen der Stabhindernisse nicht. Die Verarbeitungszeit war mit 120 min ausreichend lang. Innerhalb dieser Zeitspanne reduzierte sich das Setzfließmaß nur um 30 mm.

Im November 2000 war die Frage nach Unterschieden zwischen Verbundverhalten und Bruchverhalten von SVB und konventionellem Rüttelbeton noch nicht geklärt. Die Versuche der TU München mit dem Pull-out Test nach RILEM zeigten, dass sich das Verbundverhalten beider Betone nicht wesentlich unterscheidet. Das Verbundverhalten von SVB und Rüttelbeton ist im Bereich des „guten Verbunds“ vergleichbar. In der oberen Bewehrungslage, dem Bereich des mäßigen Verbundes, kann für den untersuchten SVB derselbe Abminderungsfaktor für die zulässige Verbundspannung angesetzt werden wie für normalen Rüttelbeton (50 %) [37]. Die Durchführung der Verbundversuche wurde erschwert durch die unerwartet hohe Festigkeit des SVB. In den Pull-out-Versuchen begann der Stahl zu fließen, bevor die Verbundspannungen erreicht waren.

Das Bruchverhalten wurde über die Bestimmung der Bruchenergie an mittig gekerbten Balken ($I^*b^*t=800*100*100$ mm³) mittels Biegezugversuch überprüft. Die experimentell bestimmte Bruchenergie des SVB stimmt sehr gut mit den rechnerischen Werten nach Modelcode 90 für Normalbeton überein. Im Versuch war die Bruchenergie für den Normalbeton leicht höher als für den SVB. Die Werte liegen jedoch innerhalb der für den Zusammenhang nach Model Code 90 bekannten Streubreite [37].

5.3 Verarbeitungsversuch

Im Verarbeitungsversuch wurde 6 m³ des SVB hergestellt. Ergänzend zur Probenahme für die Erstprüfung wurden die Auswirkungen der Anfahrzeit von 45 min zur Baustelle, eine Unterbrechung des Betoniervorgangs von rd. 45 min an

Betonausgangsstoffe	Einheit	Wert
1	2	3
Zement CEM I 32,5 R	kg/m ³	344
Flugasche (München, Safament)	kg/m ³	182
Wasser	kg/m ³	162
w/z	[-]	0,47
$(w/z)_{eq} = w/(z+0,4*f)$	[-]	0,43
Sand 0/4a mm	kg/m ³	960
Kies 4/8 mm	kg/m ³	175
Kies 8/16 mm	kg/m ³	611
Zusatzmittel		
Fließmittel FM 10 J (Isola)	kg/m ³	7,6
Stabilisierer ST – 4 (UWB Isola)	kg/m ³	0,8

Tab. 1: Betonzusammensetzung, SVB München-Aubing

Frischbetoneigenschaft	Einheit	Wert
1	2	3
Frischbetontemperatur	[°C]	
6 Setzfließmaß, sm		
Fließzeit, t ₅₀₀		
<u>10 min</u>	[cm]	72,5
t ₅₀₀₀	[sec]	3,3
<u>30 min</u>	[cm]	
t ₅₀₀	[sec]	
<u>60 min</u>	[cm]	73
t ₅₀₀	[sec]	5,0
<u>90 min</u>	[cm]	
t ₅₀₀	[sec]	
<u>120 min</u>	[cm]	71
t ₅₀₀	[sec]	5,6
Setzfließmaß mit Blockierring, sm _b	[cm]	68,0
Höhenunterschied:	[cm]	1,1
L-Box		
H ₂ /H ₁	[-]	0,95
T ₂₀	[cm]	1,5
T ₄₀	[cm]	3,1
U-Box		
Höhenunterschied:	[sec]	0,0
Steigzeit	[cm]	13,6
Luftporengehalt	[Vol.-%]	1,00
Rohdichte	[kg/dm ³]	2,489

Tab. 2: Frischbetoneigenschaften, SVB München-Aubing

Festbetoneigenschaft		Prüfalter	Einheit	Wert
1		2	3	4
Druckfestigkeit		2d	[N/mm ²]	31
		7d		45
		28d		69
		56d		71
		90d		82
E-Modul		28d	[N/mm ²]	39500
Spaltzugfestigkeit		28d	[N/mm ²]	5,7
Biegezugfestigkeit		28d	[N/mm ²]	6,7
Karbonatisierung		9 Mon	[mm]	2
Schwindverformung, ϵ_s		160d	[%]	0,42
Schwindverformung, bezogen auf 28d, $\epsilon_{s,t}$		127d	[%]	0,180
Kriechverformung, $\epsilon_{k,t}$		127d	[%]	0,722
Kriechzahl φ		127d	[-]	1,306
spez. Kriechmaß, $\text{spez}\epsilon_{k,t} = \epsilon_{k,t} / \sigma_k$		127d	[%]	0,033
Wassereindringtiefe				
Platten		28d	[mm]	12
Bohrkerne		28d	[mm]	14
Frost-Tauwiderstand				
VDZ-Verfahren				
Abwitterung	50 FTW	28d	[M.-%]	0,5
	100 FTW	28d	[M.-%]	2,4
CIF-Verfahren am Bohrkern				
Abwitterung	56 FTW	28d	[M.-%]	104
E-Modul RDM	56 FTW	28d	[%]	-12,6
Frost-Tausalzwiderstand				
CDF-Verfahren				
Abwitterung	28 FTW	28d	[g/m ²]	3676
	28 FTW	8 Mon	[g/m ²]	123
Chloriddiffusion				
Migrationskoeffizient (RCM-Test)		5 Mon	[m ² /s]	$5,0 \cdot 10^{-13}$
Gaspermeabilität (Sauerstoff)		5 Mon	[m ²]	$1,5 \cdot 10^{-18}$

Tab. 3: Festbetoneigenschaften, SVB München-Aubing

einem großen wandartigen Probekörper ($b \cdot h \cdot t = 0,8 \cdot 2,0 \cdot 2,0 \text{ m}^3$) und unterschiedliche Schaltungsbeläge untersucht [38]. Der Beton wurde praxisnah mit der Pumpe eingebracht. Die Folge der Unterbrechung war eine an der Oberfläche sichtbare Schichtgrenze zwischen den einzelnen Betonlagen. Im Wandinneren war der Verbund jedoch

nicht gestört. Dies wurde mit Bohrkernen nachgewiesen [35].

Die Eigenschaften des SVB wurden in einem weiteren Verarbeitungsversuch kurz vor der Bauausführung unter Baustellenbedingungen bei der Herstellung der Fundamente (jeweils 70 m^3) der Unterführung überprüft.

In einem der beiden Fundamente kam auch der SVB 2 zur Anwendung, mit dem das Längs- und Quergefälle von 2,7 bzw. 2,5 % eingestellt werden konnte. Dieser SVB sollte sich während des Fließens zwar vollständig entlüften, aber aufgrund seiner größeren inneren Reibung im Gefälle liegen bleiben. Deshalb wurden ein anderer Zement als im SVB für die Widerlager und eine gebrochene Gesteinskörnung, Splitt 8/16, verwendet [39]. Bei der Betonage traten dann aber Verarbeitungsprobleme auf, die unter dem herrschenden Zeitdruck nicht mehr gelöst werden konnten. Der Überbau wurde deshalb mit Rüttelbeton hergestellt [40]. Die Probleme wurden der BAST anlässlich der Betonage des letzten Widerlagers wie folgt geschildert: „Die Konsistenz des SVB 2 schwankte sehr stark zwischen den einzelnen Anlieferungen. Mal war der SVB so steif, dass er nicht von selbst geflossen ist. Ein anderes mal war er so weich, dass sich das Gefälle nicht einstellen ließ.“ Die Oberfläche des Fundaments wies nach dem Erhärten keine nennenswerte Neigung auf. Vermutlich war der SVB 2 für die Bedingungen des Praxisbetriebs im Herstellwerk nicht robust genug.

5.4 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Die Druckfestigkeit des SVB 1 war für einen Beton mit CEM I 32,5 R und mit $w/z = 0,47$ bzw. $w/(z+0,4*f) = 0,43$ sehr hoch und entsprach nahezu Beton der Festigkeitsklasse B 55. Laut Baubeschreibung [34] war die Festigkeitsklasse B 25 gefordert. Für die Rissbreitenbeschränkung wurde die Zugfestigkeit eines B 45 angenommen.

Die Nacherhärtung war für einen Beton dieser Festigkeitsklasse ebenfalls hoch und vermutlich auf den Festigkeitsbeitrag durch die Flugasche zurückzuführen. E-Modul, Spaltzugfestigkeit und Biegezugfestigkeit entsprachen den für einen Rüttelbeton derselben Festigkeitsklasse nach DIN 1045 zu erwartenden Werten (s. Tabelle 3). Die Ergebnisse der Versuche zum Schwind- und Kriechverhalten sind ebenfalls in Tabelle 3 enthalten.

Die Dichtigkeit des Porengefüges war sehr hoch. Die Wassereindringtiefe betrug maximal 14 mm [36]. Sowohl der Permeabilitätskoeffizient für Gas als auch der Chloridmigrationskoeffizient lagen unterhalb der für konventionellen Rüttelbeton üblichen Werte [41].

Der SVB wies einen hohen Frost-Tauwiderstand auf. Ein ausreichender Frost-Tausalz-widerstand XF4 konnte allerdings nicht im Alter von 28 Tagen, sondern erst bei der zweiten Prüfung im Alter von 8 Monaten nachgewiesen werden [41].

5.5 Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Zur Zeit der Ausführung des Bauwerks lag noch keine Richtlinie für SVB vor. Die zur Qualitätssicherung zählenden Verarbeitungsversuche sind vorab schon beschrieben worden. Die Qualitätssicherungspläne für das Transportbetonwerk und für die Baustelle lagen der BAST nicht vor. Aus [39] wird entnommen, dass der Sand für den SVB trocken vorgelagert werden musste. Hierzu sollte mindestens einen Tag vor dem Betonieren eine Box mit 200 t Sand (von der Halde) gefüllt und mit Folie abgedeckt werden. Im Weiteren werden die bei der Betonage des Widerlagers Süd am 05.05.2001 beobachteten und die in der Baubeschreibung [34] festgelegten Maßnahmen dargestellt.

Maßnahmen im Werk

- Bestimmung der Sandfeuchte vor Betonierbeginn durch Trocken (beobachtete Ergebnisse: Messwert TB-Werk: 7,6 % Wasser, Trocknen: 8,6 % Feuchte)
- Verwendung von Recyclingwasser war nicht erlaubt
- Die Frischbetontemperatur sollte zwischen 15° und 20 °C liegen
- Erhöhte Anforderungen an die Dosiergenauigkeit der Mischanlage
- Von der automatischen Dosierung des FM wurde trotz Veränderung der Schlauchdicken abgesehen, weil das Nachtropfverhalten nicht kontrollierbar war. Für die geringen Mengen pulverförmiger Stabilisierer war keine geeignete automatische Dosiereinrichtung vorhanden. Das zähflüssige Fließmittel und der pulverförmige Stabilisierer werden deshalb vor Betonierbeginn abgemessen und händisch in den Mischer zugegeben.
- Mischreihenfolge war sekundengenau festgelegt: Gesteinskörnungen+Zement+Flugasche+Stabilisierer wurden trocken vorgemischt, dann wurden Wasser und Fließmittel zugegeben. Die Mischung wurde erst einige Sekunden nach Zugabe des Fließmittels flüssig.
- Die Mischzeit einer Mischerfüllung betrug 4 Minuten. Die Beladung eines Mischfahrzeugs dauerte rd. 20 Minuten.
- Bei den Fahrmischern musste vor Befüllung die Trommel mit Wasser gereinigt und anschließend so lange rückwärts gedreht werden, bis das Wasser entfernt war.

- Die Frischbetoneigenschaften wurden am Beton der 1. Mischerfüllung (Rohdichte, Luftgehalt, Temperatur, Setzfließmaß mit und ohne Blockierring) und nach dem Füllen auf rd. 7 m³ (Setzfließmaß, Betontemperatur) bestimmt. Nach 3 Mischungen (rd. 1,8 m³ Füllung) wurde der SVB 5 min intensiv im Fahrmischer gemischt.
- Setzfließmaß und Temperatur der Mischung im Fahrzeug wurde auf dem Lieferschein vermerkt.

Maßnahmen auf der Baustelle

- Bestimmung des Setzfließmaßes und der Betontemperatur vor der Pumpe. Am ersten Fahrzeug zusätzlich Setzfließmaß mit Blockierring (bei ausreichender Gleichmäßigkeit der Mischung wurde darauf verzichtet). Ab und zu Kontrolle des Setzfließmaßes nach der Pumpe
- Nachdosieren von Fließmittel im Fahrmischer war nicht erlaubt.
- Der Zugabetrichter der Betonpumpe musste vor Betoneinbau im Bauteil vollständig mit Beton gefüllt sein. Anschließend musste der Beton so (langsam) gepumpt werden, dass der Zugabetrichter immer mit Beton gefüllt war. So war sichergestellt, dass durch den Pumpvorgang keine zusätzliche Luft in den Frischbeton eingebracht wurde.
- Der SVB wurde an 2 Einfüllstellen in das Widerlager eingebracht. Die Fließstrecken betragen rd. 4 m zum Flügel und rd. 10 - 12 m zur Mitte der Wand.
- Der Pumpenschlauch sollte ca. 5 cm tief in die Frischbetonoberfläche getaucht werden
- Das auf der Oberfläche der Flügelwand erforderliche Gefälle sollte mit Hilfe von Streckmetall abgestellt werden.
- Zur Nachbehandlung wurde die freie Betonoberfläche zwischen der aufgehenden Bewehrung mit wärmedämmender Luftpolsterfolie bedeckt, anschließend wurde dicke Baufolie darüber gezogen und außen an der Schalung befestigt.

5.6 Betonage des Widerlagers Süd am 05.05.2001

Die Vorbereitungen im TB-Werk begannen um 5 Uhr. Das erste Mischfahrzeug erreichte die Baustelle um 6:45 Uhr. Das letzte der 11 Mischfahrzeuge war um 12:08 Uhr entleert. Sämtliche Arbeiten erfolgten gut koordiniert und gut abgestimmt

zwischen den Baubeteiligten. Der Geräuschpegel war während der gesamten Betonage gering.

Das Setzfließmaß nahm auf der Fahrt vom Werk zur Baustelle immer zu. Zum Beispiel wurden am selben Beton im Werk $sm = 67$ cm und auf der Baustelle $sm = 74$ cm bestimmt. Die Ursache für diese Nachverflüssigung ist die Depotwirkung der Fließmittel und der Energieeintrag im Fahrmischer oder in der Pumpe. Auch das langsame Mischen im Fahrmischer beim Transport vom Herstellwerk zur Baustelle trägt genügend Energie zur Nachverflüssigung ein. Das Setzfließmaß war mit 750 mm \pm 20 mm über die gesamte Betonage sehr gleichmäßig.

Die Frischbetontemperatur stieg bei Außentemperaturen zwischen 13 °C und 19 °C im Laufe der Betonage von 20 °C auf knapp 25 °C an. Der Anstieg der Betontemperatur wurde durch die Erwärmung des Mixers im Werk mitverursacht. Durch das trockene Vormischen und die erst langsam einsetzende verflüssigende Wirkung des Fließmittels entstand erhebliche Reibungswärme. Der Mischer musste zwischenzeitlich mit Wasser gekühlt werden.

Mit zunehmender Höhe des Betonspiegels im Bauteil floss der SVB nicht mehr wie eine Flüssigkeit. Die obere Lage floss schollenartig über den schon vorhandenen Frischbeton (Bild 4). Die Bewehrung wurde dabei vollständig umhüllt, wenn auch mit langsamer Fließgeschwindigkeit (Bild 5). Um ein Abzeichnen der „Lagenbildung“ im Festbeton zu reduzieren, wurde die Frischbetonoberfläche beim Warten auf die nächste Betonanlieferung leicht mit Wasser benetzt.

Ein Gefälle von ca. 1 % wurde durch Verziehen des Pumpenschlauchs ca. 50 cm über der Betonoberfläche eingestellt. Durch das Aufplatschen des SVB wurde dabei allerdings zusätzliche Luft in den Frischbeton eingetragen.

Die Verwendung von Streckmetall zur Einstellung des erforderlichen Gefälles der Widerlagerwand von 1,6 bzw. 2,7 % (Tiefstpunkt am Ende der Widerlagerwand) hat sich nicht bewährt. Der Beton sollte von unten hochsteigen; am Tiefstpunkt floss der SVB jedoch auch von seitlich-oben auf das Streckmetall. Die Frischbetonoberfläche unterhalb des Streckmetalls wurde durch das schollenartige Fließen des SVB nicht glatt (Bild 6). Der Zementleim durchdrang das Streckmetall. Weil befürchtete wurden, das Streckmetall könne aus dem erhärteten Beton nicht mehr entfernt werden, wurde es aus dem Frischbeton hochgezogen.



Bild 4: Fließverhalten des Frischbetons in der Schalung

Zur Nachbehandlung wurde zunächst eine wärmedämmende Folie auf die freie Betonoberfläche gelegt. Anschließend wurde die Wandschalung an der Oberseite mit Folie umhüllt, wie die Bilder 7 und 8 darstellen.

Die Einbaugeschwindigkeit über die gesamte Betonierdauer betrug $16 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Fahrmiter waren mit ca. 8 m^3 SVB gefüllt. Den Engpass stellte die SVB-Herstellung im Werk dar. Dadurch ergaben sich Wartezeiten bei der Ankunft der Fahrmiter

auf der Baustelle. Eine kontinuierliche Betonage war nicht möglich.



Bild 5: Vollständige Umhüllung der Bewehrung durch den SVB



Bild 6: Herstellen der Oberflächenneigung von 2.7 %



Bild 7: Wärmedämmung der freien Oberfläche

5.7 Sichtbetonqualität der Widerlagerwand

Das fertige Bauteil wurde ca. 2 Wochen nach der Herstellung erneut besichtigt. Die Sichtbetonoberfläche machte einen sehr guten und von weitem gesehen auch einen sehr gleichmäßigen Eindruck. Alle Kanten sind sauber gebrochen. Kiesnester am Fuß der aufgehenden Widerlagerwand und an den Schalungsankern sind nicht vorhanden (Bilder 9, 10). Kleine Betonwülste sind nur dort sichtbar, wo sich Platten der Tafelschalung treffen (Bild 12).

Die Betonoberfläche ist jedoch nicht luftporenfrei. An den mit sägerauhen Brettern geschalteten Flächen fallen die Luftporen nicht sehr stark auf (Bild 11). An den mit nicht saugenden Holztafeln geschalteten Flächen ist der Eindruck allerdings schlechter (Bild 12). Die sägerauhe Oberfläche der Schalung bildet sich vollständig auf der Betonoberfläche ab (Bilder 10, 11).

Einzelne Betonierlagen zeichnen sich an der Betonoberfläche durch horizontale Fehlstellen ab, an denen sich der Beton nicht ausreichend vermischt hat (Bild 11). Dieser Effekt wurde auch von der Wand des 1. Verarbeitungsversuches berichtet.



