

Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörnitz

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 188

bast

Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörnitz

von

Janin Kuhnsch

Bundesanstalt für Straßenwesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 188

bast

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

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 3721000
Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke
auf der BAB A7 bei Wörnitz

Referat
Betonbauweisen

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

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

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-743-3

Bergisch Gladbach, Juni 2023

Kurzfassung – Abstract

Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörnitz

Während für Unter- und Oberbeton bei der Waschbetonbauweise bereits seit Jahren unterschiedliche Betone zur Anwendung kommen, war die Verwendung von Zementen unterschiedlicher Art, z. B. CEM I im Oberbeton und CEM III für den Unterbeton, bisher nicht vorgesehen. Jedoch beinhaltet die Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen ein großes Nachhaltigkeitspotenzial für die Betonbauweise. Durch Verringerung des Klinkeranteils werden erheblich CO₂-Emissionen eingespart und aufgrund des verringerten Potenzials einer betonschädigenden AKR kann auch einer zunehmenden regionalen Rohstoffknappheit entgegengewirkt werden.

Ein Erprobungskonzept für die Anwendung auf BAB wurde im Forschungsprojekt „Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte“ (1) erarbeitet. Die erste Versuchsstrecke wurde im Oktober 2020 auf der BAB A7 bei Wörnitz auf einer Länge von 1.350 m errichtet und durch ein umfangreiches Untersuchungsprogramm wissenschaftlich von der BAST begleitet.

Durch den Vergleich der Untersuchungsergebnisse von Referenz- und Versuchsstrecke konnten während des Beobachtungszeitraums die Erkenntnisse aus dem o. g. Forschungsprojekt und die Unbedenklichkeit der Bauweise bestätigt werden - die mechanischen Eigenschaften eines herkömmlichen Unterbetons unter Verwendung von Portlandzement sind mit denen eines Unterbetons unter Verwendung von hüttensandreichen Zementen (CEM III/A) vergleichbar.

Investigations on a CEM III test section on the A7 motorway near Wörnitz

While different concretes have already been used for years for the bottom and top concrete with exposed aggregate, the use of cements of different types, e.g. CEM I in the top concrete and CEM III for the bottom concrete, has not been envisaged so far. However, the use of cements containing granulated blast furnace slag contains great sustainability potential for concrete construction. By reducing the proportion of clinker, considerable CO₂ emissions are saved and, due to the reduced potential of ASR damaging the concrete, an increasing regional shortage of raw materials can also be counteracted.

A test concept for the application on highways was developed in the research project “Durable concrete pavements taking into account current ecological and economic aspects” (1). The first test section was constructed in October 2020 on the A7 motorway near Wörnitz over a length of 1,350 m and was scientifically accompanied by the BAST through an extensive investigation program.

By comparing the test results of the reference and test sections, the findings of the above-mentioned research project and the harmlessness of the construction method were confirmed during the observation period - the mechanical properties of a conventional bottom concrete using Portland cement are comparable with those of a bottom concrete using cements rich in granulated blastfurnace slag (CEM III/A).

Inhalt

Abkürzungen	7	8.1	Allgemeines	21
Danksagung	9	8.2	Frischbetoneigenschaften	21
1 Aufgabenstellung	11	8.3	Betontemperatur während des Einbaus	23
2 Lage und Aufbau der Versuchsstrecke ..	11	8.4	Betontemperaturentwicklung	23
3 Stand der Wissenschaft	11	8.5	Festbetoneigenschaften	23
4 Untersuchungsumfang	12	8.5.1	Festigkeitsentwicklung am Würfel	23
5 Betonzusammensetzung und Ausgangsstoffe	13	8.5.2	Festigkeitsentwicklung an Bohrkernen	24
5.1 Betonzusammensetzung	13	8.5.3	Festigkeitsentwicklung mittels gewichteter Reife	25
5.2 Bewertung der Gesteinskörnung bezüglich Alkali-Kieselsäure-Reaktion	13	8.6	Mittlere Texturtiefe	27
5.3 Charakterisierung der Zemente	14	9 Prüfungen durch die BAST	27	
6 Laboruntersuchungen im Rahmen der (erweiterten) Erstprüfung	14	9.1 Dokumentation des Reißens	27	
6.1 Allgemeines	14	9.1.1 Allgemeines	27	
6.2 Schwindversuche an den Betonrezepturen	14	9.1.2 Anzahl gerissener Fugen	27	
6.3 Temperaturentwicklung während der Zementhydratation	15	9.1.3 Verteilung der Rissöffnungsweiten	28	
6.4 Betonfestigkeit	16	9.2 Verbundprüfung	29	
6.4.1 Druckfestigkeitsentwicklung	16	10 Zusammenfassung	30	
6.4.2 Biegezugfestigkeit	16	11 Ausblick	31	
6.4.3 Spaltzugfestigkeit	17	Literatur	31	
6.5 Gewichtete Reife	17	Bilder	32	
7 Errichtung der Versuchsstrecke	18	Tabellen	33	
7.1 Allgemeines	18			
7.2 CEM III-Versuchsabschnitt	18			
7.3 CEM I-Referenzabschnitt	19			
7.4 Einbau Reifecomputer	19			
7.5 Aufzeichnung der Lufttemperatur	19			
8 Prüfungen im Rahmen der erweiterten Eigenüberwachung	21			

Die Anhänge A–H zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:
<https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Abkürzungen

BAB	Bundesautobahnen
EP	Erstprüfung
EÜ	Eigenüberwachung
gGK	grobe Gesteinskörnung
HÜS	Hüttensand
NM	Nachmittag
OB	Oberbeton/Waschbeton mit gGK < 8 mm
QSF	Querscheinfuge
RÖW	Rissöffnungsweite
UB	Unterbeton mit gGK > 8 mm
VM	Vormittag
WB	Waschbeton

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns bei der TPA GmbH Köln und der STRABAG Großprojekte GmbH bedanken. Vor allem gilt unser Dank Herrn David Leser für die hervorragende Zusammenarbeit, die Bereitstellung der Ergebnisse aus der Erstprüfung und Eigenüberwachung sowie Fotos, die in diesen Bericht eingeflossen sind, sowie Herrn Thomas Wolf für die enge und vertrauensvolle Kooperation zwischen STRABAG und BAST

Ein besonderer Dank geht auch an Herrn Professor Breitenbücher für die Unterstützung bei der Prüfkonzepterstellung und an die verschiedenen Mitarbeiter der Schwenk Zement KG, die das Bauprojekt mit großem Interesse verfolgt haben.

1 Aufgabenstellung

Bisher werden auf BAB in Deutschland unterschiedliche Betone für Unter- und Oberbeton eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass für den weniger stark beanspruchten Unterbeton Gesteinskörnungen mit verringerten Anforderungen an z. B. Polierwiderstand, Bruchflächigkeit, Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand sowie die Kornform eingesetzt werden können. Jedoch ist die Verwendung unterschiedlicher Zemente bisher nicht vorgesehen (Stand Oktober 2020). Grundlage dieser Regelung sind die TL Beton-StB 07 Abschnitt 2.2.2. Mit wenigen Ausnahmen kommen fast ausschließlich Portlandzemente (CEM I) zum Einsatz.

Im Kontext mit der Vermeidung einer betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) nach ARS 04/2013 ist die Verfügbarkeit von Gesteinskörnungen für den Betonstraßenbau deutlich eingeschränkt. Im Sinne einer verbesserten Verfügbarkeit würde sich die Verwendung von CEM II- oder CEM III/A-Zementen deutlich positiver auswirken und der zunehmenden regionalen Rohstoffknappheit entgegenwirken. Des Weiteren bietet die Verwendung von HÜS-haltigen Zementen (CEM III) einen erheblichen Beitrag bei der Reduzierung von Emissionen, um die künftigen Klimaziele zu erreichen. Bei der Klinkerherstellung für Portlandzement werden erhebliche Mengen CO₂ freigesetzt. Zementtypen wie CEM II und CEM III weisen hingegen eine bessere Umweltbilanz auf.

In dem Forschungsprojekt „Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte“ (1) wurden erste Ansätze zur Verwendung von Zementen mit hohem Klinkeranteil für den hochbelasteten, dünnen Oberbeton in Verbindung mit Zementen mit reduziertem Klinkeranteil für den Unterbeton erarbeitet. Aus den Ergebnissen wurde ein Konzept für die Erstellung der ersten CEM III-Versuchsstrecke abgeleitet. Das Erprobungskonzept soll als umweltfreundliche Alternative zur bisherigen Bauweise mit der ausschließlichen Verwendung von CEM I-Zementen im Unter- und Oberbeton dienen.

2 Lage und Aufbau der Versuchsstrecke

Der etwa 1.350 m lange Versuchsabschnitt liegt auf der BAB A7 bei Wörnitz in Fahrtrichtung Ulm zwi-

schen km 729,165 und km 730,515. Er wurde zweischichtig auf einer Schottertragschicht errichtet und zeichnet sich dadurch aus, dass im Oberbeton CEM I 42,5 N (sd) eingesetzt wurde, im Unterbeton jedoch ein CEM III 42,5 N mit ca. 40 M.-% HÜS. Daran angrenzend folgt der Referenzabschnitt, welcher auf herkömmliche Bauweise – CEM I in Unter- und Oberbeton – errichtet wurde, mit einer Gesamtlänge von ca. 1.300 m.

Die Gesamtdicke der Fahrbahndecke soll zwischen 29 bzw. 32 cm betragen. Zur Lagesicherung im leicht abschüssigen Gelände wurden in regelmäßigen Abständen verdickte Platten mit ca. 40 cm Dicke angeordnet. Am linken Fahrbahnrand sind Straßenabläufe über einer Drainageleitung in die Betonplatte eingelassen.

3 Stand der Wissenschaft

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte“ (1) wurden die notwendigen betontechnologischen Kenntnisse gewonnen, um eine Versuchsstrecke mit unterschiedlichen Zementen in Ober- und Unterbeton zu errichten. Es wurde nachgewiesen, dass sich unter den spezifischen Randbedingungen von Fahrbahndecken aus Beton weder für Herstellung, Nutzung sowie Dauerhaftigkeit (insbesondere bei Frost-Taumittleinwirkung) Nachteile oder Beeinträchtigungen ergeben. Insbesondere wurde dabei das Verbund- und Verformungsverhalten von Ober- und Unterbeton berücksichtigt.

Auf Grundlage der Ergebnisse aus o. g. Forschungsbericht ist nicht von Problemen durch unterschiedliche Festigkeitsentwicklung von UB und OB in der jungen Betondecke auszugehen. Die Festigkeitsverläufe der unterschiedlichen Rezepturen und Bindemittel weisen im zweischichtigen Gesamtsystem große Ähnlichkeit auf und sind daher kompatibel. Aus den bei unterschiedlichen Prüftemperaturen gewonnenen Festigkeitskennwerten wurde geschlossen, dass die Decke auch bei kühler Witterung bereits nach kurzer Zeit mit Baufahrzeugen befahren werden kann (z. B. für Fugenschnitt, Ausbürsten des Oberflächenmörtels bei Waschbeton usw.).

U. a. wurde in (1) ermittelt, dass der Unterbeton zum Zeitpunkt des Ausbürstens eine kritische

Druckfestigkeit in Höhe von rd. 2,5 N/mm² aufweisen muss, um die vorherrschende Zugspannung durch die Befahrung rissfrei aufnehmen zu können. Das Ausbürsten des oberflächennahen Mörtels bzw. die Herstellung einer ausreichenden Rautiefe ist erst ab einer Druckfestigkeit des Oberbetons von rd. 4 N/mm² (gemessen bei 20 °C) möglich. Die Herstellung der Waschbetonoberfläche kann, bei einer Herstell- und Lagerungstemperatur von 10 °C, in einem Zeitfenster von 18,5 bis 23 Stunden nach Betoneinbau durchgeführt werden.

Weiterhin ist der günstige Einfluss von HÜS-haltigen Zementen auf das AKR-Schädigungspotenzial hervorzuheben, welches ermöglicht, bisher ungeeignete Gesteinskörnung für den Straßenbau nutzbar zu machen. Die Ergebnisse zum Frost-Tausalz-Widerstand des Unterbetons weisen darauf hin, dass dieser sich zwar mit zunehmendem HÜS-Gehalt bis 40 % (CEM III/A) im Zement stetig verringert. Dennoch bewegten sie sich mit < 400 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln in einem sehr günstigen Bereich. Herausgestellt wurde jedoch auch, dass zum Erreichen des benötigten Frischbetonluftgehaltes mit steigendem HÜS-Gehalt (< 30 M.-%) eine deutlich höhere Zugabe von Luftporenbildner notwendig war.

Der Schichtenverbund zwischen Ober- und Unterbeton zeigte trotz unterschiedlicher Zement/Beton-eigenschaften gute Haftzugfestigkeiten. Die Verbundfestigkeit war in den Untersuchungen mindestens so hoch wie die Betonzugfestigkeit. Auch bei Belastung wies der Verbund – im Vergleich zur Standardbauweise – ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der maximal aufnehmbaren Scherspannungen in der Verbundfuge auf. Es ist davon auszugehen, dass die Verbundfuge als Grenzschicht zwischen den zwei Betonen bei der ordnungsgemäßen Herstellung „frisch in frisch“ keine Schwächezone darstellt. Schlussendlich wurde in Untersuchungen an den einzelnen Betonen (Ober- und Unterbetone) zum Langzeitverhalten des Verbundsystems festgestellt, dass das Bindemittel in den meisten Fällen nur einen untergeordneten Einfluss auf die Verformungseigenschaften aufweist.

4 Untersuchungsumfang

Im Zuge der Errichtung einer Versuchsstrecke mit HÜS-haltigen Zement im Unterbeton und Portlandzement im Oberbeton wurden durch die STRABAG/

TPA Köln (TPA), Ruhr-Universität Bochum (RUB) und die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) verschiedene Untersuchungen geplant, die von den entsprechenden Stellen durchzuführen waren. Hierbei lag das Hauptaugenmerk der Untersuchungen, neben der Bestimmung physikalisch/mechanischer Eigenschaften von Ober- und Unterbeton, auf dem Verbund- und dem Verformungsverhalten der Betondecke.

Der geplante Untersuchungsumfang stellte sich folgendermaßen dar:

- Erweiterte Erstprüfung (TPA), inkl.
 - Schwindversuche an den drei Betonen (Oberbeton mit CEM I, Unterbeton mit CEM I und CEM III) mittels Schwindrinne über 7 Tage
 - Bestimmung der Hydratationswärmeentwicklung an den drei Betonen in wärmegeprägten Würfeln (150 mm Kantenlänge)
 - Festigkeitsentwicklung der drei Betone
 - Druckfestigkeit nach 2, 3 und 7 Tagen (an jeweils drei wärmegeprägten Würfeln), nach 28 Tagen (an drei Norm-Würfeln)
 - Biegezugfestigkeit nach 7 und 28 Tagen (je Prüftermin 3 Biegebalken)
 - Spaltzugfestigkeit nach 7 und 28 Tagen
 - Gewichtete Reife des Betons
- Erweiterte Eigenüberwachung (TPA), inkl.
 - einbaubegleitende Untersuchung der Betontemperaturentwicklung von Ober- und Unterbeton
 - Erfassung klimatischer Randbedingungen während der Herstellung (über mind. zwei Wochen)
 - Temperaturentwicklung (Reifecomputer) in mind. drei Tiefen über zwei Wochen
 - Festigkeitsentwicklung der Betone für das Prüfalter 7 d, 28 d, 56 Tagen und 180 d
 - Druckfestigkeit am UB
 - Spaltzugfestigkeit am OB und UB
 - Ableitung der Festigkeitsentwicklung anhand der Daten des Reifecomputers über zwei Wochen
- Dokumentation des Bauverlaufs (TPA/BASt)

- Dokumentation des Reißens nach dem Kerbschnitt an Querscheinfugen (BASt)
- Verbundprüfung zwischen OB und UB (RUB im Auftrag der BASt)

5 Betonzusammensetzung und Ausgangsstoffe

5.1 Betonzusammensetzung

Die folgenden Betonzusammensetzungen wurden den Erstprüfungen (2), (3) und (4) entnommen. Alle drei Betone wurden für die Druckfestigkeitsklasse C30/37 und Expositionsklassen XF4, XM2 konzipiert.

