

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

# **Umweltfreundliche Bahnschwellen mit Calciumsulfoaluminat-Zementen**

mit dem Aktenzeichen 34784/01

gefördert von der **Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

## **VDZ Technology gGmbH**

Christoph Müller, Sebastian Palm, Nura Tomala

## **Technische Universität München**

Christoph Gehlen, Thomas Kränkel, Nicolai Klein

## **PCM RAILONE AG**

Ludwig Friedl, Marian Sanchez

## **Wilhelm Dyckerhoff Institut**

Thomas Deuse, Marlen Klische

vom 08.11.2022

Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Versuche und Ergebnisse – WDI</b>	<b>8</b>
4.1	Charakterisierung der Ausgangsstoffe	8
4.2	Herstellung von CSA-Zementen	8
4.3	Mörtelversuche	10
4.4	Zusatzmittel	13
4.5	Mörtelversuche mit verschiedenen Zusatzmitteln	13
4.6	Betonversuche	15
4.6.1	Allgemeines	15
4.6.2	Druckfestigkeit	15
4.6.3	Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand	21
4.6.4	Physikalisch-chemische Untersuchungen am Bindemittel und am erhärteten Beton	25
4.6.5	Gefügeuntersuchungen	25
4.6.6	REM-Aufnahmen	27
4.7	Wahl der Ausgangsstoffe für die weiteren Untersuchungen	30
<b>5</b>	<b>Versuche und Ergebnisse – VDZ Technology gGmbH</b>	<b>31</b>
5.1	Charakterisierung der Ausgangsstoffe	31
5.2	Wirksame Alkaligehalte der Zemente	32
5.3	Betonversuche	34
5.3.1	Betonzusammensetzung	34
5.3.2	Frischbetoneigenschaften	34
5.3.3	Hydratationswärmeentwicklung	36
5.3.4	Betondruckfestigkeit	37
5.3.5	Biegezugfestigkeit	38
5.3.6	Chlorideindringwiderstand	39
5.3.7	Karbonatisierung	41
5.3.8	Statischer E-Modul	42
5.3.9	E-Modul (Impulsresonanzmethode)	42
5.3.10	Alkali-Kieselensäure-Reaktion (AKR)	43
<b>6</b>	<b>Versuche und Ergebnisse – TU München</b>	<b>55</b>
6.1	Betonversuche	55
6.1.1	Allgemeines	55
6.1.2	Frischbetoneigenschaften	55
6.1.3	Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand	56
6.1.4	Kriechversuche	59
6.1.5	Verbundeigenschaften – Pull-Out Versuche	61
6.1.6	Spannungsrissskorrosion	62
6.1.7	Korrosionsneigung	64
<b>7</b>	<b>Versuche und Ergebnisse – PCM RAILONE AG</b>	<b>75</b>
7.1	Durchgeführte Versuche	75

7.1.1	Hintergrund	75
7.1.2	Betonrezeptur	75
7.1.3	Herstellung	76
7.2	Ergebnisse	79
7.2.1	Produktionskennwerte und Ausschalzeitpunkt	79
7.2.2	Frischbetonuntersuchungen	79
7.2.3	Untersuchung mechanische Kennwerte	79
7.2.4	Schwind- und Kriechverformungen	81
7.2.5	Temperaturentwicklung	83
7.2.6	Statische und dynamische Produktprüfung	84
7.3	Bewertung der Bauteilversuche	85
<b>8</b>	<b>Ökobilanz</b>	<b>86</b>
8.1	Grundlage der Ökobilanz, Produktkategorieregeln (PCR)	86
8.2	Untersuchungsrahmen der Ökobilanz	86
8.2.1	Deklarierte/funktionale Einheit	86
8.3	Systemgrenzen	86
8.3.1	Betrachtete Lebenszyklusphasen	86
8.3.2	Graphische Darstellung der Systemgrenzen	86
8.3.3	Beschreibung der betrachteten Lebenszyklusphasen	88
8.3.4	Kriterien für eine Nichtbetrachtung von Inputs und Outputs (Abschneideregeln)	88
8.4	Datenquellen, Beurteilung der Datenqualität generischer Daten	88
8.5	Allokation von Co-Produkten	91
8.6	Sach- und Wirkungsbilanz	92
8.6.1	Treibhauspotenzial des Bahnschwellenbetons	92
8.6.2	Ökobilanzierung der Herstellung einer Bahnschwelle	96
<b>9</b>	<b>Unterschriften</b>	<b>99</b>
<b>10</b>	<b>Literatur und Dokumente</b>	<b>100</b>

## 1 Abkürzungsverzeichnis

**Tabelle 1** Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
VDZ	VDZ Technology gGmbH
TUM	Technische Universität München
RAILONE	PCM RAILONE AG
WDI	Wilhelm Dyckerhoff Institut
CSA-Zement	Zement auf Calciumsulfoaluminatbasis
AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
VZ	Verzögerer
VZ-ZS	Zitronensäure
VZ-WS	Weinsäure
FM	Fließmittel

## 2 Einleitung

Bahnschwellen werden als Betonfertigteile in einem Herstellprozess mit hoher Taktung produziert. Der Deutsche Bahn Standard (DBS) 918143 legt für die Herstellung von Schwellen die Verwendung von CEM I 52,5 N fest. Dieser wird benötigt, um hohe Frühfestigkeiten nach 24 Stunden zu erzielen. Jedoch entstehen bei der Herstellung von 1 t Portlandzement in Deutschland im Durchschnitt ohne Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung (Netto) 0,665 t CO<sub>2</sub> bzw. 0,875 t CO<sub>2</sub> (Brutto). Diese Emissionen wirken sich auf die Ökobilanz von Bahnschwellen aus.

Die Hersteller von Bahnschwellen streben an, die Ökobilanz ihrer Produkte zu verbessern. Im Projekt werden die Hersteller von Bahnschwellen durch den Projektpartner PCM RAIL.ONE AG vertreten. Diese Verbesserung sollte mit einer weitgehend gleichbleibenden Produktionsgeschwindigkeit einhergehen. Folglich müssten Zemente verwendet werden, die ökobilanzielle Vorteile mit einer schnellen Festigkeitsentwicklung und hoher Dauerhaftigkeit verbinden. Hierfür bieten sich Zemente auf Calciumsulfoaluminatbasis (CSA-Zemente) an. Deren Eignung für die Herstellung von Betonfertigteilen sollte in diesem Forschungsvorhaben am Beispiel „Bahnschwellen“ untersucht werden.

### 3 Zusammenfassung

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Forschungsvorhabens. Eingetragen sind die Daten (Mittelwerte) des für den jeweiligen Versuch federführenden Projektpartners:

<sup>1)</sup> WDI

<sup>2)</sup> VDZ

<sup>3)</sup> TUM

<sup>4)</sup> RAILONE

**Tabelle 2** Zusammenfassung der Ergebnisse

	Anforderung gemäß	Grenzwert	CEM I 52,5 N	SL05 NF	CEM II/A-S + SR03	CEM II/A-LL + SR03
<b>Zement</b>						
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent in M.-%	DBS 918 143	0,80	0,69 <sup>2)</sup>	0,45 <sup>2)</sup>	0,70 <sup>2)</sup>	0,47 <sup>2)</sup>
Auspressverfahren c(Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> ) in mmol/l	[1]	500	541 <sup>2)</sup>	389 <sup>2)</sup>	687 <sup>2)</sup>	471 <sup>2)</sup>
<b>Beton</b>						
Druckfestigkeit (28d) in MPa	DBS 918 143	C50/60	104,6 <sup>1)</sup>	110,0 <sup>1)</sup>	69,8 <sup>4)</sup> 82,1 <sup>1)</sup>	-
Biegezugfestigkeit (7d) in MPa	DBS 918 143	6,0	7,6 <sup>2)</sup>	7,5 <sup>2)</sup>	8,4 <sup>4)</sup>	5,7 <sup>2)</sup>
statischer E-Modul (28d) in GPa	-	-	53,1 <sup>2)</sup>	50,4 <sup>2)</sup>	51,2 <sup>2)</sup>	51,0 <sup>2)</sup>
Schlupf bei max. Spannung (Pull-Out-Versuch, 9 mm Stahldurchmesser) in mm	-	-	1,38 <sup>2)</sup>	n. b.	1,28 <sup>2)</sup>	n. b.
Chloridmigrationskoeffizient (28d) in 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	[2], XD1, XD2 [2], XD3	≤10,0 ≤5,0	7,0 <sup>2)</sup>	5,0 <sup>2)</sup>	3,1 <sup>2)</sup>	3,0 <sup>2)</sup>
Karbonatisierungstiefe (70d, 3% CO <sub>2</sub> ) in mm	-	-	0,2 <sup>2)</sup>	7,4 <sup>2)</sup>	7,1 <sup>2)</sup>	4,1 <sup>2)</sup>
Karbonatisierungsrate (0,04% CO <sub>2</sub> ) in mm/√a	-	-	0,1 <sup>5)</sup>	2,5 <sup>5)</sup>	2,6 <sup>5)</sup>	1,5 <sup>5)</sup>
Abwitterung CDF (28 FTW) in kg/m <sup>2</sup>	[3]	≤1,5	0,33 <sup>3)</sup>	0,75 <sup>3)</sup>	1,22 <sup>3)</sup>	7,37 <sup>3)</sup>
rel. dyn. E-Modul CIF (28 FTW) in %	[3]	≥75	100 <sup>3)</sup>	99 <sup>3)</sup>	100 <sup>3)</sup>	101 <sup>3)</sup>
Dehnung 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 % NaCl) in mm/m	DBS 918 143	0,50	0,42	1,81 <sup>6)</sup>	0,34	1,70 <sup>6)</sup>
Ökobilanz: GWP (netto, pro m <sup>3</sup> Beton) in kg CO <sub>2</sub> -Äq/m <sup>3</sup>	-	-	325 <sup>7)</sup>	n. b.	242,1 <sup>2)</sup>	n. b.
Ökobilanz: GWP (netto, pro Bahnschwelle) in kg CO <sub>2</sub> -Äq/m <sup>3</sup>	-	-	70,7 bis 74,1 <sup>8)</sup>	n. b.	59,9 bis 63,3 <sup>2)</sup>	n. b.

n. b.: nicht bestimmt

<sup>5)</sup> berechnet nach [4]

<sup>6)</sup> Dehnung ist nicht auf eine AKR sondern auf sek. Ettringitbildung zurückzuführen, siehe Kapitel 5.3.10

<sup>7)</sup> CSC-Branchenreferenzwert für CEM I – Beton C50/60

<sup>8)</sup> Beton mit <sup>7)</sup> gerechnet

Die untersuchten Betone mit CSA – Zementen weisen in Ihren mechanischen Eigenschaften vergleichbare Werte auf wie der Referenzbeton mit CEM I. Die Anforderungen aus DBS 918 143 konnten, insbesondere von dem Beton mit einer Kombination aus CSA – Zement (SR03)

und CEM II/A-S eingehalten werden. Dieser Beton wurde für die Bauteilversuche ausgewählt.

Die Dauerhaftigkeitseigenschaften der Betone mit CSA – Zementen sind nicht in allen Fällen mit dem Referenzbeton mit CEM I vergleichbar. Keiner der geprüften Betone zeigt eine innere Schädigung im Frostversuch (CIF – Verfahren). Der Frost-Tausalz-Widerstand der Betone mit CSA-Zementen ist jedoch geringer als der des Referenzbetons. Der Grenzwert der Abwitterung wurde vom Beton mit CEM II/A-S + SR03 eingehalten. Dieser wurde für die Bauteilversuche ausgewählt. Die Karbonatisierungsraten der Betone mit CSA-Zementen sind mit 1,5 bis 2,6 mm/ $\sqrt{a}$  höher als beim Referenzbeton mit CEM I ( $w/z = 0,409$ ), liegen aber in einer Größenordnung, wie sie CEM I – Betone mit einem Wasserzementwert von  $w/z \approx 0,50$  bis 0,55 aufweisen (VDZ Datenbank). Der Chlorideindringwiderstand der Betone mit CSA-Zementen ist etwas höher als beim Referenzbeton.

Im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr lagen die Dehnungen der Betone mit CEM 52,5 N und CEM II/A-S + SR03 unter dem Grenzwert des DBS 918 143. Die deutlich höheren Dehnungen der Betone mit SL05 NF und CEM II/A-LL + SR03 sind nicht auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), sondern auf sekundäre Ettringitbildung zurückzuführen. Eine zusätzliche Bewertung des AKR-Potenzials mit dem 38 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-10 [5] ist noch nicht abgeschlossen.

Die Herstellung von vorgespannten Betonschwellen mit CSA-Zement konnte im Praxisversuch unter gleichen Bedingungen erfolgen wie mit Portlandzement (CEM I). Die Kennwerte lagen alle innerhalb der nach DBS 918 143 geforderten Kennwerte (siehe Kapitel 7).

Das Treibhausgaspotenzial (GWP) wurde sowohl für einen m<sup>3</sup> Beton als auch für eine Bahnschwelle berechnet. Im Vergleich zur Verwendung von Portlandzement ergibt sich ein Einsparpotenzial von rd. 25 %, bezogen auf einen m<sup>3</sup> Beton, bzw. 15 %, bezogen auf eine Bahnschwelle.

## 4 Versuche und Ergebnisse – WDI

### 4.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Für CO<sub>2</sub>-reduzierte Bahnschwellen sollen Zemente untersucht werden, die geringe CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem heute verwendeten CEM I aufweisen und mit denen hohe Druckfestigkeiten erreicht werden können.

Untersucht wurde ein CEM II/A-S 42,5 R aus dem Werk Deuna und ein CEM II/A-LL 42,5 R aus dem Werk Geseke, die jeweils in Bindemittelmischungen mit dem Calciumsulfoaluminatzement (CSA) „Next Base SR03“ (Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung [6]) aus dem Werk Trino kombiniert wurden.

Außerdem wurde der CSA-Zement „Next binder“ SL05NF der Firma Buzzi Unicem, bestehend aus ca. 35 M.-% CSA-Klinker, 10 M.-% CaSO<sub>4</sub> und 55 M.-% CEM I 52,5 R, eingesetzt.

Für die Referenzrezeptur des Betons wurde ein CEM I 52,5 N aus Deuna verwendet.

Die mineralogische Zusammensetzung der Zemente ist in den folgenden Tabellen angegeben.