Bild 8: Widerlager der Geh- und Radwegunterführung bei Aubing nach der Betonage

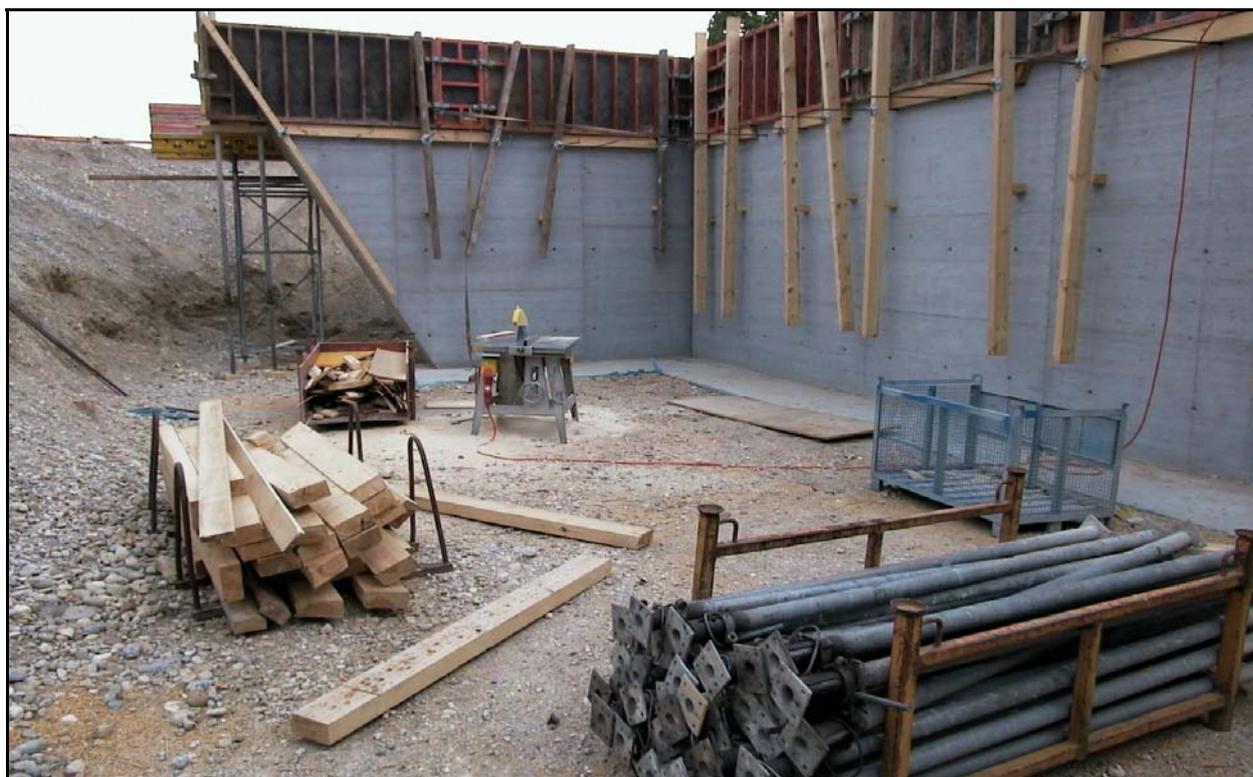


Bild 9: Aufgehende Widerlagerwand



Bild 10: Sägerau geschalte Sichtbetonfläche



Bild 11: Betonierlagen



Bild 12: Sauber gebrochene Kanten, kleine Mörtelwülste und Luftporen

Es handelte sich um Oberflächendefekte, der Verbund der Betonierlagen im Bauwerk war nicht gestört. Eine mögliche Erklärung für dies Abzeichnen der „Schüttlagen“ liegt in dem Ansteifverhalten des SVB und im Fließverhalten an der Schalungsoberfläche. An der freien Oberfläche steift der SVB recht schnell in einer dünnen Schicht an, wobei der darunter liegende Frischbeton noch flüssig ist. Dieser Effekt ist von hochfestem Beton bekannt und wird als „Elefantenhaut“ bezeichnet. Beim Einfüllen der nächsten Lage Frischbeton wird die Elefantenhaut im Inneren der Wand durchbrochen. Im schmalen Spalt zwischen Bewehrung und Schalung fließt der SVB vorwiegend horizontal. Eine Vermischung des SVB in vertikale Richtung findet wohl nur in geringem Maße statt, so dass sich an der Schalungsoberfläche der frisch eingefüllte SVB über den vorhandenen Beton legt.

6 Rasterdecke des Kappler Tunnels

6.1 Bauvorhaben

Im Zuge des Neubaus der B 31 Freiburg-Kirchzarten wird die neue Bundesstraße im Stadtgebiet von Freiburg durchgängig in Tieflage geführt. Große Teilbereiche der Strecke sind dabei vollständig überdeckt. Die Bereiche zwischen den Tunnelbauwerken werden als Lärmschutzgalerie ausgeführt und in Tieflagen zwischen Lärmschutzwänden erstellt. Im Ein- und Ausfahrtsbereich des Kappler Tunnels wird sowohl aus gestalterischen als auch aus lichttechnischen Gründen eine Rasterdecke eingebaut. Das Tunnelportal wirkt durch den Lichteinfall freundlicher und spart zusätzlich

einen Teil der sonst erforderlichen Adaptionsbeleuchtung ein (Bild 13).

Die Rasterdecke besteht aus Fertigteilen mit einer Länge von 9,77 m, Breite von 2,48 m und Höhe von 0,75 m. Je Fertigteile sind 44 Lichtöffnungen vorhanden (Bild 14). Bei einem rd. 10,5 m³ Betonvolumen hat jedes Teil ein Gewicht von ca. 26 t. Wegen der aufwändigen Geometrie und der engmaschigen Bewehrung sollte auf Vorschlag des Fertigteileunternehmers SVB zum Einsatz kommen, der hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit weitestgehend dem in der ursprünglichen Baubeschreibung vorgesehenen Normalbeton entsprach. Eine Ausführung in der Festigkeitsklasse B 45 wurde angestrebt.

Die gutachterliche Begleitung erfolgte durch König und Heunisch, Beratende Ingenieure, Leipzig. Die Bauleitung und die Bauaufsicht des Landes Baden-Württemberg wurde vom Regierungspräsidium Freiburg wahrgenommen.

Im Juli 2001 wurde die BAST durch das BMVBW eingebunden. Es wurde um eine fachtechnische Stellungnahme im Vorfeld einer möglichen Zustimmung im Einzelfall gebeten, einer Art Machbarkeitsstudie auf Basis der gutachterlichen Stellungnahmen [43] und der bisher gesammelten Erfahrungen. Im Juni 2001 war die DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) [1] veröffentlicht, jedoch noch nicht bauaufsichtlich eingeführt worden. Die Richtlinie bildete die Grundlage der gutachterlichen Stellungnahme.

Im Oktober 2001 wurde die Zustimmung im Einzelfall zur Verwendung des SVB in den Fertigteilelementen für den Kappler Tunnel erteilt. Zeit-

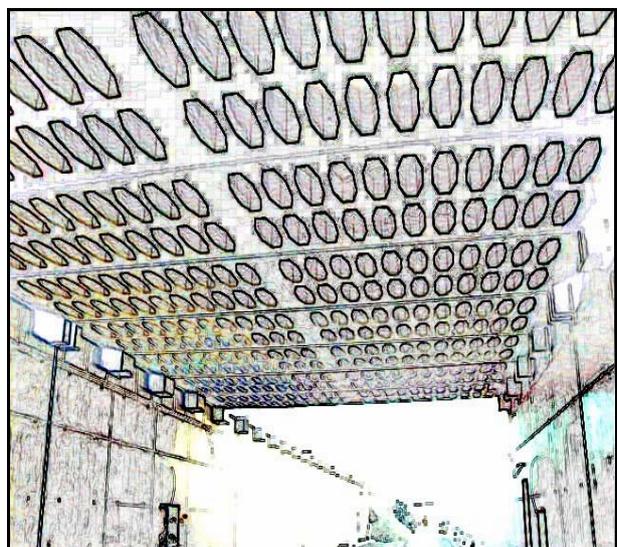


Bild 13: Untersicht der Rasterdecke im Entwurf

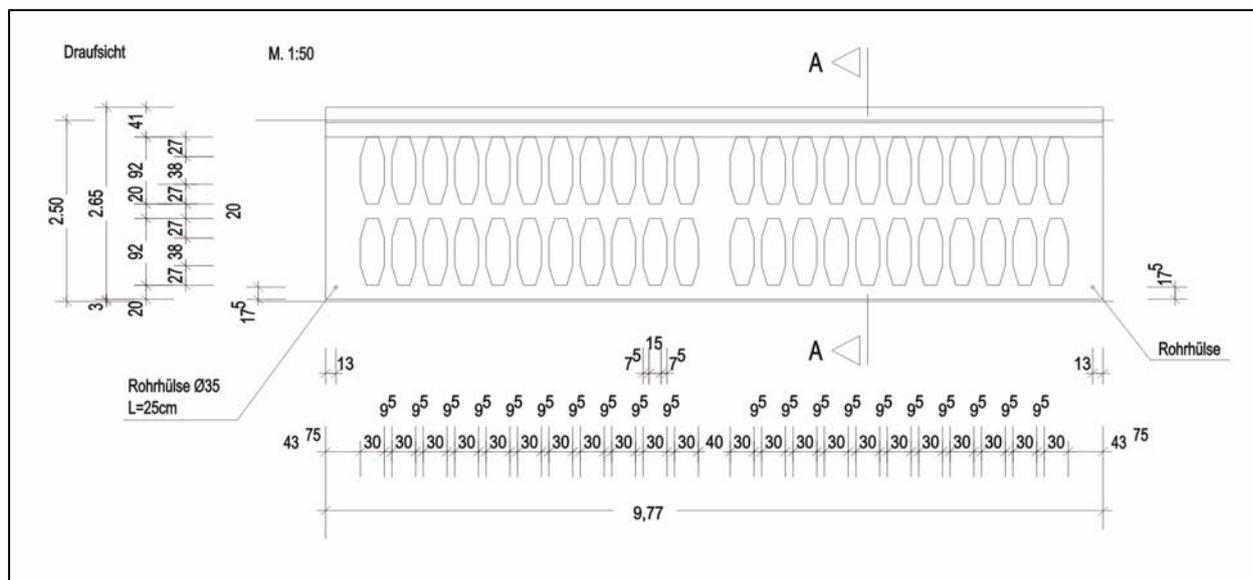


Bild 14: Skizze der Aufsicht auf ein Fertigteil der Rasterdecke

gleich wurde die BAST gebeten, die Herstellung der Fertigteile über den gesamten Herstellzeitraum fachtechnisch zu begleiten. Zwischen Oktober 2001 und Februar 2002 wurden 47 Rasterdeckenelemente hergestellt. Über die Rasterdeckenelemente aus SVB wurde auf einer Fachtagung [44] und in Fachzeitschriften [42, 45] berichtet.

6.2 Betonrezeptur und begleitendes Versuchsprogramm

Die Betonrezeptur wurde dem Büro König und Heunisch im April 2001 zur Stellungnahme vorgelegt. Der SVB wurde mit rötlich-terrafarbenem Portlandschieferzement (CEM II/B-T 42,5 „Terra-

ment“) der Fa. Rohrbach Zement unter Verwendung von Steinkohlenflugasche als Mehlkorn hergestellt (s. Tabelle 4). Neben Fließmittel wurden keine weiteren Betonzusatzmittel verwendet. Die Kornzusammensetzung des Natursandes und Rundkieses entsprach der Sieblinie A16/B16 mit einem hohen Anteil der Körnung im Bereich zwischen 0,25 und 1 mm. Die SVB Rezeptur war mit der Methode von OKAMURA entwickelt worden [42, 43]. So ergab sich ein w/z-Wert von 0,51 ohne Anrechnung von Flugasche und $(w/z)_{eq}$ von 0,45 bei Anrechnung der Flugasche mit $k = 0,4$. Der SVB wies in der Eignungsprüfung eine Druckfestigkeit von i. M. 70 N/mm² auf und war der Festigkeitsklasse B 65, hochfester Beton, zuzuordnen.

Betonausgangsstoffe	Einheit	Wert
1	2	3
Zement CEM II 42,5 R „Terrament“	[kg/m ³]	380
Steinkohlenflugasche FA GKM 18 Safament	[kg/m ³]	160
Wasser	[-]	195
w/z	[-]	0,51
$(w/z)_{eq} = w/(z+0,4*f)$	[-]	0,45
Natursand und Rundkies 0/16	[kg/m ³]	1662
Mehlkorn	[kg/m ³]	550
Mehlkorn + Feinsand	[kg/m ³]	648
Fließmittel	[M.-%] von z	1,6

Tab. 4: Betonzusammensetzung SVB Kappler Tunnel

Eigenschaft	Prüfalter	Einheit	Wert
1	2	3	4
Neigung zum Sedimentieren (am Festbeton bestimmt)	28d	[-]	keine
Setzfließmaß, sm	15 min	[cm]	76,5
Setzfließmaß mit Blockierring, sm _b	15 min	[cm]	75,0
Neigung zum Blockieren		[-]	keine
Luftgehalt		[Vol.-%]	1,10
Frischbetonrohddichte		[kg/m ³]	2,38

Tab. 5: Frischbetoneigenschaften (Eignungsprüfung) des SVB Kappler Tunnel

Den zur Verfügung stehenden Unterlagen [43] war zu entnehmen, dass die Mischanlage im Fertigteilwerk für die Betonherstellung vorgesehen und hinsichtlich der Ausstattung und der Dosiereinrichtungen für Wasser, Zusatzstoffe und –mittel sowie der Einrichtungen zur genauen Messung der Zuschlagsfeuchte begutachtet worden war. Für die Eignungsprüfung musste die Frischbetonherstellung dann allerdings wiederholt werden, weil die Betonherstellung für die Serienproduktion der Fertigteile in einem dem Fertigteilwerk benachbarten Transportbetonwerk erfolgen sollte. Der Umfang der Eignungsprüfung umfasste Setzfließmaß mit und ohne Blockierring nach 15 Minuten, Luftgehalt, Frischbetonrohddichte und Frischbetontemperatur (s. Tabelle 5). Die zeitliche Entwicklung der Frischbetoneigenschaften wurde nicht verfolgt. Die Transportstrecke bis zum Einbau des Betons war kurz. An Festbetoneigenschaften wurden die Druckfestigkeitsentwicklung bis 90 Tage, die Spaltzugfestigkeit und der statische E-Modul jeweils in Alter von 28 Tagen und das Schwinden bis zum Alter von 28 Tagen ermittelt (s. Tabelle 7). Es wurde aber darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der 90-Tage Druckfestigkeit, der Nachweis des Frost- und Frost-Tausalz widerstandes und, was im Gutachten besonders bemängelt wur-

de, ein angemessener QS-Plan für die Herstellung und den Einbau des SVB fehlten [43].

Die Ergebnisse der Herstellung des SVB vom 4. und vom 16.05.2001 [43] zeigten aber auch, dass die Frischbetoneigenschaften nicht zielsicher eingestellt werden konnten und dass ausgeprägte Unterschiede in der Druckfestigkeit bestanden (s. Tabelle 6). Auch war die Verarbeitbarkeitszeit nicht bestimmt worden. Im Zuge der Erfahrungssammlung wäre zudem eine Bestimmung der Kriechverformung des SVB wünschenswert gewesen. Sie war nicht gefordert worden [43], weil die Fertigteilelemente in der Rasterdecke keinen großen kriecherzeugenden Spannungen ausgesetzt waren und die SVB-Richtlinie 2001 [1] dann keine weiteren Nachweise fordert.

Zum Nachweis der Gleichmäßigkeit der Betonherstellung wurde eine weitere Probestonage mit 2 Mischungen gefordert. An Prüfkörpern dieser Mischungen wurden Druck- und Spaltzugfestigkeit, der Frost- und Frost-Tausalz widerstand (s. Tabelle 7) sowie die Sedimentationsstabilität am Festbeton bestimmt. Die Wirksamkeit der QS-Maßnahmen sollten im Rahmen des Verarbeitungsversuchs überprüft werden.

Mischung	A	B	C	D
Herstelldatum	04.05.01	16.05.01	23.08.01	23.08.01
Druckfestigkeit, β_{w200} (28d) in N/mm ²	76	68	71	73
	78	68	71	71
	75	68	69	73
Mittelwert, β_{w200} (28d) in N/mm ²	76	68	70	72
Wassereindringtiefe (28d) in mm	4	12	n.b.	n.b.

Tab. 6: Druckfestigkeit des SVB aus Eignungsprüfung und Verarbeitungsversuch, Kappler Tunnel

Eigenschaft		Prüfalter	Einheit	Wert
1		2	3	4
Druckfestigkeit		28d	[N/mm ²]	i.M. 70
E-Modul		28d	[N/mm ²]	33000
Schwindverformung, ϵ_s		28d	[‰]	0,247
		97d	[‰]	0,338
Spaltzugfestigkeit		28d	[N/mm ²]	4,3
Wassereindringtiefe		30d	[mm]	12
Frost-Tauwiderstand (CIF-Verfahren)				
Abfall rel. dyn. E-Modul	56 FTW	28d	[%]	6
Abwitterung	56 FTW	28d	[g/m ²]	60
Frost-Tausalzwanstand (CDF-Verfahren)				
Abwitterung	28 FTW	28d	[g/m ²]	190

Tab. 7: Festbetoneigenschaften (Eignungsprüfung) des SVB Kappler Tunnel

Auf die Überprüfung des Verbundverhaltens und des Bruchverhaltens des SVB wurde verzichtet, weil sich vermehrt zeigte, dass hier die Bemessungsansätze des konventionellen Rüttelbetons bei gleicher Festigkeitsklasse auch für mehlkornreichen SVB gelten [1, 26, 46].

Die Herstellung der Rasterdecke wurde am 23.11.01 und am 01.02.2003 (unangemeldet) jeweils durch die BAST und das Büro König und Heunisch vor Ort beobachtet.

6.3 Verarbeitungsversuch

Für die Herstellung der Fertigteile waren Auswirkungen weiter Anfahrestrecken und langer Fahrzeiten auf die Frischbetoneigenschaften nicht zu befürchten. Der Beton sollte mit der Rutsche eingebaut werden. Ein Fertigteil wurde mit 2 Fahrmaschinen gefüllt. Baustellenübliche Transport- und Einbaubedingungen, wie aus dem Brückenbau bekannt, brauchten nicht simuliert zu werden. Auch die Auswirkung von Betonierunterbrechungen mussten beim vorgesehenen Einbau nicht gesondert nachgewiesen werden. Der SVB durfte gemäß QS-Plan erst dann in das Fertigteil gefüllt werden, wenn beide Fahrmaschinen neben der Schalung standen. Daraus ergab sich die Forderung einer Verarbeitbarkeitszeit von 30 bis 40 Minuten. Beim Verarbeitungsversuch wurden 2 Mischungen kurz hintereinander hergestellt und die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie die Verarbeitbarkeitsdauer überprüft. Der Verarbeitungsversuch wurde durch den Gutacher begleitet.

Die Druckfestigkeit der aus diesen Mischungen hergestellten Betone (Mischung C und D, Tabelle 7) zeigten, dass die Bandbreite der Ergebnisse der eines B 65 entsprachen. Eher zufällig wurden an den ersten beiden Herstellungsterminen die Minimal- und Maximalwerte getroffen.

Der SVB zeigte allerdings ein rasches Ansteifen des Frischbetons bei Temperaturen um die 28 °C. Deshalb wurde die Frischbetontemperatur für die Herstellung der Fertigteile auf maximal 25 °C begrenzt. Der QS-Plan wurde allerdings erst im Oktober 2003 vom Herstellwerk vervollständigt, als Folge des großen Nachdrucks durch den Gutacher und der noch fehlenden Zustimmung im Einzelfall.

6.4 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Der SVB wies in der Eignungsprüfung ein Setzfließmaß mit Blockiering von ca. 750 mm auf. Im Laufe der Vorversuche zeigte sich nur ein geringes Rücksteifen über 30 Minuten. Dieser Zeitraum war für die festgelegten Einbaubedingungen ausreichend. Der Frischbeton wies bei augenscheinlicher Begutachtung sehr gute Fließfähigkeit und ausreichenden Widerstand gegen Entmischen auf. Auch entlüftete er beim Fließen ausreichend [42, 43]. Im Vergleich zum SVB bei der Baumaßnahme Aubing war der Frischbeton sehr viskos. Er sah nahezu zähflüssig-klebrig aus, umhüllte beim Fließen die Bewehrung jedoch vollständig, entlüftete

ausreichend und führte zu dichten und gleichmäßig gefärbten Sichtbetonoberflächen.

In der laufenden Produktion wurde das erforderliche Setzfließmaß dann aber auf 650 bis 680 mm mit Blockiererring reduziert, weil die recht hohen Fließgeschwindigkeiten Probleme mit dem Aussehen der Kanten an den Aussparungen des Fertigteils bereiteten (s. Kapitel 6.6). Auch die Druckfestigkeit war in der laufenden Produktion mit i. M. 64 N/mm² geringer als in der Erstprüfung (s. Tabelle 8). Die Fertigteile wurden demnach nicht mit hochfestem Beton ausgeführt.