Die beiden verwendeten Zemente – CEM I 42,5 N (sd) bzw. CEM III/A 42,5 N – stammen von der Schwenk Zement KG, Werk Mergelstätten. Ferner wurden als Ausgangsstoffe die feine Gesteinskörnung 0/2 aus dem Werk Hohenfeld sowie die groben Gesteinskörnungen des Diabassplitts aus dem ca. 200 km entfernten Werk Stadtsteinach im Oberbeton und des Kalksteinsplitts aus dem nahegelegenen Bettenfeld im Unterbeton verwendet. Als Zusatzmittel wurden einheitlich Fließmittel MasterPozzolith 25BV und Luftporenbildner MasterAir 102 verwendet.

5.2 Bewertung der Gesteinskörnung bezüglich Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Bewertung einer groben Gesteinskörnung bzw. Betonzusammensetzung hinsichtlich einer schädigenden AKR findet laut ZTV Beton-StB 07 (5) nach ARS 04/2013 (6) statt. Für die Gesteinskörnung des Unterbetons fand die bayerische Ergänzung zum ARS 04/2013 - Verfahren 4 (7) Anwendung. Der verwendete Kalksteinsplitt wurde in Alkaliempfindlichkeitsklasse E I der Alkali-Richtlinie des DAfStB (8) eingestuft und es liegen bereits langjährig positive Erfahrung im Betonstraßenbau vor. Auch für die feine Gesteinskörnung ist die Einstufung in E I ausreichend.

In der Baubeschreibung zum Baulos wurde vom Auftraggeber festgelegt, dass Verfahren 4 (7) auch für die Waschbetonoberfläche angewendet werden kann, wenn zwingend ein Zement mit niedrigem Alkaligehalt (< 0,6 M.-%) verwendet wird. Durch das geringe Natriumäquivalent der beiden im Ober- und Unterbeton eingesetzten Zemente (siehe Kapitel 5.3), ist das Potenzial für eine schädigende Reaktion als gering einzuschätzen.

Die Einstufung nach Alkali-Richtlinie ist für alle verwendeten Gesteinskörnungen in Tabelle 2 zusammengestellt.

Rezeptur	Oberbeton 0-8 mm	Unterbeton 0-22 mm Referenzabschnitt	Unterbeton 0-22 mm Versuchsabschnitt
Zement	420 kg/m ³	340 kg/m ³	340 kg/m ³
Wassergehalt	w/z = 0,40	w/z = 0,43	w/z = 0,43
Sand 0/2	507 kg/m ³	534 kg/m ³	532 kg/m ³
Diabassplitt 2/5	552 kg/m ³	-	-
Diabassplitt 5/8	743 kg/m ³	-	-
Kalksteinsplitt 2/8	-	286 kg/m ³	286 kg/m ³
Kalksteinsplitt 8/16	-	519 kg/m ³	518 kg/m ³
Kalksteinsplitt 16/22	-	564 kg/m ³	562 kg/m ³
Fließmittel (FM)	1,26 % v. Z.	0,34 % v. Z.	1,70 % v. Z.
Luftporenbildner (LP)	0,24 % v. Z.	0,29 % v. Z.	0,20 % v. Z.

Tab. 1: Betonrezepturen für Ober- und Unterbeton im Versuchs- und der Referenzabschnitt

Ausgangsstoff	Verwendung in	Alkali-Empfindlichkeitsklasse
feine Gesteinskörnung 0/2, Werk Hohenfeld	Oberbeton, Unterbeton	E I
Diabassplitt, Werk Stadtsteinach	Oberbeton	E I
Kalksteinsplitt, Werk Bettenfeld	Unterbeton	E I

Tab. 2: Einstufung der verwendeten Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie des DAfStB (8)

Parameter	Einheit	Normvorgabe	Prüfwert CEM I 42,5 N (sd)	Prüfwert CEM III/A 42,5 N
Physikalische Kenndaten				
spez. Oberfläche (Blaine)	[cm ² /g]		3006	4096
Mörteltechnische Kenndaten				
Wasseranspruch (DIN EN 196-3)	[M.-%]		25,5	28,6
Raumbeständigkeit (DIN EN 196-3)	[mm]	≤ 10	0,3	1,0
Erstarrungsbeginn (DIN EN 196-3)	[min]	≥ 120	221	197
Druckfestigkeit (DIN EN 196-1)	[MPa]			
2 Tage		≥ 10	17,5	12,3
28 Tage		42,5 - 62,5	61,1	59,0
Chemische Kenndaten				
SO ₃ (DIN EN 196-2)	[M.-%]	≤ 3,5 (CEM I) ≤ 4,0 (CEM III)	2,7	1,6
Na ₂ O-Äquivalent (DIN EN 196-2)	[M.-%]	≤ 0,80 (CEM I) ≤ 1,05 (CEM III)	0,4	0,5 (im Zementanteil)
Cl ⁻ (Chlorid) (DIN EN 196-2)	[M.-%]	≤ 0,10	0,01	0,01
unlös. Rückstand (DIN EN 196-2)	[M.-%]	≤ 5,0	0,8	0,5
Glühverlust (DIN EN 196-2)	[M.-%]	≤ 5,0	2,3	1,2

Tab. 3: Ergebnisse der Zementprüfungen

5.3 Charakterisierung der Zemente

Die in Tabelle 3 aufgeführten Ergebnisse der Zementprüfungen für CEM I 42,5 N (sd) und CEM III/A 42,5 N aus dem Werk Mergelstetten wurden dem jeweiligen aktuellen Prüfzeugnis der Eigenüberwachung entnommen.

Der Grenzwert des Alkaligehalts von Zementen für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton von 0,8 M.-% (CEM I) bzw. 1,05 M.-% (CEM III) wird von beiden Zementen deutlich unterschritten.

6 Laboruntersuchungen im Rahmen der (erweiterten) Erstprüfung

6.1 Allgemeines

An allen drei Betonrezepturen wurde das Fröhschwinden, die Temperaturentwicklung an wärmedämmten Probekörpern sowie die Entwicklung der Druckfestigkeit geprüft. Zudem fand ein Verfahren zur Reifegradbestimmung Anwendung. Die hier dargestellten Werte wurden den jeweiligen Erstprüfungen (2), (3) und (4) sowie (9) entnommen.

6.2 Schwindversuche an den Betonrezepturen

Die Schwindversuche an den drei unterschiedlichen Betonrezepturen wurden im Rahmen der erweiterten Erstprüfung an der TPA Köln in Anlehnung an ÖNORM B 3329 (Vergussmörtel – Anforderungen und Prüfmethode) ermittelt. Hierfür wurden jeweils drei 1 m lange Schwindrinnen (b = 100 mm, t = 60 mm) mit der entsprechenden Betonrezeptur befüllt und die Längenänderung über einen Zeitraum von 7 Tagen kontinuierlich bestimmt. Der durchschnittliche Schwindverlauf an Ober- und Unterbetonrezepturen ist in Bild 1 dargestellt.

Bereits in den ersten zwei Stunden nach Start der Schwindmessungen weisen Ober- und Unterbeton mit CEM I ein annähernd gleich hohes Schwinden von ca. 0,07 bzw. 0,06 mm/m auf. Zu diesem Zeitpunkt ergeben sich bei der Schwindmessung des Unterbetons mit CEM III kaum Änderungen der Ausdehnung. Erst nach 7 Tagen weist der Unterbeton mit CEM III durchschnittlich 0,07 mm/m Schwinden auf und liegt damit um 0,02 mm/m geringfügig unter dem Wert des CEM I-Unterbetons. Das höchste durchschnittliche Schwindmaß zeigt nach 7 Tagen die Oberbetonrezeptur mit 0,13 mm/m. Begründet liegt das im hohen Zementgehalt von 420 kg/m³.

Die Einzelwerte der Messungen können dem Anhang D – Ermittlung des Schwindmaßes entnommen werden. Aus Bild 31 und Bild 32 ist ersichtlich,

Beton		OB (0/8) CEM I	UB (0/22) CEM I	UB (0/22) CEM III	Bemerkungen
Frischbeton					
Frühschwinden über 7 d [mm/m]		-0,13	-0,09	-0,07	Dehnungsmessung in der Schwindrinne
Temperaturoentwicklung [K]		23	21	14	Bestimmung der Temperaturspanne in wärmege- dämmten Würfeln während Zementhydratation
Festbeton					
Druckfestigkeit [N/mm ²]	2 d	34,5	32,4	35,9	an wärmege- dämmten Würfeln
	3 d	39,0	38,8	39,2	
	7 d	48,7	42,6	44,8	
	28 d	56,2	57,3	54,3	Normwürfel
Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	7 d	4,91	4,5	4,52	
	28 d	5,92	5,12	4,87	
Spaltzugfestigkeit [N/mm ²]	7 d	3,44	3,2	2,86	
	28 d	4,07	3,69	3,57	

Tab. 4: Übersicht über die Ergebnisse der (erweiterten) Erstprüfung

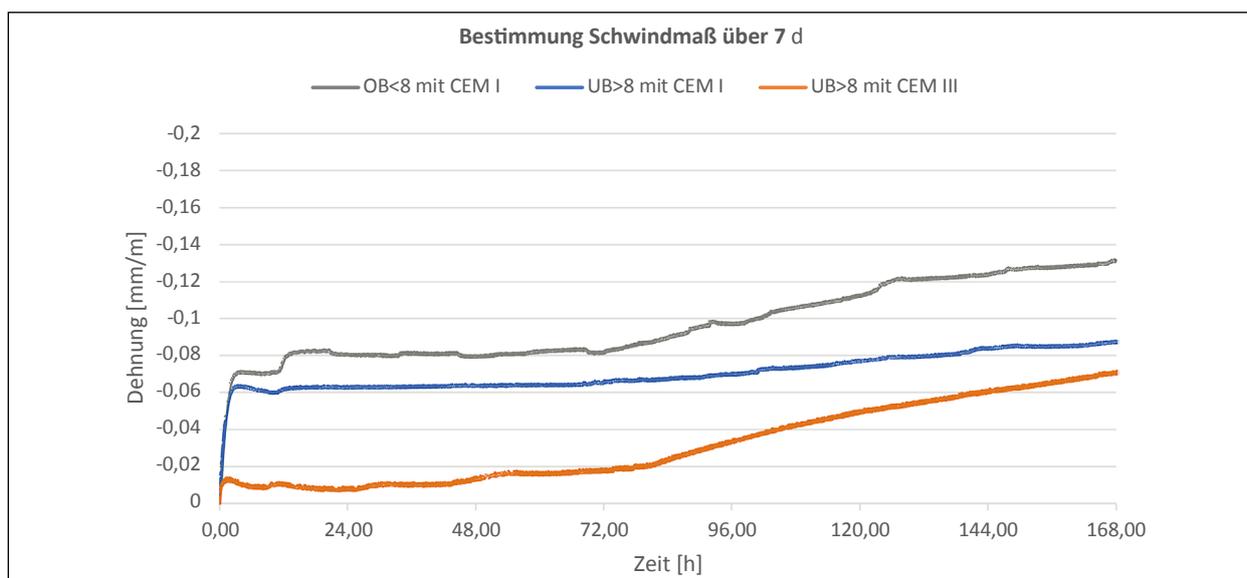


Bild 1: Durchschnittliches Frühschwinden der Betonrezepturen

dass jeweils eine der drei Schwindrinnen mit CEM I in OB und UB ein nur geringes Schwindmaß aufweist und somit das durchschnittlich ermittelte Schwindmaß erniedrigt.

6.3 Temperaturentwicklung während der Zementhydratation

An wärmege-dämmten Würfelschalungen (Kantenlänge = 150 mm) wurde die Temperaturentwicklung des Betons kontinuierlich über einen Zeitraum von 7 Tagen bestimmt. Hierfür wurde der Deckel der Styroporschalung mit einem Temperaturmessfühler versehen, welcher in der Würfelmitte platziert wurde. Die Herstellung und Lagerung der Probekörper

erfolgte dabei in Anlehnung an DIN EN 12390-2. Aus den Differenzen zwischen den Temperaturen der Frischbetone und den während des Erhärtungsprozess am höchsten gemessenen Temperaturen lassen sich ggf. Hinweise auf temperaturbedingte Spannungen ableiten, siehe Bild 2.

Der UB mit CEM III erreicht nach ca. 18 Stunden höchstens 41 °C und weist mit 14 K eine erwartungsgemäß geringe Temperaturdifferenz während der Zementhydratation auf. Die beiden Unter- und Oberbetonrezepturen mit CEM I weisen eine Maximaltemperatur von jeweils 46 °C nach ca. 12 bis 18 Stunden auf. Die ermittelte Differenz zwischen dem Frisch- und dem jungem Festbeton beträgt 21 bzw. 23 K.