**Tabelle 3** mineralische Zusammensetzung der Normzemente

Bezeichnung	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A (ku- bisch)	C <sub>3</sub> A (ortho- rhom- bisch)	C <sub>4</sub> AF	Gips	Halb- hydrat	Anhy- drit	Calcit	HÜS	Sons- tige Phasen
	M.-%										
CEM II/A-LL 42,5 R	60,7	8,3	6,4	2,5	0,6	3,0	0,4	0,4	13,8	-	3,9
CEM I 52,5 N	64,4	13,3	1,4	3,4	6,5	0,1	1,4	3,0	4,1	-	2,4
CEM II/A-S 42,5 R	51,4	12,2	2,1	5,1	3,8	0,1	1,8	2,5	3,8	14,0	3,2

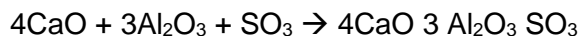
**Tabelle 4** mineralische Zusammensetzung der CSA-Zemente

Bezeichnung	Ye'eli- mit (ku- bisch)	Ye'eli- mit (orthor.)	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A (ku- bisch)	C <sub>3</sub> A (or- thor.)	C <sub>4</sub> AF	Gips	Halb- hydrat	Anhy- drit	Cal- cit	Sons- tige Pha- sen
	M.-%											
SR03	23,2	23,1	-	17,8	-	-	2,3	-	-	19,0	-	14,6
SL05NF	11,8	12,8	28,5	18,0	5,1	0,1	3,1	0,7	0,2	9,5	0,9	9,3
SR03 (modifiziert)	20,5	26,6	-	18,9	1,1	-	2,3	-	-	18,3	-	12,3

### 4.2 Herstellung von CSA-Zementen

Die hier verwendeten CSA-Zemente (Calcium-Sulfo-Aluminat) werden von der Firma Buzzi Unicem in Italien und in den USA produziert und unter dem Namen „Next Base“ vertrieben. Als Rohstoffe kommen ca. 35 M.-% Kalkstein, 40 M.-% Bauxit und 25 M.-% Gips zum Einsatz. Im Gegensatz zum Portlandzement entsteht durch den Brennprozess ein Klinker mit Ye'elimit (ca. 55 M.-%) als reaktiver Phase (Gleichung 1).

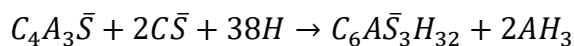




Gleichung 1

CSA-Zementklinker wird bei etwa 1300°C im Drehrohrofen gebrannt und damit ist der Brennstoffbedarf geringer als beim Portlandklinker [7]. Im Gegensatz zum Portlandklinker wird weniger Kalkstein als Rohstoff eingesetzt, sodass der CO<sub>2</sub>-Ausstoß als Folge der Entsäuerung des Kalksteins ebenfalls geringer ist. Bei der CSA-Klinkerproduktion können etwa 20% Treibhauspotential eingespart werden [8].

Nach dem Brand wird der Klinker gemahlen und mit ca. 20 M.-% Anhydrit gemischt. Die Zugabe des Calciumsulfates ist für die festigkeitsbildenden Reaktionen notwendig (Gleichung 2). Nach der Wasserzugabe kommt es zu einer schnellen Bildung von Ettringit und Aluminiumhydroxid mit hohen Frühfestigkeiten [9].

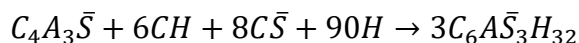


Gleichung 2

Darin bedeuten:

CH	Calciumhydroxid
C $\bar{S}$	Calciumsulfat
C <sub>4</sub> A <sub>3</sub> $\bar{S}$	Calcium-Sulfo-Aluminat (Ye'elimit)
C <sub>6</sub> A $\bar{S}$ <sub>3</sub> H <sub>32</sub>	Ettringit
AH <sub>3</sub>	Aluminiumhydroxid
H	Wasser

Die Anwesenheit von Calciumhydroxid führt zur Bildung von expansivem Ettringit (Gleichung 3), und wirkt dadurch dem Schwindprozess entgegen. Als zusätzliche Calciumquelle wird zum CSA-Zement Portlandzement eingesetzt. Das bei der Hydratation von Portlandzement entstehende Calciumhydroxid reagiert mit Ye'elimit und Calciumsulfat zu Ettringit. Während bei Gleichung (2) 1 Mol Ettringit entsteht, reagiert der Ye'elimit bei Portlandzementzugabe zu 3 Mol Ettringit [10].



Gleichung 3

Das geringste Schwindverhalten wird mit CSA-Dosierungen von 40 – 60 M.-% erreicht. Da aus den bisherigen Erfahrungen eine geringere Karbonatisierung bei niedriger CSA-Zementdosierung und ein besserer Frost-Tausalz-Widerstand zu erwarten ist, wurden die Versuche in diesem Forschungsvorhaben mit einem CSA-Anteil von 40 M.-% durchgeführt.

Der „Next binder“ SL05NF setzt sich aus ca. 35 M.-% CSA-Klinker, 10 M.-% CaSO<sub>4</sub> und 55 M.-% CEM I 52,5 R zusammen. Die Zusammensetzung gewährleistet ein geringes Schwinden und eine schnelle Festigkeitsentwicklung und kann daher in der Fertigteilebranche Anwendung finden.

Für die Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben wurde die Portlandzementkomponente im SL05NF durch CEM II/A-LL 42,5 R bzw. CEM II/A-S 42,5 R ersetzt, die durch den geringeren Klinkerfaktor die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Bindemittels zusätzlich verbessern können.

### 4.3 Mörtelversuche

**Bild 1** zeigt, dass mit den Normzementen CEM II/A-LL 42,5 R (Geseke) und CEM II/A-S 42,5 R (Deuna) in der Mischung mit Next Base SR03 Druckfestigkeiten von rd. 50 MPa nach 28 Tagen erreicht werden konnten. Die Mörtel wurden abweichend von der EN 196-1:2016-11 hergestellt.

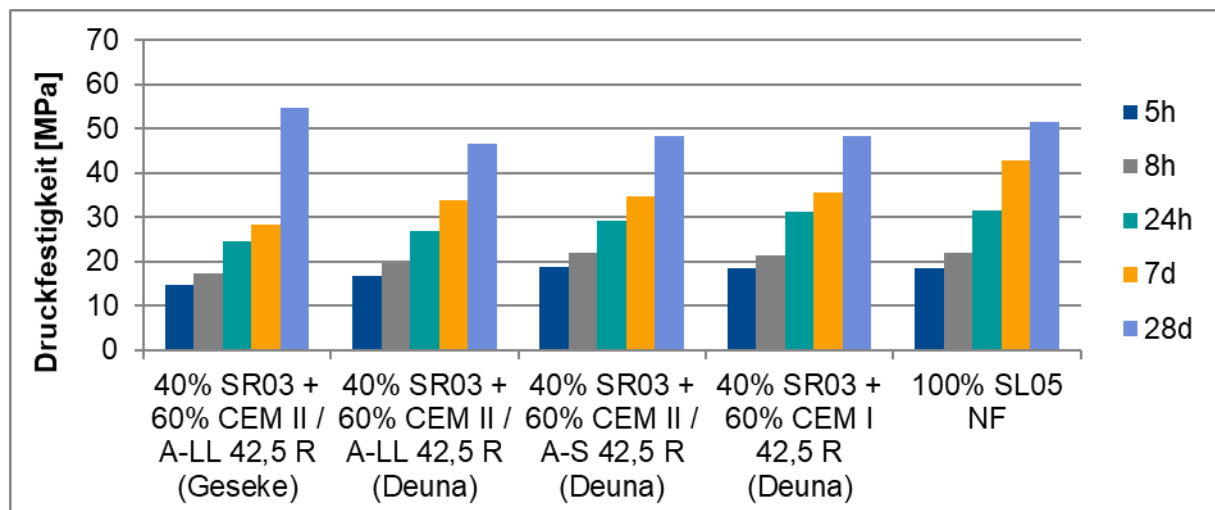
Da die Mischungen aus 40 M.-% SR03 (bzw. 100 M.-% SL05NF, 100 M.-% SR03) bestanden und kein Verzögerer zur Anwendung kam, wurde der Mischvorgang wie folgt abgeändert:

- 1350g Normsand mit 225g Wasser homogenisieren
- Zementgemisch dem Sand-Wasser-Gemisch zugeben und für 45s Stufe 1 und 15s Stufe 2 im Mischer vermischen
- Mörtel sofort in Prismen-Formen (40 mm x 40 mm x 160 mm) füllen und auf Vibrationsstisch verdichten

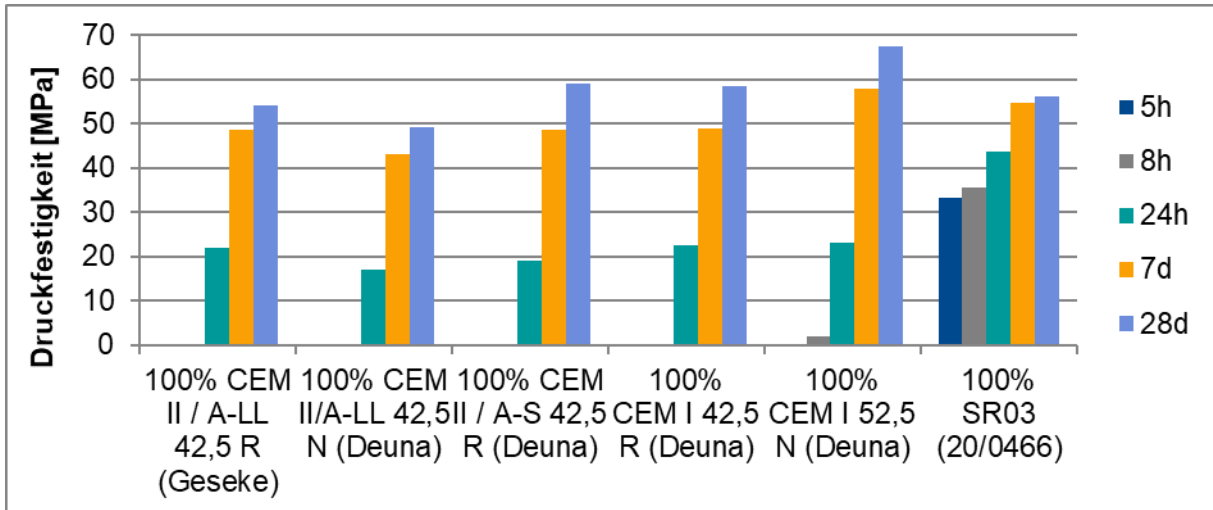
Die Prismen wurden nach 5h, 8h und 24h ausgeschalt. Die Prismen, die nach 7d bzw. 28d geprüft werden sollten, wurden bis zum Prüftag im Wasser bei (20,0 ± 1,0) °C gelagert.

Die Ermittlung der Festigkeiten an den Normzementen (**Bild 2**), erfolgte nach EN 196-1:2016-11.

Zur Festigkeitsermittlung wurde der Mittelwert aus je drei Prismen gebildet.



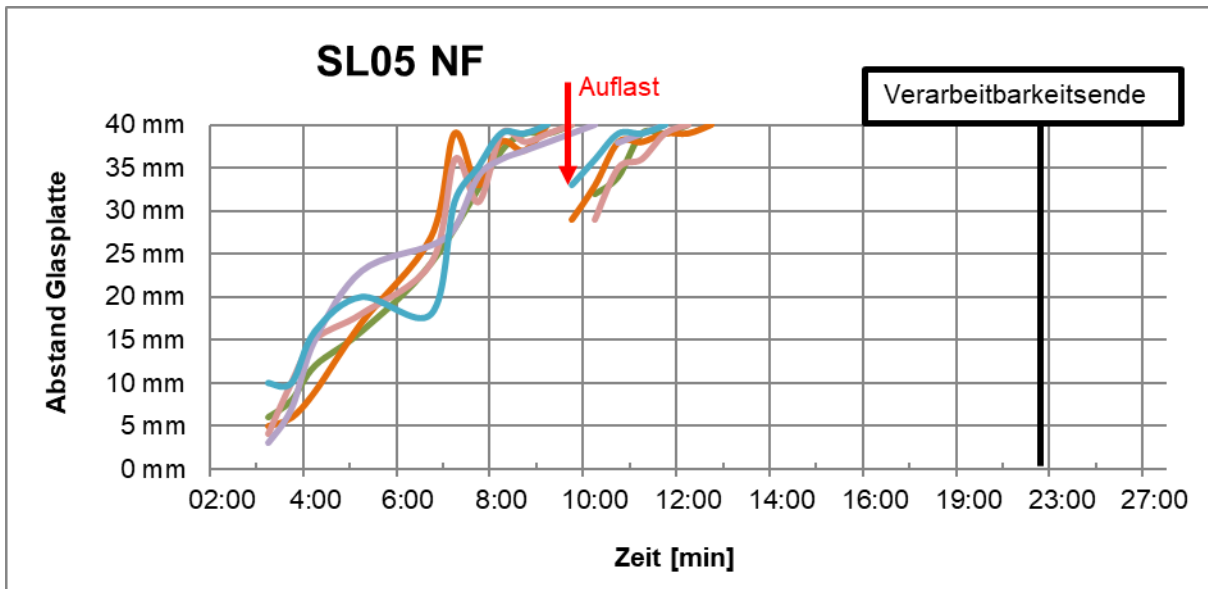
**Bild 1** Festigkeitsentwicklung Mischungen mit CSA-Zement



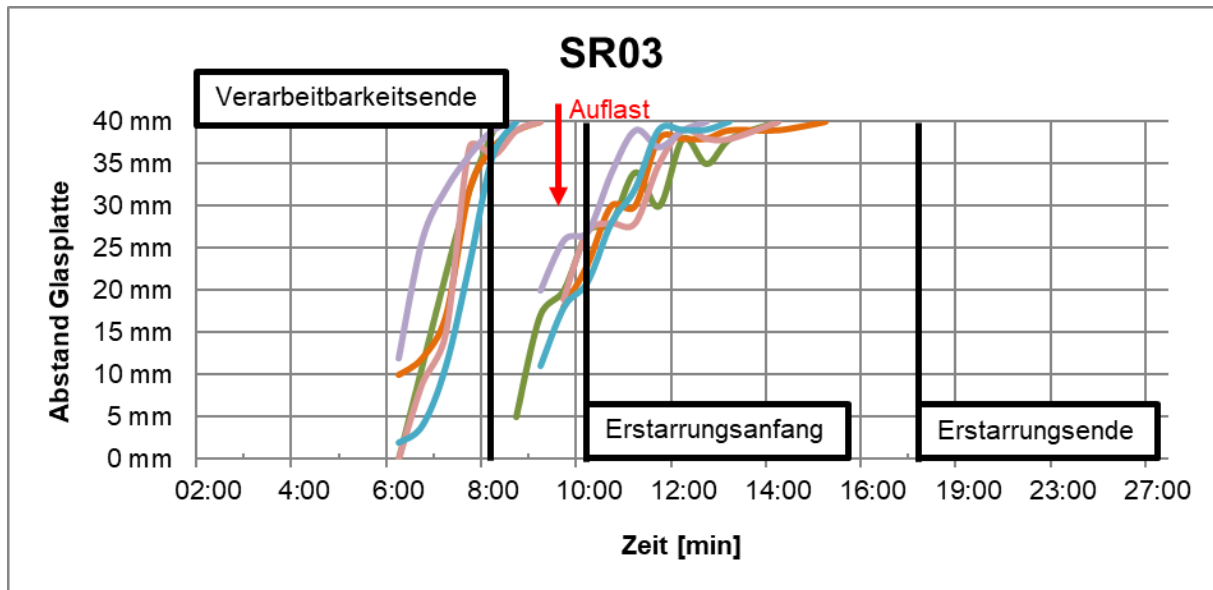
**Bild 2** Festigkeitsentwicklung Ausgangszemente

Die folgenden Bilder zeigen die Erstarrungszeiten der verwendeten CSA-Zemente, welche an einem Normmörtel (Mischvorgang wie in oben beschrieben) getestet wurden. Die Ergebnisse wurden mittels Handvicat und einem Zusatzgewicht von 1000g gewonnen. Es handelt sich dabei um eine modifizierte Methode der Firma Dyckerhoff, die an das schnelle Erstarrungsverhalten von CSA-Zementen angepasst ist.