Die Druckfestigkeit des SVB betrug im Mittel 70 N/mm². E-Modul, Spaltzugfestigkeit, Wassereindringtiefe (s. Tabelle 7) liegen in den Bereichen, die auch für konventionellen Rüttelbeton zu erwarten sind. Die Beurteilung erfolgte in [43], wobei der Bemessung ein B 45 zugrunde gelegt war. Die Schwindverformung betrug nach 97 Tagen 0,338 mm/m (0,338 ‰) und war verglichen mit den der Bemessung zugrunde gelegten Werten relativ hoch. Es wurde empfohlen, die Konsolen für die Lagerung der Rasterdecke daraufhin noch einmal zu überprüfen [43].

Die Dichtheit des Betongefüges wurde über die geringe Wassereindringtiefe nachgewiesen, obwohl die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Alter von 1 Jahr für die Erfahrungssammlung wünschenswert gewesen wäre. Bei dem hohen Flugaschegehalt des Betons, der sich bekanntermaßen positiv auf den Chlorideindringwiderstand auswirkt, wurde auf einen experimentellen Nachweis der Chlorideindringtiefe verzichtet.

Der SVB weist einen hohen Frostwiderstand und einen hohen Frost-Tausalz-widerstand auf (s. Tabelle 7).

Neben der augenscheinlichen Beurteilung des Sedimentierens des Frischbetons wurde der Nachweis am Festbeton durch visuelle Beurteilung der Bruchfläche eines Zylinders geführt [47].

6.5 Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherungspläne für das Herstellwerk und für das Fertigteilwerk basierten auf den in der SVB-Richtlinie festgelegten Maßnahmen. Als problematisch erwies sich die Forderung der BAST nach einer gleichmäßigen Sandfeuchte während der SVB-Produktion. Das Herstellwerk lehnte es ab, einen separaten Behälter aufzustellen, in dem für die SVB-Produktion Sand mit bekannter Eigenfeuchte gelagert werden sollte. Unter Berücksichtigung der wesentlich höheren Druckfestigkeit des SVB im Vergleich zur Bemessungsfestigkeit und den Tatsachen, dass nur 11 m³ je Betoniertag hergestellt werden und misslungene Fertigteile durch den Auftraggeber zurückgewiesen werden konnten, wurde die Forderung dahingehend abgeschwächt, dass die Sandfeuchte bekannt sein muss und bei der Betonherstellung berücksichtigt wird. Die QS-Maßnahmen sind im Folgenden stichpunktartig aufgeführt.

Eigenschaft	Prüfalter	Einheit	Wert
1	2	3	4
Druckfestigkeit	28d	[N/mm ²]	i.M. 64 $\sigma_{n-1}^{1)} = 4,4$
Setzfließmaß mit Blockiererring, sm_b		[mm]	660 ± 70
Luftgehalt im Frischbeton		[Vol.-%]	2,0
Frischbetonrohddichte		[kg/dm ³]	i.M. 2,35
Betontemperatur		[°C]	i.M. 17 +12 bis +21
Lufttemperatur		[°C]	i.M. 6 -8 bis +17
$(w/z)_{eq}$ aus Darrversuch		[-]	0,44 ± 0,03

¹⁾ Standardabweichung

Tab. 8: Frisch- und Festbetoneigenschaften über einen Produktionszeitraum von 38 Betonagen, SVB Kappler Tunnel

Maßnahmen im Herstellwerk:

Über die DAfStb-Richtlinie hinaus wurden für die Herstellung des SVB gefordert:

- Nachweis des Nicht-Sedimentierens am Festbeton
- Bestimmung der Eigenfeuchte des Sandes vor Beginn jeder Betonage durch Darren
- Berücksichtigung der beim Darrversuch festgestellten Sandfeuchte
- Herstellung des SVB getrennt von der laufenden Produktion
- keine Verwendung von Recyclingwasser
- Frischbetontemperatur nicht oberhalb von 25 °C
- Bei jeder neuen Lieferung der Betonausgangsstoffe und bei Änderung der Petrographie, der chemischen oder mineralogischen Zusammensetzung der Zuschläge war der Gutachter einzuschalten. Dem Gutachter war vorbehalten, Probemischungen mit den neuen bzw. veränderten Ausgangsstoffen zu fordern.

Maßnahmen bei der Fertigteilherstellung

- Zuständige für alle Arbeitsschritte waren namentlich mit ihren Aufgaben benannt
- Die Arbeitsschritte Behandlung der Schalung, Einlegen der Bewehrung, Prüfung der Lage der Abstandhalter wurden detailliert beschreiben
- Fahrzeugbeladung sowie Freihalten der Zufahrtswege waren festgelegt
- Einbringen des Betons mittels Rutsche
- Prüfung der Konsistenz (Setzfließmaß mit Blockiering) vor dem Betoneinbau, $s_{mb} \geq 650$ mm
- Augenscheinliche Prüfung der Homogenität
- Überwachung der Frischbetontemperatur
- Der Zeitraum zwischen Beginn des Mischens und dem Entleeren der Fahrzeuge muss zwischen 20 und 90 min liegen. 90 min durften nicht überschritten werden
- Beginn der Betonage des Fertigteils erst, wenn das 2. Mischfahrzeug neben der Schalung stand
- Abdecken der Frischbetonoberfläche zum Verdunstungsschutz: nach dem Vorglätten sofort mit PE-Folie abdecken, nach dem Abscheiben ist die Folie sofort wieder aufzulegen
- Ausschalen der Fertigteile nach Erreichen der Festigkeit eines B 25, i.d.R. nach 30 Stunden
- Zur Nachbehandlung: Allseitiges Umhüllen der Fertigteile mit Folie unmittelbar im Anschluss an

das Ausschalen. Belassen in Folie für mindestens 7 Tage. Die Fertigteile wurden wegen der abfließenden Hydratationswärme mindestens 1 Tag in der Halle belassen (der Herstellzeitraum lag im Winter).

6.6 Beobachtungen bei der Herstellung der Fertigteile

Die Herstellung der Rasterdeckenelemente wurde am 23.11.01 und am 01.02.2003 (unangemeldet) jeweils durch die BASt und das Büro König und Heunisch vor Ort beobachtet.

Beim ersten Besuch erfolgten alle Arbeiten gut koordiniert. Die Fertigteile wurden zur Nachbehandlung mit Folie abgedeckt, allerdings nicht allseitig, und vereinzelt waren Löcher in der Folie vorhanden. Das mittwochs betonierte Fertigteil war freitagmorgens infolge der abfließenden Hydratationswärme noch handwarm.

Das Mischwerk war ein ganz normales Werk, das durch neue Technik aufgerüstet wurde. Die Feuchtemesssonde im Sandsilo war jedoch außer Betrieb. Der Darrversuch am Sand wurde durch Erhitzung über 4,5 – 5 min in der Mikrowelle ersetzt. Der Darrversuch am Frischbeton wurde jedoch regelmäßig durchgeführt, wie aus den Unterlagen des Werks zur Eigenüberwachung hervorging.

Die Frischbetonkonsistenz wurde immer mit Blockiering bestimmt. Während der Produktion war das mit mindestens $s_{mb} = 650$ mm festgelegte Setzfließmaß mit je einem Wert von 570 und 600 mm deutlich unterschritten worden. Es war fraglich, ob ein solch steifer SVB noch ausreichend entlüftet. Die aus den Verarbeitungsversuchen bestimmte mittlere Druckfestigkeit von 70 N/mm² wurde in der laufenden Herstellung nicht erreicht. Im Mittel wurde 64 N/mm² erreicht. Damit war die erforderliche Festigkeitsklasse eines B 45 immer noch erfüllt. Der SVB in den Fertigteilen war somit auch kein hochfester Beton. Der Luftgehalt des Frischbetons wurde nur 1x je Woche bestimmt. In der Produktionskontrolle des TB-Werks wurden die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Ausgangsstoffe nach SVB-Richtlinie [1] nicht eingehalten. Über die Forderungen der Richtlinie hinaus wurde aber freiwillig der Sandanteil kleiner 0,25 mm betoniertäglich überprüft, weil ein Zusammenhang zu den starken Schwankungen des Setzfließmaßes vermutet wurde.

Beim zweiten, unangekündigten Besuch der Produktion waren die beim ersten Besuch festgestellten Mängel beseitigt. Die Herstellung des Betons und des Fertigteils lief reibungslos. Die Kon-

sistenz des SVB lag jedoch mit $s_{mb} = \text{ca. } 620 \text{ mm}$ weiterhin unter dem im QS-Plan benannten und in der Eignungsprüfung festgelegten Wert von ca. 750 mm. Als Begründung wurde angeführt, dass bei SVB mit einem größeren Setzfließmaß als ca. 650 mm der Frischbeton beim Umströmen der Einbauten in den Fertigteilen an deren Kanten leicht sedimentierte und dieses am Festbeton der Fertigteile sichtbar sei. Deshalb wurde die Konsistenz vom Betonhersteller möglichst niedrig gehalten. Eine ausreichende Selbstentlüftung wurde über die Bestimmung des Luftgehalts mit dem LP-Topf nachgewiesen. Die Bewehrung wurde auch mit dieser Konsistenz noch vollständig umschlossen. Als möglicher Einfluss auf die großen Unter-

schiede in der Konsistenz wurde durch den Betonhersteller zum einen die Schwankungen der Sandfraktion zwischen 0,125 und 0,25 mm und zum anderen der Anteil von gebrochenen Körnern im Sand vermutet. Der Anteil gebrochener Körner im Natursand sei nicht gleichbleibend und vorab nicht bekannt. Versuche der Konsistenzkorrektur durch Nachdosierung von Fließmittel in den Mischer der Mischanlage wurden als nicht immer erfolgreich geschildert.

Die nachträgliche Auswertung der durch das Herstellwerk überlassenen Unterlagen aus der Eigenüberwachung durch die BAST zeigt die Bandbreite der bestimmten Kennwerte. Über 38 Betonagen

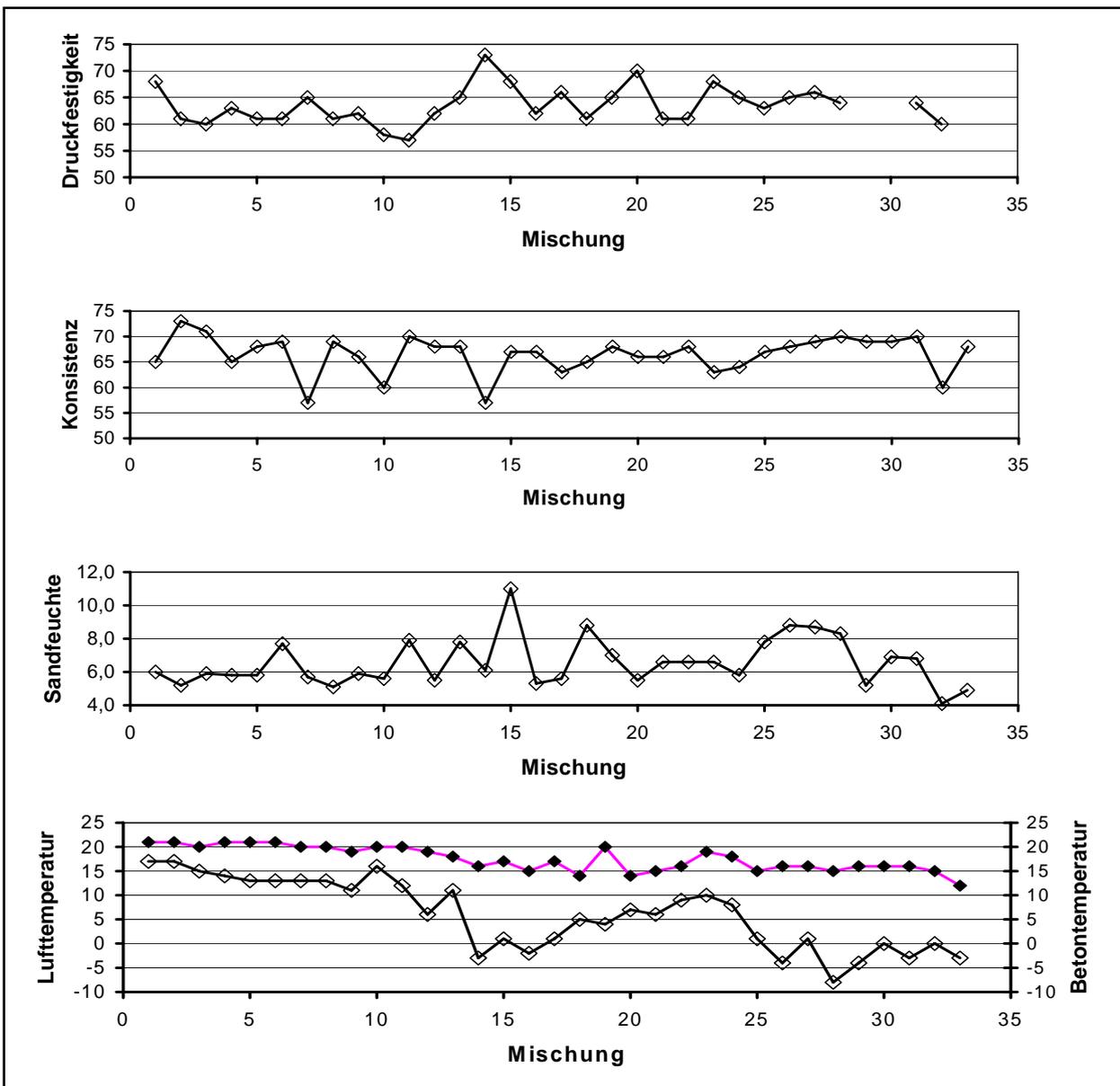


Bild 15: Schwankungen von Druckfestigkeit, Konsistenz (s_{mb}), Sandfeuchte und Lufttemperatur während 38 Herstelltagen des SVB



Bild 16: Betonage eines Fertigteils

ergab sich das Setzfließmaß zu $sm_b = 670 \pm 70$ mm. Die Druckfestigkeit betrug i.M. $63,9 \text{ N/mm}^2$ mit einer Standardabweichung von $4,4 \text{ N/mm}^2$. Die Gleichmäßigkeit der Festbetonkennwerte der SVB-Produktion stellt sich somit nicht besser dar, als die eines konventionellem Rüttelbetons. Die Sandfeuchte betrug i. M. 6,5 M.-%, mit 4 % als kleinstem und 11 % als größtem Wert.

Der Darrversuch am Frischbeton ergab über 38 Betonagen einen Mittelwert $w/(z+0,4^*f) = 0,44 \pm 0,03$. Die Frischbetontemperatur betrug i. M. $17 \text{ }^\circ\text{C}$ mit Minimum $12 \text{ }^\circ\text{C}$ und Maximum $21 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einer Lufttemperatur von i. M. 6°C mit -8°C als Minimum und 17°C als Maximum. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Sandfeuchte, Temperatur und Setzfließmaß, Wassergehalt im Frischbeton und Setzfließmaß war nicht zu erkennen (Bild 15).

6.7 Sichtbetonqualität der Fertigteile

Die Betonage und die optisch sehr gut gelungenen Fertigteile werden in den Bildern 16 bis 19 exemplarisch gezeigt. Die Oberfläche der Fertig-



Bild 17: Nachbehandlung bis zum Betonalter von 7 Tagen



Bild 18: Ansicht der abgeriebenen Oberfläche eines Fertigteils

teile ist glatt, dicht geschlossen und weitgehend gleichmäßig gefärbt (Bilder 18, 19). Einzelne größere Luftporen waren aber vorhanden. Die Anzahl solcher Lufteinschlüsse je Fertigteil galt unter anderem als Abnahmekriterium für die Fertigteile.

7 Bogenbrücke Wölkau

7.1 Bauvorhaben

Im Januar 2002 wurde dem BMBVW ein Bauwerksentwurf vorgelegt, der die Herstellung des Bogens und des Überbaus einer sehr flachen Bogenbrücke mit knapp 57 m Stützweite und 5,30 m Breite in selbstverdichtendem Beton der Festigkeitsklasse B 65 vorsah (Bild 20).

Das Bauwerk hat zwischen den Endauflagern eine Stützweite von 56,55 m. Der Bogen überspannt die BAB A17 mit einer Weite von ca. 47,50 m zwischen den Kämpfern und mit einem Parabelstich von ca. 5,10 m. Im Scheitelpunkt sind Bogen und Fahrbahnplatte über eine Länge von 18,80 m mit-

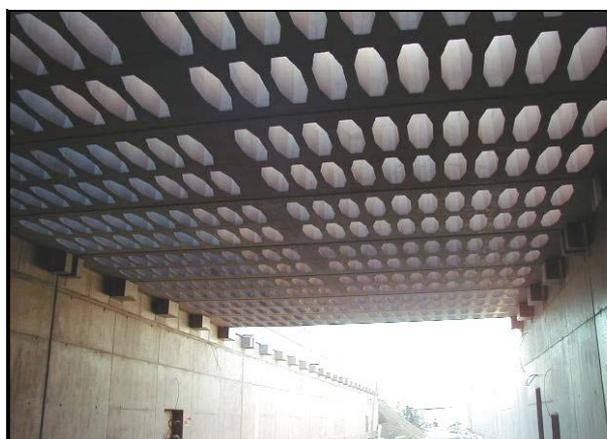


Bild 19: Rasterdecke Kappler Tunnel aus Fertigteilen mit Portlandschieferzement „Terrament“

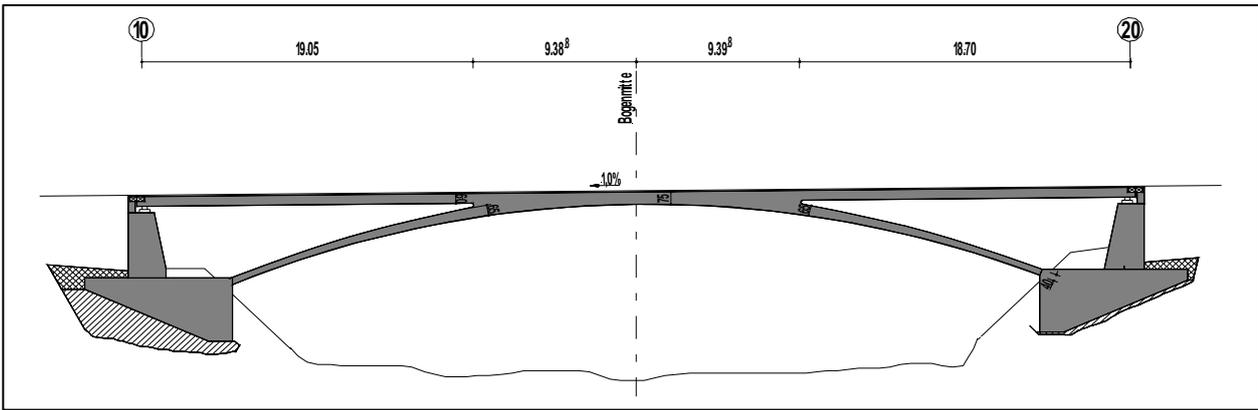


Bild 20: Ansicht der Brücke bei Wölkau über die BAB A 71 im Zuge des Neubaus der Strecke Dresden - Prag

einander verschmolzen. Die beiden seitlich an den Bogen anschließenden Überbauhälften weisen einen über die Länge konstanten Querschnitt auf und haben eine Spannweite von 19,05 m bzw. 18,70 m. Damit ergibt sich bei einer Konstruktionshöhe von 0,60 m eine Schlankheit von $l/h = 32$. Der mit dem Überbau verschmolzene Bogen hat im Anschnittbereich eine Konstruktionshöhe von 0,65 m. In Richtung Kämpfer verjüngt sich der Querschnitt symmetrisch zur Bogenachse auf 0,40 m. Zur Reduzierung der Rissbildung im Kämpferbereich sind beidseitig Betongelenke vorgesehen. In Querrichtung weist der Bogen mit 2,50 m dieselbe Breite auf, wie der Steg. Bei einer Gesamtbreite des plattenbalkenartigen Überbaus von 5,30 m, einschließlich Kappen, weist die Fahrbahnplatte eine Breite von 4,50 m auf, wobei der Steg eine Breite von 2,50 m besitzt. Die in die Platten eingespannten 1 m breiten Kragarme haben eine Dicke von 28 bzw. 35 cm im Anschnitt und verjüngen sich bis zum Ende des Kragarmes auf 20 cm (s. Bild 21).