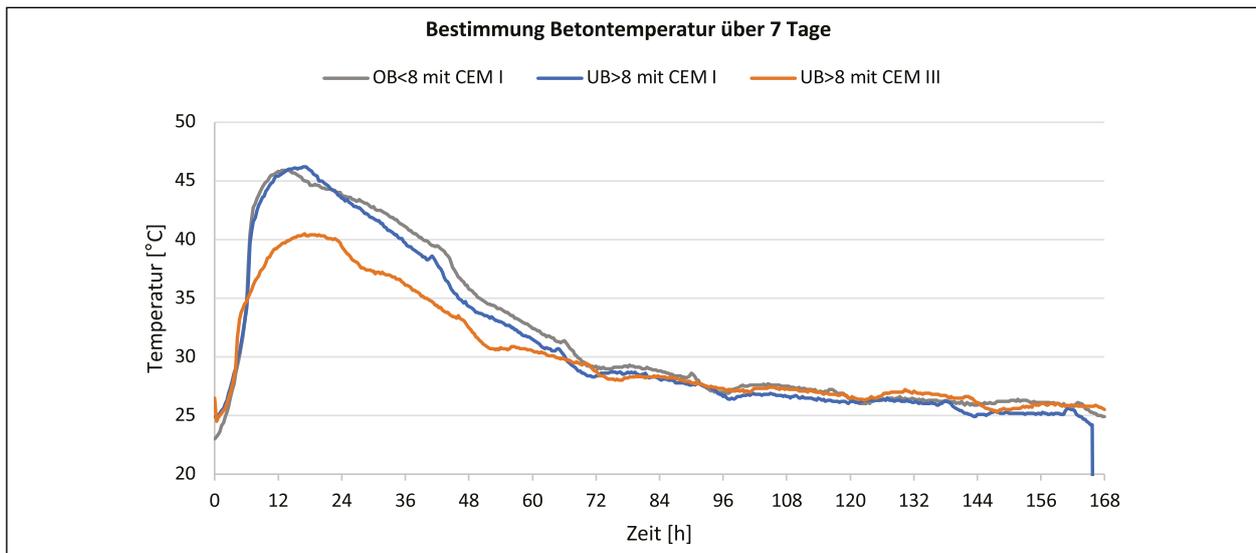


Bild 2: Temperaturentwicklung während der Zementhydratation

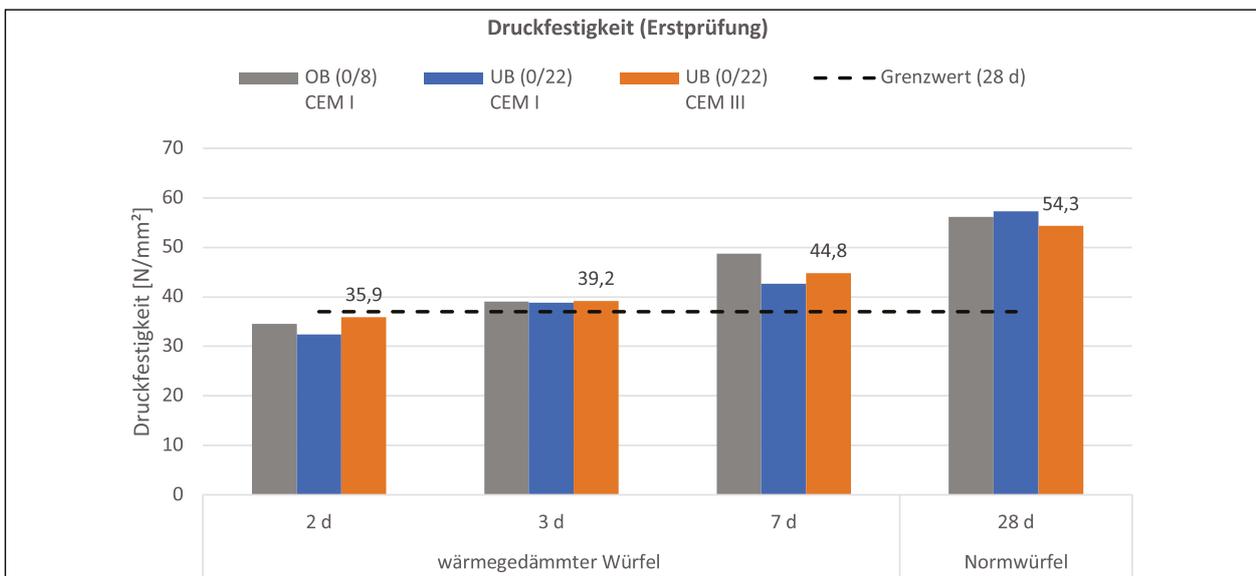


Bild 3: Entwicklung der Druckfestigkeit der drei Betone (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)

6.4 Betonfestigkeit

6.4.1 Druckfestigkeitsentwicklung

Die Frühfestigkeiten der drei Betone wurden zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Nach 2, 3 und 7 Tagen wurden die Druckfestigkeiten an jeweils drei wärmegeämmten Probekörpern, siehe Kapitel 6.3, ermittelt. Die Bestimmung der 28 Tage-Festigkeit erfolgte gem. DIN EN 12390-3. Alle Ergebnisse sind in Tabelle 4 enthalten und in Bild 3 dargestellt.

Aus Bild 3 wird ersichtlich, dass die Festigkeitsentwicklung der drei Betone, trotz unterschiedlichem Zementgehalt und -art, sehr ähnlich verläuft. Bereits nach 2 Tagen werden die Anforderungen an frühhochfesten Beton von allen drei Betonen eingehalten ($f_{cm2,cube} \geq 30 \text{ N/mm}^2$). Der UB mit CEM III

weist mit $35,9 \text{ N/mm}^2$ nach 2 Tagen in der wärmegeämmten Form eine überraschend schnelle Festigkeitsentwicklung auf. Nach 3 und 7 Tagen zeigen die Unterbetone mit CEM I und CEM III eine ähnlich schnelle Zunahme der Festigkeit. Nach 28 Tagen beträgt der Unterschied zwischen der höchsten (UB CEM I) und der niedrigsten (UB CEM III) durchschnittlichen Festigkeit 3 N/mm^2 . Die Anforderung der TL Beton-StB (nach 28 Tagen: $f_{ck,cube} \geq 37 \text{ N/mm}^2$) wird von allen drei Betonen eingehalten.

6.4.2 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit am Festbeton wurde gem. DIN EN 12390 Teil 5 nach 7 und 28 Tagen an jeweils drei Probekörpern ermittelt. Die Durchschnitts-

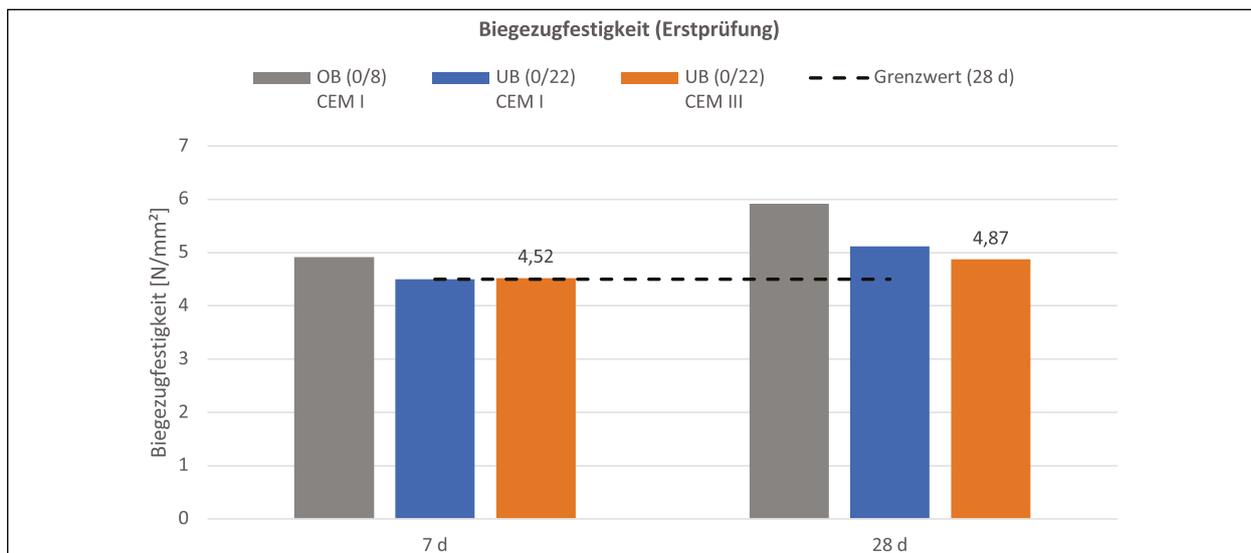


Bild 4: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der drei Betone (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)

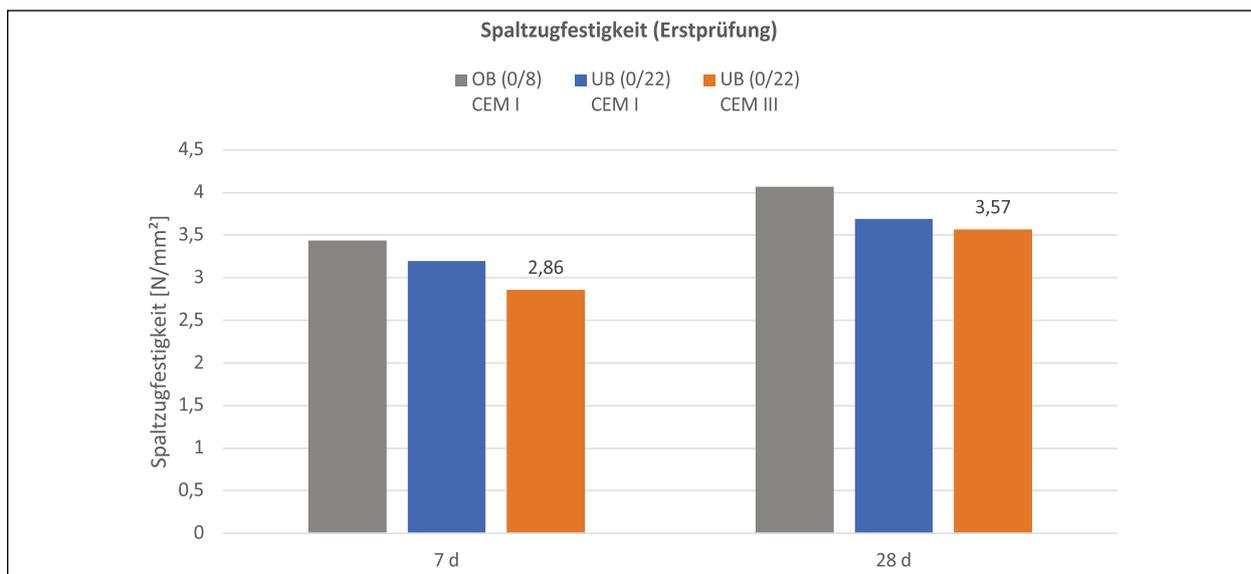


Bild 5: Entwicklung der Spaltzugfestigkeit der drei Betone (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)

werte können Tabelle 4 bzw. Bild 4 entnommen werden.

Die Biegezugfestigkeit des UB mit CEM III liegt nach 7 Tagen mit 4,5 N/mm² auf dem gleichen Niveau wie die des UB mit CEM I und ca. um 0,4 N/mm² unter der des Oberbetons. Die Anforderung der TP Beton-StB (nach 28 Tagen: $f_{cbt} > 4,5$ N/mm²) wird von allen drei Betonen erfüllt.

6.4.3 Spaltzugfestigkeit

Zusätzlich wurden in der Erstprüfung auch die Spaltzugfestigkeiten der Betone nach 7 und 28 Tagen ermittelt. Hierfür wurden je 15 zylindrische Probekörper hergestellt und die herausgearbeiteten Zylinderscheiben gemäß TP B-StB, Teil 3.1.05 ge-

prüft. Die durchschnittlichen Kennwerte der Spaltzugfestigkeiten sind in Tabelle 4 sowie Bild 5 ersichtlich.

Der UB mit CEM III weist nach 7 d mit 2,86 und nach 28 d mit 3,57 N/mm² etwas geringere Werte auf als der UB mit CEM I (3,20 bzw. 3,69 N/mm²).

6.5 Gewichtete Reife

Die Entwicklung der Druckfestigkeit des noch jungen Betons wurde mittels Reifegradverfahren nach de VREE bestimmt (CEMIJ-Methode). Die gewichtete Reife beschreibt dabei die Festigkeitsentwicklung eines Betons in Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung und unter Berücksichtigung der

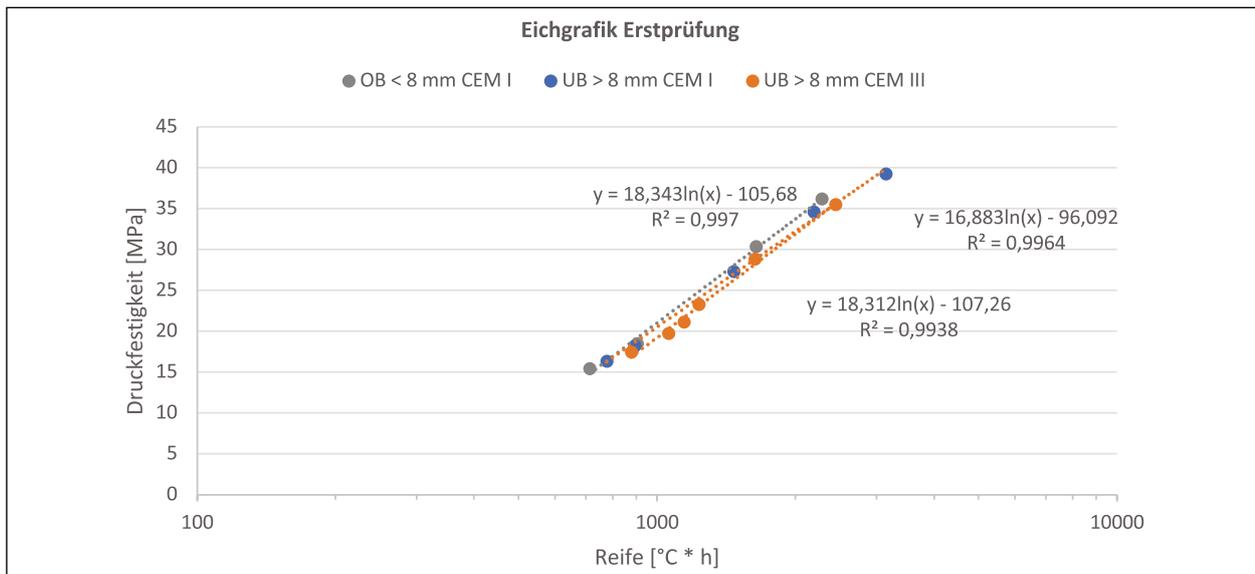


Bild 6 Vergleich Eichgrafiken für gewichtete Reife

Temperaturempfindlichkeit des Bindemittels. Vorteil des Verfahrens ist die Möglichkeit einer computer-gestützten, kontinuierlichen und zerstörungsfreien Ermittlung der Betondruckfestigkeit zwischen 5 MPa und 70 % der 28 d-Festigkeit (11). Das detaillierte Vorgehen des CEMIJ-Verfahrens kann (11) entnommen werden.

Um die Zuordnung der Reife zur Druckfestigkeit zu realisieren, wurde zunächst eine Eichkurve ermittelt, indem je Betonrezeptur eine Regressionsgerade durch verschiedene Messpunkte – Druckfestigkeiten zu verschiedenen Zeitpunkten – gelegt wurde.

Aus Bild 6 wird ersichtlich, dass die aus der gewichteten Reife abgeleitete Festigkeitsentwicklung des UB mit CEM III in den ersten Tagen sehr ähnlich zu den beiden anderen Betonen abläuft. Da sich die Festigkeit des jungen Betons lediglich bis 70 % der 28 d-Festigkeit (hier 37 MPa bei allen drei Betonen angenommen) abschätzen lässt, ist diese Verfahrensweise nur bis ca. 26 MPa gesichert. Diese Festigkeit wird bereits nach 3 bis 4 Tagen erreicht.

7 Errichtung der Versuchsstrecke

7.1 Allgemeines

Der Einbau des CEM III-Versuchsabschnitts erfolgte von Dienstag, den 27.10.2020, bis Freitag, den 30.10.2020. Die Streckenlänge beläuft sich auf ca. 1.350 m. Über den gesamten Einbauzeitraum

von vier Tagen herrschten relativ konstante Lufttemperaturen zwischen 6 °C und 14 °C mit temporären, leichten Niederschlägen. Die relative Feuchte lag zwischen 65 % und 100 %.

Direkt im Anschluss an die Errichtung des Versuchsabschnitts erfolgte zwischen Freitag, dem 30.10.2020, und Mittwoch, dem 4.11.2020, die Errichtung des CEM I-Referenzabschnitts, welcher ca. 1.300 m Länge aufweist.

Eine Skizze zur Versuchsstrecke inklusive der Verortung von Einbaustellen der Reifecomputer und den Fugenkontrollbereichen ist in Bild 28 im Anhang A – Übersicht Versuchsstrecke dargestellt.