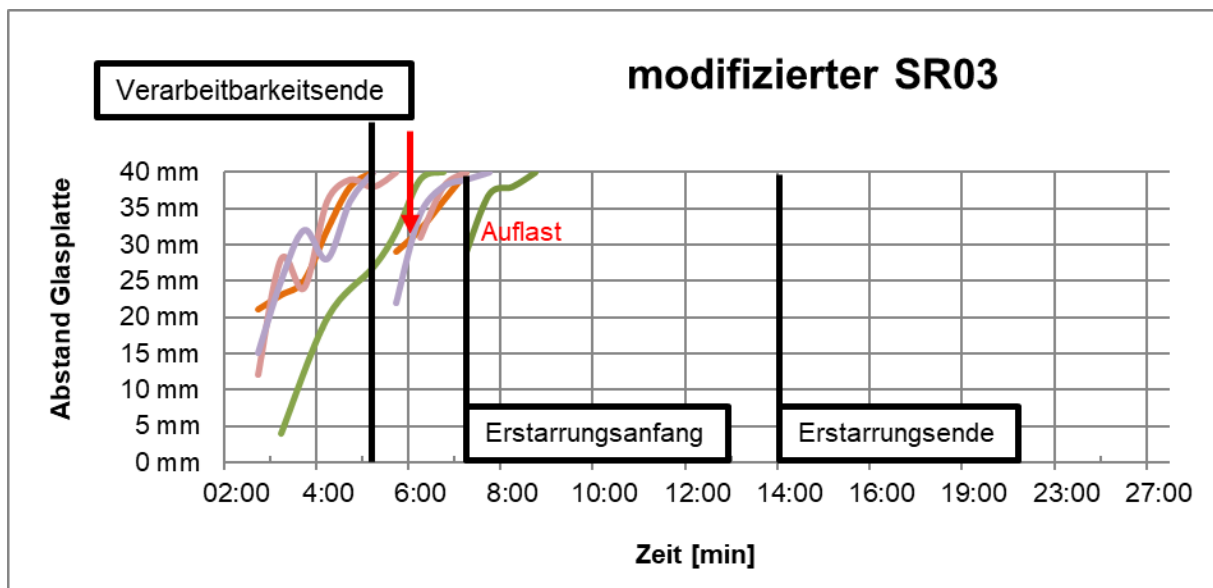
**Bild 5** zeigt das Erstarrungsverhalten des modifizierten SR03, welcher im Dezember 2021 aufgrund der besseren Dauerhaftigkeit neu produziert wurde. Es ist zu erkennen, dass dieser Zement im Vergleich zum handelsüblichen SR03 etwa doppelt so schnell reagiert.



**Bild 3** Erstarrungszeiten SL05NF (6.3.2020)



**Bild 4** Erstarrungszeiten SR03 (7.2.2020)



**Bild 5** Erstarrungszeiten modifizierter SR03 (19.1.2021)

#### 4.4 Zusatzmittel

Im Folgenden sind alle Zusatzmittel bzw. Zusatzstoffe aufgeführt, die in den Mörtel- und den Betonversuchen zum Einsatz kamen.

Fließmittel:

- MasterGlenium ACE 40 (MBCC)
- MasterGlenium ACE 314 (MBCC)
- MasterGlenium ACE 394 (MBCC)
- MasterEase 5020 (MBCC)
- ViscoCrete 3360 (Sika)
- Premment 970 X (BT3)

Verzögerer:

- Kombination aus 60 M.-% Zitronensäure (Monohydrat) + 40 M.-% Weinsäure
- VP 2019/24.4 (MBCC)
- Berolan RT 5 (Berolan GmbH)

#### 4.5 Mörtelversuche mit verschiedenen Zusatzmitteln

Zur Entwicklung eines geeigneten Bahnschwellenbetons auf CSA-Basis wurden verschiedene Zusatzmittel (Verzögerer, Fließmittel) im Mörtel auf ihre Wirksamkeit untersucht.

Es wurden das Fließverhalten, die 1d-Druckfestigkeiten sowie das Erstarrungsverhalten an einer ausgewählten Rezeptur überprüft. Die Prismen wurden nach 24h ausgeschalt und geprüft.

**Tabelle 5** zeigt die Ergebnisse bei Verwendung von 100 M.-% SL05NF (w/z = 0,40).

Mit dem Fließmittel ACE 40, welches in der Bahnschwellenrezeptur auf Basis von Portlandzement enthalten ist, konnte erst bei sehr hohen Dosierungen ein ausreichendes Fließverhalten erreicht werden.

**Tabelle 5** Mörtelversuche M1-M6 (Einfluss Fließmittel bei Einsatz von SL05NF)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
<b>Art VZ</b>	<b>60% VZ-ZS + 40% VZ-WS</b>					
<b>Dos. VZ [M.-%]</b>	<b>0,5</b>					
Art FM	ACE 394	VC 3360	ACE 40	Premment 970X	Master Ease 5020	ACE 314
Dos. FM [M.-%]	0,8	2,4	5,8	1,7	2,4	2,7
ABM sofort [cm]	17,0	18,5	16,0	18,0	16,0	17,5
ABM 25min [cm]	15,0	n. b.	14,0	16,0	14,5	16,5
f <sub>c,1d</sub> [MPa]	47,5	45,0	n. b.	51,5	43,0	41,5
Erstarren [min]	n. b.	39	n. b.	60	46	51

n. b.: nicht bestimmt

**Tabelle 6** zeigt die Ergebnisse bei Verwendung von 40 M.-% SR03 und 60 M.-% CEM II/A-LL mit  $w/z = 0,40$ .

Da mit dem Einsatz von 100 M.-% SR03 ein noch geringeres  $\text{CO}_2$ -Äq/ $\text{m}^3$  zu erwarten ist (vgl. Kapitel 8), wurden auch Versuche mit diesem Zement durchgeführt. Ebenso wurden 20 M.-% SR03 gegen Hüttensand bzw. Kalksteinmehl ausgetauscht.

**Tabelle 6** Mörtelversuche M7-M13 (Einsatz von SR03)

	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>	<b>M10</b>	<b>M11</b>	<b>M12</b>	<b>M13</b>
<b>Variante</b>	<b>Original</b>	<b>Original</b>	<b>mod.</b>	<b>Original</b>	<b>Original</b>	<b>Original</b>	<b>Original</b>
<b>Zusatz</b>	<b>+ CEM II/A-LL</b>			-	-	<b>+ 20% HÜS</b>	<b>+ 20% KSM</b>
<b>Dos. SR03 [M.-%]</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>40</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>80</b>
Art VZ	Berolan RT 5			60 M.-% VZ-ZS +40 M.-% VZ-WS			
Dos. VZ [M.-%]	0,6	0,5	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5
Art FM	VC 3360						
Dos. FM [M.-%]	0,3	2,0	0,3	2,6	1,0	0,8	1,0
ABM sofort [cm]	15,0	18,0	14,5	23,5	24,0	23,0	23,5
ABM 25min [cm]	10,5	13,5	n. b.	25,0	19,0	20,0	19,0
$f_{c,1d}$ [MPa]	31,5	31,5	36,5	44,0	48,0	42,0	40,5
Erstarren [min]	42	34	n. b.	60	39	45	45

mod.: modifiziert, siehe Kapitel 4.6.4

n. b.: nicht bestimmt

## 4.6 Betonversuche

### 4.6.1 Allgemeines

Die Fa. PCM RAILONE AG schlug auf der Grundlage ihrer betrieblichen Erfahrungen die in **Tabelle 7** beschriebene Bahnschwellenrezeptur vor. Es kam die Gesteinskörnung aus dem Werk Aschaffenburg zum Einsatz (siehe auch Kapitel 5.1).

**Tabelle 7** Rezeptur

	Stoffmenge
CEM I 52,5 N	320 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	131 kg/m <sup>3</sup>
Fließmittel ACE 40 (MBCC)	1,98 kg/m <sup>3</sup>
Sand 0/2	698 kg/m <sup>3</sup>
Splitt 8/11	376 kg/m <sup>3</sup>
Splitt 11/16	669 kg/m <sup>3</sup>
Splitt 16/22	293 kg/m <sup>3</sup>

### 4.6.2 Druckfestigkeit

Für die ersten Betonversuche wurden Würfel mit der Kantenlänge 150 mm nach DIN EN 12390-2:2019-10 gefüllt und nach DIN EN 12390-3:2019-10 geprüft. Pro Prüftag wurde je ein Würfel geprüft, welcher nach 24h entschalt und anschließend für weitere 6d im Wasser bei  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  gelagert wurde. Die Würfel, die im Alter von 28d geprüft wurden, wurden nach der Wasserlagerung für 21d im Normklima bei  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  und  $(65 \pm 5)\%$  gelagert. **Tabelle 8** zeigt die Ergebnisse, die am Beton mit 100 M.-% SL05NF (320 kg/m<sup>3</sup>) und ansonsten mit der Zusammensetzung gemäß **Tabelle 7** ermittelt wurden.

Das Verdichtungsmaß (**Tabelle 8**) wurde nach DIN EN 12350-4:2019-09 ermittelt.

Das Erstarren wurde mittels Betonsonde (**Bild 6**) der Firma Beckel ermittelt. Bei dieser Methode fällt ein Gewicht mit einer Masse von 500 g von einer Fallhöhe von 200 mm auf die Betonoberfläche. Nach 25 Aufschlägen wird die Einschlagtiefe am Rundstab gemessen. Verarbeitbarkeitsende ist erreicht, wenn der Rundstab noch etwa 15 mm in den Beton eindringt.



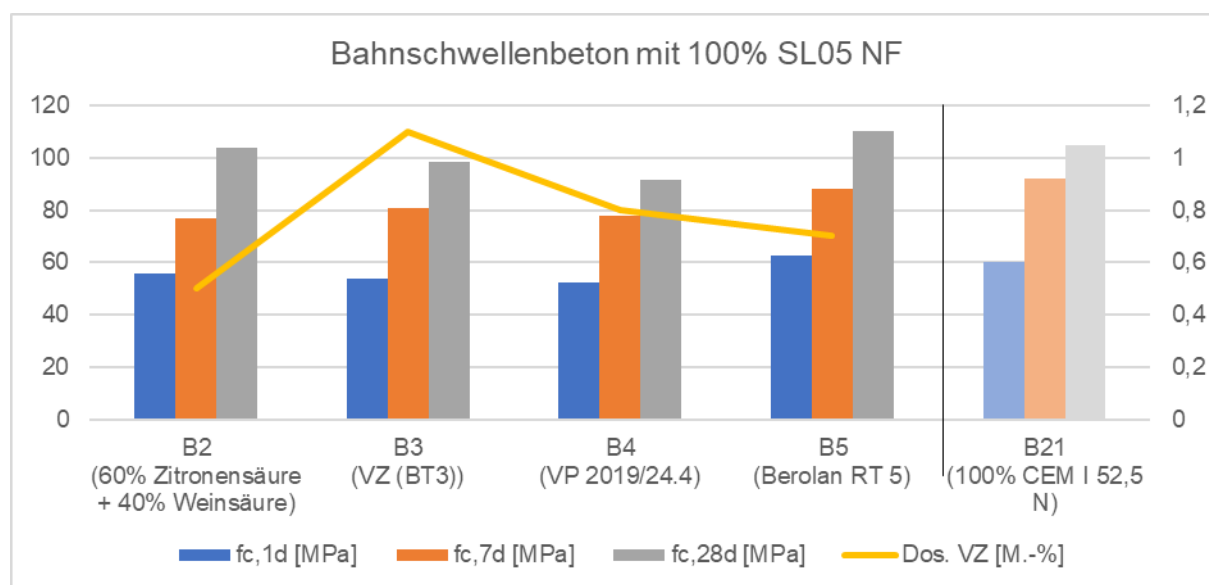
**Bild 6** Betonsonde nach Humm

Die höchsten Druckfestigkeiten in Verbindung mit der längsten Verarbeitbarkeit wurden mit den Betonen B2 und B5 erreicht. In der Praxis erweist sich die Dosierung von einer anstelle mehrerer Verzögerungskomponenten als einfacher. Daher wurde für die Praxisversuche das Produkt „Berolan RT 5“ der Fa. Berolan GmbH verwendet.