Bogen und Überbau sollten ab Oberkante Gründung in einem Stück betoniert werden. Dabei war vorgesehen, die beiden Bogenhälften von unten aus zu betonieren und gleichzeitig den Überbau herzustellen.

Für den Überbauquerschnitt wurde eine in Längsrichtung beschränkt vorgespannte Massivplatte gewählt. Es war beschränkte Vorspannung (DIN 4227-1) mit Litzenspanngliedern St 1570/1770 und nachträglichem Verbund mit herkömmlichem Einpressmörtel nach DIN 4227-5 vorgesehen. Der Überbau hat in Längsrichtung ein Gefälle von 1,0 %. Die Oberseite des Überbaus, die Fahrbahnoberfläche, muss aus entwässerungstechnischen Gründen eine Querneigung von 2,5 % haben.

Das Projekt wies neben der Verwendung von hochfestem selbstverdichtendem Beton im ersten Bauwerksentwurf folgende Besonderheiten auf:

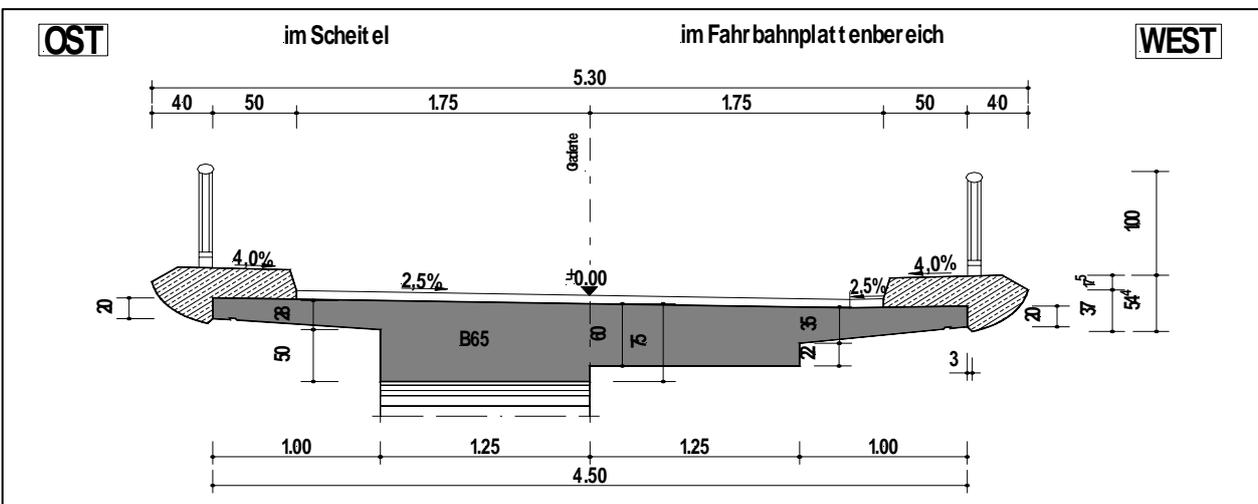


Bild 21: Querschnitt des Überbaus der Brücke bei Wölkau über die BAB A 71 im Zuge des Neubaus der Strecke Dresden - Prag

- Bogen und Überbau sollten in einem Guss hergestellt werden.

Dazu hätten ca. 150 m³ SVB ohne Unterbrechung hergestellt und kontinuierlich eingebaut werden müssen, was einen hohen Mehraufwand an Logistik und Qualitätssicherung im Vergleich zur Ausführung in normalem Rüttelbeton erfordert hätte. Betonierkonzept und Betonrezeptur hätten, um Zwangs- und Eigenspannungen zu minimieren, so aufeinander abgestimmt werden müssen, dass die Beton-erhärtung und die damit verbundene Temperaturentwicklung über das Bauwerk gleichmäßig erfolgt wäre. Auch an das Traggerüst und die Schalung wären wegen des Frischbetondrucks, der als hydrostatisch angenommen werden muss, der sich verändernden Belastungen während des Betonier- und Einbauvorganges und der erforderlichen Verformungsbeständigkeit sehr hohe Anforderungen gestellt worden.

- Die Fahrbahnplatte sollte mit Längsvorspannung ausgeführt werden.

Bei Einreichung des Bauwerksentwurfs war noch nicht abschließend geklärt, ob und wie weit die Lasteinleitung der Vorspannkraft in SVB der Festigkeitsklasse B65 vergleichbar war mit konventionellem hochfestem Rüttelbeton.

- Das Oberflächenprofil der Fahrbahnplatte sollte ohne Konterschaltung hergestellt werden.

Die Fahrbahnplatte muss aus entwässerungstechnischen Gründen in Längsrichtung mit 1 % und in Querrichtung mit 2,5 % Gefälle ausgeführt werden. Hinzu kommt, dass die Betonoberfläche der Fahrbahnplatte unterhalb der tiefer liegenden Kappe mit gegenläufiger Querneigung von ebenfalls 2,5 % ausgeführt werden muss, damit Wasser im Gefälleknick neben der späteren Fahrspur abgeleitet wird und nicht, die Kappe unterlaufend, vom Überbau auf die Fahrspur der gequerten Autobahn abfließt (Bild 21). Diese Formgebung der Betonoberfläche kann nicht allein durch Fließen des SVB in einer vorgegebenen Neigung erreicht werden, sondern erfordert eine gezielte Bearbeitung des frischen bzw. anstehenden Betons.

Für die Realisierung des Gesamtprojekts war es von entscheidender Bedeutung, ob die Fahrbahnplatte mit dem erforderlichen Profil in SVB ausgeführt werden konnte. Hierfür musste ein SVB entwickelt werden, der ein vom üblichen abweichendes Fließverhalten aufweist und dennoch alle anderen SVB-typischen Vorteile (selbstentlüftend, selbsttätiges vollständiges Umfließen der

Bewehrung und Ausfüllen der Schalung ohne Einwirkung von Rüttelenergie) hat. Die Ausführung der Bogenstiele in SVB erschien weniger kritisch, da sich das Ausfüllen einer geschlossenen Schalung mit SVB als typische Anwendung darstellte.

Der Bauherr war die DEGES. Als Gutachter für die Bemessung und Ausführung in selbstverdichtendem hochfestem Beton war das Ingenieurbüro König+Heunisch tätig und wurde durch die MFPA Leipzig unterstützt.

7.2 Vorversuche zur Ausführbarkeit des Fahrbahnplattenprofils

Zunächst musste in Vorversuchen geklärt werden, ob es möglich ist, für die Fahrbahnplatte eine freie Oberfläche in SVB mit der erforderlichen Neigung und dem Neigungswechsel herzustellen. Eine Ausführung mit Deckenschalung wäre im Vergleich zu Normalbeton sehr kostenaufwändig geworden. Sie wurde deshalb ausgeschlossen. Die Vorversuche wurden mit einem hohen Maß an Eigenleistungen der beteiligten Unternehmen durchgeführt.

Im Sommer 2002 wurden drei gleiche Probekörper aus SVB hergestellt, die mit 2,5 % Querneigung auch den Neigungswechsel in der Fahrbahnplatte unterhalb der tiefer liegenden Kappe abbildeten. Die Probekörper wiesen eine Breite von 2,25 m (halbe Überbaubreite) und eine Länge von 4 m auf. Die Bewehrung entsprach der einer Originalplatte. Die Versuche wurden von der BAST beobachtet. Sie zeigten, dass die Herstellung der Querneigung und des Neigungswechsels im Festbeton auch mit SVB reproduzierbar möglich war. Die Frischbetonoberfläche war gegen mäßige Erschütterungen der Schalung stabil. Es zeigte sich aber auch ein weiterer Entwicklungsbedarf bei der Bearbeitungstechnologie der Frischbetonoberfläche. Über die Versuche wurde in [48] ausführlich berichtet.

7.3 Hinweise zur Ausschreibung und ergänzende Festlegungen

Die Bemessung und Ausführung der Brücke in hochfestem selbstverdichtendem Beton SVB 65 erforderte besondere Fachkenntnis und Erfahrung mit diesen Baustoffen. Eine entsprechende Begleitung durch ein Institut oder Ingenieurbüro, das sowohl mit der Bemessung als auch mit der Bonteknologie und der Ausführung von Bauwerken aus SVB und hochfestem Beton umfangreiche Erfahrungen hat, war ebenso Voraussetzung für eine Zustimmung im Einzelfall wie die Ausführung durch ein Unternehmen mit Erfahrungen in der

Verarbeitung von hochfestem und selbstverdichtendem Beton.

Das gleichzeitige Betonieren von Bogen und Überbau würde einen erheblichen Mehraufwand an Schalung- und Rüsttechnik, Logistik und Qualitätssicherung im Vergleich zur getrennten Ausführung von Bogen und Überbau bedeuten. Das Bauwerk müsste in einem Guss und mit kontinuierlichem Betonfluss ausgeführt werden. Zeitlich versetzt eingebrachte Schüttagelagen des Betons können bei SVB nicht durch Rütteln miteinander verbunden werden. Deshalb wurde gefordert, vorab die Unschädlichkeit von Arbeitsunterbrechungen auf den Verbund des Betons und die Qualität der Sichtbetonoberfläche nachzuweisen. Auch wären weitere Arbeiten am Bauwerk während des gesamten Betoniervorgangs nicht zulässig gewesen, da planmäßig gleichzeitig die Bogenschalung gefüllt und die freie Überbauoberfläche hergestellt worden wären. Der Bereich unter und neben dem Bauwerk wäre von Verkehr freizuhalten gewesen.

Die Vorversuche hatten zwar gezeigt, dass die Herstellung des Oberflächenprofils der Fahrbahntafel möglich ist. Sie hatten aber auch gezeigt, dass die Bearbeitung auf die Eigenschaften des einzubauenden Frischbetons abgestimmt werden muss und die spezielle Technologie nur durch praktische Erfahrung der Einbaumannschaft mit der Aufgabe entwickelt werden kann. Deshalb wurde gefordert, vor Herstellung des Überbaus mit der planmäßig vorgesehenen Betonzusammensetzung die Bearbeitbarkeit der Betonzusammensetzung und das Oberflächenprofil im Festbeton an 3 großmaßstäblichen Probekörpern (vgl. Kapitel 7.2) nachzuweisen. Die Probekörper waren auf der Baustelle herzustellen, um Einflüsse aus Transport und Einbau wirklichkeitsnah abzubilden. Sollte dieser Nachweis nicht gelingen, wurde eine getrennte Herstellung der Bogenstiele in SVB 65 und des Überbaus in B 65 aus betontechnologischer Sicht für möglich gehalten.

An die Bemessung des hochfesten SVB 65 wurden die Anforderungen durch ein Ingenieurbüro formuliert, das mit mehreren Brücken aus hochfestem Beton Erfahrung gesammelt hatte. Zur Frage der Lasteinleitung aus der Vorspannung in den SVB wurde mit dem Forschungsnehmer eines zu der Zeit noch nicht abgeschlossenen Projektes² Kontakt aufgenommen. Die Auskunft bestätigt den Entwurf mit beschränkter Vorspannung im Sinne von DIN 4227-1.

Zur Herstellung, Verarbeitung und Einbau von SVB war im Juni 2001 die DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton [1] veröffentlicht worden. Ergänzend zur Richtlinie wurden seitens der BAST im Juli 2002 Festlegungen empfohlen, die auf das Projekt bezogen dazu beitragen sollten, einen Frischbeton mit gleichmäßigen Eigenschaften über den gesamten Betoniervorgang sicherzustellen, die Qualitätssicherungsmaßnahmen von Betonherstellung (Frischbeton- und Festbetoneigenschaften) und Bauausführung (Schalung, Trennmittel, Einbau und Nachbehandlung) aufeinander abzustimmen und Erfahrungen mit Frisch- und Festbetoneigenschaften von SVB zu gewinnen.

So wurde z. B. über die Anforderungen an die Gleichmäßigkeit der Betonausgangsstoffe aus der Richtlinie hinaus vom Hersteller gefordert, die Sollwerte der Frischbetoneigenschaften festzulegen und zulässige Toleranzen anzugeben, innerhalb derer die zugesicherten Eigenschaften Selbstverdichten und Nicht-Entmischen eingehalten werden. Bei Über- oder Unterschreitung dieser Toleranzen sollte der Frischbeton zurückgewiesen werden. Die Verarbeitbarkeitsdauer sollte angegeben werden und es sollten Maßnahmen benannt werden, die im Falle der Nichteinhaltung der Werte herangezogen werden konnten. Diese Toleranzen und Maßnahmen sollten unter besonderer Berücksichtigung der Frischbetontemperatur in der Eignungsprüfung festgeschrieben und dann unter den Praxisbedingungen der Baustelle bei einer Probebetonage überprüft werden.

Ergänzend zum Setzfließmaß und zur Fließzeit t_{500} war zur Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Viskosität die Bestimmung der Trichterauslaufzeit für die Ausführung des Überbaus in SVB vorgesehen. Die Frischbetontemperatur wurde auf maximal 25 °C begrenzt. Die Sedimentationsstabilität des SVB während des Erhärtens sollte in der Eignungsprüfung am Festbeton bestimmt werden.

Um lange Liegezeiten des Frischbetons vor dem Erhärten, eine zu sehr verzögerte Festigkeitsentwicklung und eine zu lange Belastungsdauer des Traggerüsts durch den Frischbetondruck zu vermeiden, wurde von Seiten des Gutachters ergänzend zur Richtlinie gefordert, dass die Lufttemperatur während der Herstellung und in den darauffolgenden 36 Stunden nicht unter +5 °C abfällt. Der Einfluss einer gegenüber der Erstprüfung verlängerten Liegezeit des frischen SVB, insbesondere in Hinblick auf das Sedimentationsverhalten, war nicht überprüft worden.

Eine Veränderung der Konsistenz im Fahrnischer war nicht vorgesehen, u.a. weil umfangreiche Vorversuche zur geforderten Festlegung der Tole-

² DAfStb - V 416: Einsatz von selbstverdichtendem Beton für vorgespannte Bauteile. Bearbeitet durch Professor Hegger, RWTH Aachen.

ranzen der Frischbetoneigenschaften unter Berücksichtigung verschiedener Frischbetontemperaturen erforderlich gewesen wären. Das Risiko durch Fließmittelzugabe im Fahrmischer die Eigenschaften des SVB, insbesondere die Sedimentationsstabilität und Verarbeitbarkeitsdauer, zu verschlechtern wurde als sehr hoch eingeschätzt. Zu der Zeit war auch in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen von SVB eine Fließmittelnachdosierung in den Fahrmischer nicht zulässig.

Besonderes Augenmerk wurde auf die Schwankungen des Wassergehalts durch Veränderung der Sandfeuchte während der Betonage der Brücke gelegt. Auch sollte der Wasserzementwert 0,35 nicht unterschreiten, um die Zugabewassermenge nicht zu klein werden zu lassen. Je kleiner die Menge an Zugabewasser in den Beton ist, desto stärker verändern Schwankungen in den Dosiereinrichtungen und nicht berücksichtigtes Oberflächenwasser, insbesondere auf der feinen Gesteinskörnung, den Wasserzementwert, die Frischbetoneigenschaften und, über den Wasserzementwert, auch die Festbetoneigenschaften.

Die Erfüllung der Anforderungen der Richtlinie an die Schulung des Personals im Transportbetonwerk und auf der Baustelle sollten dokumentiert werden. Mindestens eine Führungskraft sollte nachweisen, dass sie bereits verantwortlich an der Verarbeitung und Nachbehandlung von SVB beteiligt gewesen war. Alle an der Herstellung des Bauwerks Beteiligten sollten am großmaßstäblichen Verarbeitungsversuch auf der Baustelle teilgenommen haben.

Der Verarbeitungsversuch unter den Praxisbedingungen der Baustelle sollte nicht nur zum Üben der Herstell- und Betoniermannschaft und zur Überprüfung der QS-Maßnahmen genutzt werden, sondern auch um die Verträglichkeit von Schalung, Trennmittel und SVB in Hinblick auf eine gute Sichtbetonoberfläche, die Wirksamkeit der oberflächennahen Bewehrung zur Vermeidung von Schwindrissen, die Wirksamkeit der gewählten Nachbehandlungsmethode zur Vermeidung von Kapillarschwindrissen und die Auswirkungen von unplanmäßigen Arbeitsunterbrechungen auf den Verbund und die Sichtbetonqualität sowie die Wirksamkeit von Maßnahmen bei Überschreitung der Verarbeitbarkeitszeit zu überprüfen.

Um Erfahrungen mit dem neuen Werkstoff SVB zu sammeln, sollten neben der Druckfestigkeit auch Spaltzugfestigkeit, statischer E-Modul, Schwinden, Kriechen, Frostwiderstand, Wassereindringtiefe, Gesamtporenvolumen des Festbetons sowie der Frost-Tausalz-Widerstand mit dem CDF-Verfahren bestimmt werden. Bei Verwendung von Flugasche

als mehlfiner Zusatzstoff im SVB sollte auch die Karbonatisierungstiefe im Alter von 1 Jahr bestimmt werden.

7.4 Durchführung der Baumaßnahme

7.4.1 Konzeption des SVB 65 und Nachweis des Fahrbahnoberflächenprofils an gesonderten Probekörpern

Nach erfolgter Vergabe des Projekts wurde die BAST im März 2003 informiert, dass die Betonarbeiten der Bogen und des Überbaus in Kürze beginnen würden. Die Planung des Bauunternehmens sah für die Entwicklung des SVB durch den Transportbetonhersteller von den ersten Vorversuchen bis zum Beginn der Eignungsprüfungen knapp einen Monat vor. Die Probekörper zum Nachweis des Oberflächenprofils sollten unmittelbar anschließend im Wochentakt hergestellt werden. Die Herstellung von Bogen und Überbau in einem Zuge schien dem Bauunternehmen kaum vorstellbar zu sein.

Der Transportbetonhersteller verfügte über 2 geeignete hüttensandhaltige Zemente, wahlweise CEM III/A oder CEM III/B. Ein CEM I oder CEM II-Zement wurde nicht vorgeschlagen. Als Mehlkorn wurde Flugasche vorgesehen, die gegenüber Portlandzementklinker verzögert reagiert und so die Hydratationswärmeentwicklung des Frischbetons reduziert. Der Nachweis der Druckfestigkeitsklasse B 65 wurde wegen der langsamen Festigkeits- und Hydratationswärmeentwicklung der hüttensandhaltigen Zemente im Alter von 56 Tagen vorgesehen.

Die Zeitvorgaben des Bauunternehmens für die Rezepturentwicklung des SVB 65 mit den für die spezielle Anwendung erforderlichen Frischbeton- und Verarbeitungseigenschaften erwies sich, wie aus den Erfahrungen mit anderen selbstverdichtenden Betonen zu erwarten war, mit 1 Monat als deutlich zu kurz. Eine Abstimmung zwischen Bauunternehmen und Betonhersteller hinsichtlich der Bauaufgabe und der dafür erforderlichen Frischbetoneigenschaften des SVB war nicht unmittelbar zu erkennen.

Die vom Betonhersteller vorgeschlagenen Rezepturen wiesen ein hohes Fließvermögen, aber auch eine lange Verarbeitbarkeitsdauer von ca. 2 Stunden mit nahezu gleicher Trichterauslaufzeit auf. Die Temperaturentwicklung im Frischbeton des ersten Probekörpers war mit 50 °C (Kerntemperatur) nach ca. 20 Stunden moderat. Nach Herstellung des zweiten Probekörpers, in den der SVB mittels Betonpumpe eingebracht wurde, wurde

deutlich, dass sich der SVB während der Liegezeit wieder ausnivellierte. Zum Herstellen des Oberflächenprofils wurden beim 2. Probekörper als Varianten das Abziehen mit einer Rüttelbohle und Profilierung mit einer Walze untersucht. Auf der Bewehrung wurden als Führung für die Rüttelbohle und die Walze dreieckförmige Linien-Abstandhalter montiert. Die Rüttelbohle bewährte sich dabei besser als die Walze. Die Linienabstandhalter bewährten sich nicht. Über den Abstandhaltern war die Betonoberfläche nicht durchgehend geschlossen. Die Neigung und der Neigungswechsel der Oberfläche waren im erhärteten Zustand nicht wie erforderlich nachweisbar.