7.2 CEM III-Versuchsabschnitt

Während des Einbaus traten keine Probleme auf, die auf die Verwendung von CEM III im Unterbeton zurückzuführen wären. Bereits am nächsten Morgen konnte die junge Fahrbahndecke zum Ausbürsten des Oberflächenmörtels (nach etwa 15 bis 17 h) und dem Schneiden der Fugen (nach ca. 24 bis 26 h) befahren werden.

Nach einer Woche waren die ersten sechs Querscheinfugen im Bereich der Kontrollschächte (Straßenablauf) aufgrund der vorliegenden Querschnittschwächung gerissen, nach zwei Wochen der größte Teil der Fugen. Paketreißen konnte nicht festgestellt werden. Details hierzu werden unter Kapitel 9.1 erläutert.

Bild 7 gibt Impressionen des Bauverlaufs wieder.

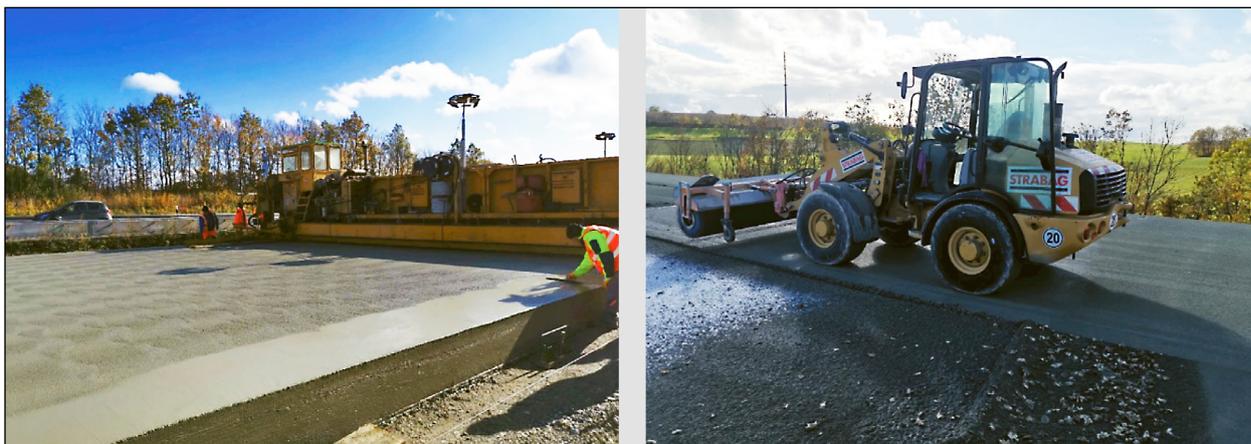


Bild 7: Errichtung des CEM III-Versuchsabschnitts (links) und Ausbürsten der Oberfläche (rechts)



Bild 8: Fertiger Abschnitt im CEM I-Referenzabschnitt (links) und geschnittene QSF (rechts)

7.3 CEM I-Referenzabschnitt

Auch hier herrschten über den gesamten Zeitraum der Errichtung konstante Lufttemperaturen zwischen 5 °C und 18 °C vor. Die relative Feuchte lag zwischen 69 % und 100 %.

Die Festigkeit der Fahrbahndecke war nach ca. 17 h ausreichend hoch, um den Oberflächenmörtel auszubürsten. Nach ca. 28 h erfolgte der Fugenschnitt.

Die Fahrbahndecke im Referenzabschnitt neigte zur Ausbildung von Paketrisen. In Abhängigkeit der Anzahl von Kontrollschächten für den Straßenablauf zeigte sich an den zwei untersuchten Teilabschnitten nach einer Woche eine höhere oder geringere Anzahl gerissener Querschnittsfugen (QSF), siehe Kapitel 9.1.

7.4 Einbau Reifecomputer

Zur Überwachung der Festigkeitsentwicklung von Ober- und Unterbeton wurden insgesamt drei Reifecomputer installiert, indem Temperaturfühler in den Fahrbahndeckenbeton eingebaut wurden. Die Messstationen 1 und 2 befinden sich in der ersten (km 729 + 384, Plattennummer 200044) und der zweiten Tagesleistung (km 729 + 614, Plattennummer 200090) des Versuchsabschnitts. Messstation 3 befindet sich in der dritten Tagesleistung des Referenzabschnitts (km 731 + 767, Plattennummer 200528). Die Reifecomputer ermittelten die Temperaturentwicklung im jungen Beton über einen Zeitraum von ca. zwei Wochen.

7.5 Aufzeichnung der Lufttemperatur

Neben der Aufzeichnung der Betontemperaturen mithilfe der Reifecomputer, wurden auch die Lufttemperaturen im Versuchs- und Referenzabschnitt

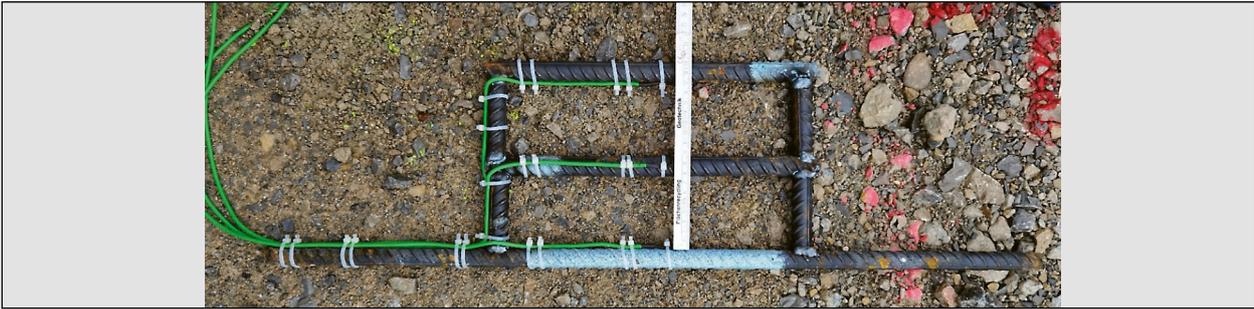


Bild 9: Hilfskonstruktion als Befestigung für Temperaturmessfühler (Quelle: TPA)



Bild 10: Einbau der Hilfskonstruktion mit Temperaturmessfühlern in den Unterbeton (Quelle: TPA)



Bild 11: Messstation mit neben der Fahrbahn liegendem Reifecomputer (Quelle: TPA)

in Bodennähe aufgezeichnet. Im Bauzeitraum, zwischen dem 27.10. und 04.11.2020, wiesen die drei Messstationen einen sehr ähnlichen Kurvenverlauf mit Extremalwerten zwischen $+5\text{ °C}$ und $+18\text{ °C}$ auf. Nach der Fertigstellung des Referenzabschnitts sank die Nachttemperatur leicht unter 0 °C .

Das Diagramm in Bild 12 stellt die Kurvenverläufe der Tages- und Nachttemperaturen der drei Messstationen (1 und 2 im Versuchsabschnitt, 3 im Referenzabschnitt) dar. Als Vergleich sind zusätzlich die Daten der nahegelegenen Wetterstation Pfeffermühle in Bild 12 enthalten.

Aus Bild 12 ist ersichtlich, dass der Referenz- und der Versuchsabschnitt bei nur leicht unterschiedlichen Tagestemperaturen eingebaut wurden. Bemerkenswert ist, dass die Maximaltemperatur der Luft an der Messstation 2 grundsätzlich ca. 6 K hö-

here Werte aufweist als an den beiden anderen. Ggf. wurde der Messfühler an dieser Stelle stark durch die Sonneneinstrahlung beeinflusst. Auch konnte die Lufttemperatur hier nicht kontinuierlich über 14 Tage aufgezeichnet werden, sodass die ermittelten Werte nur bedingt zur Auswertung der Temperaturbedingungen herangezogen werden konnten. Des Weiteren sind in Bild 29 (Anhang B - Klimadaten während des Einbaus) die Klimadaten der nächstgelegenen Wetterstation ersichtlich. Aus den Daten sind Höchsttemperaturen von 20 °C am 2.11. und Tiefsttemperaturen von 6 °C am 27.10. und 4.11. abzulesen, welche sich mit den Daten der Messstation 1 decken. Auch der Lufttemperatursensor von Messstation 3 zeigt eine gute Übereinstimmung zu Messstation 1.

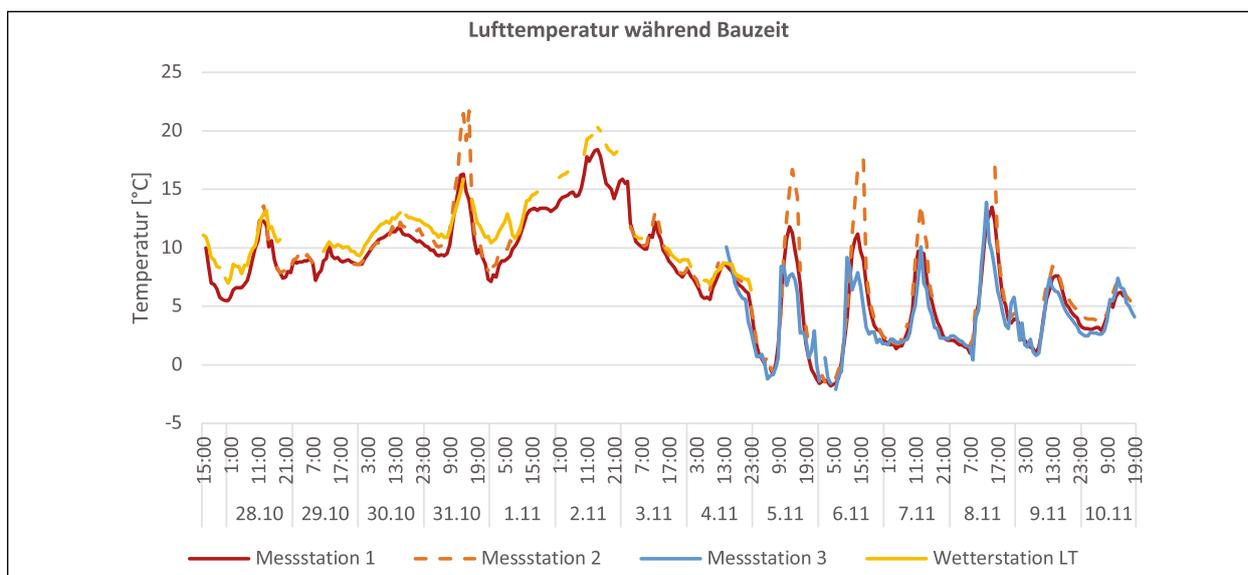


Bild 12: Lufttemperatur verschiedener Messstationen während der Errichtung von Versuchs- und Referenzabschnitt

Beton	CEM III-Versuchsabschnitt		CEM I-Referenzabschnitt		Bemerkungen	
	OB (0/8)	UB (0/22)	OB (0/8)	UB (0/22)		
Frischbeton						
Wasser [kg/m³]	171	144	178	142		
W/Z-Wert [-]	0,41	0,42	0,42	0,42		
Konsistenz [-], V-Maß	1,26	1,36	1,26	1,35		
Rohdichte [kg/dm³]	2,4	2,36	2,37	2,37		
LP-Gehalt [Vol.-%]	4,5	4,1	4,7	4,1		
Festbeton						
Rohdichte [kg/dm³]	28 d	2,41	2,37	2,40	2,38	am Würfel
Druckfestigkeit [N/mm²]	28 d	58,0	60,1	55,2	54,9	
Druckfestigkeit [N/mm²]	7 d	n.b.	35,3	n.b.	43,8	an Bohrkernen
	28 d	n.b.	48,0	n.b.	53,0	
	56 d	n.b.	59,2	n.b.	54,7	
	180 d	n.b.	67,7	n.b.	64,3	
Charakteristische Spaltzugfestigkeit [N/mm²]	7 d	3,53	3,81	3,25	3,68	Mittelwerte aus 3 (7 d) bzw. 12 Bohrkern-Probekörpern (28, 56, 180 d)
	28 d	4,54	4,55	4,07	4,37	
	56 d	4,68	4,97	4,12	4,58	
	180 d	5,40	5,59	4,89	5,35	

Tab. 5: Übersicht über die Ergebnisse (Mittelwerte) der Eigenüberwachung

8 Prüfungen im Rahmen der erweiterten Eigenüberwachung

8.1 Allgemeines

Im Zuge der Bauüberwachung wurden die Prüfungen am Frisch- und Festbeton nach DIN 1048 bzw. DIN EN 12350 und DIN EN 12390 durchgeführt. Die Eigenüberwachung (EÜ) erfolgte durch die TPA GmbH. Die Ergebnisse können Tabelle 5 sowie Anhang E – Ergebnisse der Eigenüberwachung entnommen werden. Detaillierte Informationen sind in

dem Bericht zu zusätzlichen Untersuchungen zur Eigenüberwachung (12) bzw. den EÜ-Berichten (13), (14) und (15) enthalten.

8.2 Frischbetoneigenschaften

Der Luftporengehalt wurde an der Einbaustelle vor dem Einbau geprüft. Die Anforderungen an den LP-Gehalt im Unterbeton (4,0 V.-%) wurden in beiden Rezepturen mit jeweils 4,1 V.-% eingehalten. We-