Die höchsten Frühfestigkeiten (1d) wurden mit dem Fließmittel ViscoCrete (VC) 3360 der Firma Sika Deutschland GmbH erreicht.

**Tabelle 8** Bahnschwellenbeton mit 100 M.-% SL05NF

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Art VZ	60% Zitronensäure + 40% Weinsäure		VZ (BT3)	VP 2019/24.4	Berolan RT 5			
Dos. VZ [M.-%]	0,5		1,1	0,8	0,7	0,8	0,7	0,7
Art FM	ACE 394	VC 3360	VC 3360	VC 3360	VC 3360	Premment 970 X	Master Ease 5020	ACE 314
Dos. FM [M.-%]	0,48	1,72	0,72	1,1	1,19	0,71	1,2	1,2
Verdichtungsmaß	1,16	1,13	1,21	1,16	1,16	1,17	1,2	1,23
$f_{c,1d}$ [MPa]	49,1	55,9	54,0	52,2	62,8	49,4	53,2	53,3
$f_{c,7d}$ [MPa]	70,6	76,6	80,7	78,0	88,2	70,6	77,1	78,5
$f_{c,28d}$ [MPa]	92,6	103,7	98,4	91,3	110,0	85,6	90,3	92,2
Erstarren [min]	50	55	40	50	45	55	55	55



**Bild 7** Einfluss der Verzögerungsart auf die Druckfestigkeit bei Verwendung von 100 M.-% SL05NF und Vergleich mit Referenzbeton (CEM I)

**Tabelle 9** zeigt die Ergebnisse, die mit 40 M.-% SR03 (128 kg/m<sup>3</sup>) und 60 M.-% CEM II/A-S 42,5 R (192 kg/m<sup>3</sup>) in der Betonzusammensetzung gemäß **Tabelle 7** erzielt wurden. Im Gegensatz zum Einsatz von 100 M.-% SL05NF konnte mit einer Kombination von SR03 und CEM II/A-S nur eine Druckfestigkeit von 50 MPa nach einem Tag erreicht werden. Die Zugabe von verschiedenen Zusätzen (z.B. Lithiumsalz, Anhydrit) führte zu einer Erhöhung der Druckfestigkeiten.

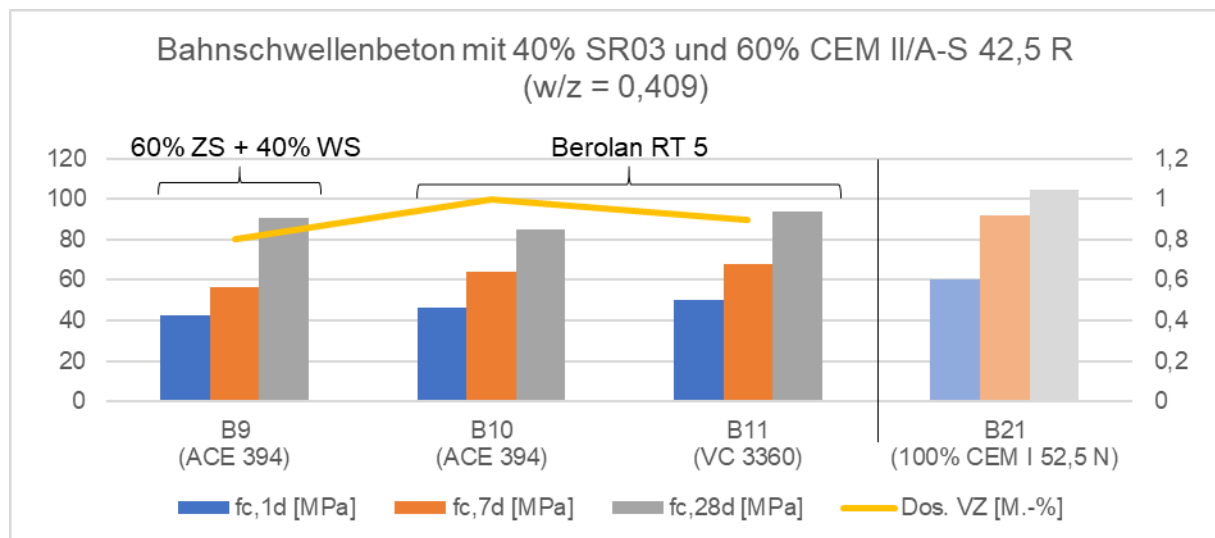


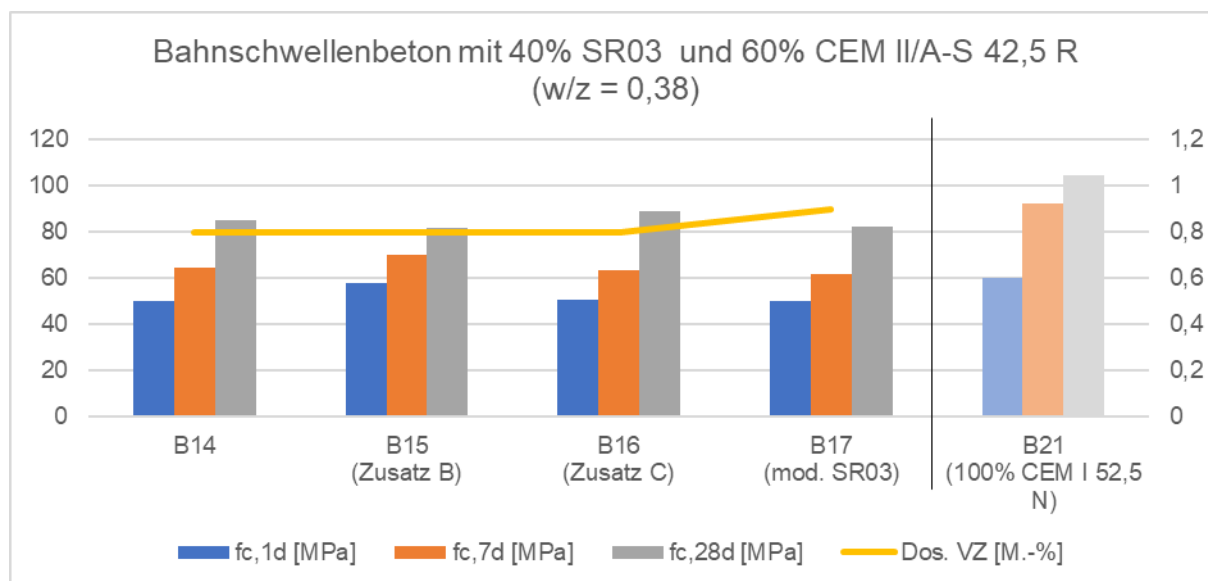
**Tabelle 9** Bahnschwellenbeton mit 40 M.-% SR03 und 60 M.-% CEM II/A-S 42,5 R

	B9	B10	B11	B12 (Zusatz A)	B13 (Zusatz A + MHK)	B14	B15 (Zusatz B)	B16 (Zusatz C)	B17 (mod. SR03)
w/z	0,409					0,38			
Art VZ	1)	Berolan RT 5							
Dos. VZ [M.-%]	0,8	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,9
Art FM	ACE 394			VC 3360					
Dos. FM [M.-%]	0,48	0,42	1,2	1,2	1,1	2,17	2,16	2,15	1,33
Verdichtungs- maß	1,15	1,16	1,18	1,22	1,15	1,16	1,22	1,17	1,18
f <sub>c,1d</sub> [MPa]	42,4	46,4	50,2	59,1	41,4	50,3	57,7	50,8	50,4
f <sub>c,7d</sub> [MPa]	56,7	64,3	67,7	75,1	58,7	64,7	70,0	63,7	62,0
f <sub>c,28d</sub> [MPa]	90,6	85,3	93,7	97,9	77,0	85,3	81,5	89,1	82,1
Erstarren [min]	60	55	60	60	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.

1) 60 M.-% VZ-ZS+ 40 M.-% VZ-WS

n. b.: nicht bestimmt

**Bild 8** Druckfestigkeit bei Verwendung von 40 M.-% SR03 + 60 M.-% CEM II/A-S 42,5 R (w/z = 0,409)



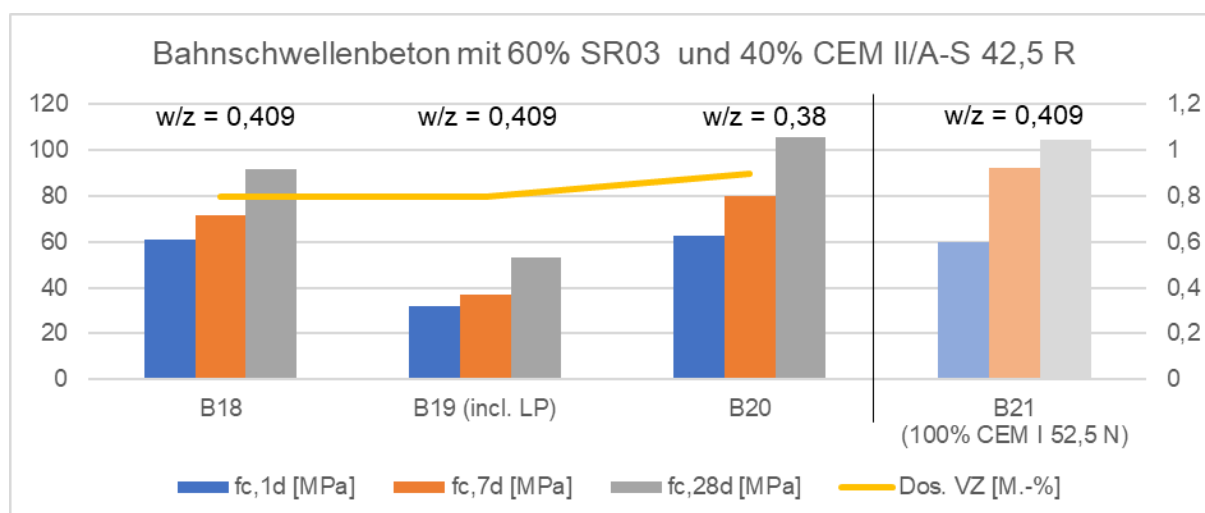
**Bild 9** Druckfestigkeit bei Verwendung von 40 M.-% SR03 + 60 M.-% CEM II/A-S 42,5 R (w/z = 0,38)

Durch die Erhöhung des SR03-Anteils auf 60 M.-% wurde eine Erhöhung der Druckfestigkeiten ohne weitere Zugabe von Zusätzen erwartet. **Tabelle 10** zeigt, dass ähnliche Druckfestigkeiten wie bei der Referenzmischung mit CEM I (B21) erreicht wurden, allerdings verringerte sich gleichzeitig der Frost-Tausalz-Widerstand (siehe **Tabelle 14**). Die Zugabe eines LP-Bildners verringerte die Druckfestigkeiten deutlich. Der Frost-Tausalz-Widerstand konnte ebenfalls nicht verbessert werden.

**Tabelle 10** Bahnschwellenbeton mit 60 M.-% SR03 und 40 M.-% CEM II/A-S 42,5 R

	B18	B19 (incl. LP)	B20	B21 (100 M.-% CEM I)
w/z	0,409		0,38	0,409
Art VZ	Berolan RT 5			-
Dos. VZ [M.-%]	0,8	0,8	0,9	-
Art FM	VC 3360			ACE 40
Dos. FM [M.-%]	1,02	0,31	2,0	0,62
Verdichtungsmaß	1,20	1,28	1,16	1,23
f <sub>c,1d</sub> [MPa]	61,2	32,2	62,9	60,1
f <sub>c,7d</sub> [MPa]	71,7	36,8	80,1	92,2
f <sub>c,28d</sub> [MPa]	91,9	53,3	105,8	104,6
Erstarren [min]	35	n. b.	n. b.	135

n. b.: nicht bestimmt



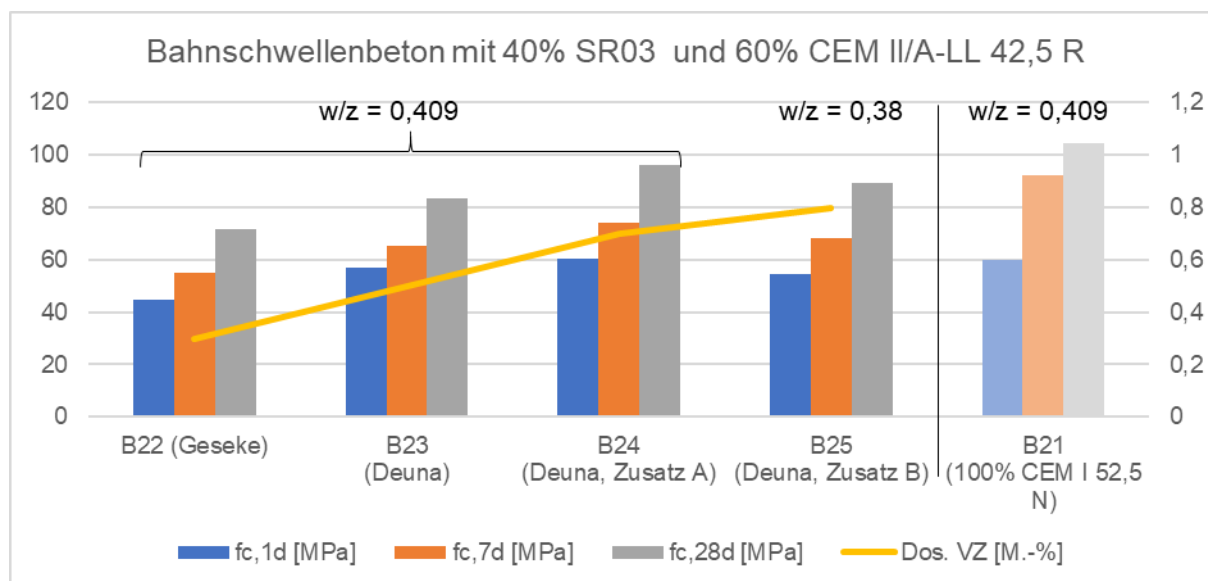
**Bild 10** Druckfestigkeit bei Verwendung von 60 M.-% SR03 + 40 M.-% CEM II/A-S 42,5 R

**Tabelle 11** zeigt die Ergebnisse, die mit 40 M.-% SR03 und 60 M.-% CEM II/A-LL 42,5 R in der Betonzusammensetzung gemäß **Tabelle 7** ermittelt wurden. Auch hier führte die Zugabe von Zusätzen zu einer weiteren Verbesserung der Druckfestigkeiten ähnlich B12 und B15 (**Tabelle 9**). Auch der Frost-Tausalz-Widerstand des Betons mit 40 M.-% SR03 und 60 M.-% CEM II/A-LL wurde mit der Zugabe des Zusatzes B so verbessert, dass die Kriterien zur Abwitterung eingehalten werden konnten (**Tabelle 14**).