Wegen der nach dem Pumpvorgang beobachteten leichten Neigung zum Entmischen wurde nach dem 2. Probekörper die Rezeptur durch den Betonhersteller umgestellt. Das Fließmittel wurde ausgetauscht, der Verzögerer weggelassen und zusätzlich ein Stabilisierer vorgesehen. Durch Verwendung von Stabilisierer neben dem Fließmittel war auch in [18] eine Verbesserung der Robustheit von SVB beobachtet worden. Die zunächst vorgesehenen Stabilisierer waren für die Verwendung in Spannbeton nicht zugelassen, so dass sie für die Herstellung des Überbaus mit beschränkter Vorspannung nicht geeignet waren. Der dann gewählte flüssige Stabilisierer enthielt 20 % Siliziumoxid als Feststoff. Die endgültige SVB-Rezeptur ist in Tabelle 9 wiedergegeben. Tabelle 10 enthält die Frischbetoneigenschaften und Tabelle 11 die Festbetoneigenschaften aus der Erstprüfung.

Der 3. Probekörper zum Nachweis des Oberflächenprofils wurde in doppelter Breite ausgeführt, so dass ein 4 m langes Teilstück des Überbaus mit der gesamten Breite der Fahrbahntafel von 4,50 m mit vollständiger Bewehrung hergestellt wurde. An diesem Stück wurde neben dem Abziehen der Frischbetonoberfläche mit einer Rüttelbohle auch die Verwendung einer Gegenschalung an der freien Betonoberfläche (Konterschaltung) im Gefälleknick erprobt. Die Konterschaltung lief dabei nicht über die gesamte Breite der Fahrbahntafel, sondern vom Gefälleknick aus ca. 1 m zu jeder Seite hin.

Beide Varianten zur Herstellung des Oberflächenprofils führten nicht zum Erfolg. Der SVB stellte sich nach dem Pumpen in die Schalung nicht ab, sondern nivellierte sich selbst aus. An der oberen Kante der Fahrbahnplatte war die Schalung nicht bis zum Rand gefüllt, im Tiefpunkt des Gefälleknicks lief der SVB an der abgeschalteten Stirnseite des Probestücks aus der Schalung heraus.

Am fertigen Probekörper war zwar im Bereich der Konterschaltung der Gefälleknick in die Oberfläche eingeprägt, bis zum Ansteifen bewegte sich der Frischbeton aber zur tiefsten Stelle hin und füllte den oberen Teil der Schalung nicht vollständig aus. Auch waren in der Festbetonoberfläche unterhalb der Konterschaltung Lufteinschlüsse erkennbar.

Im Bereich der freien Oberfläche konnte das gewünschte Gefälle dem Frischbeton eingeprägt

Betonausgangsstoffe	Einheit	Wert
1	2	3
Zement CEM III 42,5 NA, Rüdersdorf	kg/m ³	370
Flugasche, Opola Block 1 nach DIN EN 450	kg/m ³	200
Wasser (ohne Anteil aus Zusatzmitteln)	kg/m ³	135
Zuschlag, Sieblinie A16/B16		
Natursand SBU 0/2a mm	kg/m ³	709
Kies SBU 2/8 mm	kg/m ³	442
Kies SBU 8/16 mm	kg/m ³	491
Zusatzmittel		
Fließmittel Muraplast BV FK 63.30	kg/m ³	8,88
Stabilisierer Centrament Stabi 510 MC-Bauchemie	kg/m ³	9,25
Summe Wasser ($w+w_{sr}+w_{fm}$)	kg/m ³	154
w/z	[-]	0,42
w/b	[-]	0,27
$(w/z)_{eq} = w/(z+0,4*f)$	[-]	0,37

Tab. 9: Betonzusammensetzung SVB 65 (Eignungsprüfung), Wölkau

Frischbetoneigenschaft		Einheit	Wert
1		2	3
Frischbetontemperatur		[°C]	25
Neigung zum Sedimentieren (am Festbeton bestimmt)	28d	[-]	keine
Setzfließmaß, sm			
10 min		[cm]	71
45 min		[cm]	70
60 min		[cm]	69
90 min		[cm]	69
100 min		[cm]	68
120 min		[cm]	67
150 min		[cm]	65
Setzfließmaß mit Blockierring, sm _b			
10 min		[cm]	70
45 min		[cm]	69
60 min		[cm]	68
90 min		[cm]	68,5
120 min		[cm]	67
Trichterauslaufzeit, t _{Tr}			
10 min		[sec]	13
45 min		[sec]	13
60 min		[sec]	13
90 min		[sec]	14
100 min		[sec]	14
120 min		[sec]	15
150 min		[sec]	18
Luftgehalt		[Vol.-%]	1,8
Frischbetonrohddichte		[kg/dm ³]	2,356
w/z aus Darrversuch		[-]	0,37

Tab. 10: Frischbetoneigenschaften SVB 65 (Eignungsprüfung), Wölkau

werden, nachdem das Fließmittel mit zunehmender Zeit seine Wirkung verlor. Dazu wurde in den Tiefstpunkten Beton mit der Schaufel weggenommen und in den Hochpunktbereichen hinzugefügt. Die Oberfläche wurde mit einer Rüttelbohle mit hoher Frequenz und geringer Amplitude abgezogen und nachverdichtet. Eine Neigung von 1 % in Längsrichtung und 2 % in Querrichtung konnte so im Festbeton eingepreßt werden [49]. Allerdings ist diese Methode zur Herstellung größerer Brückenoberflächen nicht geeignet. Das Zeitfenster für die Oberflächenbearbeitung ist zu klein. Kurz nach dem Nachlassen der verflüssigenden Wirkung des Fließmittels beginnt sich der Beton durch die chemische Erhärtungsreaktion zu erwärmen. Ein

Wegnehmen des Betons nach dem Beginn der Erhärtung und Hinzufügen an anderer Stelle ist mit Gefügestörungen verbunden, die Festigkeit und der Dichtigkeit beeinträchtigen.

Die Entwicklung einer modifizierten SVB-Rezeptur war für dieses Bauwerk nicht vorgesehen und aus Gründen der Bauzeitplanung auch nicht realisierbar. Es wurde von allen Beteiligten gemeinsam beschlossen, nur den Bogen in SVB 65 auszuführen, den Überbau hingegen in einem normal zu verdichtenden hochfesten Beton B 65.

Die Modifikation der Rezeptur für den SVB 65 während der Probekörperherstellung hatte zur Folge,

Eigenschaft	Prüfalter	Einheit	Wert	
1	2	3	4	
Druckfestigkeit	1d	[N/mm ²]	29	
	2d	[N/mm ²]	43	
	3d	[N/mm ²]	48	
	7d	[N/mm ²]	76	
	14d	[N/mm ²]	82	
	28d	[N/mm ²]	85	
	56d	[N/mm ²]	93	
E-Modul	56d	[N/mm ²]	41700	
Spaltzugfestigkeit	56d	[N/mm ²]	4,9	
Wassereindringtiefe	28d	[mm]	14	
Frost-Tausalz-widerstand (CDF-Verfahren)				
Abwitterung	28 FTW	28d	[g/m ²]	663
Schwindverformung ¹⁾				
Kriechverformung ¹⁾				

¹⁾ Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Bisherige Ergebnisse zeigen geringe Abweichungen zu den in DIN 1045-1 angegebenen Werten [49]

Tab. 11: Festbetoneigenschaften SVB 65 (Eignungsprüfung), Wölkau

dass die Anforderungen aus DIN-Fachbericht 100 zur Alkalität der Porenlösung nicht in vollem Umfang eingehalten wurden. Durch die geringen Mengen reaktionsfähigen Siliziumoxids im Stabilisierer wurde die für einen hüttensandhaltigen CEM III/A-Zement zulässige Zugabemenge an Flugasche in der Rezeptur der Erstprüfung überschritten. Es ist aber davon auszugehen, dass das Gefüge des hochfesten selbstverdichtenden Betons deutlich dichter ist als das eines normalen Betons. Der Widerstand gegen das Eindringen schädigender Substanzen, wie z. B. Kohlendioxid oder Chlorid, ist größer, so dass eine Korrosionsgefahr für die Bewehrung herabgesetzt wird [50].

7.4.2 Änderung der Ausführung

Die Umplanung der Ausführung wurde vom Ingenieurbüro in Abstimmung mit der DEGES vorgenommen. Den Vorstellungen des Bauunternehmens, den Anschluss der Bogenteile durch eine vertikale Teilung vorzunehmen, konnte schon deshalb nicht gefolgt werden, weil die Spannglieder über die gesamte Überbaulänge geführt werden mussten. Für die dann erforderlichen Koppelfugen war wegen der schlanken Ausführung aber nicht ausreichend Platz. So wurden die Bogenstiele bis zum Verschmelzungsbereich zwischen Überbau und Bogen in SVB 65 in geschlossener Schalung hergestellt (Bilder 22, 23). Der Bogenschluss wur-

de dann gemeinsam mit dem Überbau in B 65 hergestellt. Die Bewehrung lag im Verschmelzungsbereich sehr eng (Bilder 24, 25).

Durch die Trennung von Bogenstielen und Überbau wurde kurzfristig die Entwicklung einer Rezeptur für den hochfesten Beton B 65 erforderlich. Von Seiten des Auftraggebers (vertreten durch das Bundesland Sachsen) wurde nachdrücklich der Wunsch nach gleicher Farbgebung für Bogenstiele und Überbau geäußert. Von betontechnolo-



Bild 22: Trennung von Überbau und Bogen. Betonage der Bogenstiele



Bild 23: Trennung von Überbau und Bogen. Schalung des Überbaus über den fertigen Bogenstielen
(Foto: Bechert+Partner)



Bild 24: Ansicht der oberflächennahen Bewehrung des Überbaus. In der Mitte ist der Bereich des Lückenschlusses zwischen Bogenstielen und Überbau

gischer Seite wurde der Mehlkorngelalt des SVB 65 auf den für hochfesten Beton B 65 zulässigen Wert von 500 kg/m^3 gesenkt. Die erforderliche Druckfestigkeit sollte unter Verwendung desselben Zementes, einem CEM III/42,5 R NA, nach 28 Tagen erreicht werden [50, 51]. Eine weitere Anforderung an die Festigkeitsentwicklung ergab sich aus dem Wunsch, zur Vermeidung bzw. Reduzierung von Rissen im jungen Beton eine Teilvorspannung des Überbaus vor Erreichen des Temperaturmaximums nach ca. 30 Stunden aufzubringen. Dann sollte die Festigkeit 28 N/mm^2 betragen. Um die Festigkeit sicher zu erreichen und vor allem Farbunterschiede zu vermeiden, wurde gegenüber der SVB-Mischung Flugasche herausgenommen und Silikastaub zugegeben [50, 51]. Für diesen speziellen Anwendungsfall von hochfestem Beton wurde der gemeinsamen Verwendung von Flugasche, Silikastaub und hüttensandhaltigem Zement durch das BMVBS zugestimmt.

7.4.3 Verarbeitungsversuch

Die für den Einbau in die Bogenstiele vorgesehene Betonrezeptur war nur im letzten der drei Probekörper zur Profilierung der Betonoberfläche verwendet worden. Auch lag zu der Zeit noch kein belastbarer, zwischen Herstellwerk und Baustelle abgestimmter Qualitätssicherungsplan für den Einbau vor. Deshalb wurde am 26.09.2003 zusätzlich ein Fundament des Bauwerks mit dem SVB hergestellt. Die BAST wurde in diese Probestbetonage nicht eingebunden.

Es wurden insgesamt 90 m^3 des SVB 65 der angegebenen Rezeptur (s. Tabelle 10) eingebaut. Die Frischbetontemperatur lag zwischen $17 \text{ }^\circ\text{C}$ und $23 \text{ }^\circ\text{C}$, die Lufttemperatur zwischen $7 \text{ }^\circ\text{C}$ und

$20 \text{ }^\circ\text{C}$. Der Einbau dauerte insgesamt 6 Stunden. Während dieser Zeit blieben die Frischbetoneigenschaften (Setzfließmaß) annähernd konstant. Das für die Herstellung der Bogenstiele favorisierte Pumpen des Frischbetons über Einfüllstutzen in die Schalung wurde auch getestet. Mit dieser Probestbetonage wurde gezeigt, dass die Herstellung der Bogenstiele mit dem angegebenen SVB ohne weiteres möglich war. Anhand der großen Betonmenge konnten Einflüsse aus Schwankungen der Ausgangsstoffe, der Witterung und der Frischbetontemperatur im Rahmen der zu erwartenden Werte auf die Frischbetoneigenschaften gesammelt und es konnte ein wirklichkeitsnaher Betonierplan aufgestellt werden [50].

7.4.4 Herstellung der Bogenstiele

Die Herstellung der Bogenstiele in SVB erfolgte am 18.03.2004. Witterungsbedingt musste die Betonage von Januar an mehrfach verschoben werden. Die Lufttemperatur lag in den Wochen vorher



Bild 25: Engliegende Bewehrung im Bereich des Lückenschlusses

nicht für mindestens 36 Stunden oberhalb von $+5^{\circ}\text{C}$.

Die Schalung war auf hydrostatischen Frischbetondruck ausgelegt (Bild 26). Der Anschluss des Bogens an das Fundament und die Durchführung der Anschlussbewehrung waren flüssigkeitsdicht ausgeführt (Bild 27). Am Hochpunkt der Schalung war eine bauteilbreite Öffnung abgeschalt, um die durch den Frischbeton verdrängte Luft entweichen zu lassen und den Frischbetonspiegel bei vollständiger Füllung der Schalung beobachten zu können (Bild 28).

Vor Beginn der Betonage war sichergestellt worden, dass sich in der nahezu flüssigkeitsdicht ausgeführten Schalung kein Wasser (z. B. aus Niederschlag) angesammelt hatte. Am Bogenfuß anstehendes Wasser hätte zur Entmischung des SVB führen können.

Je Bogenstiel waren ca. 18 m^3 SVB erforderlich, d. h. drei Fahrmischer mit jeweils mindestens 6 m^3 Frischbeton. Der Einbau erfolgte durch 3 über die Höhe der Bogenstiele verteilte Einfüllstutzen (Bild 29). An jedem Einfüllstutzen wurde so lange gepumpt, bis der Beton an dem nächst höher liegenden Stutzen zu erkennen war. Dann wurde der Schlauch umgesetzt. Am letzten Einfüllstutzen wurde so lange gepumpt, bis der Frischbeton im Schalungsaufsatz aufstieg. Dort war durch die aufsteigende Luftblasen auch das Entlüftungsverhalten des SVB zu beobachten.

Der Qualitätssicherungsplan sah den kontinuierlichen Einbau des SVB vor. Der Beton musste deshalb an der Baustelle so angeliefert werden, dass eine Überprüfung der Frischbetoneigenschaften möglich war, bevor der Beton an die Pumpe übergeben wurde. Der Einfülltrichter der Betonpumpe musste während des gesamten Einbaus gefüllt



Bild 26: Schalung der Bogenstiele (Konterschaltung Fa. DOKA)



Bild 27: Abdichtung der Anschlussbewehrung am Hochpunkt

sein, damit durch das Misch- und Transportwerkzeug keine Luft in den Frischbeton eingeschlagen wurde.

Als Frischbetoneigenschaften wurden an jedem Fahrzeug im Werk Setzfließmaß, mit und ohne Blockiering (sm_b und sm), Fließzeit (t_{500}) und die Frischbetontemperatur bestimmt. Auf der Baustelle wurde bei Eintreffen des Fahrzeugs sm , sm_b , t_{500} überprüft und bei einzelnen Fahrzeugen die Trichterauslaufzeit t_T oder auch der Luftgehalt im Frischbeton mit dem LP-Topf bestimmt. Die Baustelleneinrichtung für diese Prüfungen ist in Bild 30 zu sehen. Bei Übergabe an die Betonpumpe wurde erneut sm_b und t_{500} kontrolliert. Die Lufttemperatur lag während des gesamten Einbaus zwischen 17°C und 21°C , die Frischbetontemperatur lag zwischen 19°C und 22°C . Die Betonage des ersten Bogenstiels wurde durch die BASt beobachtet.

Bis einschließlich des 4. Fahrzeugs lief die Betonage reibungslos. Die Einbaugeschwindigkeit betrug einschließlich Frischbetonprüfungen vor Übergabe



Bild 28: Schalungsaufsatz am Hochpunkt der Bogenschalung (Betoniertrichter)



Bild 29: Einfüllstützen mit Schieber

des Betons ca. 8 m³ SVB je Stunde. Das Umsetzen des Betonierschlauches lief wie erwartet. Der erste Bogenstiel war mit 3 Fahrzeugen gefüllt worden. Das Setzfließmaß vergrößerte sich aufgrund der Bewegung im Fahrermischer und des sogenannten Depoteffekts des Fließmittels während der Fahrt auf i.M. 780 mm. Im Allgemeinen wurde eine Zunahme von 60 – 70 mm festgestellt. Die Einbaukonsistenz, vor der Pumpe gemessen, betrug i.M. 766 mm. Die Fließzeit nahm zwischen 0 und 3 Sekunden zu, was bei gleichzeitiger Zunahme der Konsistenz (Setzfließmaß) auf eine nur geringfügige Abnahme der Viskosität schließen lässt. Da alles normal verlief, war eine weitere Beobachtung durch die BASt nicht erforderlich. Aus diesen Gründen beendete die BASt die Beobachtungen auf der Baustelle in Abstimmung mit der DEGES und Vertretern des Gutachters nach dem Umsetzen des Schlauches auf den 2. Bogenstiel.



Bild 30: Frischbetonprüfungen auf der Baustelle. Von links: Trichter zur Bestimmung der Auslaufzeit, Ausrüstung für Darr-Versuch, Ausbreittisch für Setzfließmaß und Fließzeit, Probekörperformen



Bild 31: Untersicht des Festbetons im 2. Bogenstiel mit Blick auf die freiliegende Bewehrung

Beim 5. Fahrzeug wurde dann aber auf der Baustelle ein gegenüber den vorherigen Lieferungen erheblich kleineres Setzfließmaß gemessen [50]. 30 Minuten später, kurz vor der Übergabe an die Pumpe, wurde nach kräftigem Durchmischen im Fahrzeug ein um weitere 9 cm reduzierter Wert bestimmt. Die Übernahme des Betons wurde abgelehnt, der Beton verworfen. Das 6. Fahrzeug kam mit einem noch geringeren Setzfließmaß als das 5. Fahrzeug auf der Baustelle an. Da ein Verwerfen des Betons aus diesem Fahrzeug wegen der langen Betonierunterbrechung bis zur Anlieferung des nächsten ohne Zweifel zum Abbruch der Betonage dieses Bogenstiels geführt hätte, wurde das Setzfließmaß durch Zugabe von Wasser von 650 mm auf 670 mm gebracht und eingebaut. Die Zugabemenge von ca. 15 l basierte auf den Erfahrungen des Gutachters mit SVB. Der Beton des 7. Fahrzeugs erreichte die Baustelle wieder mit der üblichen Konsistenz von ca. 750 mm. Der zweite Bogenstiel wurde vollständig gefüllt [50].

Beim teilweisen Ausschalen Anfang April wurde festgestellt, dass der 2. Bogenstiel vertikale und horizontale Schichtbildungen und einige große tiefe Fehlstellen auf der Unterseite aufwies (vgl. Bild 31). In einigen Fehlstellen war die untere Bewehrungslage zu erkennen. Die entnommenen Bohrkerns zeigten, dass die Bewehrung an zahlreichen Stellen nicht im Verbund mit dem Beton lag bzw. in der Umgebung der Bewehrung eine Konzentration von Mehlkorn zu erkennen war. Die nachträgliche Herstellung des Verbundes zwischen Stahl und Beton sowie die Beseitigung von Mehlkornansammlungen im Inneren des Bauteils an den Schichtgrenzen war nahezu unmöglich. Eine gleichmäßige Lastabtragung im Bogen hätte nicht sichergestellt werden können. Der festgestellte



Bild 32: Zweiter Bogenstiel nach dem Rückbau. Links im Bild der oberste Teil mit der Anschlussbewehrung für den Überbau. Vorne unten der Rest nach Freilegen der Anschlussbewehrung des Betongelenks zwischen Widerlager und Bogenfuß

Schaden ist eine Folge der nicht ausreichenden Robustheit des verwendeten SVB, die im Rahmen der Bauvorbereitung (Erstprüfung, Probekappen, Verarbeitungsversuch mit 90 m³ SVB) nicht festgestellt wurde [50].