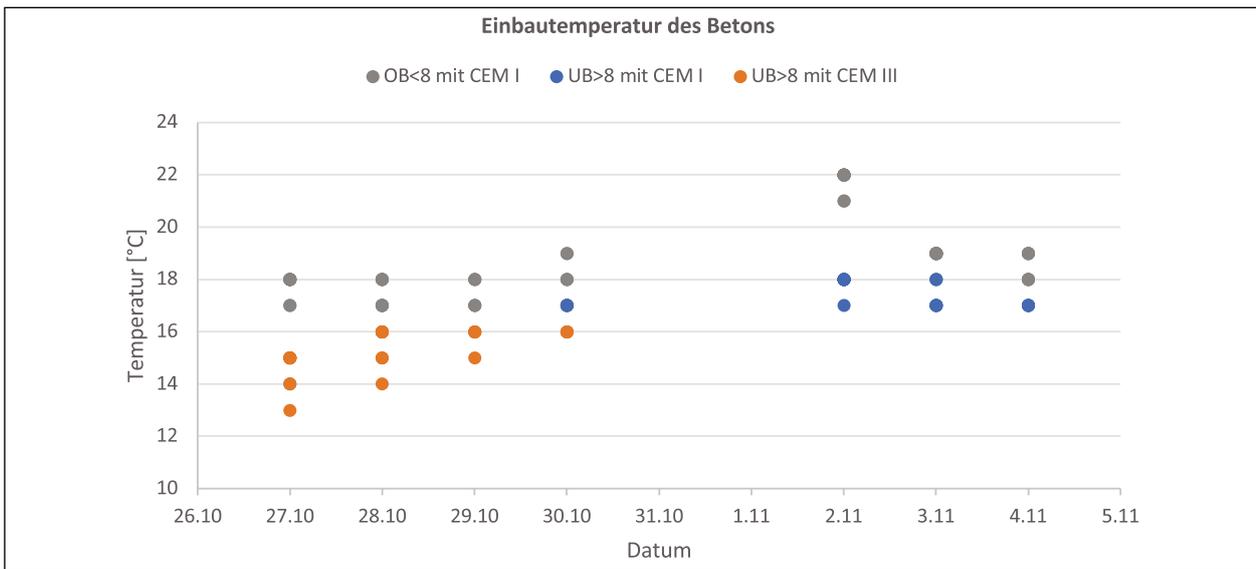


Bild 13: Frischbetontemperatur

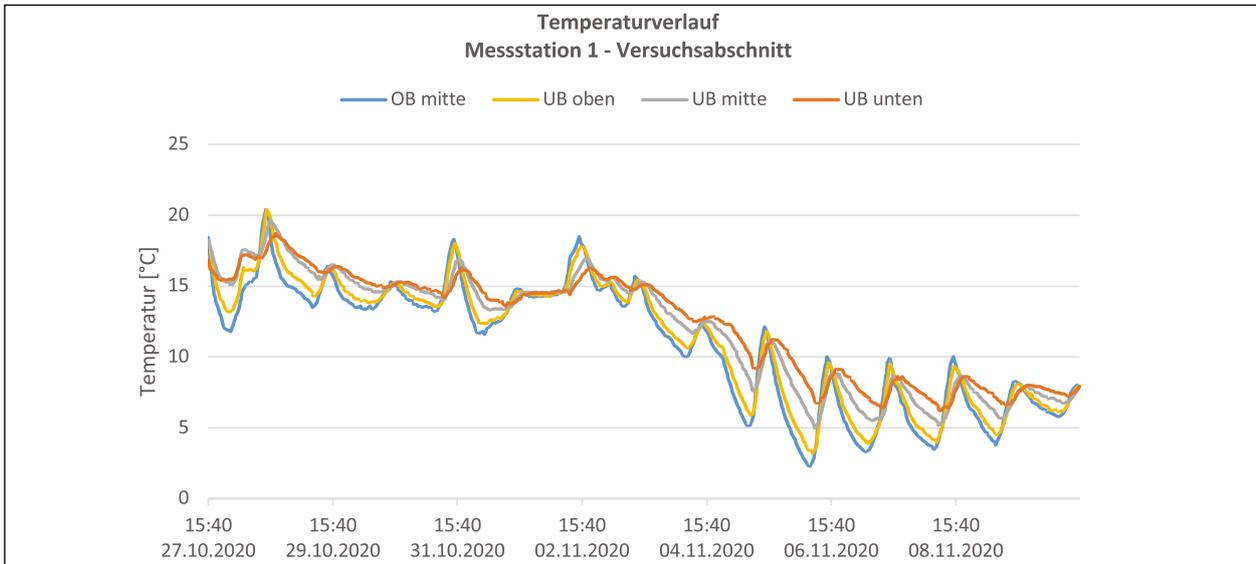


Bild 14: Temperatur der Betondecke im Versuchsabschnitt - Messstation 1

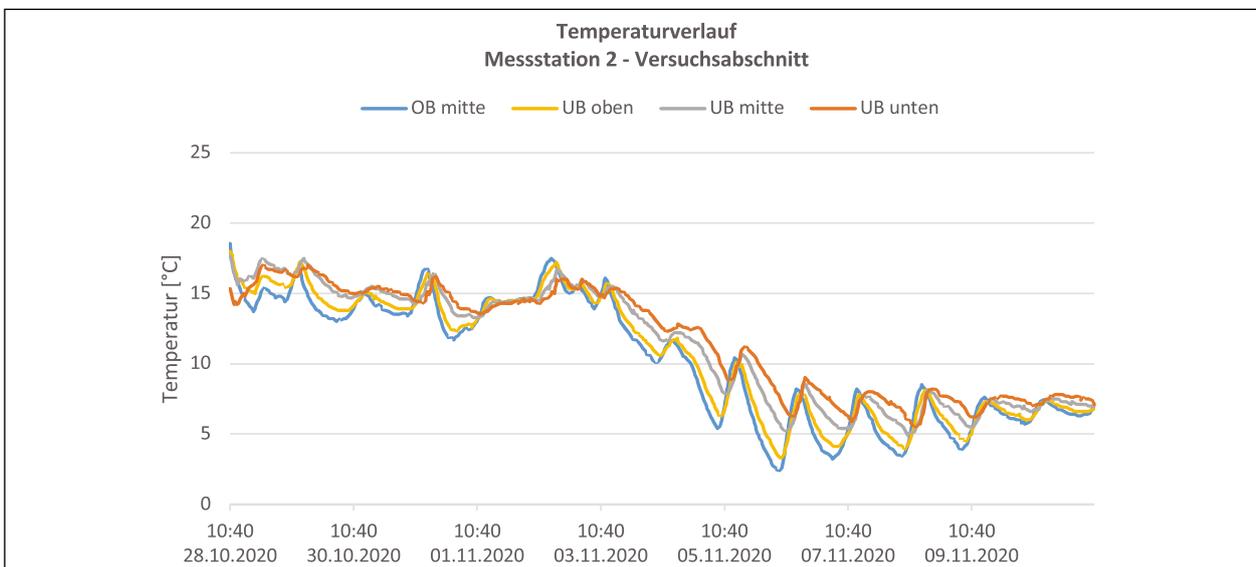


Bild 15: Temperatur der Betondecke im Versuchsabschnitt - Messstation 2

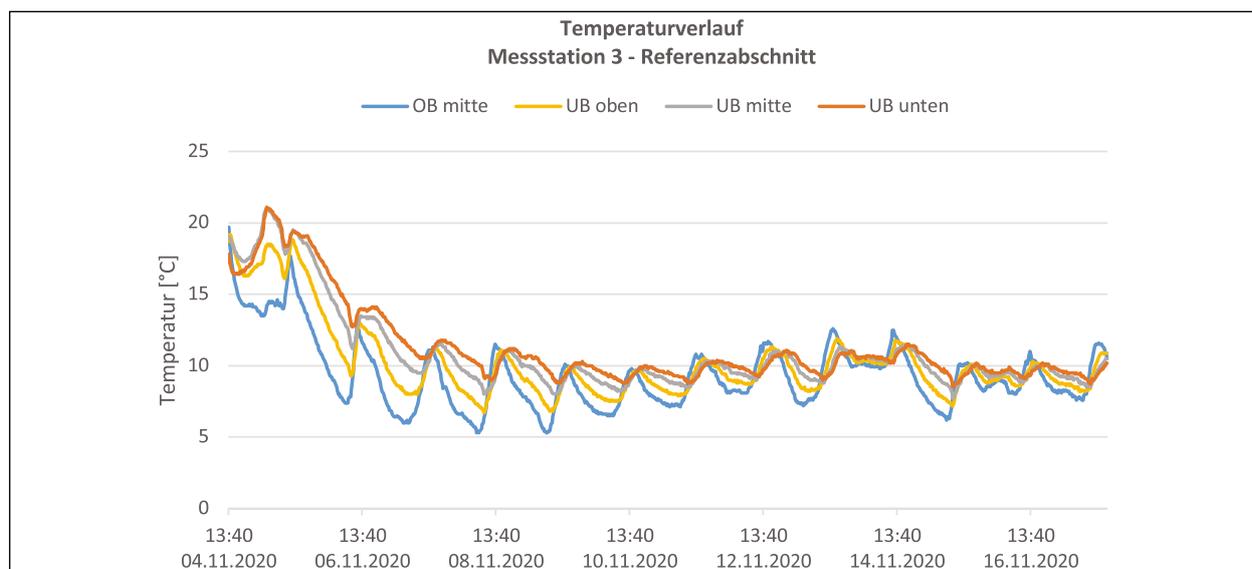


Bild 16: Temperatur der Betondecke im Referenzabschnitt - Messstation 3

der im Versuchs- noch im Referenzabschnitt wurde der LP-Gehalt unzulässig unterschritten.

Die Frischbetoneigenschaften des Oberbetons unterscheiden sich im Bereich des Versuchsabschnitts etwas von dem des Referenzabschnitts, da sich auch die w/z-Werte um ca. 0,1 voneinander differieren. Der LP-Gehalt liegt beim Referenzabschnitt mit durchschnittlich 4,7 V.-% um 0,2 V.-% höher als bei dem Versuchsabschnitt.

Alle Frischbetonkennwerte sind in Tabelle 14 und Tabelle 15 im Anhang E – Ergebnisse der Eigenüberwachung hinterlegt.

8.3 Betontemperatur während des Einbaus

Mittels Einstechthermometer wurden die Frischbetontemperaturen überwacht. Bild 13 gibt die einzelnen Messwerte auf dem Referenz- und dem Versuchsabschnitt wieder.

Da der Einbau des Versuchs- und Referenzabschnittes im Oktober und November erfolgte, wiesen die Betone moderate Temperaturen zwischen 13 und 22 °C auf. Betontechnologische Maßnahmen zum Kühlen bzw. Wärmeschutz der Betonfahrbahn mussten nicht getroffen werden.

8.4 Betontemperaturentwicklung

Mithilfe der eingebauten Messfühler an den drei Messstationen (siehe Kapitel 7.4) wurde der Tem-

peraturverlauf auf vier Ebenen (Oberbeton: mitte, Unterbeton: oben, mitte, unten) sowie die Lufttemperatur aufgezeichnet.

Die Bilder 14 – 16 geben den Temperaturverlauf an den drei Messstationen während der ersten 14 Tage wieder.

Aus den Bildern geht hervor, dass der maximale Temperaturunterschied zwischen Unterbeton-unten und Oberbeton-mitte auszumachen ist. Die beiden Messstationen des Versuchsabschnitts weisen gegenüber dem Referenzabschnitt geringere Unterschiede auf. Zwischen dem Unterbeton mit CEM III und dem Oberbeton mit CEM I werden im Tagesverlauf maximale Temperaturdifferenzen von 5,8 K erfasst, siehe Bild 14 und 15. Der maximale Unterschied zwischen Unter- und Oberbeton des CEM I-Referenzabschnitts liegt bei 7,4 K, siehe Bild 16.

8.5 Festbetoneigenschaften

8.5.1 Festigkeitsentwicklung am Würfel

In Bild 17 sind die während der Eigenüberwachung ermittelten Druckfestigkeiten am Würfel im Vergleich zur Erstprüfung dargestellt. Weiterhin geben die Tabelle 16 und Tabelle 17 im Anhang E – Ergebnisse der Eigenüberwachung Aufschluss über die einzelnen Kennwerte.

Nach 28 Tagen erreicht der UB mit CEM III 60,1 N/mm² Druckfestigkeit am Würfel und liegt damit leicht über der Festigkeit des UB mit CEM I (54,9 N/mm²). Die Werte liegen etwas über den Festigkeiten der

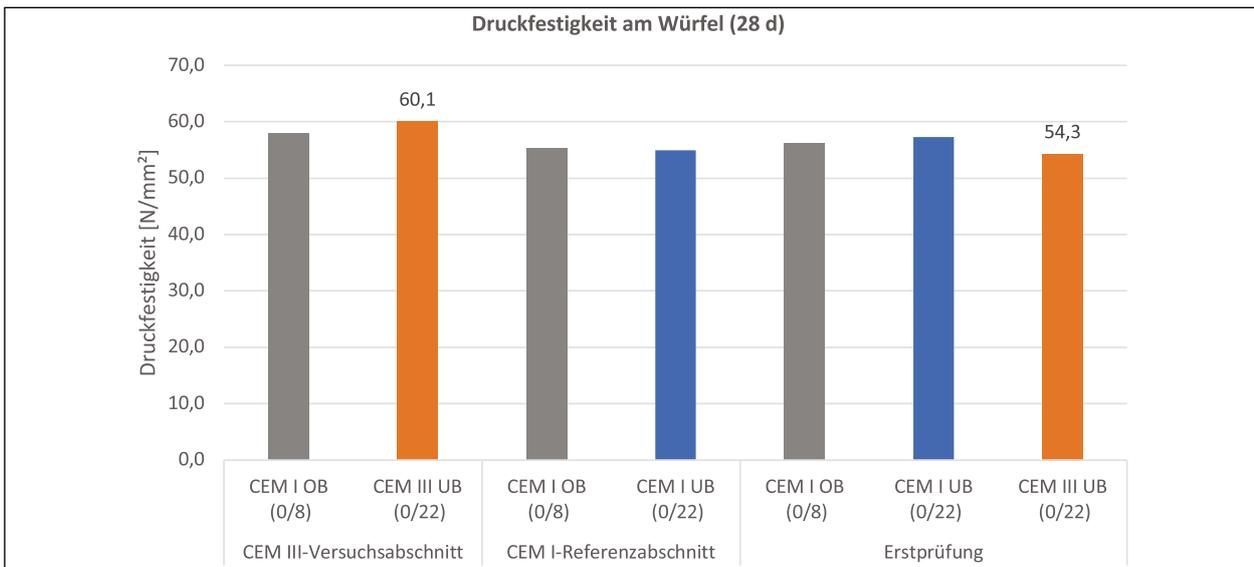


Bild 17: Vergleich der Druckfestigkeit am Würfel nach 28 d (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)

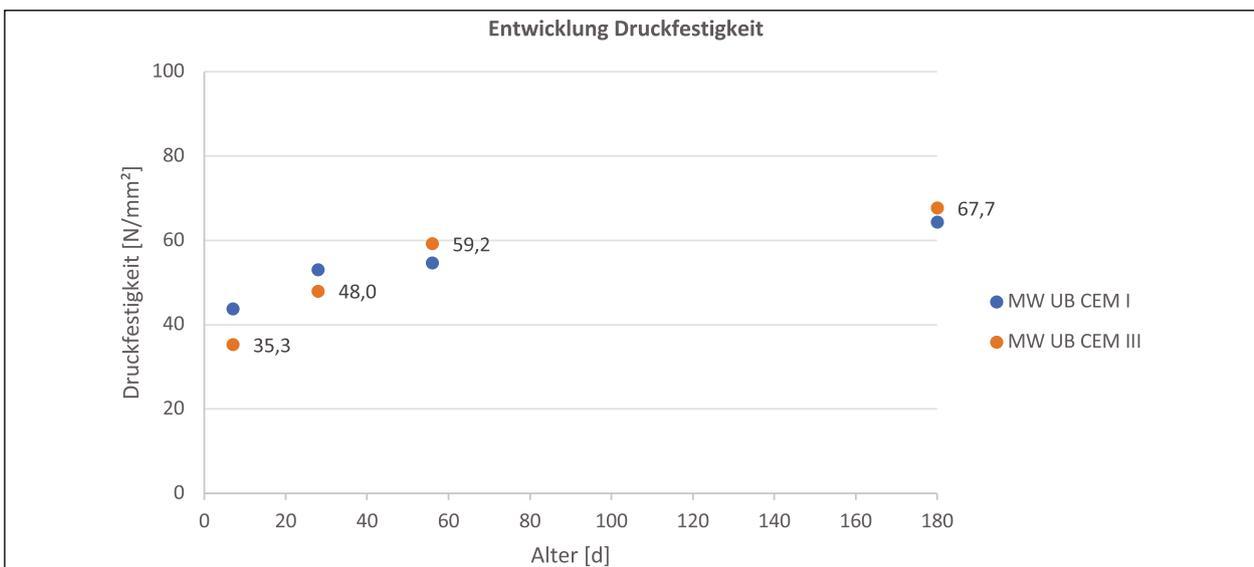


Bild 18: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit ermittelt am Bohrkern (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)

Erstprüfung (50,7 und 49,0 N/mm²). Der Oberbeton erreicht im Mittel (Referenz- und Versuchsabschnitt) 56,5 N/mm² und liegt im Bereich der Erstprüfung (56,2 N/mm²). Die nach TL Beton StB geforderten 37 N/mm² werden von allen drei Betonen erreicht.