**Tabelle 11** Bahnschwellenbeton mit 40 M.-% SR03 und 60 M.-% CEM II/A-LL 42,5 R

	B22	B23	B24 (Zusatz A)	B25 (Zusatz B)	B26 (Zusatz B + LP)
Werk	Geseke	Deuna			
w/z	0,409			0,38	
Art VZ	Berolan RT 5				
Dos. VZ [M.-%]	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9
Art FM	VC 3360				
Dos. FM [M.-%]	1,08	0,68	0,68	1,69	1,69
Verdichtungsmaß	1,15	1,21	1,20	1,23	1,13
f <sub>c,1d</sub> [MPa]	44,7	57,2	60,4	54,6	43,9
f <sub>c,7d</sub> [MPa]	55,1	65,4	74,2	68,1	n. b.
f <sub>c,28d</sub> [MPa]	71,8	83,6	96,1	89,4	78,4
Erstarren [min]	25	20	40	n. b.	n. b.

n. b.: nicht bestimmt

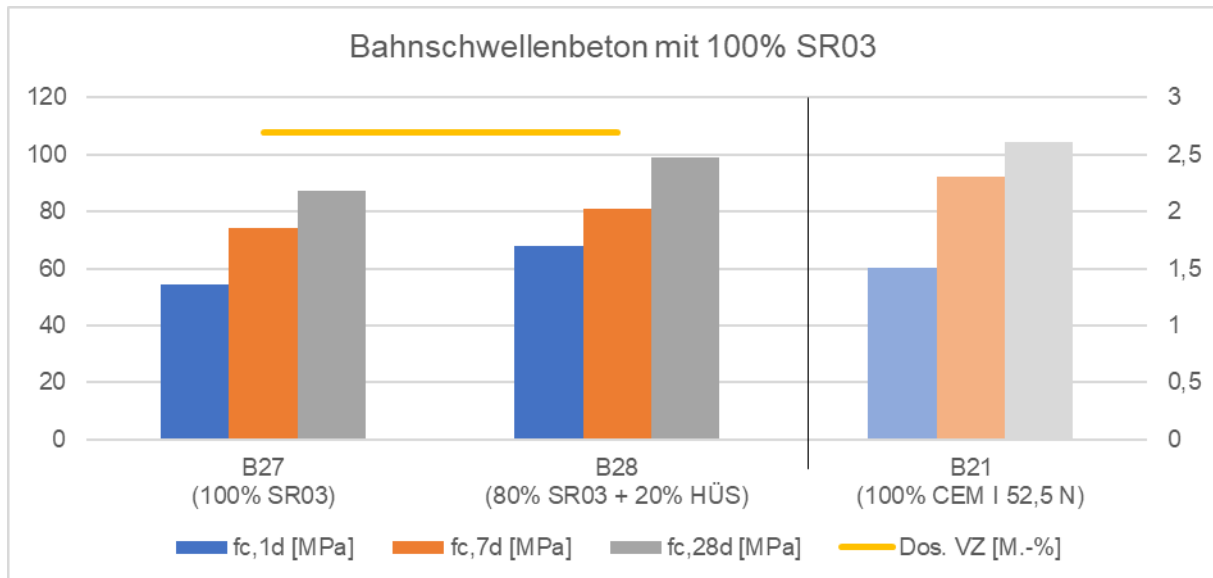


**Bild 11** Druckfestigkeit bei Verwendung von 40 M.-% SR03 + 60 M.-% CEM II/A-LL 42,5 R

**Tabelle 12** zeigt die Ergebnisse, die mit 100 M.-% SR03 (Version 2020) gewonnen wurden. Die Mischung von 80 M.-% SR03 und 20 M.-% Hüttensand führte zu einem weiteren Festigkeitsanstieg. Es waren jedoch höhere Dosierung des Verzögerers erforderlich.

**Tabelle 12** Bahnschwellenbeton mit 100 M.-% SR03

	<b>B27 (100 M.-% SR03, Variante 2020)</b>	<b>B28 (80 M.-% SR03-Variante 2020 + 20 M.-% HÜS)</b>
w/z	0,38	
Dos. VZ [M.-%]	2,7	
Art FM	ViscoCrete 3360	
Dos. FM [M.-%]	0,64	0,86
Verdichtungsmaß	1,29	1,31
f <sub>c,1d</sub> [MPa]	54,2	67,8
f <sub>c,7d</sub> [MPa]	74,3	80,9
f <sub>c,28d</sub> [MPa]	87,5	98,9
Erstarren [min]	43	55



**Bild 12** Druckfestigkeit bei Verwendung von 100 M.-% SR03 ( $w/z = 0,38$ )

#### 4.6.3 Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

Von ausgewählten Rezepturen wurden CF- bzw. CDF-Prüfkörper hergestellt und in Anlehnung an DIN CEN/TS 12390-9:2017-5 geprüft. Die Frostlagerungen begannen im Alter von 35 Tagen. Als Prüflösungen kamen destilliertes Wasser bzw. eine 3%ige NaCl-Lösung zum Einsatz. Die Abwitterung wurden nach 28 Frost-Tau-Wechseln (CDF) bzw. 56 Frost-Tau-Wechseln (CF) bestimmt. An den CF-Prüfkörpern wurde das relative dynamische E-Modul nach 56 Frost-Tau-Wechseln nach dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ bestimmt.

An Rezeptur B12 mit 40 M.-% SR03 und 60 M.-% CEM II/A-S 42,5 R wurde die CDF-Prüfung zusätzlich nach einer Vorlagerung von 70 anstelle 35 Tagen durchgeführt (**Tabelle 13**). Dies führte zu einer geringeren Abwitterung. Ein vergleichbares Ergebnis konnte bei der Rezeptur B24 mit 40 M.-% SR03 und 60 M.-% CEM II/A-LL 42,5 N nicht erzielt werden (**Tabelle 14**).

Während die Zugabe von Zusatz C (Anhydrit) den Frost-Tausalz-Widerstand stark verringerte, führte die Zugabe des Zusatzes B bei Rezeptur B15 zu einer Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes (**Tabelle 13**). Daraufhin wurde in Trino am 16.12.2020 eine neue Charge SR03 mit der Probennummer 21/0065 hergestellt, welche den Zusatz B enthielt. Bei dem Beton B17 kam der modifizierte SR03 zum Einsatz. **Tabelle 13** zeigt, dass der Frost-Tausalz-Widerstand deutlich verbessert werden konnte. Auch die beiden Wiederholungsmischungen zeigten ein ähnlich positives Ergebnis.

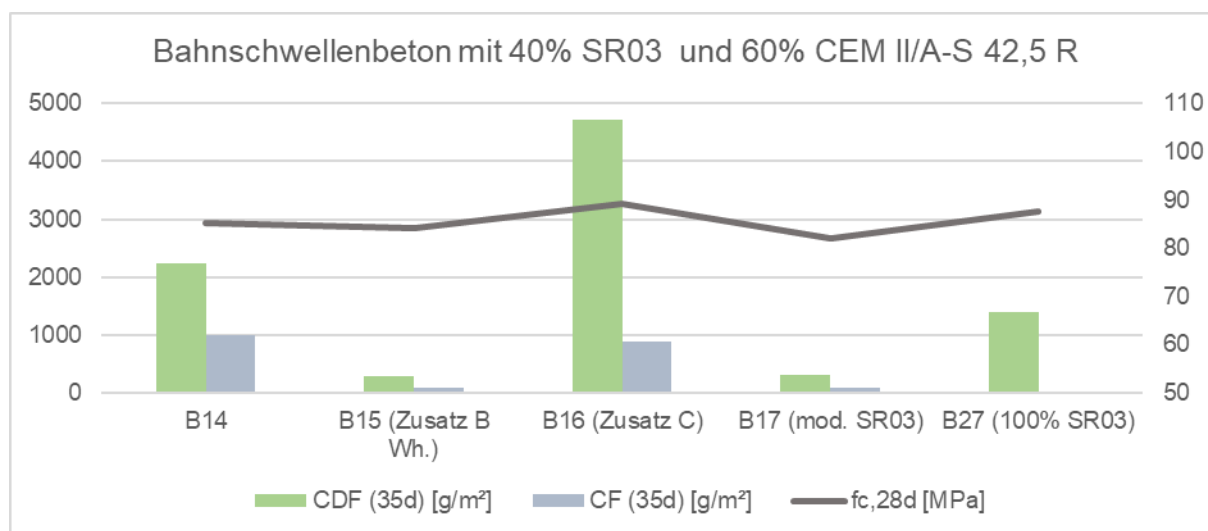
**Bild 13** zeigt die grafische Darstellung des Frostwiderstandes. Vergleichend ist der Beton mit 100 M.-% SR03 dargestellt. Mit  $1401 \text{ g/m}^2$  wurden mit 100 M.-% SR03 doppelt so hohe Abwitterungen festgestellt wie mit 40 M.-% mod. SR03 und 60 M.-% CEM II/A-S 42,5 R.

**Tabelle 13** Ergebnisse CF- und CDF-Prüfung mit 40 M.-% SR03 und 60 M.-% CEM II/A-S 42,5 R

	B12 (Zusatz A)	B13 (Zusatz A + MHK)	B14	B15 (Zusatz B)	B15 (Zusatz B) Wh.	B15 (Zusatz B) Wh. 2	B16 (Zusatz C)	B17 (mod. SR03)	B17 (Wh.)
w/z	0,409	0,409	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Verdichtungsmaß	1,23	1,15	1,16	1,22	1,18	n. b.	1,17	1,18	1,2
LP [Vol.-%]	n. b.	1,7	n. b.	1,7	1,3	n. b.	n. b.	2,4	n. b.
f <sub>c,28d</sub> [MPa]	93,9	77,0	85,3	81,5	84,1	84,4	89,1	82,1	76,6
CDF (35d) [g/m <sup>2</sup> ]	2314	1274	2233	615	293	896	4717	318	578
CDF (70d) [g/m <sup>2</sup> ]	1867	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
CF (35d) [g/m <sup>2</sup> ]	n. b.	391	999	n. b.	97	n. b.	887	86	n. b.
Änderung rel. dyn. E-Modul [%]	n. b.	137	102	n. b.	119	n. b.	103	109	n. b.

n. b.: nicht bestimmt

MHK: Mikrohohlkugeln

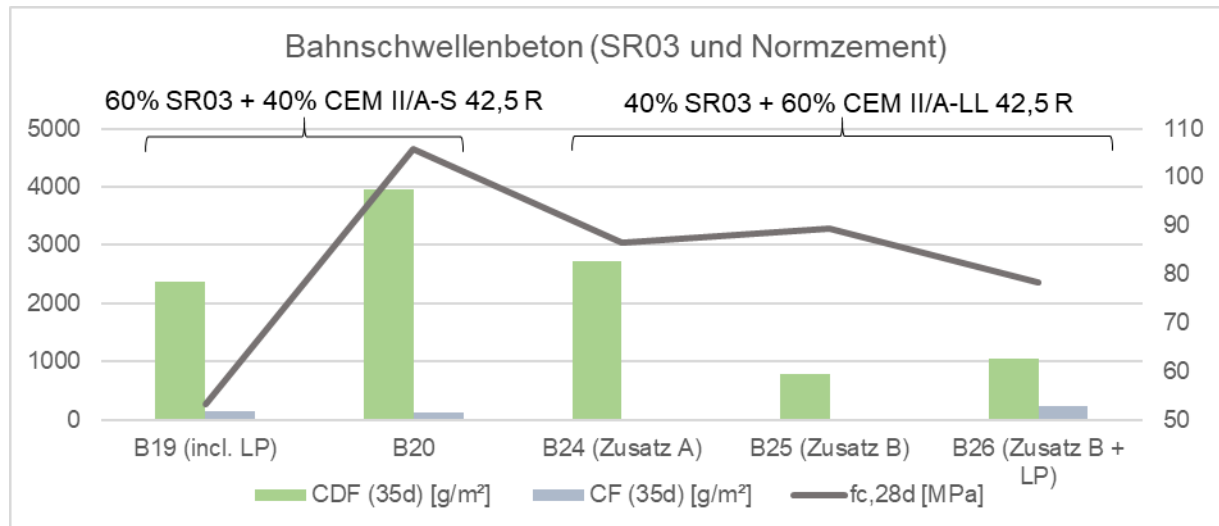


**Bild 13** Frostwiderstand (40 M.-% SR03 + 60 M.-% CEM II/A-S 42,5 R)

**Tabelle 14** Ergebnisse CF- und CDF-Prüfung mit SR03 und verschiedenen CEM II - Zementen

	B19 (incl. LP)	B20	B24 (Zusatz A)	B25 (Zusatz B)	B26 (Zusatz B + LP)	B27
CEM II	A-S	A-S	A-LL	A-LL	A-LL	n. b.
Dos. SR03 [M.-%]	60	60	40	40	40	100
w/z	0,409	0,38	0,409	0,38	0,38	0,38
Verdichtungsmaß	1,28	1,16	1,23	1,23	1,13	1,29
LP [Vol.-%]	5,5	n. b.	n. b.	1,8	4,1	n. b.
$f_{c,28d}$ [MPa]	53,3	105,8	86,4	89,4	78,4	87,5
CDF (35d) [g/m <sup>2</sup> ]	2375	3962	2727	788	1046	1401
CDF (70d) [g/m <sup>2</sup> ]	n. b.	n. b.	2732	n. b.	n. b.	n. b.
CF (35d) [g/m <sup>2</sup> ]	140	119	n. b.	n. b.	244	117
Änderung rel. dyn. E- Modul [%]	103	97	n. b.	n. b.	99	118

n. b.: nicht bestimmt

**Bild 14** Frostwiderstand (SR03 und verschiedene CEM II - Zemente)

Auf der Suche nach weiteren Parametern, die die Unterschiede im Frost-Tausalz-Widerstand der verschiedenen Betone erklären können, wurden die Prüflösungen nach Beendigung der CDF-Tests analysiert. (Tabelle 15).