Der 2. Bogenstiel (nördliche Bogenhälfte) wurde durch Sägeschnitte abgetragen. Im Bereich der Anschlussbewehrung des Widerlagers wurde der Beton mittels Hochdruckwasserstrahl abgetragen. Die Einzelteile zeigt Bild 32. Das Ausmaß des fehlerhaften Verbundes der Bewehrung wird am Sägeschnitt durch den Bogenstiel im Bild 33 deutlich.

Die Oberflächen des intakten 1. Bogenstiels sind sehr dicht und nahezu gleichmäßig gefärbt. Aus der Nähe betrachtet sind an der Schalungsoberseite allerdings einige Poren aus Lufteinschlüssen erkennbar. Die aus dem Frischbeton austretende



Bild 33: Sägeschnitt durch den Bogen. Oben links ist ein Luftporen an der oberen Bewehrung sichtbar, an der Unterseite die freiliegende Bewehrung



Bild 34: Bild der Laufspuren der aufsteigenden Luft an der Deckenschalung auf der Bogenoberseite

Luft hat sich an der geneigten Schalungsoberseite zu kleinen Blasen gesammelt, die zum Hochpunkt gelaufen sind. Diese Laufspuren sind im Festbeton sichtbar (Bild 34). Die Dauerhaftigkeit des dichten Betons ist dadurch aber nicht beeinträchtigt. Ebenfalls sichtbar ist der Unterschied zwischen der geschalteten Seitenfläche und dem Beton in den Einfüllstutzen (Bild 35). Dort war der Beton beim Ausschalen infolge des Schiebers am Einfüllstutzens ebenflächig und sauber abgetrennt worden. Die Druckfestigkeit des Festbetons wurde an parallel zum Einbau auf der Baustelle hergestellten Würfeln bestimmt. Sie betrug im Alter von 56 Tagen i. M. 88 N/mm² und entsprach dem Wert



Bild 35: Sichtbeton am Einfüllstutzen

aus der Eignungsprüfung von 93 N/mm^2 im Rahmen der für hochfeste Betone üblichen Streuungen. Der Zielwert der Eignungsprüfung für B 65 ist nach Richtlinie 75 N/mm^2 . Der Mittelwert von mindestens 70 N/mm^2 sowie der kleinste Einzelwert von 60 N/mm^2 wurde vom SVB 65 sicher erreicht. Die Druckfestigkeit entspricht einem B 75.

Am 17.04.2004 wurde in Anwesenheit der BAST der 2. Bogenstiel erneut in SVB 65 ausgeführt. Die Freigabe zur Ausführung in SVB konnte erfolgen, weil die Ursache des Schadens vom 18.03.2004 durch den Gutachter zumindest weitgehend geklärt werden konnte [50]. Am 17.04.2004 wurde die Rezeptur aus der Probestronge vom 26.09.2003 eingebaut. Um einen gleichmäßigen Wassergehalt der Sandfraktion zu sichern, wurden vor Mischbeginn mehr als 4 m^3 Sand aus dem unteren Bereich der Vorratsbox abgelassen und nicht für den SVB verwendet. Die Einfüllstützen in der Schalung wurden versetzt auf beiden Seitenflächen des Bogenstiels angebracht.

Die Betonage des 2. Bogenstiels verlief reibungslos. Die Einbaugeschwindigkeit betrug ca. 9 m^3 je Stunde. Die Lieferkonsistenz betrug i. M. $sm_b = 766 \text{ mm}$, die Einbaukonsistenz vor der Pumpe i. M. 754 mm . Anders als beim 1. Bogenstiel wurden an der Oberseite der Schalung kleine Beobachtungsöffnungen von ca. 8 cm Durchmesser angebracht, um das Aufsteigen des Frischbetons beobachten zu können. Zur Vermeidung der auf der Betonoberseite des ersten Bogenstiels beobachteten Laufspuren der aufsteigenden Luft wurde die obere Schalung durch Bearbeitung der Balken mit einem Luftdruckhammer in leichte rhythmische Schwingung versetzt. Beim ersten Bogenstiel war versucht worden, die aufsteigende Luft durch händisches Klopfen mit Hämmern in Richtung Bogenhochpunkt zu treiben. Dies war nicht gelungen, wie Bild 34 zeigt. Das dichte Verschießen der Beobachtungsöffnungen kurz vor dem Austreten des Frischbetons erfolgte mit etwas mehr Aufwand als geplant. Es konnte jedoch gut beobachtet werden, dass durch die wechselseitige Anordnung der Einfüllstützen der Frischbeton auf der Gegenseite die gewünschte Höhe erreichte. Der Frischbeton ließ sich Dank seiner Fließfähigkeit gut von unten nach oben pumpen, wurde jedoch durch seine Viskosität und die Behinderung durch die Bewehrung immer etwas schräg zum Hochpunkt geschoben. Die Festbetonoberfläche ist luftporenarm (Bild 36).

Eine Besonderheit der Betonage des 2. Bogenstiels war die Ansammlung von Zementmörtel in der Aufsatzschalung am Hochpunkt des Bogenstiels. Dies war an den Beobachtungsöffnungen

nur in geringem Ausmaß als leichte vorlaufende wasserreiche Zementmörtelschicht auf dem Schalungsboden beobachtet worden. Am Hochpunkt musste über den Schalungsaufsatz dann aber eine große Menge Feinkornsuspension abgelassen werden, bis die zu erwartende Menge Gesteinskörnung mit größerem Durchmesser im aufsteigenden SVB enthalten war. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Frischbetonproben am Betonierschlauch nach der Pumpe genommen (Konsistenz, Zylinder zum Nachweis des Nicht-Sedimentierens am Festbeton). Durch das Pumpen verflüssigte der SVB deutlich: Das Setzfließmaß erhöhte sich von 730 mm auf 820 mm . Die Fließzeit t_{500} nahm von $10,5$ auf 5 Sekunden ab und die Frischbetontemperatur betrug $24 \text{ }^\circ\text{C}$ anstelle von $22 \text{ }^\circ\text{C}$ vor dem Pumpvorgang.

7.4.5 Auswertung des Schadensfalls

Die schadhafte Qualität des SVB 65 im 2. Bogenstiel ist auf die mangelnde Robustheit von SVB zurückzuführen. Die Bilder des schadhaften Festbetons sowie der Bericht des Gutachters [50] legen den Schluss nahe, dass der SVB während des Fließens in der Schalung frühzeitig angesteift ist. Die untere Bewehrungslage wurde nur noch unvollständig und bereichsweise von schon angesteiftem Beton durchdrungen. Der noch flüssige zementleimreiche Frischbeton hat an der Unterseite der Schalung den angesteiften Beton nicht

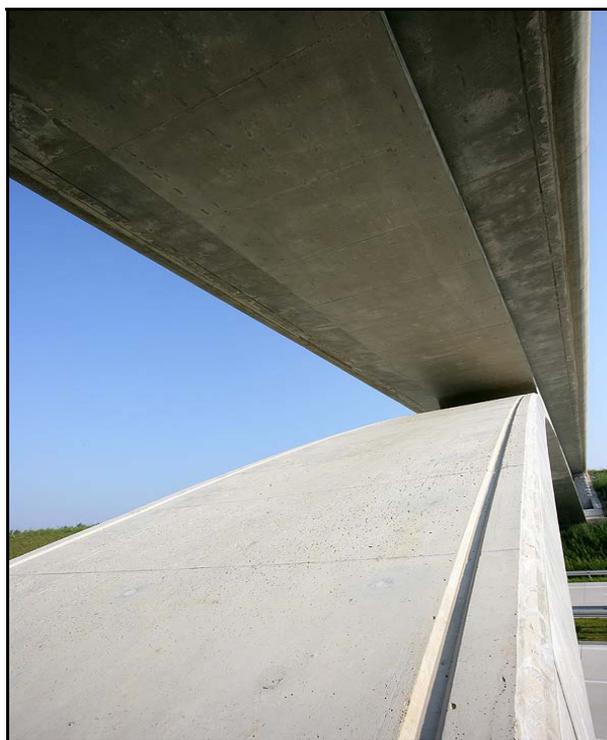


Bild 36: Oberfläche des 2. Bogenstiels
(Fotograph Jörg Riethausen, Chemnitz)

mehr umflossen (Bilder 31, 32 und 33). Die wolkige Struktur des durch die Bewehrung „herabtropfenden“ SVB lässt auch die Möglichkeit einer Luftansammlung offen. Die Druckbögen der sichelförmigen Lunker zwischen den oberen Bewehrungsstäben (Bild 33) weisen auf ein Absacken des Frischbetons hin, als dieser schon zu steif war, um widerstandsfrei durch die Lücke zwischen der oberen Bewehrung nachzufließen. Dies lässt darauf schließen, dass der Frischbeton während des Fließens nicht ausreichend entlüftet hat oder dass der Frischbeton insgesamt nach unten gesackt ist.

Eine Zusammenstellung der während der Betonage bestimmten Frischbetoneigenschaften des 2. Bogenstiels weist ebenfalls darauf hin, dass der Frischbeton im Verlauf der Betonage schon beim Eintreffen auf der Baustelle weniger fließfähig war. Neben dem deutlichen Rückgang der Konsistenz bei den kritischen Fahrzeugen wurde auch eine deutliche Zunahme der Fließzeit t_{500} gemessen. Letzteres deutet auf eine Abnahme der Viskosität gegenüber den ersten Anlieferungen und damit auf ein schlechteres Selbstentlüften hin. Dabei fällt auf, dass kurz nach der Herstellung, bei Prüfung des SVB im Herstellwerk, keine signifikanten Veränderungen der Verarbeitbarkeit festgestellt wurden. Die Konsistenz wurde zwar im Verlauf der Betonage insgesamt heruntergefahren, weil das im QS-Plan vereinbarte Setzfließmaß von 700 +/- 20 mm auf der Baustelle überschritten wurde. Die Fließzeit veränderte sich jedoch nicht signifikant. Die Darrversuche deuten darauf hin, dass im Frischbeton des noch kritischen 6. Fahrzeugs weniger Wasser enthalten war.

Die genaue Betrachtung der Betonrezepturen und Lieferscheine im Anschluss an die Betonage zeigten, dass sich die verwendete SVB-Mischung im Fließmittelgehalt und im Wassergehalt deutlich von der Rezeptur der Eignungsprüfung unterschieden [50]. Anstelle von 8,9 kg/m³ Fließmittel wurde 6,1 kg/m³ über die gesamte Betonage hinweg eingewogen. Anstelle von 135 l/m³ Zugabewasser (einschließlich Eigenfeuchte der Gesteinskörnung) waren lt. Lieferscheinen im Verlauf der Betonage zwischen 140 l/m³ und 150 l/m³ enthalten.

Hinweise auf eine unerwartet verkürzte Verarbeitbarkeitsdauer bei Unregelmäßigkeiten der Betonherstellung, wie z. B. Veränderung der Eigenfeuchte der Gesteinskörnung, des Kornbandes der feinen Gesteinskörnung oder der Frischbetontemperatur, ergaben sich im Nachhinein aus einem zeitgleich mit der Rezepturenentwicklung für die Brücke Wölkau laufenden Forschungsprojekt zur Robustheit von SVB [18]. Eine verkürzte Verarbeitbarkeitsdauer zeigte sich auch in [18] nicht an

den Frischbetoneigenschaften, die unmittelbar nach der Herstellung bestimmt wurden. Erst 30 bis 60 Minuten danach wurde ein schnelleres Ansteifen von SVB dann festgestellt, wenn mit niedrigem Fließmittelgehalt bei erhöhten Sandfeuchten oder erhöhten Frischbetontemperaturen gearbeitet wurde. Nach einer Erhöhung der Fließmittel- und Stabilisierergehalte wurde dieser Effekt nicht mehr beobachtet. Dagegen war eine zu geringe Menge an Zugabewasser, z. B. - 10 l/m³ und mehr als Folge ungenauen Dosierens, schon kurz nach der Herstellung an den Frischbetoneigenschaften erkennbar. Eine zu große Menge Zugabewasser konnte zur Sedimentation des Frischbetons führen. Bei zu hohen Sandfeuchten wurde eine Veränderung der Sedimentationsneigung jedoch nicht festgestellt [18].

Die während des Verlaufs der Betonage am 18.03.2004 beobachtete Abnahme der Verarbeitbarkeitszeit ist demnach durch die zu geringe Dosierung des Fließmittels zumindest mitverursacht worden. Probemischungen im Transportbetonwerk vor der erneuten Betonage des 2. Bogenstiels am 17.04.2005 zeigten nach Auskunft des Gutachters bei der vorgesehenen Dosierung von 8,9 kg/m³ wieder eine gute Verarbeitbarkeit über 2 Stunden hinweg. Dies war Voraussetzung für die erneute Betonage des 2. Bogenstiels in SVB.

Eine Veränderung der Dosierung von Fließmittel ist nach DIN-Fachbericht 100 zulässig, wenn bei Übergabe des Betons auf der Baustelle die vereinbarte Konsistenz erreicht wird. Die gravierenden Auswirkungen solcher Veränderungen auf die Verarbeitbarkeitsdauer von SVB ist erst seit dem Schadensfall der Bogenbrücke Wölkau bewusst geworden. Der Forschungsbericht [18] ist im Dezember 2004 veröffentlicht worden.

Schlussfolgerung aus dem Schadensfall

Die Verarbeitbarkeitsdauer von SVB sollte nicht nur in der Erstprüfung sondern bei allen weiteren Herstellungen, z. B. zum Nachweis des Verarbeitbarkeitsfensters nach SVB-Richtlinie und dem Verarbeitungsversuch auf der Baustelle, bestimmt werden. Die Robustheit des SVB gegenüber Veränderungen bei Ausgangsstoffen, Dosierung und Frischbetontemperatur sollte schon Gegenstand des Mischungsentwurfs und der Erstprüfung sein. Nur so kann der Betonhersteller sicher sein, auch unter schwankenden Herstellbedingungen einen gleichmäßig guten SVB ausliefern zu können.

Die nach DIN-Fachbericht 100 und SVB-Richtlinie [26] zulässigen Variationen der Betonzusammensetzungen dürfen für SVB nicht ausge-

nutzt werden. Sollen die Einwaagen schwanken dürfen, muss die Bandbreite der vom projektierten SVB vertragenen Schwankungen vorab überprüft werden, um mit Sicherheit ein schadensfreies Bauteil herstellen zu können.

Im QS-Plan, z. B. Betonierplan, sollten Zielwerte des Setzfließmaßes mit und ohne Blockierung wie auch der Fließzeit t_{500} , oder besser noch der Trichterauslaufzeit t_{Tr} , zusammen mit den zulässigen Abweichungen festgelegt werden. Diese Werte müssen aus den vorangegangenen Herstellungen des SVB abgeleitet und im Verarbeitbarkeitsversuch kontrolliert werden. Das größte Problem der Umsetzung dieser Forderung, insbesondere der Überprüfung der Trichterauslaufzeit, stellt der Zeitaufwand für die Frischbetonprüfungen vor der Freigabe im Transportbetonwerk, die Prüfungen bei der Übergabe auf der Baustelle sowie der Geräteaufwand dar.

Die Sensibilität der Betonhersteller für den Einfluss der Sandfeuchte auf den Wassergehalt und die Verarbeitbarkeit von SVB muss geweckt werden. Das Rechenbeispiel in Tabelle 12 mit der Rezeptur des SVB für die Bogenbrücke Wölkau soll den Einfluss der Sandfeuchte verdeutlichen.

In Tabelle 12 sind zwei Rechenbeispiele zum Einfluss von unbekannter, z.B. während des Betoniertages wechselnder, Sandfeuchte aufgeführt.

Schwankungen der Eigenfeuchte des Sandes zwischen ca. 4 M.-% und 9 M.-% über einen längeren Herstellzeitraum sind in der Transportbetonherstellung durchaus üblich. Einzelwerte können aber auch 10 M.-% überschreiten.

Wird die Eigenfeuchte des Sandes vollständig ignoriert und die in der Erstprüfung angegebene Menge eingewogen, bedeutet 4 % Eigenfeuchte bei 709 kg/m³ Sand zusätzlich 28 l/m³ Wasser. Dies hat Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit des SVB, aber auch auf den w/z-Wert des Betons und damit auf seine Dichtigkeit und Festigkeit.

Im zweiten Beispiel (Tabelle 12, Zeilen 5 bis 7) wird davon ausgegangen, dass die Sandfeuchte konstant 4 % beträgt. Wenn die Feuchte dann aber, z.B. im Anschluss an eine Regenereignis, auf 9 % ansteigt, jedoch bei der Betonherstellung nicht berücksichtigt wird, sind 35 l mehr Wasser je m³ Frischbeton enthalten. Der w/z-Wert nimmt von 0,37 auf 0,47 zu, die Druckfestigkeit und Dichtigkeit des Festbetons sinkt. Die Verarbeitbarkeit des SVB wird selbst dann, wenn Stabilisierer verwendet werden, gemäß Bild 37 [52], weit außerhalb des optimalen Bereichs, d. h. schlecht, sein. Ein Normalbeton könnte solche Schwankungen hinsichtlich der Konsistenz eventuell noch verkraften. In der Praxis würde diese Differenz jedoch vom Mischmeister am Aussehen des Frischbetons im Mischer bemerkt werden, und er würde Gegenmaßnahmen ergreifen. Bei SVB fehlen hier im Regelfall die Erfahrungen.

Annahme zur Eigenfeuchte und Einfluss auf den Wassergehalt des SVB (Sandgehalt (0/2a): 709 kg/m ³)		tatsächliche Eigenfeuchte			
		0 %	4 %	6 %	9 %
Annahme der Sandfeuchte 0 M.-%	Wassermenge aus Sand	-	28,4 l/m ³	42,5 l/m ³	63,8 l/m ³
	Anteil am Gesamtwassergehalt (154 l/m ³)	-	18 M.-%	28 M.-%	41 M.-%
	(w/z) _{eq}	0,37	0,45	0,48	0,54
Annahme der Sandfeuchte 4 M.-%	Wassermenge aus Sand	-	-	14,1 l/m ³	35,4 l/m ³
	Anteil am Gesamtwassergehalt (154 l/m ³)	-	-	9 M.-%	23 M.-%
	(w/z) _{eq}	-	0,37	0,41	0,47

Tabelle 12: Einfluss der Eigenfeuchte des Sandes 0/2a

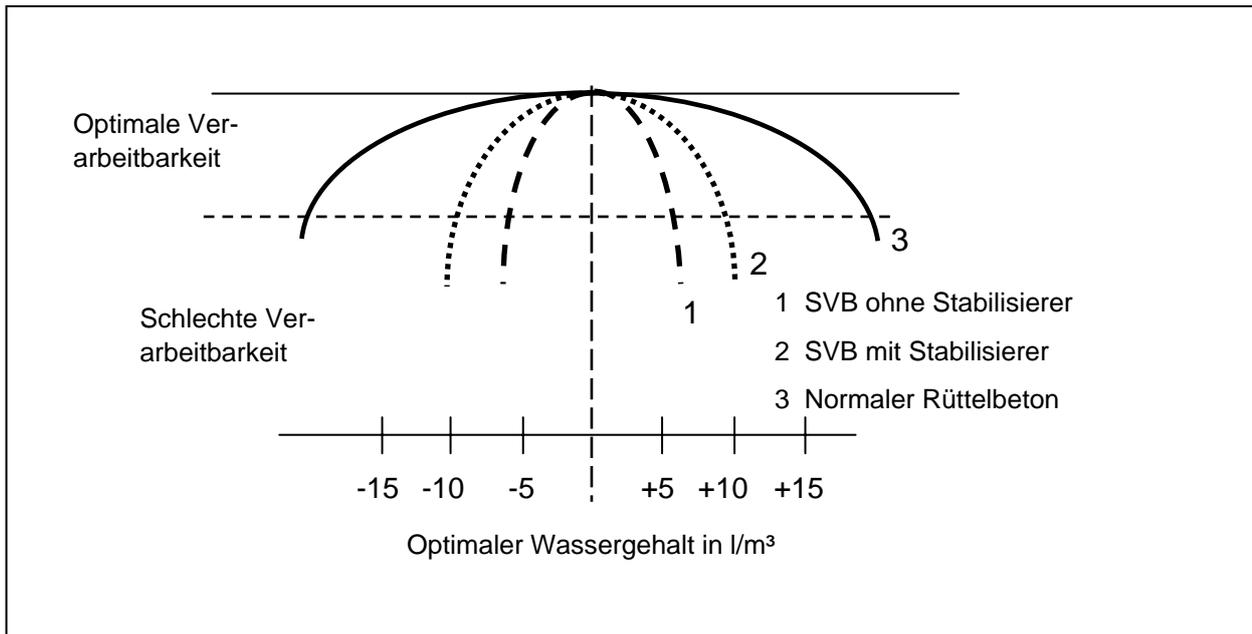


Bild 37: Robustheit von SVB nach [52]

7.5 Schlussbemerkungen zur Bogenbrücke Wölkau

Die Bogenbrücke bei Wölkau ist ein sehr elegantes schlankes Brückenbauwerk (Bild 38). Diese Gestaltung wurde durch die Verwendung von hochfestem Beton der Festigkeitsklasse B 65 möglich. Mit der Herstellung der Bogenstiele in selbstverdichtendem hochfestem Beton SVB 65 wurden die Möglichkeiten der Anwendung von selbstverdichtendem Beton im Brückenbau gezeigt. Der bei

der ersten Betonage aufgetretene Schaden stellt kein prinzipielles Problem des SVB dar. Die Veränderung der Betonrezeptur, die bei konventionellem Rüttelbeton unproblematisch ist, ist aber ein Zeichen der in der Praxis noch fehlenden Sensibilität für diesen Hochleistungsbaustoff. Insbesondere der Einfluss von Veränderungen der Ausgangsstoffe (Eigenfeuchte Sand, Kornband unterhalb von 0,5 mm, Zementlieferung etc.) wird unterschätzt. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Robustheit der SVB-Mischung über die gesamte



Bild 38: Bogenbrücke bei Wölkau mit SV-Beton B 65 und hochfestem Beton B 65 (Fotograph Jörg Riethausen, Chemnitz)

Verarbeitbarkeitsdauer hinweg im Mittelpunkt des Mischungsentwurfs stehen muss, nicht nur die Frischbetoneigenschaften im Anschluss an die Herstellung. Die Nachverflüssigung im Fahr-mischer während der Anlieferung zur Baustelle sollte ebenso erfasst werden, wie der Einfluss des Pumpens. Als besonders angenehm wurde das Fehlen des Lärms der Rüttelflaschen beim Verdichten empfunden. Die Geräuschentwicklung durch das Hämmern auf die Schalung der geneigten Flächen der Bogenstiele zum Austreiben der aus dem Frischbeton aufsteigenden Luft war immer noch leiser, als es Schalungsrüttler zur Verdichtung von konventionellem Beton gewesen wären.