8.5.2 Festigkeitsentwicklung an Bohrkernen

Zur Überwachung der Bauleistung wurden aus der fertigen Decke Bohrkern entnommen, anhand derer neben der Deckendicke auch die Entwicklung der Druck- und Spaltzugfestigkeit im Alter von 7, 28, 56 und 180 Tagen ermittelt wurde. Je Bohrkern konnten drei Prüfkörper gewonnen werden für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit am Ober- und Unterbeton sowie Druckfestigkeit am Unterbeton.

Für den Oberbeton konnten aus den Bohrkernen keine Druckfestigkeitsprobekörper gewonnen werden. Die zusätzlich ermittelten Ergebnisse der Spaltzugfestigkeiten im Unterbeton sind in Bild 19 ersichtlich. Eine tabellarische Übersicht findet sich in Anhang E – Ergebnisse der Eigenüberwachung.

Die mittlere Druckfestigkeit des CEM III-Unterbetons betrug nach 7 Tagen 35,3 N/mm² und nach 28 Tagen 48,1 N/mm². Bedingt durch den Einsatz von Hüttensand im Zement liegt die Festigkeit unterhalb des CEM I-Referenzabschnitts mit 43,8 N/mm² bzw. 53,0 N/mm², durch eine verzögerte Hydratation. Bereits nach 56 Tagen wies der Unterbeton mit CEM III durchschnittlich 59,2 N/mm² auf, während der Unterbeton mit CEM I mit 54,7 N/mm², verglichen mit dem 28 d-Wert, annähernd gleich blieb.

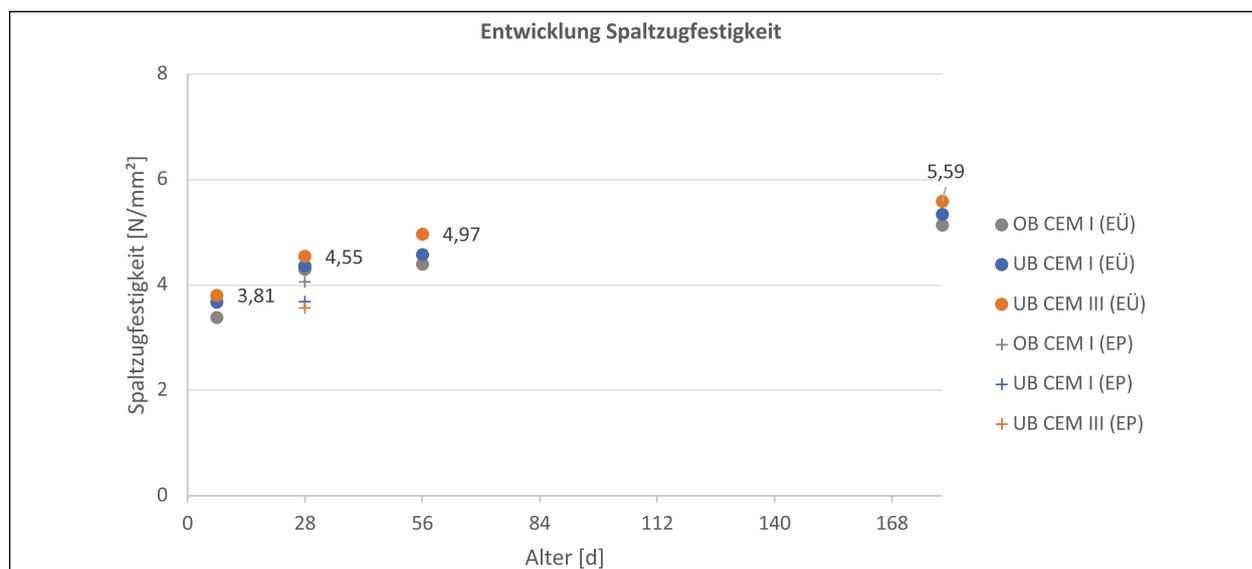


Bild 19: Zeitliche Entwicklung der Spaltzugfestigkeit im OB mit CEM I und UB mit CEM I bzw. CEM III (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)

Betonart:	Sorten-Nr.:	Funktion der linearen Regressionslinie aus Eichgrafik	
		Basis Erstprüfung	Basis Probe-/Werks-Mischung
OB	37-1-8-1-385	$y = 18,341\ln(x) - 105,67$	$y = 18,945\ln(x) - 108,95$
UB (Referenzabschnitt)	37-1-22-1-386	$y = 16,883\ln(x) - 96,092$	$y = 16,103\ln(x) - 93,293$
UB (Versuchsabschnitt)	37-3-22-1-387	$y = 18,308\ln(x) - 107,23$	- *

* keine Bestimmung möglich – Fehler bei Datenaufzeichnung

Tab. 6: Zuordnung Betonsorten/Prüfberichte Eigenüberwachung

Die mittlere Spaltzugfestigkeit beider Unterbetone weist bereits nach 7 Tagen eine vergleichbare Höhe von 3,5 N/mm² auf. Der Unterbeton mit CEM III erreicht nach 28 Tagen 4,6 N/mm² und nach 180 Tagen 5,6 N/mm², mit CEM I 4,4 N/mm² und 5,4 N/mm². Der Oberbeton liegt mit 3,4 N/mm² nach 7 Tagen, 4,3 N/mm² nach 28 Tagen und 5,1 N/mm² nach 180 Tagen in einem vergleichbaren Festigkeitsbereich.

Im Vergleich zwischen Erstprüfung und Eigenüberwachung lassen sich am Bauwerk nach 28 Tagen teilweise günstigere Spaltzugfestigkeiten feststellen.

8.5.3 Festigkeitsentwicklung mittels gewichteter Reife

Durch die Bestimmung der gewichteten Reife lässt sich die Druckfestigkeit der drei Betone zerstörungsfrei prüfen. Erfahrungsgemäß ist die Ableitung der Druckfestigkeit unter bestimmten Randbedingungen zuverlässiger als die Prüfung mit dem Rückprallhammer. Die eingebauten Messfühler (siehe Kapitel 7.4) bestimmen den Temperaturver-

lauf in verschiedenen Höhen des erhärtenden Betons und der Reifecomputer berechnet daraus die Entwicklung der Reife. Mithilfe einer Eichgrafik kann von der Reife auf die Druckfestigkeit geschlossen werden, um daraus den optimalen Zeitpunkt für das Ausbürsten bzw. für den Fugenschnitt abzuleiten.

In der jeweiligen Erstprüfung wurden die bestehenden Eichgrafiken pro Betonart mit Prüfungen am werksgemischten Beton (aus Probemischungen) präzisiert, siehe auch Kapitel 6.5. Die erneute Bestimmung der Eichgrafiken erfolgte nach dem in den zusätzlichen Untersuchungen zur Erstprüfung (9), Kapitel 2.4 beschriebenen Verfahren an fünf Probekörpern.

Für die zerstörungsfreie Bestimmung der Druckfestigkeit am Bauteil wurden die in Tabelle 6 hervorgehobenen Funktionen verwendet.

Das Bild 20 gibt die mittels gewichteter Reife ermittelten Druckfestigkeiten über die ersten sieben Tage an den drei Messstationen wieder. Dargestellt sind jeweils die ermittelten Werte zum OB und dem mittleren Drittel des UB. Die Kurvenverläufe zeigen die Festigkeitsentwicklung ab 5 N/mm². Zusätzlich ist

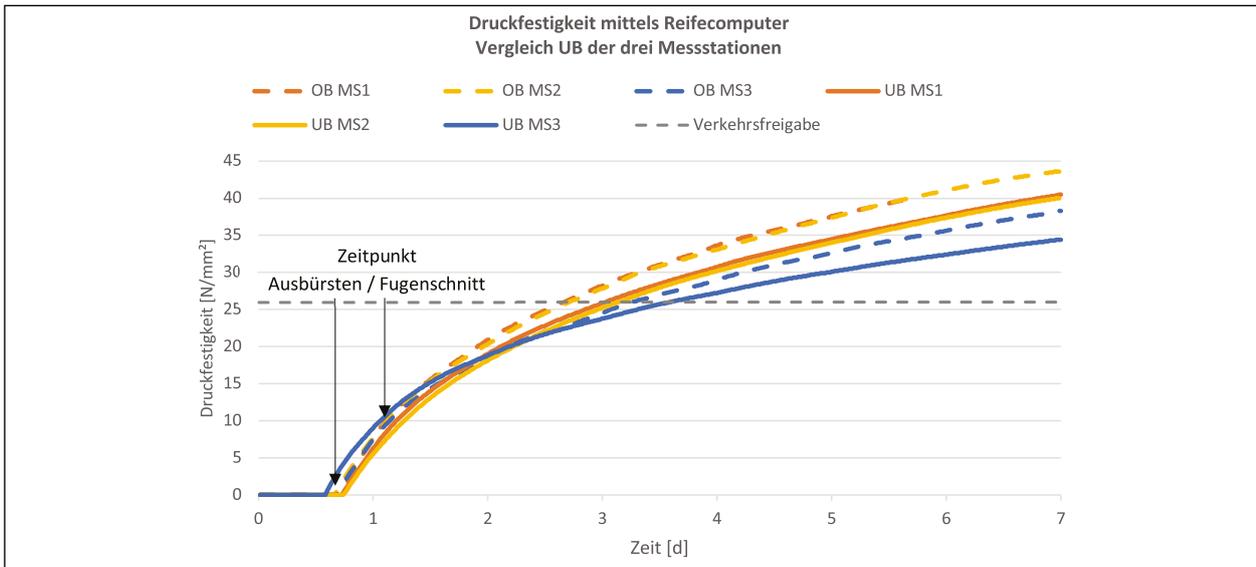


Bild 20: Vergleich der gewichteten Reife für OB und UB an den drei Messstationen

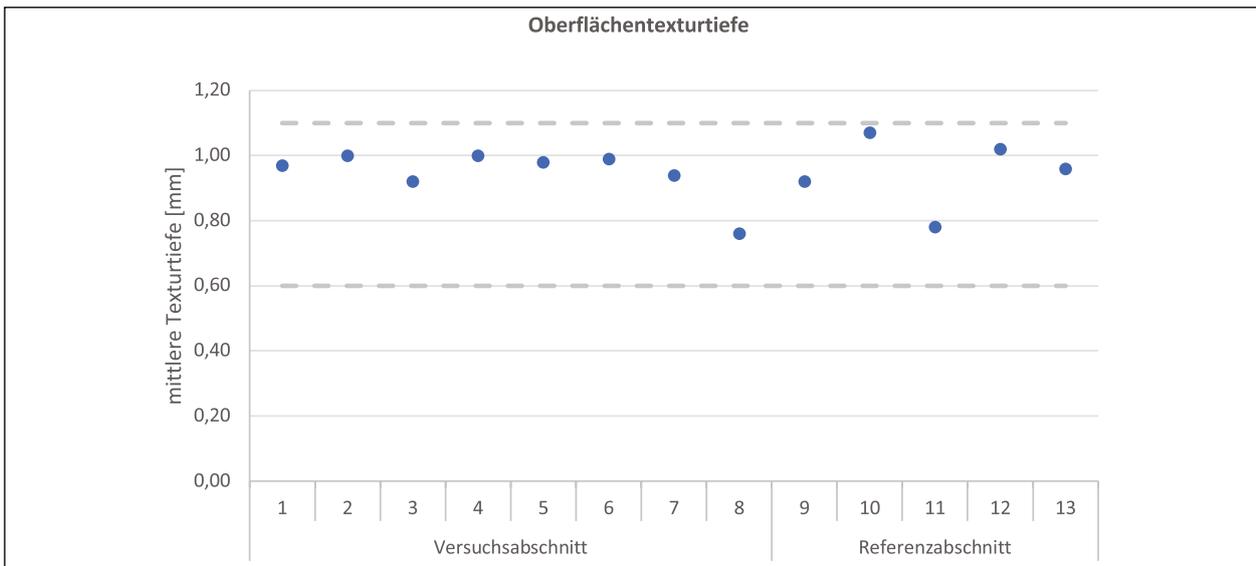


Bild 21: Texturtiefe im Versuchs- und Referenzabschnitt

die in der ZTV Beton-StB 07 geforderte Mindestbetondruckfestigkeit von 26 N/mm² zur Bestimmung des Zeitpunktes einer möglichen Verkehrsfreigabe eingezeichnet.

Die Kurvenverläufe für die im Fahrbahndeckenbeton in verschiedenen Höhen verbauten Temperaturmessfühler können Anhang F – Reifecomputer entnommen werden. Vergleichend ist in diesem Bild auch die mittlere Druckfestigkeit, ermittelt an Bohrkernprobekörpern (siehe Kapitel 8.5.2), dargestellt.

Die Messstationen 1 und 2 zeigen die Ergebnisse der Reifemessung aus dem CEM III-Versuchsabschnitt. Aus dem Bild wird ersichtlich, dass durch den Reifecomputer eine Festigkeit des Oberbetons von 4 N/mm², welche laut (1) zur Herstellung der

Oberflächentextur erforderlich ist, frühestens nach 20 h ermittelt wird (Oberbeton des Versuchsabschnitts, Messstation 2). Zumindest für die geringen Festigkeitskennwerte werden die ermittelten Zeitpunkte als unrealistisch erachtet, da nach (1) die notwendige Frühfestigkeit des Fahrbahndeckenbetons früher erreicht wird.

Aus der Grafik kann abgeleitet werden, dass sich die Festigkeit sowohl im OB als auch im UB im Bereich des Versuchsabschnitts schneller entwickelt als im Referenzabschnitt. Das kann mit der etwas kühleren Witterung zum Zeitpunkt der Errichtung des Referenzabschnitts begründet werden.

Nach weniger als vier Tagen wird der Sollwert zur Verkehrsfreigabe von allen Betonen erreicht.

8.6 Mittlere Texturtiefe

Die mittlere Texturtiefe der Waschbetonoberfläche wurde mittels Sandfleckverfahren zu 0,95 mm ermittelt. Alle Einzelwerte befinden sich zwischen 0,6 und 1,1 mm und erfüllen die Sollvorgaben.

9 Prüfungen durch die BAST

9.1 Dokumentation des Reißens

9.1.1 Allgemeines

Vergleichend wurden an jeweils 40 Fahrbahnplatten an einem Kontrollbereich des CEM III-Versuchsabschnitts und zwei Bereichen des CEM I-Referenzabschnitts die Anzahl und die Weite der gerissenen QSF aufgenommen. Der Kontrollbereich des Versuchsabschnitts liegt im Abschnitt der ersten Tagesleistung, in der Nähe der Reifecomputer-Messstation 1. Die zwei weiteren liegen in der 2. und 3. Tagesleistung des Referenzabschnitts, nahe der Reifecomputer-Messstation 3 (siehe auch Übersicht in Bild 28). Die Fugen wurden jeweils am Nachmittag (NM) eines Untersuchungstages an der aufgewärmten Fahrbahndecke sowie am Morgen (VM) des darauffolgenden Tages an der abgekühlten Fahrbahndecke dokumentiert.

Aufgrund des Baufortschritts und der damit einhergehenden Errichtung des Banketts, konnte die Kontrolle der QSF an der CEM III-Strecke lediglich bis Tag 22 nach Errichtung verfolgt werden. Das Alter der beiden Kontrollbereiche betrug zu dem Zeitpunkt ca. 15 und 16 Tage.



Bild 22: Rissbreitenbestimmung an QSF

Die Einzelwerte der Rissöffnungsweiten können Tabelle 21 im Anhang G - Ermittlung der Rissweiten entnommen werden.