**Tabelle 15** Eluatanalyse der Prüflösungen

Material	Anzahl FTW	Abwitterung nach 28 FTW [g/m <sup>2</sup> ]	Eluat Konzentrationen in [mg/l]							
			Al	Ca	Fe	K	Mg	S	SO <sub>4</sub>	Si
NaCl-Lösg.	0		< 0,5	39	< 0,5	31	6	20	60	3
B12	4	2314	19	3,5	< 0,5	128	< 0,5	266	796	1,5
	14		3,5	5,0	< 0,5	56	< 0,5	73	218	12
B14	14	2233	28	26	< 0,5	61	< 0,5	61	182	< 1,0
	28		15	< 4	< 0,5	70	< 0,5	31	92	1,6
B15	4	615	15	7,0	< 0,5		< 0,5	206	618	< 0,5
B17	4	318	35	< 4	< 0,5	64	1,6	86	257	< 1,0
	14		< 0,5	< 4	< 0,5	26	0,64	32	97	< 1,0
	28		7,9	< 4	< 0,5	21	< 0,5	37	111	< 1,0
B24	4	2727	19	4,5	< 0,5	87	< 0,5	207	620	2
	14		3	9	< 0,5	62	< 0,5	81	242	15
B25	4	788	40	8,0	< 0,5	123	< 0,5	265	795	< 0,5
B26	4	1046	< 0,5	18	< 0,5	118	< 0,5	261	781	< 0,5
	14		31	21	< 0,5	70	0,5	95	284	3,2
	28		20	23	< 0,5	62	< 0,5	87	260	5,4

Analyse der Lösungen auf Aluminium, Schwefel, Calcium, Eisen, Kalium, Magnesium und Silizium:

Die hergestellten Lösungen wurden über einen Filterfilter abfiltriert. Danach wurde ein Teil des Eluats mittels Membranspritzenfilter mit einer Porengröße 0,45µm in 50ml PP-Röhrchen gefüllt, mit Salpetersäure suprapur angesäuert.

Nach entsprechenden Verdünnungen wurden die Lösungen mittel ICP-OES Spektrometer analysiert.

Die Analysen zeigten, dass schon nach 4 Frost-Tau-Wechseln eine große Menge an Sulfat und Kalium in Lösung geht, unabhängig vom Material.

Es konnte allerdings kein großer Unterschied zwischen den stark abgewitterten Betonen (B14) und den Betonen festgestellt werden, die geringe Abwitterungen (B17) zeigten.

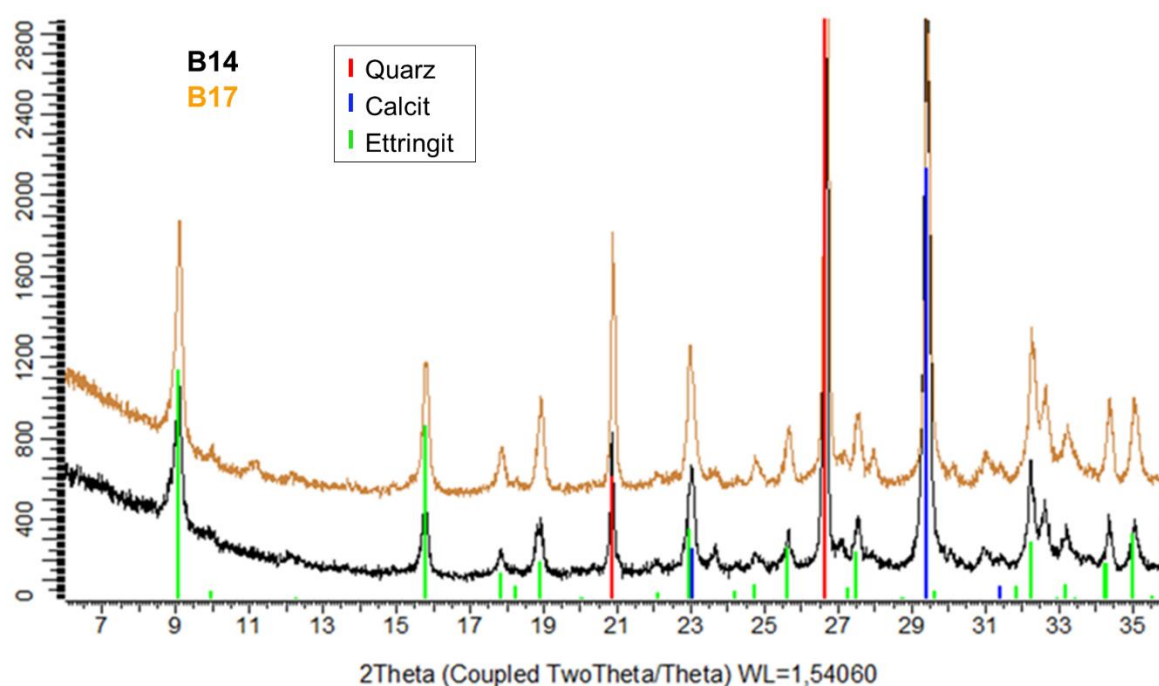
Außerdem konnten keine Zusammenhänge zwischen den gelösten Elementen und der CDF-Abwitterung gefunden werden, allerdings deutet die hohe Sulfatkonzentration auf eine Auslaugung des Betons hin. Weitere Untersuchungen zur Klärung der Lösungsvorgänge während der CDF-Prüfung werden im WDI erfolgen.



#### 4.6.4 Physikalisch-chemische Untersuchungen am Bindemittel und am erhärteten Beton

Vom Beton B14 (ohne Zusätze, hohe Abwitterungen im CDF-Test) und Beton B17 (neue SR03-Modifikation, geringe Abwitterungen im CDF-Test) wurde die Abwitterung nach 28 FTW aufgefangen, bei 40°C getrocknet und mittels qualitativer Röntgenbeugung analysiert. Es kam das Diffraktometer D4 der Fa. Bruker zum Einsatz.

Die Röntgendiffraktometrie (**Bild 15**) zeigt in beiden Proben die gleiche mineralogische Zusammensetzung bestehend aus Quarz, Calcit und Ettringit. Das abgewitterte Material gibt demnach keinen Hinweis auf das unterschiedliche Verhalten beider Proben während der CDF-Prüfung.



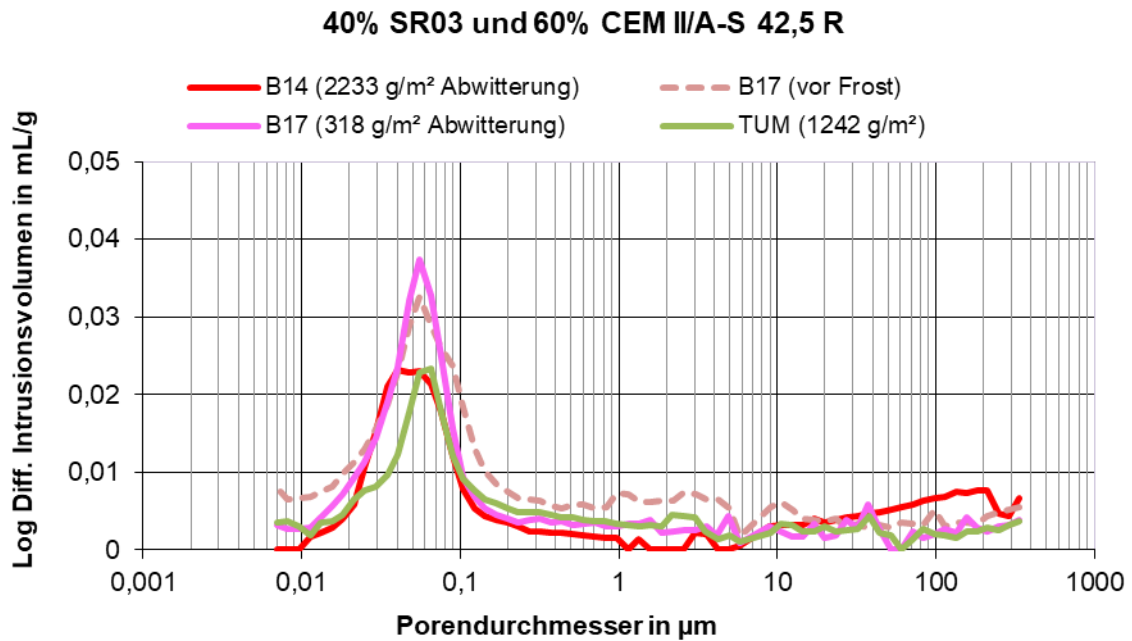
**Bild 15** RDA der Abwitterung CDF nach 28 FTW-40°C getrocknet

#### 4.6.5 Gefügeuntersuchungen

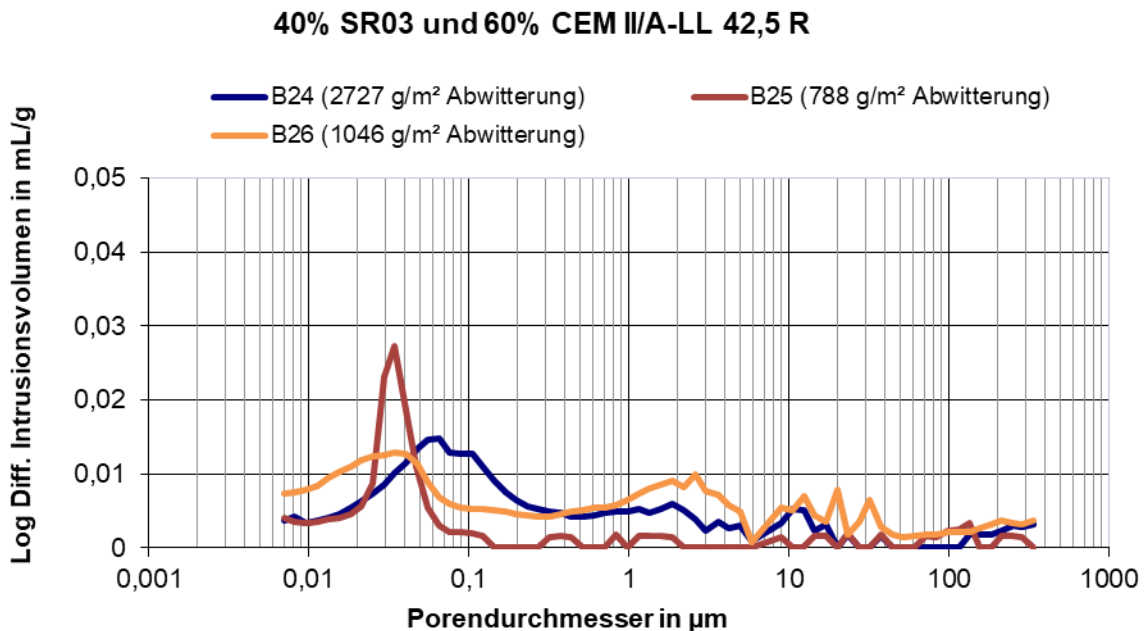
Mittels Quecksilberdruckporosimetrie wurde das Gefüge des Kernbereiches von CDF-Prüfkörpern nach dem Frostversuch untersucht. Es wurde das Model AutoPore IV 9505 von der Fa. Micromeritics verwendet. Von den Prüfkörpern wurden etwa 10mm große Stücke für 24h getrocknet. Um die Porenstruktur der entstandenen Kristalle nicht zu zerstören, wurden die Probekörper im Vorfeld bei 40°C anstelle von 105°C im Ofen getrocknet. Am Beton B17, welcher die geringste Abwitterung aufwies, wurde ein hoher Porenanteil im Bereich von < 0,05µm festgestellt. Eine von der TU München zugesandte Probe dagegen zeigte einen geringeren Porenanteil, obwohl es sich um die gleiche Rezeptur wie bei Probe B17 handelte. Gleichzeitig witterte sie stärker ab. Der Porenanteil im Bereich < 0,05µm könnte einen Einfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand haben.

Aus **Bild 16** geht außerdem hervor, dass sich das Porengefüge im Inneren des Betons nach dem Frostversuch nicht wesentlich geändert hat.

**Bild 17** zeigt die Porenverteilungen der drei Betone B24 bis B26. Auch hier enthält die Probe mit den geringsten Abwitterungen im CDF-Test den höchsten Anteil an Poren < 0,05µm.