Die Herstellung geneigter und profilierter Frischbetonoberflächen für Brückenüberbauten mit üblichen Abmessungen ist mit SVB nicht wie erwartet gelungen. Bei Bauteilen kleinerer Abmessungen kann eine geeignete SVB-Rezeptur gefunden werden – allerdings mit wesentlich mehr Entwicklungsaufwand als für konventionellen Rüttelbeton und mit Probekörpern im Maßstab 1:1.

Nicht gelungen ist die Umsetzung der Vorgaben zur Festlegung der Kennwerte des SVB für die Annahmeprüfung auf der Baustelle gemäß Kapitel 7.3. Ob der Einfluss von Schwankungen der Ausgangsstoffe auf Setzfließmaß, Trichterauslaufzeit und Fließzeit in Vorversuchen durch den Betonhersteller überprüft wurde, kann von uns nicht nachvollzogen werden. Auf der Baustelle wurde zwar das Setzfließmaß kontrolliert. Ein Soll-Wert und zulässige Abweichungen waren auch im Betonierkonzept enthalten. Nur wurde während der durch die BAST begleiteten Vorversuche immer ein höheres Setzfließmaß auf der Baustelle beobachtet, das dem des Frischbetons der 2. Betonage des Bogenstiels entsprach. Auch wurde der SVB nicht zurückgeschickt, als er dem im Betonierkonzept festgeschriebenen Sollwert nicht entsprach. Ob eine Verwechslung zwischen Setzfließmaß im TB-Werk und auf der Baustelle vorlag, wurde nicht geklärt. Angaben zum Sollwert für Fließzeit und Trichterauslaufzeit fehlten vollständig.

Auch zeigte sich, dass das Bauunternehmen zu Beginn der Betonagen mit SVB über keine praktischen Erfahrungen mit diesem Werkstoff verfügte. Im Laufe der Bauvorbereitung stellte sich dann aber eine Sensibilität für das komplexe System SVB-Eigenschaften – Einbau – Schalung – Trennmittel ein. Die Erarbeitung eines zwischen Unternehmung und Betonhersteller abgestimmten QS-Plans war nur mit dem nachdrücklichen Einsatz der Gutachter und erst kurz vor der Betonage zumindest auf dem Papier vorhanden. Die Umsetzung gelang jedoch wie oben beschrieben nicht

vollständig. Ein Nachbehandlungskonzept fehlte ebenfalls bis kurz vor der Betonage der Bogenstiele. Dank der Motivation und Qualifikation aller an der Ausführung Beteiligten verliefen die Betonagen dann aber reibungslos. Nach der ersten Betonage der Bogenstiele wurden noch weitere Untersuchungen zur Oberflächenqualität des SVB durchgeführt.

Durch die Zeitvorgaben der Baumaßnahme stand eine relativ kurze Entwicklungsdauer für die erforderlichen besonderen Frischbetoneigenschaften des SVB zur Ausführung des Profils des Überbaus zur Verfügung. Der QS-Plan des Werks wurde gemeinsam mit dem Gutachter erarbeitet und lag mit der Erstprüfung zusammen vor. Die Mischanlage war schon vorab für die Herstellung des SVB besonders ausgerüstet worden; sie war für SVB mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung geeignet. Als Umrüstungsmaßnahmen wurden uns insbesondere eine neue Mischer- und Mischwerkzeugauskleidung, neue Dosiereinrichtungen und die Feuchtemessung der Gesteinskörnungen genannt.

Grundsätzlich sollte überlegt werden, ob die Erprobung der Eignung von Hochleistungsbetonen in Bauwerken erfolgen sollte, die einem sehr engen Zeitplan unterliegen. Die Bogenbrücke Wölkau war nicht gesondert, sondern in einem Los mehrerer Bauwerke der A 17 vergeben worden.

8 Schlussfolgerungen aus der Begleitung der Bauvorhaben

Die Anwendungen von SVB im Brückenbau haben gezeigt, dass SVB des Mehlkorntyps (mit und ohne Verwendung von Stabilisierer) sowohl in größeren Mengen (18 bis 70 m³) auf die Baustelle geliefert und eingebaut werden als auch für großformatige Fertigteile mit Erfolg verwendet werden kann. Der größte Vorteil von SVB liegt in dem Verzicht auf das Verdichten im Bauteil und den Wegfall des damit verbundenen Lärms.

Der SVB umfließt die Bewehrung und dringt in alle Winkel der Schalung vor. Die Bewehrung wird auch bei engem Stababstand vollständig umschlossen und im alkalischen Milieu des Betons vor Korrosion geschützt, wenn das Größtkorn angemessen gewählt wird. Ein gut zusammengesetzter SVB entlüftet während des Fließens selbsttätig. Die Fähigkeit zur fast niveaugleichen Verteilung hängt wesentlich von der Viskosität und den Fließ-eigenschaften ab. In den beobachteten Bauteilen nivellierte und entlüftete sich SVB mit hohem Setz-

fließmaß ebenso von selbst, wie mit relativ niedrigem.

Bei gleicher Betonzusammensetzung (Zementart, Zementgehalt, w/z-Wert) deuten die Ergebnisse der Laborversuche darauf hin, dass die Karbonatisierungsgeschwindigkeit, die Geschwindigkeit des Eindringens von Chloriden aus Tausalzen und die Schädigung in der Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands gegenüber einem konventionellen Rüttelbeton deutlich reduziert wird. Diese Verbesserung der Dauerhaftigkeit an labormäßig hergestellten Prüfkörpern wird auch durch andere Untersuchungen bestätigt. Beobachtungen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von großformatigen Bauteilen unter Witterung und Verkehr stehen zurzeit noch aus.

Die Festbetoneigenschaften Festigkeit und Verformungsverhalten von SVB des Mehlkorntyps (mit und ohne Verwendung von Stabilisierer) nach [26] entsprechen denen eines in der Festigkeitsklasse vergleichbaren Rüttelbetons. Auch der Verbund zwischen Beton und Bewehrungsstahl ist so gut wie bei konventionellem Rüttelbeton. Arbeitsfugen und nicht geschaltete Betonoberflächen sind jedoch aufgrund der hohen Dichte und Festigkeit der Mörtelmatrix als glatt anzusehen. Die Druckfestigkeit von SVB ist höher als für die üblichen Bauwerke an Bundesfernstraßen erforderlich. Festigkeiten unterhalb von 60 N/mm² wurden nicht beobachtet. Im Mischungsentwurf nach der Methode von OKAMURA stehen Fließfähigkeit, Viskosität und das Sedimentationsverhalten im Vordergrund. Wasserzementwert und Druckfestigkeit ergeben sich aus den so optimierten Frischbetoneigenschaften. Beim SVB ist das Zementsteinvolumen in der Regel größer, da die Sedimentationsstabilität nur mit Gesteinskörnung Größtkorn 16 mm oder kleiner erreicht wird. Dies erhöht die Kriech- und Schwindverformung, wie auch beim Rüttelbeton mit diesem Größtkorn. Für verformungsempfindliche Bauwerke ist es sowohl für Rüttelbeton als auch für SVB erforderlich, die Kennwerte experimentell zu bestimmen.

Nicht erfüllt haben sich allerdings die Erwartungen an die Sichtbetonoberfläche und die Robustheit von SVB. Die Sichtbetonoberfläche wird zum einen durch den nicht-kontinuierlichen Betoneinbau bei großformatigen Bauteilen mit hoher Grundfläche, wie z. B. einer Widerlagerwand, beeinträchtigt. Die einzelnen Betonlagen zeichnen sich an der geschalteten Oberfläche ab. Die Lagen wurden bei Verwendung von Flugasche, deren Eignung als Betonzusatzstoff nachgewiesen ist, als schmale anthrazitfarbene horizontale Streifen betont. Der Beton konnte nicht kontinuierlich, also nicht an die

mögliche Einbaugeschwindigkeit angepasst, angeliefert werden. Ausnahme waren die Bogenstiele der Brücke Wölkau, deren Herstellung eine planmäßig reduzierte Betoniergeschwindigkeit erforderten.

Zum anderen muss die aus dem Beton während des Fließens austretende Luft als Folge des Wegfalls der Verdichtungsenergie an der Schalung leicht zur freien Oberfläche hin aufsteigen können. Hier ist die Abstimmung von Trennmittel, Schalhaut und den Eigenschaften des betrachteten SVB wichtiger als bei Rüttelbeton. Wird das System Schalhaut/Trennmittel/SVB nicht optimiert und wird die Betoniergeschwindigkeit nicht dem Aufsteigen und Entlüften angepasst, sind Lunker und Luft einschüsse nicht zu vermeiden. Im Fall der geneigten Deckelschalung der Bogenstiele der Brücke Wölkau war eine lunkerarme Festbetonoberflächen nur möglich, weil durch das maschinelle Bearbeiten der Schalungsträger die Luft bis zum Schalungsaufsatz am oberen Ende getrieben wurde. Allerdings sind solche Lunker nicht vergleichbar mit Kiesnestern aus mangelhafter Verdichtung – der Zementmörtelmatrix des SVB sorgt in solchen Fehlstellen für eine in sich geschlossene Zementsteinoberfläche. An Oberflächen, die mit sägerauhen Schalbrettern hergestellt werden, fallen Luftporen und Betonierlagen am wenigsten auf.

Die Ausführung der Bauwerke zeigte, dass kurze Arbeitsunterbrechungen beim Einbau von SVB (20 bis 30 min) nur die Oberfläche, nicht jedoch den Kern des Betons störten. Lange Arbeitsunterbrechungen und frühzeitiges Ansteifen können in oberseitig geschlossenen und gegebenenfalls gebogenen Schalungen nicht beherrscht werden.

Die mangelnde Robustheit zeigte sich in der zu kurzen Verarbeitbarkeitsdauer einiger Lieferungen des SVB für die Bogenbrücke Wölkau. Die Ursache hierfür ließ sich im Nachhinein klären. Vermeiden lassen sich solcherart Überraschungen aber nur, wenn in der Erst- bzw. Eignungsprüfung die Schwankungen der Ausgangstoffe und der Dosierung geeignet simuliert und die Auswirkungen auch über die gesamte Verarbeitbarkeitsdauer überprüft werden. Ein Entmischen und Sedimentieren des SVB wurde jedoch bei keinem der Bauwerke beobachtet.

Jahreszeitlich bedingte niedrige Lufttemperaturen (mind. +5 °C) können die Anwendung von SVB einschränken. Bei zu hohen Temperaturen kann ggf. auf die Nachtstunden ausgewichen werden.

Zur Schalung wurde festgestellt, dass der Schalungsbau durch den Betonierdruck des SVB aufwändig ist, weil mit hydrostatischem Druck ge-

rechnet werden muss. Bei sauberer Ausführung müssen die Fugen von Brettschalungen nicht gesondert abgedichtet werden. Durchlässe in der Schalung, z. B. für Anschlussbewehrung, müssen jedoch gesondert abgedichtet werden.

Die Ausführung von Fahrbahntafeln in SVB ist nicht angezeigt. Das zur Entwässerung erforderliche Oberflächenprofil und eine Neigung von 2,5 % kann mit einem üblichen SVB nicht hergestellt werden. Vergleichbare Probleme sind aber auch mit fließfähigem und sehr fließfähigem Beton, z. B. in Fahrbahntafeln von Verbundbrücken, zu erwarten. Insbesondere auch dann, wenn der Frischbeton zu falschem Ansteifen der Betonoberfläche neigt (Ausbildung einer so genannten Elefantenhaut).

Für deckenähnliche Bauteile mit Hohlkörpern oder Aussparungen kann das Fließverhalten von SVB entscheidend für die Unteransicht werden. Bei sehr flüssiger Konsistenz kann an solchen Stellen turbulentes Strömungsverhalten auftreten, das eine Anreicherung schwindempfindlicher Zementschlämme zur Folge hat.

Ein Unterschied in der Verwendung von SVB im Fertigteilwerk oder vor Ort auf der Baustelle war in Hinblick auf Erfordernis und Umfang der Überwachung im Mischwerk nicht vorhanden. Auch sind die Anforderungen an das Herstellwerk, verglichen mit Rüttelbeton, sehr hoch. Nicht jede Transportbetonanlage ist geeignet, SVB herzustellen. Allerdings steigt mit der Anzahl der hergestellten Fertigteile die Erfahrung und die Routine im Umgang mit SVB, vorausgesetzt der SVB wird häufig hergestellt.

Die strenge Trennung der Produktion von SVB- und Rüttelbeton hat sich bewährt. Die Produktion wird deshalb häufig in die Abend- und Nachtstunden oder auf einen Samstag gelegt.

Zur Umsetzung von speziellen Qualitätssicherungsmaßnahmen für SVB konnte bei den beobachteten Projekten nur geringes Verständnis bei den Baubeteiligten geweckt werden. Die Erwartungshaltung der Bauunternehmung beinhaltet, dass SVB gleich einem konventionellen Rüttelbeton bestellt und mit weniger Aufwand eingebaut werden kann. Der Aufwand zur Überwachung der Frischbetoneigenschaften, der, wie die Anwendungsbeispiele gezeigt haben, unbedingt erforderlich ist, wird als zu hoch, d. h. als deutlich zu zeitaufwändig, geräteaufwändig und personalintensiv empfunden. Eine Bereitschaft von Unternehmung und Betonhersteller zur gemeinsamen Entwicklung eines auf den speziellen SVB abgestimmten QS-Planes war nicht sofort erkennbar. Aus unseren Er-

fahrungen heraus sollten deshalb einige Hinweise der SVB-Richtlinie 2003 als überprüfbare Forderung vereinbart und zusätzlich die Robustheit des SVB gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe und Einbaubedingungen schon im Mischungsentwurf berücksichtigt werden. Die SVB für die beobachteten Projekte waren nach der Methode von OKAMURA entwickelt worden und zeigten sich, bis auf den Schaden als Folge einer Veränderung der Zusatzmitteldosierung, als robust genug für die Baustellenanwendung.

Die tatsächlichen Kosten für Herstellung, Überwachung und Einbau von SVB wurden nicht offengelegt. Neben den Vorversuchen zur Eignung der Ausgangsstoffe gehen auch die Verarbeitungsversuche und der Prüfumfang zur Qualitätssicherung im Werk sowie beim Einbau über den Aufwand für konventionellen Rüttelbeton hinaus.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Festbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton (SVB) werden wesentlich stärker von den Frischbetoneigenschaften bestimmt als bei konventionellem Rüttelbeton. Viskosität und Fließfähigkeit des Frischbetons müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass sich feste und flüssige Bestandteile nicht entmischen und gleichzeitig die im Frischbeton enthaltene Luft aus dem Herstell- und Einbauvorgang während des Fließens in der Schalung ohne Zuführung weiterer Verdichtungsenergie nahezu vollständig entweicht. Die Abstimmung von Viskosität und Fließfähigkeit ist bei SVB – nicht zuletzt durch die Wirkungsweise spezieller Fließmittel – sehr stark von den Betonausgangsstoffen beeinflusst. Die Schwankungen der Ausgangsstoffe – Mehlkorn aus Zement, Zusatzstoff und Gesteinskörnung sowie Wasser und weiterer Zusatzmittel, feine und grobe Gesteinskörnung – dürfen nur klein sein, um das Entmischen zu vermeiden und die erforderliche Selbstentlüftungsfähigkeit zu erhalten.

Im Rahmen des Projektes wurden bei zwei Baumaßnahmen die Herstellung von Bauwerksteilen in Ortbeton und bei einer Maßnahme die Serienherstellung großformatiger Fertigteile aus SVB fachtechnisch begleitet. Die dabei gesammelten Erfahrungen konnten durch Auswertung von Fachveröffentlichungen bestätigt und vertieft werden. Die Vorteile von SVB können auch für den Brücken- und Ingenieurbau genutzt werden.

In Übereinstimmung mit Berichten über Großprojekte mit SVB [53, 54, 55, 56, 57] wurde festge-

stellt, dass der Erfolg einer Baumaßnahme in SVB von der Gleichmäßigkeit der Ausgangsstoffe, der Ausrüstung des Herstellwerkes und der partnerschaftlichen Zusammenarbeit in der Kette Ausgangstofflieferant – Betonhersteller – Bauunternehmung abhängt. Nur durch diese Zusammenarbeit können geeignete und wirksame Qualitätssicherungsmaßnahmen für das jeweilige Bauvorhaben abgestimmt werden. Das Einbauverfahren muss auf die Eigenschaften des SVB abgestimmt werden, und die Einbaubedingungen erfordern häufig spezielle Eigenschaften des SVB. Die Überwachung der Rohstoffe muss zwischen Lieferanten der Ausgangsstoffe und dem Betonhersteller abgestimmt werden, da Kriterien zur Überwachung der Ausgangsstoffe häufig erst durch den Erfahrungsaustausch zwischen Betonherstellung und Rohstoffeigenschaften gefunden werden.

Für die Planung ist wichtig, dass nicht jedes Herstellwerk für konventionellen Rüttelbeton von der Ausstattung her in der Lage ist, SVB mit gleichmäßigen Frisch- und Festbetoneigenschaften herzustellen. Die Herstellleistung des Mischwerks sinkt dramatisch auf Werte um 25 m³/h ab. Mit Mischern mit besonderer Ausstattung konnten über 40 m³/h, anstelle von 100 m³/h für normalen Rüttelbeton, hergestellt werden. Neben der Mischwirkung stehen dabei auch die Dosiergenauigkeit, Lagerung und Überwachung der Eigenfeuchte der Zuschläge im Vordergrund.

Die Produktion von SVB wird von der üblichen getrennt und deshalb häufig in die Abend- und Nachtstunden oder auf einen Samstag gelegt.