9.1.2 Anzahl gerissener Fugen

Im Ergebnis der Untersuchung an jeweils 40 QSF der drei Teilabschnitte konnte festgestellt werden, dass im Bereich der Kontrollschächte für den Straßenablauf, welche sich im Bereich der Schutzplanke befinden, die Fugen meist zuerst gerissen sind.

Zwischen dem Versuchsabschnitt und dem Referenzabschnitt fällt ein unterschiedliches Rissverhalten auf. Während ein Teilabschnitt mit CEM I im Unter- und Oberbeton offensichtlich zu Paketreißen neigte, waren im untersuchten Bereich des CEM III-Versuchsabschnitts bereits nach 16 Tagen alle 40 beobachteten Fugen gerissen. Auf dem CEM I-Referenzabschnitt konnte beobachtet werden, dass nach 8 Tagen 22 bzw. 11 der 40 beobachteten Fugen gerissen waren. Die Anzahl hat sich auch nach 16 Tagen nicht geändert, siehe Tabelle 7 und Bild 23.

Eine Begründung für das unterschiedliche Reißen zwischen den Streckenabschnitten lässt sich nicht aus dem Schwindmaß der Betone ableiten. Da der Unterbeton mit CEM III ein geringeres Schwinden aufweist als der Beton mit CEM I, siehe Kapitel 6.2, war das Paketreißen eher auf dem Versuchsabschnitt zu erwarten. Auch eine Abhängigkeit des Rissverhaltens von den während des Einbaus und der Erhärtung vorhandenen Tages- und Nachttemperaturen (Temperaturspanne, Nullspannungstemperatur) lässt sich aus den vorhandenen Daten nicht ableiten.

Dass die beiden Teilbereiche des Referenzabschnitts eine unterschiedliche Anzahl gerissener Fugen aufweisen, lässt sich jedoch mit der Anzahl

Zeitpunkt	CEM III-Versuchsabschnitt	CEM I - Referenzabschnitt	
		Kontrollbereich 1	Kontrollbereich 2
7d NM	6	n.b.	n.b.
8d VM	11	22	11
15d NM	28	22	11
16d VM	40	22	11
22d NM	40	n.b.	n.b.
n.b. zum Zeitpunkt nicht beurteilt			

Tab. 7: Vergleich Anzahl gerissener Fugen im Versuchs- und Referenzabschnitt

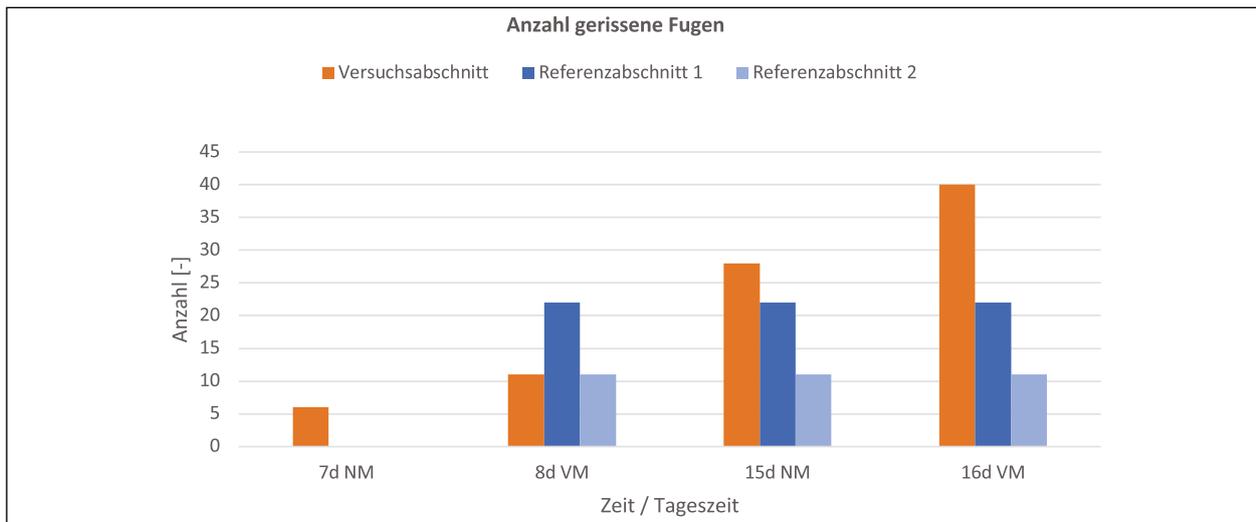


Bild 23: Anzahl gerissener Fugen im Versuchs- und Referenzabschnitt

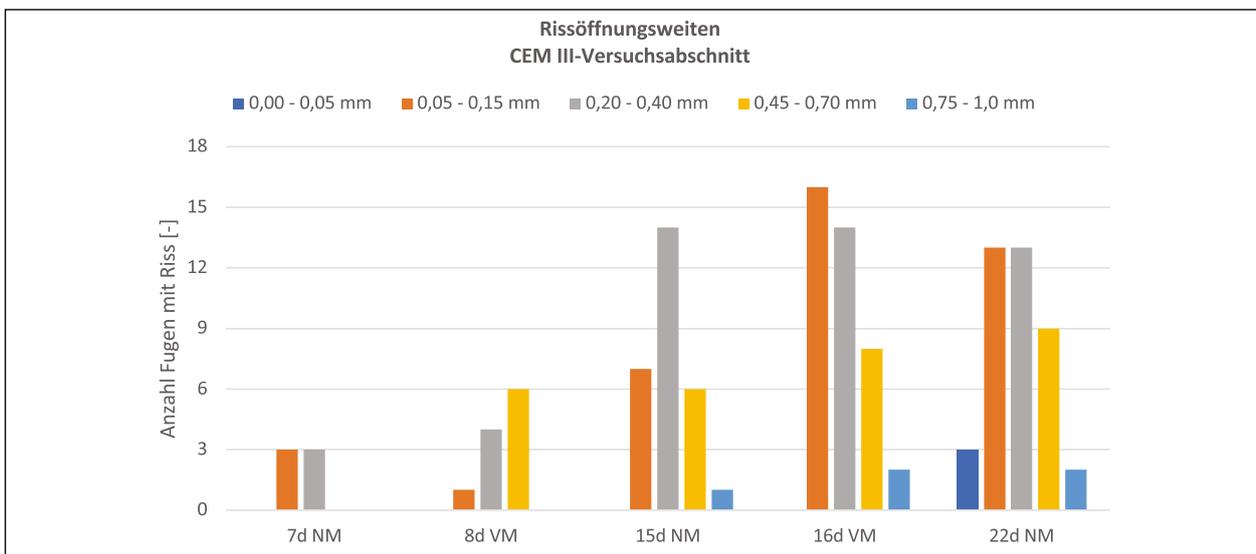


Bild 24: Rissöffnungsweiten im Kontrollbereich des CEM III Versuchsabschnitts

der Kontrollschächte für den Straßenablauf, welche im Bereich der Schutzplanke angeordnet sind, begründen. Nach 8 Tagen waren sowohl im Kontrollbereich des Versuchsabschnitts als auch im Kontrollbereich 1 des Referenzabschnitts die meisten QSF in der Nähe der jeweils acht Kontrollschächte gerissen, siehe Anhang G - Ermittlung der Rissweiten. Der Kontrollbereich 2 des Referenzabschnitts weist hingegen lediglich zwei Kontrollschächte auf. Hier blieben die angrenzenden QSF bis zum 16. Tag ungerissen.

9.1.3 Verteilung der Rissöffnungsweiten

Bild 24 gibt die Verteilung der RÖW auf dem CEM III-Versuchsabschnitt wieder.

Sieben Tage nach der Herstellung waren 6 der 40 beobachteten Fugen gerissen und wiesen eine ma-

ximale Weite von 0,35 mm auf. Mit längerer Beobachtungsdauer stellten sich höhere Rissweiten bis max. 0,95 mm nach 16 Tagen ein. Die mittlere RÖW liegt nach 15 Tagen (Nachmittag) bei 0,32 mm (28 gerissene QSF). Nach 16 Tagen (Vormittag) liegt die mittlere RÖW zwar mit 0,31 mm im gleichen Bereich, jedoch sind zu diesem Zeitpunkt bereits alle Fugen gerissen. Durch die Ausdehnung der Betondecke am Tag maß die mittlere RÖW nach 22 Tagen (Nachmittag) 0,29 mm. Bemerkenswert ist, dass nach 22 Tagen drei der gerissenen Fugen nicht mehr erkennbar waren.

Die Rissöffnungsweiten der beiden Kontrollbereiche des Referenzabschnitts werden in den Bildern 25 und 26 dargestellt.

Da nach 16 Tagen nur ein Teil der Fugen im CEM I-Referenzabschnitt gerissen waren, weisen die bei-

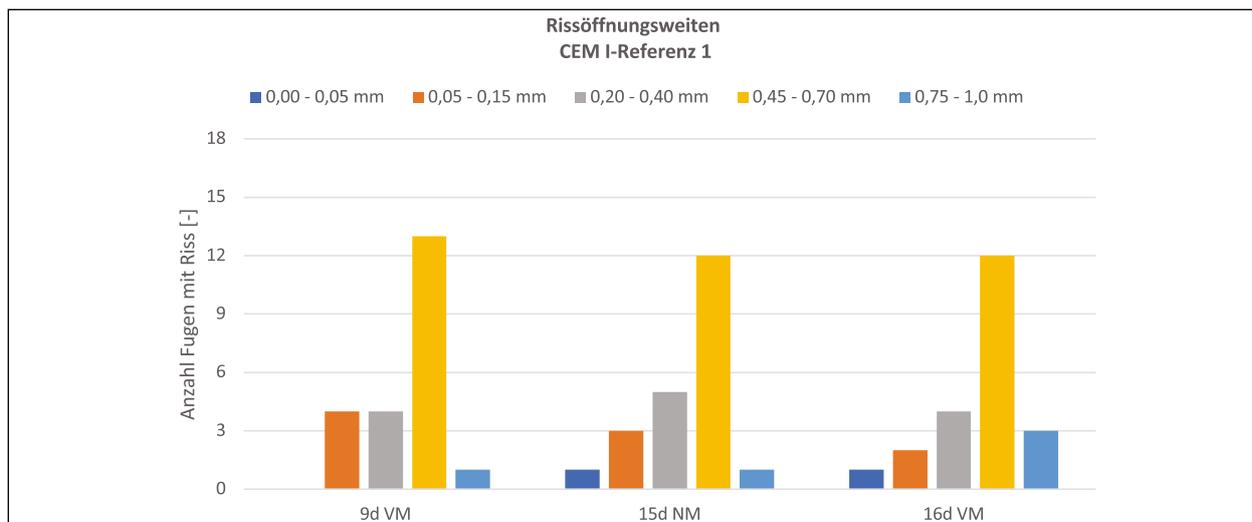


Bild 25: Rissöffnungsweiten im CEM I-Referenzabschnitt, Kontrollbereich 1

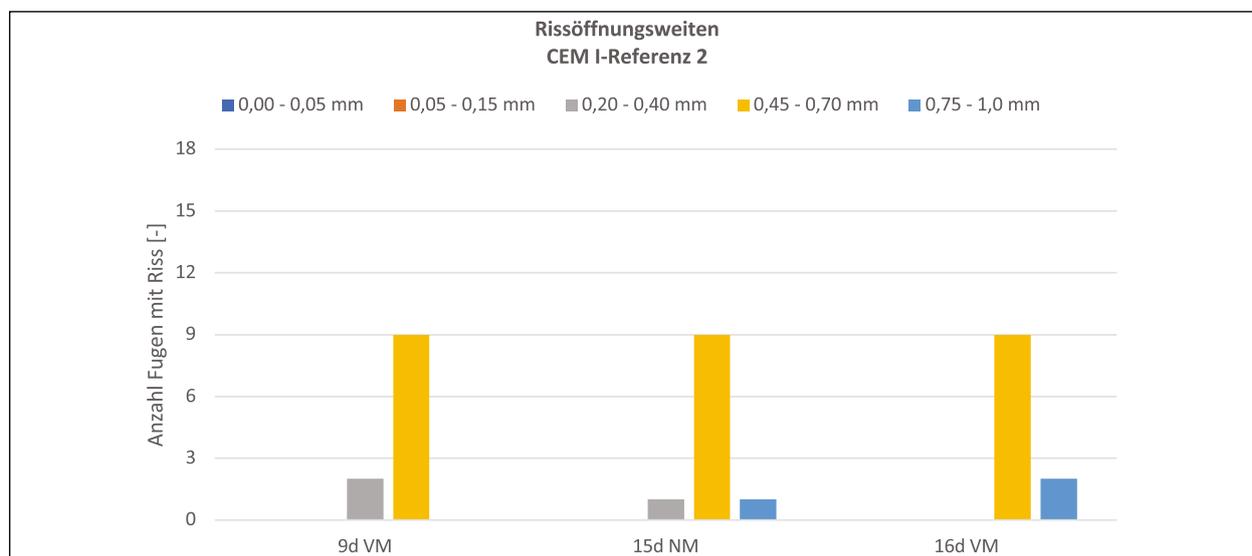


Bild 26: Rissöffnungsweiten im CEM I-Referenzabschnitt, Kontrollbereich 2

den Kontrollbereiche durchschnittlich höhere Rissweiten als im Versuchsabschnitt auf. Im Bereich 1 maß die durchschnittliche RÖW am Nachmittag des 15. Tages 0,44 mm, am nächsten Vormittag 0,51 mm, siehe Bild 25. Auch in diesem Bereich war an einer Fuge der Riss nach 15 Tagen nicht mehr erkennbar. Im Bereich 2 waren weniger Platten gerissen und somit waren die durchschnittlichen Rissweiten mit 0,60 mm am Nachmittag und 0,63 mm am nächsten Vormittag höher, siehe Bild 26.

9.2 Verbundprüfung

Aus zwei Bereichen des Versuchs- und einem Bereich des Referenzabschnitts wurden je drei Bohrkern in Plattenmitte des Standstreifens entnommen. An den insgesamt 9 Bohrkernen mit $D = 100$ mm

wurde die Verbundfestigkeit im Alter von 26 bis 34 Tagen von der Ruhr-Universität Bochum ermittelt. Die Scherfestigkeit in der Grenzfläche zwischen Ober- und Unterbeton wurde in Anlehnung an den direkten Scherversuch nach LEUTNER bestimmt (TP Asphalt-StB Teil 80).

Die Probekörper 1 bis 6 stammen aus dem Versuchsabschnitt mit CEM III/A 42,5 N im Unterbeton, die Probekörper 7 bis 9 stammen aus dem Referenzabschnitt mit CEM I 42,5 N (sd) im Ober- und Unterbeton. Die ermittelten Werte können Bild 27 bzw. den Tabellen in Anhang H – Ermittlung der Verbundfestigkeit entnommen werden.