**Bild 16** Quecksilberdruckporosimetrie am CDF-Prüfkörper

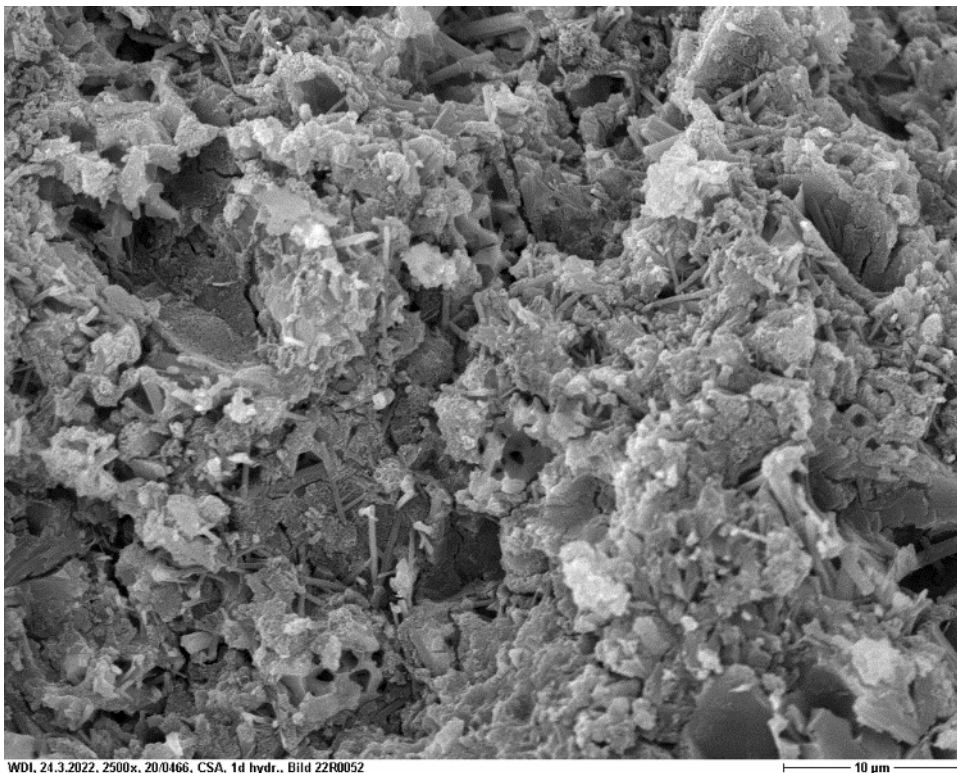


**Bild 17** Quecksilberdruckporosimetrie am CDF-Prüfkörper

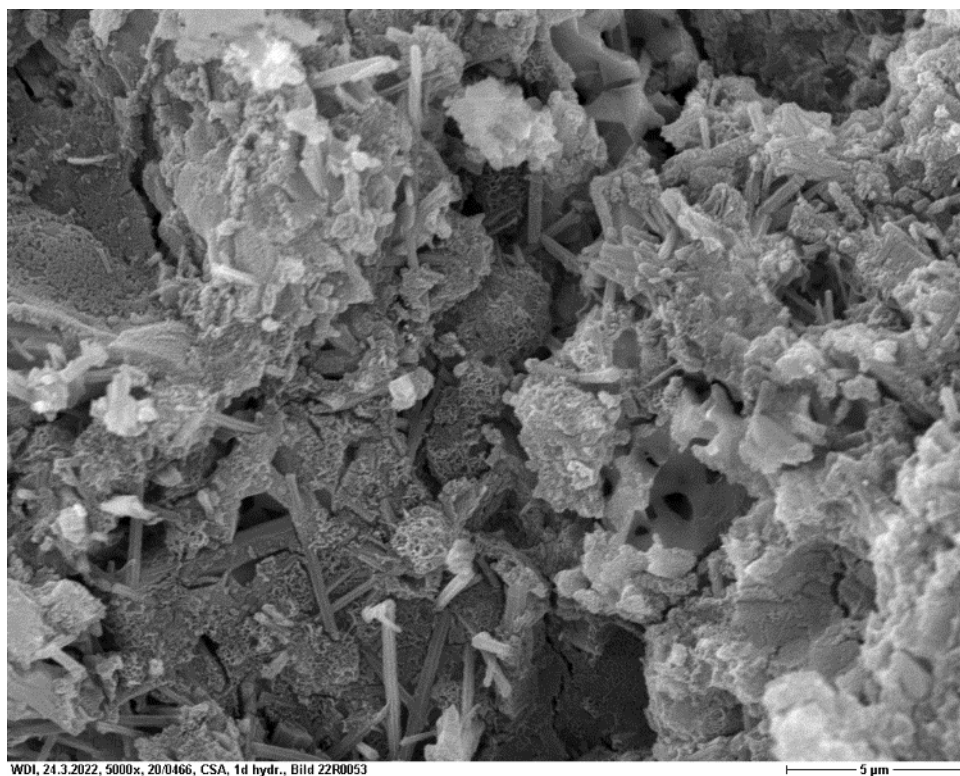
#### 4.6.6 REM-Aufnahmen

Für die Untersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop wurden die beiden CSA-Proben SR03 aus den Jahren 2020 und 2021 jeweils mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 0,50$  für 1 Tag hydratisiert und bei  $40^{\circ}\text{C}$  getrocknet. Die frisch gebrochenen Bruchstücke wurden mit Platin besputtert und im Cambridge Stereoscan 360 untersucht.

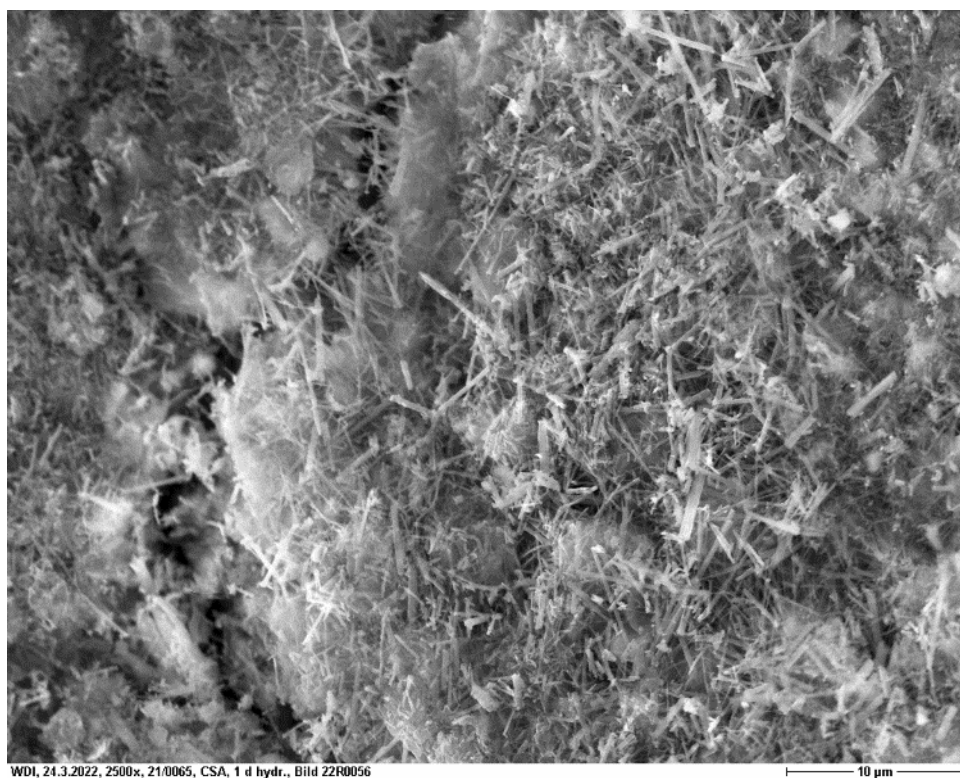
Die folgenden Abbildungen (SE-Modus) zeigen, dass die SR03-Probe aus dem Jahr 2020 kompaktere Hydratphasen nach 24h ausgebildet hatte als der modifizierte SR03 aus 2021. Letzterer bildet deutlich feinere Ettringitkristalle während der Hydratation aus. Dies könnte der Grund für das feinporige Gefüge sein, besonders im Bereich zwischen  $0,01$  und  $0,1 \mu\text{m}$  (vgl. **Bild 16**). Die Normdruckfestigkeiten des modifizierten SR03 fielen geringer aus (**Bild 22**). Dies ist mit einer langsameren Entwicklung von Ettringitkristallen zu begründen (vgl. **Bild 23**), welche an weiteren abgestoppten Zementleimproben ermittelt wurden. Es ist ersichtlich, dass sich bei der Probe mit dem modifizierten SR03 schon nach 10 min mehr Hydratphasen ausbildeten als in der SR03-Probe aus dem Jahr 2020. Die weitere Reaktion der SR03-Probe lief langsamer ab, wodurch der Ettringitgehalt der modifizierten Probe bereits nach einer Stunde Hydratation geringer ist als in der Vergleichsprobe. Der Unterschied vergrößert sich bis zu einer Hydratationsdauer von einem Tag noch deutlich. Dies könnten die niedrigeren Druckfestigkeiten erklären.



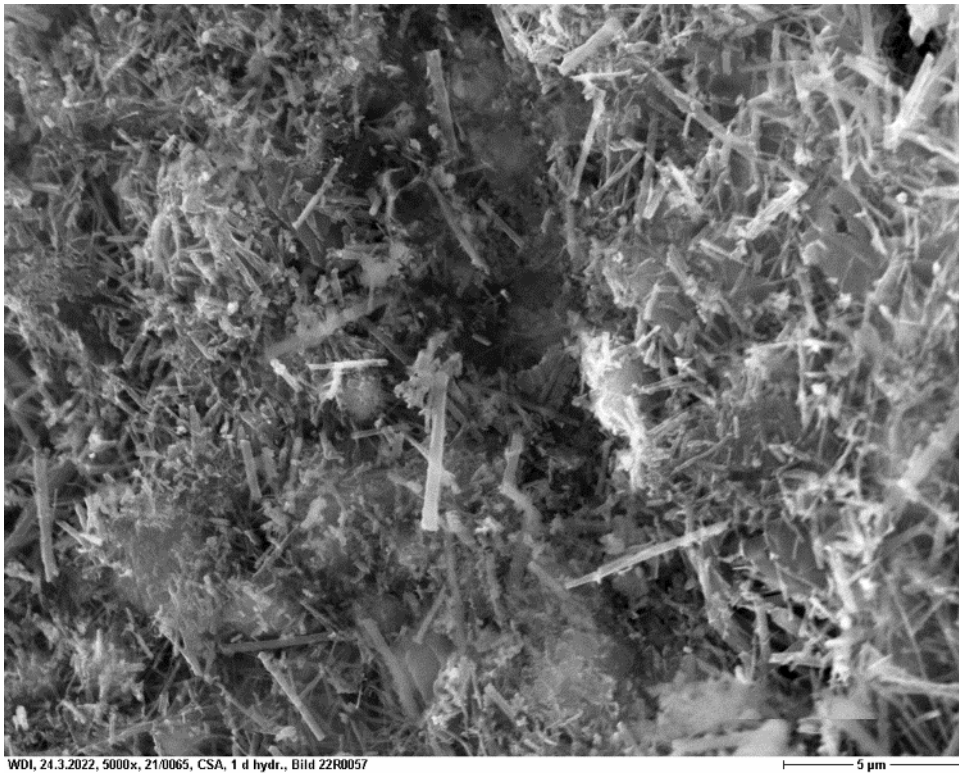
**Bild 18** REM-Aufnahmen (2500x) von Zementleim (1d) aus 100 M.-% SR03 (Variante 2020)



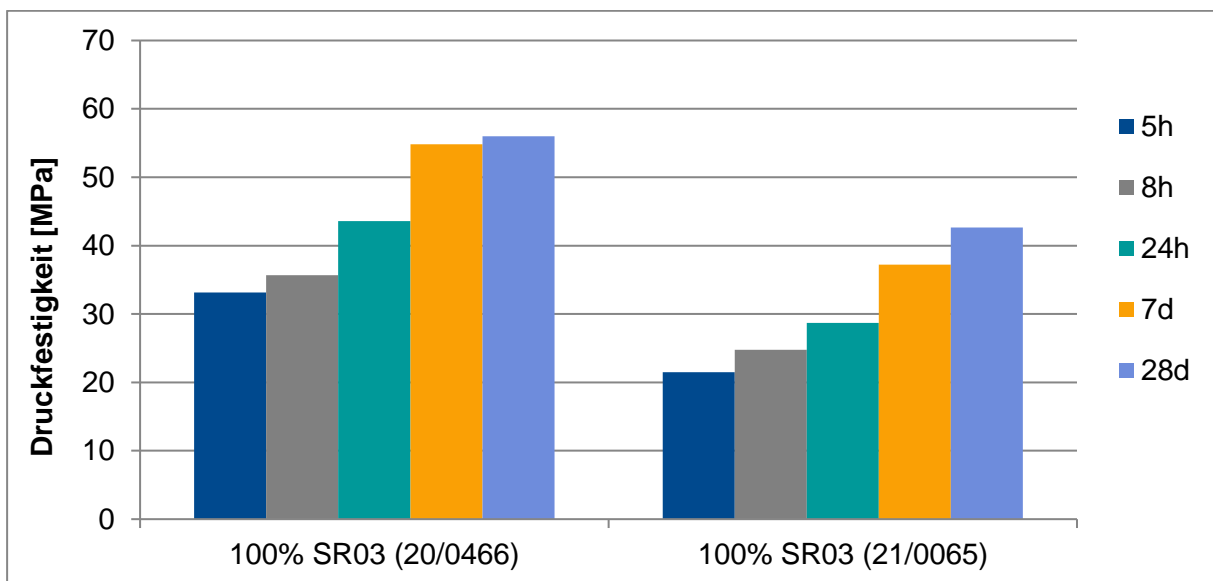
**Bild 19** REM-Aufnahmen (5000x) von Zementleim (1d) aus 100 M.-% SR03 (Variante 2020)



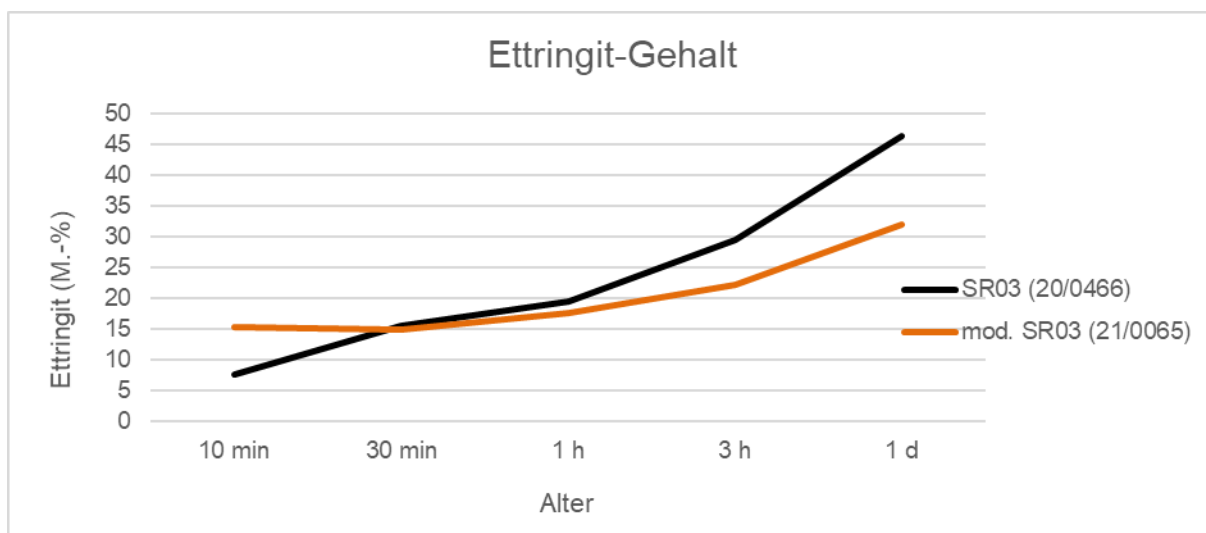
**Bild 20** REM-Aufnahmen (2500x) von Zementleim (1d) aus 100 M.-% SR03 (Variante 2021)



**Bild 21** REM-Aufnahmen (5000x) von Zementleim (1d) aus 100 M.-% SR03 (Variante 2021)



**Bild 22** Vergleich Normdruckfestigkeiten SR03 (Variante 2020 mit Variante 2021)



**Bild 23** Ettringit-Gehalt [M.-%]

#### 4.7 Wahl der Ausgangsstoffe für die weiteren Untersuchungen

Für die weiteren Versuche wurden die folgenden Ausgangsstoffe gewählt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

- CEM II/A-S 42,5 R aus dem Werk Deuna
- CEM II/A-LL 42,5 R aus dem Werk Geseke
- Calciumsulfoaluminatzement (CSA) „Next Base SR03“, modifiziert mit Zusatz B
- Calciumsulfoaluminatzement (CSA) SL05NF (Kombination mit CEM I)
- Fließmittel BASF Glenium ACE 460 für den Referenzbeton mit CEM I
- Fließmittel Sika ViscoCrete 3360 für die Prüfbetone mit CSA-Zementen
- Verzögerer Berolan RT5 für die Prüfbetone mit CSA-Zementen

Die Zusammensetzung des Betons für die weiteren Untersuchungen ist in der folgenden Tabelle angegeben.