Jahreszeitlich bedingte niedrige Lufttemperaturen (mind. +5 °C) können die Anwendung von SVB einschränken. Bei zu hohen Temperaturen kann ggf. auf die Nachtstunden ausgewichen werden.

Die bauvorbereitenden Maßnahmen für SVB sind aufwändig und gehen häufig über den in der SVB-Richtlinie 2003 geforderten Verarbeitungsversuch hinaus. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Betonhersteller und Bauunternehmung ist dabei unbedingt erforderlich.

Die Schalung für SVB muss, wenn nicht im Vorfeld die Frischbetoneigenschaften des SVB, das Einbauverfahren und die Betoniergeschwindigkeit bekannt sind, auf hydrostatischen Druck bemessen werden. Grundsätzlich kann der Druck auf die Schalung aber auch hydrostatischen Druck überschreiten, z. B. durch den Pumpvorgang. Es kann auch erforderlich werden, die Betonier- bzw. Steiggeschwindigkeit an die Schalung anzupassen.

Die Herstellung einer porenarmen, gleichmäßig gefärbten Sichtbetonoberfläche bedarf auch bei

SVB besonderer Maßnahmen. Die Abstimmung des Systems Schalung – Trennmittel – SVB ist unbedingt erforderlich und sollte durch Vorversuche bestätigt werden. Eine Schalung aus sägerauhen Bretten lässt Luftporen nicht so ins Auge fallen, wie glatte Schaltafeln. Die „Hautbildung“ an der Frischbetonoberfläche tritt mit zunehmender Temperatur früher ein und begünstigt das Übereinanderfließen der Betonierlagen an der Schalungsoberfläche. Bisher konnte nur durch ständige Bewegung der Frischbetonoberfläche oder das kontinuierliche Betonieren mit eingetauchtem Pumpenschlauch das Abzeichnen der Betonierlagen an der Betonoberfläche vermieden werden. Für deckenähnliche Bauteile mit Hohlkörpern oder Aussparungen kann das Fließverhalten von SVB entscheidend für die Unteransicht werden. Bei sehr flüssiger Konsistenz kann an solchen Stellen turbulentes Strömungsverhalten auftreten, das eine Anreicherung schwindempfindlicher Zementschlämme zur Folge hat.

Eine gute und gleichmäßig gefärbte Sichtbetonoberfläche lässt sich aber auch mit vergleichsweise geringem Aufwand aus gut zusammengesetztem konventionellem Rüttelbeton weicher Konsistenz herstellen [62].

Zur Herstellung von Fahrbahntafeln im Brückenbau mit Längs- und Querneigung ist SVB nicht geeignet. Dasselbe gilt aber auch für fließfähigen und sehr fließfähigen Beton, mit dem ebenfalls das für die Entwässerung erforderliche Oberflächenprofil nicht eingestellt werden kann.

Eine weitere Einschränkung für den Brückenbau ist in der häufig zu hohen Druckfestigkeit gegeben. Die Druckfestigkeit liegt nur in seltenen Fällen unterhalb von ca. 50 N/mm² im Alter von 28 Tagen. Gegebenenfalls gelten für SVB dieselben Einschränkungen wie für hochfesten Beton.

Die tatsächlichen Kosten für Herstellung, Überwachung und Einbau von SVB wurden nicht offengelegt. Möglicherweise sind nicht die Materialkosten bestimmend für die Preis. Denn neben den Vorversuchen zur Eignung der Ausgangsstoffe gehen auch die Verarbeitungsversuche und der Prüfumfang zur Qualitätssicherung im Werk und beim Einbau über den Aufwand für konventionellen Rüttelbeton hinaus.

Seit Beginn des Jahres 2004 läuft ein Forschungsvorhaben zur Erhöhung der Robustheit von SVB, das von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert wird.

10 Literatur

- [1] DAfStb-Richtlinie selbstverdichtender Beton – SVB-Richtlinie. Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb im DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin - Köln: Beuth, Juni 2001
- [2] LUDWIG, H.-M., WEISE, F., HEMRICH, W., EHRLICH, N.: Der neue Beton. Selbstverdichtender Beton - Grundlagen und Praxis. Teil 3: Praktische Anwendungsbeispiele, Erfahrungswerte und Anwendungsregeln. In: Betonwerk- und Fertigteiltechnik, Nr. 7, 2001, S. 64 – 69
- [3] Lahntalbrücke für die DB-Neubaustrecke Köln-Rhein/Main, Philipp Holzmann AG, Eigenverlag, 2001
- [4] BREITENBÜCHER, R.: Erste Erfahrungen mit selbstverdichtendem Beton in der Praxis. Kongressunterlage der 45. Ulmer Fertigteil-Tage 2001. In: Betonwerk+Fertigteiltechnik, Nr. 1, 2001, S. 21
- [5] CHRISTLMEIER, P.: SCC-Beton - praktische Erfahrungen bei der Herstellung von Stahlbetonstützen. In: Zement+Betton, Nr. 3, 2000, S. 24 – 26
- [6] BERGER-BÖCKER, T., BLOBNER, A.: Selbstverdichtender Transportbeton: Anwendung mit Zustimmung im Einzelfall. In: Beton, Nr. 9, 2001, S. 492 – 495
- [7] RIEGER, Th.: Selbstverdichtender Beton. In: FuE-Forum Hochtief Construction AG, Nr. 17, 2002
- [8] WALRAVEN, J.: Anwendungen von selbstverdichtendem Beton in den Niederlanden. In: Selbstverdichtender Beton. Innovationen im Bauwesen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Hrsg.: G. König, K. Holschemacher, F. Dehn. Berlin: Bauwerk, 2001, S. 205 - 219
- [9] BILLBERG, P., PETERSSON, Ö., ÖSTERBERG, Th.: Full scale casting of bridges with self-compacting concrete. 1. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. September 99, Stockholm, Schweden, S. 639 – 650
- [10] ÖSTERBERG, T.: The use of SCC at the Södra Lanken Projekt, Stockholm, Schweden. www.vagverketproduktion.se
- [11] NISCHER, P., PICHLER, R., STEIGENBERGER, J., ZÜCKERT, U.: Selbstverdichtender Beton für Brücken. Hrsg.: Bundesminister für Verkehr, Innovation und Technologie. Straßenforschung, Österreich, Heft 503
- [12] STEIGENBERGER, J.: Anwendung von SVB in Österreich. In: Selbstverdichtender Beton. Innovationen im Bauwesen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Hrsg.: G. König, K. Holschemacher, F. Dehn. Berlin: Bauwerk, 2001, S. 235 – 240
- [13] EDVARDSEN, C.: Selbstverdichtender Beton - Anwendung in Dänemark. Kongressunterlage der 45. Ulmer Fertigteil-Tage 2001. In: Betonwerk+Fertigteiltechnik, Nr. 1, 2001, S. 24 – 26
- [14] TEGELAAR, R.: Selbstverdichtender Beton. Popmusik statt Rüttellärm. In: Betonwerk- und Fertigteiltechnik, Nr. 11, 2001, S. 96 – 99
- [15] BENNENK, H.W.: Selbstverständlich - selbstverdichtender Beton in der täglichen Praxis. In: Betonwerk+Fertigteiltechnik, Nr. 6, 2002, S. 20 – 31
- [16] OKAMURA, H., OUCHI, M.: Self-Compacting Concrete. In: Journal of Advanced Concrete Technology (Japan Concrete Institute), Vol.1, No.1, April 2003, S. 5 - 15
- [17] SHINDOH, T., MATSUOKA, Y.: Development of combination-type self-compacting concrete and evaluation test methods. In: Journal of Advanced Concrete Technologie, Vol. 1, No 1, 2003
- [18] LOHAUS, L., HÖVELING, H., SCHIEßL, P., LOWKE, D.: Eigenschaften Selbstverdichtender Betone. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn. Heft 906, 2004
- [19] REINHARDT, H.W.: Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB). Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb im DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; Wien; Zürich: Beuth, Heft 516, 2001
- [20] BRAMESHUBER, W.: Selbstverdichtender Beton. Schriftenreihe Spezialbetone Band 5. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2004
- [21] HAUCK, H.G.: Fließmittel der neuen Generation für die Transportbetonindustrie. Zusammensetzung und technologische Eigenschaften. In: Beton, Nr. 3, 2004, S. 128 –130
- [22] KORDTS, S., GRUBE, H.: Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von Selbst-

- verdichtendem Beton als Transportbeton. In: Beton, Nr. 4, 2002, S. 217 - 233
- [23] REINHARDT, H.W.: Beton. In: Betonkalender, Bd. 1, 2002, S. 1 - 152
- [24] DAfStb-Richtlinie für Fließbeton. Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb im DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin - Köln: Beuth, 1995
- [25] OKAMURA, H., OZAWA, K.: Mix-design for self-compacting concrete. In: Concrete Library of JSCE, No. 25, 1995, S. 107 – 120
- [26] DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb im DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin - Köln: Beuth, November 2003
- [27] Selbstverdichtender Beton. Innovationen im Bauwesen. Beiträge aus Praxis und Wissenschaft. Hrsg.: G. König, K. Holschmacher, F. Dehn. Berlin: Bauwerk, 2001
- [28] BREIT, W., GRUBE, H., RICKERT, J.: Selbstverdichtender Beton – Technologie und Anwendung. In: Der Prüferingenieur 37, Oktober 2000
- [29] Final Report 8.4 Quality control. Brite Euram Proposal No. BE96-801; Contract No. BRPR-CT96-0366 Task 8.4. Author: L.-G. Tviksta. Rev. No. 6 vom 30.06.2000
- [30] Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Hrsg.: EFNARC, UK, February 2002
- [31] EFES, Y., HINTZEN, W., HERSCHELMANN, A.: Selbstverdichtende Betone mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung. Übersicht über die erteilten Zulassungen des DIBt. In: Betonwerk+Fertigteiltechnik, 12, 2003, S. 6 - 13
- [32] GRAM, H.-E.: Oberflächenschäden bei Selbstverdichtendem Beton. Diskussion möglicher Ursachen. In: Betonwerk + Fertigteiltechnik, Nr. 8, 2004, S. 28 – 33
- [33] WEBER, J.: Anwendung neuerer Entwicklungen im bayerischen Brückenbau. In: Vorträge Deutscher Beton- und Bautechnik-Tag, Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., 2001, S. 388 – 403
- [34] Bundesautobahn A 99, Autobahnring München - Westabschnitt; Streckenteilabschnitt Unterpfaffenhofen – Aubing, BW 92/5s Unterführung eines Geh- und Radweges. Bauwerk mit SCC-Beton. 10 Seiten Austauschblätter zu Baubeschreibung. Schreiben der Autobahndirektion Südbayern vom 25.08.2000
- [35] Untersuchung im Rahmen der Eignungsprüfung eines selbstverdichtenden Betons. Bauvorhaben: Geh- und Radwegunterführung A99. Untersuchungsbericht des Materialprüfamt für das Bauwesen der Technischen Universität München, Abteilung Baustoffe vom 09.08.2001
- [36] Festbetonuntersuchungen in Rahmen der Eignungsprüfung eines selbstverdichtenden Betons. Bauvorhaben: Geh- und Radwegunterführung A99. Untersuchungsbericht des Materialprüfamt für das Bauwesen der Technischen Universität München, Abteilung Baustoffe vom 27.08.2002
- [37] Wissenschaftliches Begleitprogramm im Rahmen des Neubaus einer Geh- und Radwegunterführung aus SCC: Untersuchungen zum Verbund- und Bruchverhalten. Untersuchungsbericht des Instituts für Baustoffe und Konstruktion, MPA Bau der Technischen Universität München vom 14.05.2001
- [38] Baustellenbericht SVB mit Zustimmung im Einzelfall. Bauvorhaben Geh- und Radwegunterführung an der B2 in München-Neubauing. Readymix Baustoffgruppe.
- [39] Autobahndirektion Südbayern. Bundesautobahn A 99, Autobahnring München - Westabschnitt; Streckenteilabschnitt Unterpfaffenhofen – Aubing, BW 92/5s Unterführung eines Geh- und Radweges. Untersuchungs- und Erprobungsmaßnahme Selbstverdichtender Beton (SVB). Ergebnisvermerk über die Besprechung vom 05.03.01 in der TU München.
- [40] ZILCH, K., GLÄSER, Chr.: Anwendung von hochfestem und selbstverdichtendem Beton im Brückenbau. Vortrag auf der Brückenbautagung 2001 der bayerischen Straßenbauverwaltung am 19./20. September 2001 in Ingolstadt.
- [41] Zusätzliche Festbetonuntersuchungen im Rahmen der Eignungsprüfung eines selbstverdichtenden Betons. Bauvorhaben: Geh- und Radwegunterführung A99. Herstellung eines selbstverdichtenden Betons mit künstlich eingeführten Luftporen. Untersuchungsbericht des Materialprüfamt für das Bauwesen der Technischen Universität München, Abteilung Baustoffe vom 27.08.2002

- [42] KONOPKA, E.: Herstellung großformatiger Rasterdeckenelement. Praktische Erfahrung mit selbstverdichtendem Beton in der Betonfertigteilindustrie. In: Beton, Heft 6, 2004, S. 300 – 303
- [43] Gutachterliche Stellungnahme: Zustimmung im Einzelfall zur Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Zuge der B31 Ost, Bauteil Rasterdecke (43-39-B 31 Ost / BW Nr. 8013 685). König und Heunisch, Beratende Ingenieure, Leipzig vom 25.06.2001
- [44] BERNHARDT, K.: Herstellung feingliedriger Betonfertigteile für eine Tunnelrasterdecke aus selbstverdichtendem Beton (SVB). In: Internationale Arbeitstagung Brücken- und Ingenieurbau 05./07.06.2002 in Magdeburg
- [45] DEHN, F., RIES, W., TAUSCHER, F., RAUNER, R., BRINKOP, P.: Herstellung von Rasterdecken aus SVB-Fertigteilen. In: Bau-technik, Vol. 79, Heft 11, 2002, S. 744 – 749
- [46] SCHIEßL, A.: Verbundverhalten von selbstverdichtendem Beton. 38. Forschungskolloquium des DAfStb, TU München, 2000
- [47] Untersuchungsbericht Nr. 135/2001 Teil 1 bis Teil 6. Öffentliche Baustoffprüfstelle der Fachhochschule Stuttgart – Hochschule für Technik (ÖBP) vom 06. 06., 19.06., 04.09., 05.09., 24.09., 08.11.2001
- [48] DEHN, F., REINTJES, K.-H., TAUSCHER, F., MAURER, R.: Verwendung von selbstverdichtendem Beton für geneigte Brückenflächen. In: Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 97 (2002) Heft 12, S. 657 – 662
- [49] Gutachterliche Stellungnahme zur Verwendung des SVB 65 in der Bogenbrücke Wölkau. König und Heunisch, Beratende Ingenieure, Leipzig
- [50] Schlussbericht zur Bogenbrücke Wölkau. König und Heunisch, Beratende Ingenieure, Leipzig
- [51] Gutachterliche Stellungnahme zur Verwendung des B 65 in der Bogenbrücke Wölkau. König und Heunisch, Beratende Ingenieure, Leipzig
- [52] STARK, J.: Optimierte Bindemittelsysteme für die Betonindustrie. In: Beton, Nr. 10, 2004, S. 486 - 490
- [53] BRANDL, J.: Selbstverdichtender Beton beim Bau eines U-Bahnhofs. Von der Eig-nungsprüfung bis zur Einsatzreife. In: Beton, Nr. 9, 2003, S. 424 – 427
- [54] Baustellenbericht SVB mit Zustimmung im Einzelfall. Bauvorhaben U-Bahn-Linie 1 in Fürth. Readymix Baustoffgruppe. Eigenverlag.
- [55] BUDELDMANN, H., GIESELMANN, R., u.a.: Das Science Center „Phaeno“. Betontechnologische Wege zur Umsetzung exzellenter Architektur mit Selbstverdichtendem Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau 99, Heft 1, 2004, S. 64 – 69
- [56] BUDNIK, J., STARKMANN, U.: Betontechnologie und Ausführung beim Science-Center Wolfsburg. SVB für anspruchsvolle Sichtbeton-Architektur. In: Beton, Nr. 9, 2003, S. 418 – 422
- [57] FISCHER, A., SILBEREISEN, R.: Selbstverdichtender Transportbeton für das BMW-Werk Leipzig. Rezeptur, Betoneigenschaften und Einbau. In: Beton, Nr. 6, 2004, S. 292 – 299
- [58] Brückenbau in den Niederlanden mit SCC. In: tis, Nr. 3, 2002, S. 21 – 24
- [59] Brückenbau in den Niederlanden mit SCC. In: Baumarkt + Bauwirtschaft, Nr. 1, 2002, S. 59 – 64
- [60] KÖNIG, G., HOLSCHEMACHER, K., MAUER, R., DEHN, F.: Selbstverdichtender Beton für den Brückenbau. In: Beton- und Stahlbetonbau, 97, Heft 6, 2002, S. 322 – 325
- [61] OUCHI, M., NAKAMURA, S., OSTERBERG, T., HALLBERG, S.-E., LWIN, M.: Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and the United States. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration, Bridge Technology, 2003
- [62] FOCKENBERG, K., GÜTZ-KOTTMANN, P., KORNEFFEL, R.: Bau des Neuen Mercedes-Benz Museums in Stuttgart. Doppelhelix führt in betontechnischen Grenzbereich. In: Beton, Nr. 12, 2004, S. 598 - 602

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

1993

- B 1: Realkalisierung karbonatisierter Betonrandzonen
Budnik, Laakkonen, Maaß, Großmann vergriffen
- B 2: Untersuchungen an Fertigteilbrücken BT 70/BT 700
Haser kostenlos
- B 3: Temperaturunterschiede an Betonbrücken
Knabenschuh vergriffen
- B 4: Merkblatt zur Entnahme repräsentativer Strahlschuttproben MES-93 € 9,00

1994

- B 5: Spezielle Probleme bei Brückenbauwerken in den neuen Bundesländern
von H. Hase, R. Kaschner
Teil 1: Nachrechnung von Gewölbebrücken
Teil 2: Schubsicherung bei Fertigteilträgern BT 70 und BT 50
Haser, Kaschner € 11,50

1995

- B 6: Zur Berechnung von Platten mit schwacher Querbewehrung
Kaschner € 11,50
- B 7: Erprobung von dichten lärmindernden Fahrbelägen für Brücken
Sczyslo € 12,50
- B 8: Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbelagplatte
Krieger, Rat € 17,50
- B 9: Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Betonbrücken
Krieger € 13,00
- B 10: Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln
Maaß, Krieger € 12,50

1996

- B 11: Fahrbeläge auf Sohlen von Trogbauwerken
Wruck € 12,00
- B 12: Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkirchener Brücke
Goebel € 15,50
- B 13: Strukturanalyse von Beton
Gatz, Gusia € 11,00

1997

- B 14: Verhalten von Fahrbelagübergängen aus Asphalt infolge Horizontallasten
Krieger, Rath € 16,00
- B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betonersatz beim Einbau von Abdichtungen
Großmann, Budnik, Maaß € 14,50
- B 16: Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brückenseile
Eilers, Hemmert-Halswick € 27,50
- B 17: Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonisierungstiefe und des Chlorgehaltes von Beton
Gatz, Gusia, Kuhl € 14,00

1998

- B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken
Krieger € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Beschichtungen
Schröder € 11,00
- B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl
Eilers, Ritter € 12,50
- B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3
Krieger € 10,50

1999

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken
Haardt € 11,50
- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger Untergründe
Schröder, Sczyslo € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl
Eilers, Stoll € 11,00
- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken
Haardt € 12,50
- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerksprüfung
Krieger, Rath, Berthold € 10,50
- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

2000

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbonisierungstiefe und des Chlorgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitätskategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbelagplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbeläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbelagübergänge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Talbrücke Haiger
Krause, Wiggenhauser, Krieger € 17,00

B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti
von Weschpfennig € 11,50

B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahr-
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Kuchler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Von A. Städing, T. Krockner € 12,00

B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50

B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50

B 45: Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus
wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln
Hemmert-Halswick € 13,00

2004

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im
Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

B 48: Scannende Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken
Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggenhauser € 15,00

B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf-
tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50

B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für
das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen
Hydrophobierungsmitteln
Holst € 12,50

B 52: Brückenseile mit Galfan-Überszug – Untersuchung der
Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staeck in Vorbereitung

B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im
Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.