Aus dem Bild geht hervor, dass die Verbundfestigkeit zwischen Ober- und Unterbeton im Versuchsabschnitt mit durchschnittlich 6,28 N/mm² geringfü-

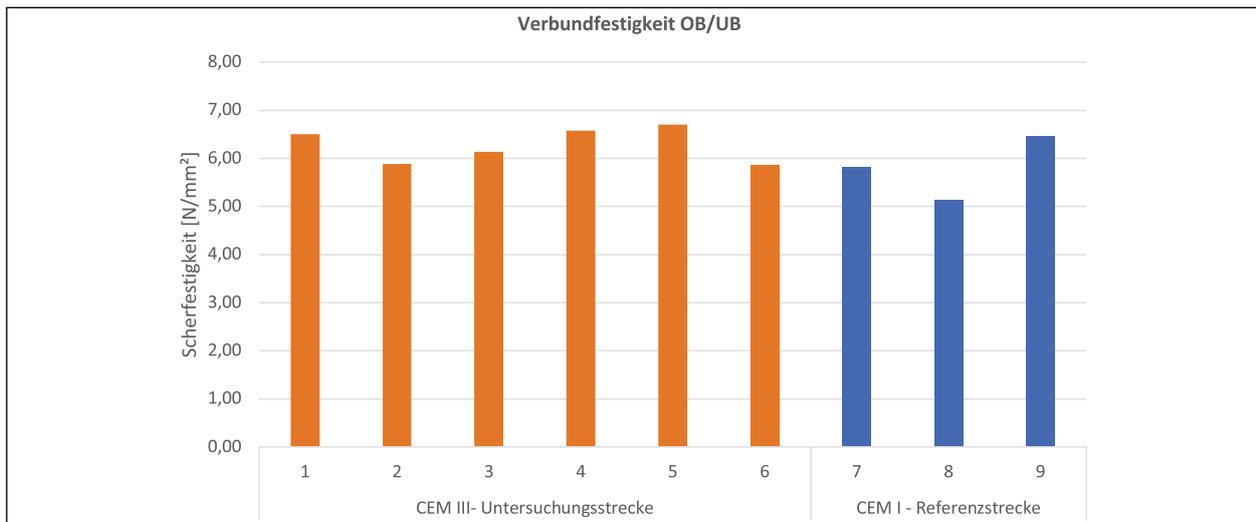


Bild 27: Scherfestigkeit der untersuchten Bohrkern

gig höher ist als die Verbundfestigkeit des Referenzabschnitts mit 5,81 N/mm².

Innerhalb des UB mit CEM III wurde eine Scherfestigkeit von 7,47 N/mm² festgestellt. Die Werte sind vergleichbar mit üblichen Straßenbetonen und den Scherfestigkeiten aus dem Forschungsprojekt „Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte“ (1). Die größere Scherfestigkeit im Unterbeton ist auf das gröbere Gesteinskorn im Vergleich zum Oberbeton zurückzuführen. Der größere Korndurchmesser verursacht eine größere Verzahnung in der Scherfuge und somit die höheren Scherfestigkeiten.

10 Zusammenfassung

Wie bereits in (1) beschrieben, kann die Verwendung unterschiedlicher Zemente in Ober- und Unterbeton viele Vorteile bieten. Neben der verbesserten Umweltbilanz durch geringere CO₂-Emissionen weisen Zemente mit geringem Klinkergehalt auch Vorteile bezüglich einer betonschädigenden AKR auf. Des Weiteren sind die mechanischen Eigenschaften eines herkömmlichen Unterbetons durchaus mit denen eines Unterbetons mit CEM III vergleichbar.

Die Errichtung einer Versuchsstrecke zur Erprobung unterschiedlicher Zemente in Unter- und Oberbeton auf der BAB A7 bei Wörmitz wurde durch ein umfangreiches Untersuchungsprogramm wissenschaftlich begleitet. Der Einbau erfolgte zwi-

schen dem 27.10. und 4.11.2020 unter sehr ähnlichen Temperatur- und Witterungsbedingungen.

Bereits die Ergebnisse der Erstprüfung weisen darauf hin, dass die Entwicklung der Druckfestigkeit beider Unterbetone im jungen Alter trotz unterschiedlicher Zementart sehr ähnlich verläuft. Auch die Ergebnisse der Biege- und Spaltzugprüfungen unterscheiden sich nur wenig voneinander. Die Grenzwerte für Druck- und Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen werden von allen drei Betonen eingehalten.

Auch bei der Erfassung der Betontemperatur während der Zementhydratation werden die Unterschiede bei der Anwendung verschiedener Bindemittel deutlich. Erwartungsgemäß wurde während des Abbindeprozesses des CEM III im UB weniger Wärme abgegeben als in den beiden Betonen mit CEM I. Im Versuchsabschnitt selbst wurden mithilfe der einbetonierten Temperatursensoren sogar geringere Temperaturdifferenzen zwischen CEM I-OB und CEM III-UB gemessen, als im Referenzbereich. Es wird davon ausgegangen, dass bei der Verwendung von CEM III im UB nicht mit Spannungen zu rechnen ist, sofern die freiwerdende Wärme des OB abgegeben werden kann.

An Schwindrinnen wurde das Dehnungsverhalten der drei Betone während des Abbindeprozesses untersucht. Bereits in den ersten beiden Stunden nach Start der Schwindmessungen zeigen sich deutliche Unterschiede in Abhängigkeit des Bindemittels. Während der Beton mit CEM III kaum schwindet, weisen Ober- und Unterbeton mit CEM I bereits 0,07 bzw. 0,06 mm/m auf. Nach 7 d erreicht der UB mit CEM III mit -0,07 mm/m Dehnung ein et-

was geringeres Schwindmaß als der UB mit CEM I (0,09 mm/m), der OB liegt bei -0,13 mm/m Dehnung.

Am Bauwerk selbst konnte ein unterschiedliches Rissverhalten der Betonplatten beobachtet werden. Während am CEM III-Versuchsabschnitt nach 16 Tagen bereits alle untersuchten QSF gerissen waren, zeichnete sich im Referenzbereich ein Paketreißen ab. Aus dem Aufbau der Betondecke lässt sich schließen, dass die QSF vorwiegend an den Platten mit Querschnittsschwächung durch den integrierten Straßenablauf rissen. Auf dem Versuchsabschnitt stellten sich außerdem geringere RÖW als auf dem Referenzabschnitt ein, abhängig von der Anzahl der gerissenen QSF.

Anhand der ermittelten Daten des Reifecomputers lässt sich die kontinuierliche Festigkeitsentwicklung der drei Betone über 7 Tage abbilden. Da sich jedoch die Festigkeit in den ersten 24 Stunden nicht zuverlässig darstellen lässt, siehe Bild 20, lässt sich der Zeitpunkt zum Ausbürsten nicht, zum Fugenschnitt nur bedingt und für die Verkehrsfreigabe sicher ableiten.

Das Verbundverhalten zwischen Ober- und Unterbeton wurde durch die Verwendung unterschiedlicher Zemente positiv beeinflusst. Den Ergebnissen zur Scherfestigkeit in der Verbundfuge ist zu entnehmen, dass der Verbund, geprüft an Bohrkernen des Versuchs- und Referenzabschnitts, mindestens gleichwertig ist.

Negative Auswirkungen, die z. B. aus den eventuell entstehenden Zwangsspannungen zwischen Oberbeton mit CEM I und Unterbeton mit CEM III resultieren, konnten im Beobachtungszeitraum der Versuchsstrecke nicht festgestellt werden.

11 Ausblick

Nach Beendigung der Baumaßnahme auf der Gegenrichtung sind auf der BAB A7 bei Wörnitz weitere Untersuchungen zur Erfassung der Ebenheit mittels 3D-Flächenscan angedacht.

Um mehr Erfahrungen in der neuen Bauweise zu sammeln, sind außerdem weitere Versuchsstrecken, u. a. in Brandenburg, in Planung.

Literatur

1. LUDWIG, H.-M. et al. Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018.
2. TPA GmbH. Erstprüfung Oberbeton 0/8 - BAB A7 / Betonlos D 727 - EP K 2050/385/20. s.l.: STRABAG Großprojekte GmbH, 2020.
3. —. Erstprüfung Unterbeton 0/22 - BAB A7 / Betonlos D 727 - EP K 2050/386/20. s.l.: STRABAG Großprojekte GmbH, 2020.
4. —. Erstprüfung Unterbeton 0/22 - BAB A7 / Betonlos D 727 - EP K 2050/387/20. s.l.: STRABAG Großprojekte GmbH, 2020.
5. Arbeitsgruppe Betonbauweisen. ZTV Beton-StB - Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Köln: FGSV, 2008. FGSV 899.
6. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. ARS 04/2013 - Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Bonn: FGSV, 2013.
7. Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr. Herstellererklärung gemäß Verfahren 4 als Ergänzung zu ARS 04/2013. s.l.: Bayerische Staatskanzlei, 2014. Az.: IID9-43435-002/08.
8. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStB). Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliereaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Berlin: DAfStB, 2013.
9. TPA GmbH. Erstprüfung - Zusätzliche Untersuchungen. EP K 2050/385,386,387/20. s.l.: STRABAG Großprojekte GmbH, 2020.
10. IKEN, LACKNER, WÖHNL, ZIMMER, BREIT: Handbuch der Betonprüfung. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2012. 978-3-7640-0515-3.
11. de VREE, R. T., TEGELAAR., R. A..Gewichtete Reife des Betons - Kontinuierliche, zer-

- störungsfreie Ermittlung der Betondruckfestigkeit. 11, Beton: Verlag Bau+Technik GmbH, 1998.
12. TPA GmbH. Eigenüberwachung - Zusätzliche Untersuchungen. K 2050/688/21 - BAB A7 / Betonlos D 727. s.l.: STRABAG Großprojekte GmbH, 2021.
13. —. Eigenüberwachung Oberbeton (Waschbeton) 0/8 mm - K 2050 / 672 / 20. Köln: STRABAG Großprojekte GmbH, 2020.
14. —. Eigenüberwachung Unterbeton 0/22 mm - K 2050 / 673 / 20. Köln: STRABAG Großprojekte GmbH, 2020.
15. —. Eigenüberwachung Unterbeton 0/22 mm - K 2050 / 674 / 20. Köln: STRABAG Großprojekte GmbH, 2020.
16. Arbeitsgruppe Betonbauweisen. TP B-StB - Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen. Köln: FGSV, fortlaufend. FGSV 893.
17. —. TL Beton-StB - technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Köln: FGSV, 2007. FGSV 891.
- Bild 7: Errichtung des CEM III-Versuchsabschnitts (links) und Ausbürsten der Oberfläche (rechts)
- Bild 8: Fertiger Abschnitt im CEM I-Referenzabschnitt (links) und geschnittene QSF (rechts)
- Bild 9: Hilfskonstruktion als Befestigung für Temperaturmessfühler (Quelle: TPA)
- Bild 10: Einbau der Hilfskonstruktion mit Temperaturmessfühlern in den Unterbeton (Quelle: TPA)
- Bild 11: Messstation mit neben der Fahrbahn liegendem Reifecomputer (Quelle: TPA)
- Bild 12: Lufttemperatur verschiedener Messstationen während der Errichtung von Versuchs- und Referenzabschnitt
- Bild 13: Frischbetontemperatur
- Bild 14: Temperatur der Betondecke im Versuchsabschnitt - Messstation 1
- Bild 15: Temperatur der Betondecke im Versuchsabschnitt - Messstation 2
- Bild 16: Temperatur der Betondecke im Referenzabschnitt - Messstation 3
- Bild 17: Vergleich der Druckfestigkeit am Würfel nach 28 d (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)
- Bild 18: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit ermittelt am Bohrkern (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)

Bilder

- Bild 1: Durchschnittliches Frühschwinden der Betonrezepturen
- Bild 2: Temperaturentwicklung während der Zementhydratation
- Bild 3: Entwicklung der Druckfestigkeit der drei Betone (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)
- Bild 4: Entwicklung der Biegezugfestigkeit der drei Betone (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)
- Bild 5: Entwicklung der Spaltzugfestigkeit der drei Betone (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)
- Bild 6: Vergleich Eichgrafiken für gewichtete Reife
- Bild 19: Zeitliche Entwicklung der Spaltzugfestigkeit im OB mit CEM I und UB mit CEM I bzw. CEM III (Werte für UB (0/22) mit CEM III angegeben)
- Bild 20: Vergleich der gewichteten Reife für OB und UB an den drei Messstationen
- Bild 21: Texturtiefe im Versuchs- und Referenzabschnitt
- Bild 22: Rissbreitenbestimmung an QSF
- Bild 23: Anzahl gerissener Fugen im Versuchs- und Referenzabschnitt
- Bild 24: Rissöffnungsweiten im Kontrollbereich des CEM III Versuchsabschnitts
- Bild 25: Rissöffnungsweiten im CEM I-Referenzabschnitt, Kontrollbereich 1

- Bild 26: Rissöffnungsweiten im CEM I-Referenzabschnitt, Kontrollbereich 2
- Bild 27: Scherfestigkeit der untersuchten Bohrkerne
- Bild 28: Übersicht zur Versuchsstrecke
- Bild 29: Klimadaten Messstation Pfeffermühle während des Einbaus des CEM III-Versuchsabschnitts
- Bild 30: Klimadaten Messstation Pfeffermühle während des Einbaus des CEM I-Referenzabschnitts
- Bild 31: Frühschwinden der Betonrezeptur OB < 8 mm mit CEM I
- Bild 32: Frühschwinden der Betonrezeptur UB/ OB > 8 mm mit CEM I
- Bild 33: Frühschwinden der Betonrezeptur UB/ OB > 8 mm mit CEM III
- Bild 34: Ermittlung der Druckfestigkeit mittels Reifecomputer 1 im Versuchsabschnitt über 7 d
- Bild 35: Ermittlung der Druckfestigkeit mittels Reifecomputer 2 im Versuchsabschnitt über 7 d
- Bild 36: Ermittlung der Druckfestigkeit mittels Reifecomputer im Referenzabschnitt über 7 d

Tabellen

- Tab. 1: Betonrezepturen für Ober- und Unterbeton im Versuchs- und der Referenzabschnitt
- Tab. 2: Einstufung der verwendeten Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie des DAFStB (8)
- Tab. 3: Ergebnisse der Zementprüfungen
- Tab. 4: Übersicht über die Ergebnisse der (erweiterten) Erstprüfung
- Tab. 5: Übersicht über die Ergebnisse (Mittelwerte) der Eigenüberwachung
- Tab. 6: Zuordnung Betonsorten/Prüfberichte Eigenüberwachung
- Tab. 7: Vergleich Anzahl gerissener Fugen im Versuchs- und Referenzabschnitt

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach

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

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani

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

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Klein, Gehlen, Kränkel

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

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich

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

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wistuba

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

S 155: KIST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

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

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

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

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen

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

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

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

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

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

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

Rigo, Unterderweide

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

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

Kathmann, Schroeder

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

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes

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

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß,

Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann

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

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller

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

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz

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

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Demond, Reiche, Haas, Schmidt

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

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder,

Riwe

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

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauasphalt

Gehrke, Stephan, Weigel

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

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Radenberg, Holzwarth

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

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

Radenberg, Twer, Louis, Buscham

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

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tiemann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

Villaret, Beckenbauer, Riwe, Tschernack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

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

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

Michaelides, Koukoulidou, Birle, Heyer, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Breitenbücher, Buckenhüskes, Radenberg, Twer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

Weise, Hüsken, Niedack-Nad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

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

S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkuhl, Pfeifer € 14,50

2023

S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Hülsbömer, Weißelborg, Gogolin, Mörchen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen

Neumann, Liu, Blasl, Reinhardt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalt-einlagen

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen

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

S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärm- armer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton

Freudenstein, Bollin, Eger, Klein, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 186: Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

Oeser, Schulze, Benninghoff, Renken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 187: Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

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

S 188: Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörmitz

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.