**Tabelle 16** Bahnschwellenrezeptur für weiteren Projektverlauf

	Stoffmenge
SR03 (mod.)	128 kg/m <sup>3</sup>
CEM II/A-S 42,5 R	192 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	122 kg/m <sup>3</sup>
ViscoCrete 3360 (Sika GmbH Deutschland)	4,25 kg/m <sup>3</sup>
Berolan RT 5 (VZ)	2,88 kg/m <sup>3</sup>
Sand 0/2	699 kg/m <sup>3</sup>
Splitt 8/11	377 kg/m <sup>3</sup>
Splitt 11/16	669 kg/m <sup>3</sup>
Splitt 16/22	293 kg/m <sup>3</sup>

## 5 Versuche und Ergebnisse – VDZ Technology gGmbH

### 5.1 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Die Betonversuche wurden mit Gesteinskörnung aus dem Betonschwellenwerk Aschaffenburg der RAILONE GmbH durchgeführt. Die Betonversuche erfolgten mit Sand 0/2 mm aus Rodgau-Niederroden und Granitsplitt 8/11 mm, 11/16 mm und 16/22 mm aus Groß-Bieberau. Die Sieblinie kann Bild 24 entnommen werden. Die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung wurde im VDZ bei der Festlegung der Zugabewassermenge wie folgt berücksichtigt: Die Gesteinskörnung wurde bei 105°C getrocknet. Die Zugabe des fehlenden Wassers bis zum Gesteinskörnungszustand „kernfeucht, oberflächentrocken“ (3 %) erfolgte bei der Herstellung des Betons.

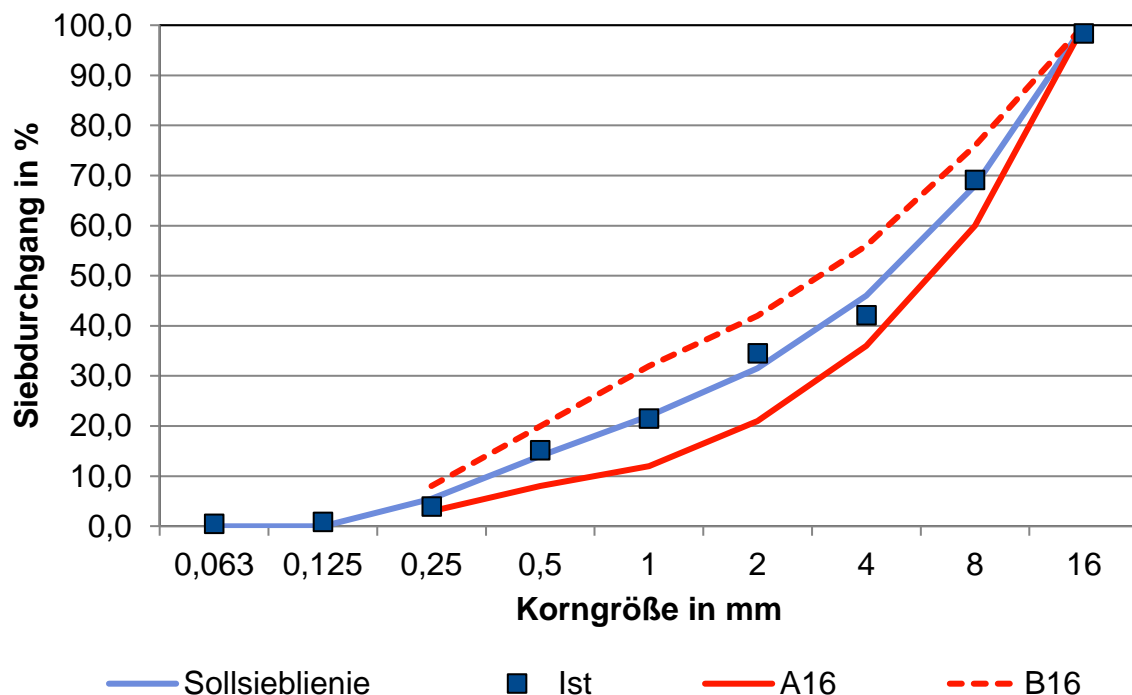


Bild 24 Sieblinie der Gesteinskörnung

Als Zusatzmittel wurden das Fließmittel BASF Glenium ACE 460 für die Herstellung des Referenzbetons mit CEM I sowie das Fließmittel Sika ViscoCrete 3360 und der Verzögerer Berolan RT5 für alle Betone mit CSA-Zementen verwendet.

### Alkaligehalte der Zemente

Die Alkaligehalte ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalente) der Zemente nach DIN EN 196-2:2013-10 sind in Tabelle 17 angegeben. Die Werte der Zemente SL05 NF und CEM II/A-LL + SR03 lagen mit  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalenten von  $\leq 0,60$  M.-% im Bereich von Zementen mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt nach DIN 1164-10 (NA-Zemente). Die  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalente der Zemente CEM I 52,5 N und CEM II/A-S + SR03 lagen etwas darüber.

**Tabelle 17** Alkaligehalt von Zementen nach DIN EN 196-2:2013-10

Zement	CEM I 52,5 N	SL05 NF	CEM II/A-S + SR03	CEM II/A-LL + SR03
Kaliumoxid	0,78	0,42	0,73	0,39
Natriumoxid	0,18	0,17	0,22	0,21
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent	0,69	0,45	0,70	0,47

## 5.2 Wirksame Alkaligehalte der Zemente

Der wirksame Alkaligehalt der Zemente wurde mit dem Auspress- und dem Lösungsverfahren nach [1] in Anlehnung an den die TGL 28 104/17 [11] bestimmt.

### Auspressverfahren

Zementleim wurde mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 0,50$  hergestellt. Der Zementleim wurde luftblasenfrei in eine verschließbare PE-Flasche gefüllt und 24 Stunden bei 20 °C und 65 % relativer Feuchte im Überkopfschüttler in Bewegung gehalten. Danach wurde die Probe bei 20 °C bei 100 % relativer Feuchte in der Nebelkammer bis zur Prüfung gelagert. Im Alter von 28 Tagen wurden die Porenlösungen der Zementsteine gemäß **Tabelle 18** ausgepresst.

**Tabelle 18** Auspressregime im Auspressverfahren

Lastbereich bezogen auf Probekörper Ø 70 mm	Belastungsgeschwindigkeit bezogen auf Probekörper Ø 70 mm
0 kN bis 100 kN   0 MPa bis 26 MPa	0,5 kN/s   0,13 MPa/s
100 kN bis 1000 kN   26 MPa bis 260 MPa	20 kN/s   5,2 MPa/s
1000 kN bis 3000 kN   260 MPa bis 780 MPa	1,67 kN/s   0,43 MPa/s
3000 kN   780 MPa	konstante Belastung für 7 min

### Lösungsverfahren

Zementleim wurde mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 1,00$  in einem PVC-Weithalsbehälter hergestellt. Der Behälter wurde mit Argon gespült, verschlossen und bis zur Prüfung bei 20 °C und 100 % rel. Feuchte in der Nebelkammer gelagert. Im Alter von 28 Tagen wurde die über dem Zementstein stehende Lösung mit einer Spritze entnommen.

### Analyse der Lösungen

Die gewonnenen Lösungen wurden unmittelbar mittels Teflon-Membranspritzenfilter mit einer Porengröße von 0,45 µm gereinigt und in unbenutzte PP-Zentrifugenröhrchen gefüllt. Die Behälter wurden mit Argon gefüllt und verschlossen.

Mittels Ionenchromatographie (Ionenchromatograph ICS 1000) wurden die Natrium- und Kaliumionenkonzentrationen (Na<sup>+</sup>) und Kalium (K<sup>+</sup>) bestimmt. Die Hydroxidionenkonzentrationen (OH<sup>-</sup>) wurden mittels Säure-Base-Titration mit Hilfe eines Titrators (Mettler Toledo T70) und 0,05-molarer Salzsäure analysiert. Die pH-Werte wurden aus den Hydroxidionenkonzentrationen berechnet.



## Ergebnisse

Die Konzentrationen der Ionen Natrium, Kalium und Hydroxid ( $K^+$ ,  $Na^+$  und  $OH^-$ ) sowie der pH-Wert im Auspress- und im Lösungsverfahren sind in **Tabelle 19** angegeben. Die wirksamen Alkaligehalte der Zemente SL05 NF und CEM II/A-LL + SR03 lagen im Bereich von Zementen mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt nach DIN 1164-10 (NA-Zemente) und somit unter den Werten, die im IGF-Vorhaben 19295 N [1] als Kriterien für Zemente mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt empfohlen wurden: 500 mmol/l im Auspress- bzw. 200 mmol/l im Lösungsverfahren. Die Zemente CEM I 52,5 N und CEM II/A-S + SR03 wiesen Werte über diesen Grenzen auf.

**Tabelle 19** Ergebnisse im Alter von 28 Tagen

Zement	CEM I 52,5 N	SL05 NF	CEM II/A-S + SR03	CEM II/A-LL + SR03
<b>Alkalien</b>				
Na <sub>2</sub> O-Äqu.	0,69	0,45	0,70	0,47
<b>Auspressverfahren 28 d</b>				
Na <sup>+</sup> [mg/l]	2270	2590	3560	3940
Ka <sup>+</sup> [mg/l]	17300	10800	20800	11700
OH <sup>-</sup> [mmol/l]	515	383	-	502
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> [mmol/l]	541	389	687	471
pH	13,71	13,58	-	13,70
<b>Lösungsverfahren 28 d</b>				
Na <sup>+</sup> [mg/l]	865	n. b.	n. b.	n. b.
Ka <sup>+</sup> [mg/l]	6530	n. b.	n. b.	n. b.
OH <sup>-</sup> [mmol/l]	208	n. b.	n. b.	n. b.
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> [mmol/l]	205	n. b.	n. b.	n. b.
pH	13,33	n. b.	n. b.	n. b.

n. b.: nicht bestimmt

## 5.3 Betonversuche

### 5.3.1 Betonzusammensetzung

**Tabelle 20** zeigt die Zusammensetzung der Betone, welche durch die VDZ Technology gGmbH hergestellt wurden. Das Mischregime ist in **Tabelle 21** zusammengefasst. Das Vorfeucht- und Zugabewasser wurde jeweils mit einer Temperatur von  $(4,0 \pm 0,2)$  °C zugegeben.

**Tabelle 20** Betonrezepturen (VDZ)

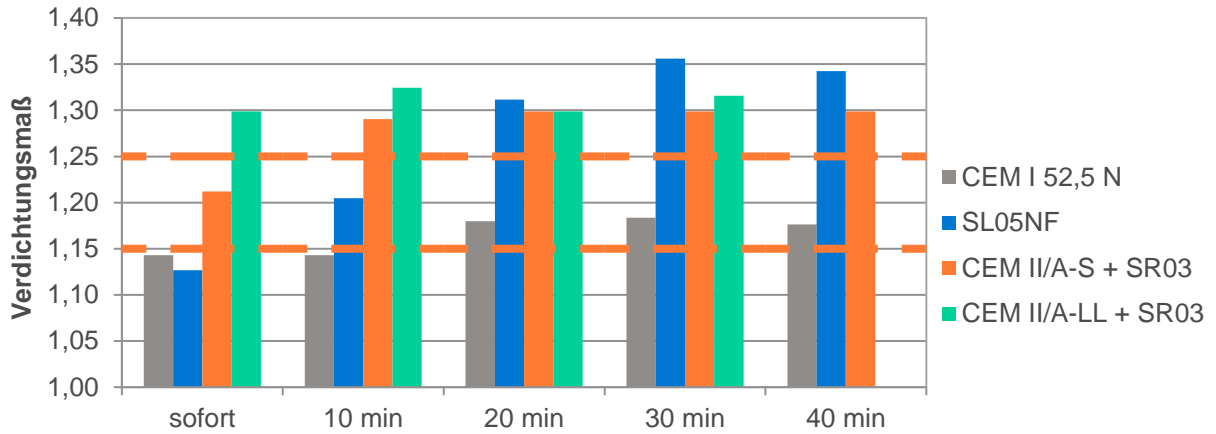
	Beton mit			
	CEM 52,5 N	SL05 NF	60% CEM II/A-S + 40 % SR03	60 % CEM II/A-LL + 40 % SR03
Zementgehalt in kg/m <sup>3</sup>	320			
Wasserzementwert	0,409	0,409	0,380	0,380
Sand 0/2 Rodgau-Niederrode in Vol.-%	36			
Splitt 8/11 Groß-Bieberau in Vol.-%	18			
Splitt 11/16 Groß-Bieberau in Vol.-%	32			
Splitt 16/22 Groß-Bieberau in Vol.-%	14			
Feuchte der Gesteinskörnung in M.-%	3			
Berolan RT 5 (VZ) in % v. Z.	-	0,8	0,9	0,9
Sika ViscoCrete 3360 (FM) in % v. Z.	-	0,8	1,3	1,5
BASF MasterGlenium ACE 460 (FM) in % v. Z.	0,6	-	-	-

**Tabelle 21** Mischregime der Betone (VDZ)

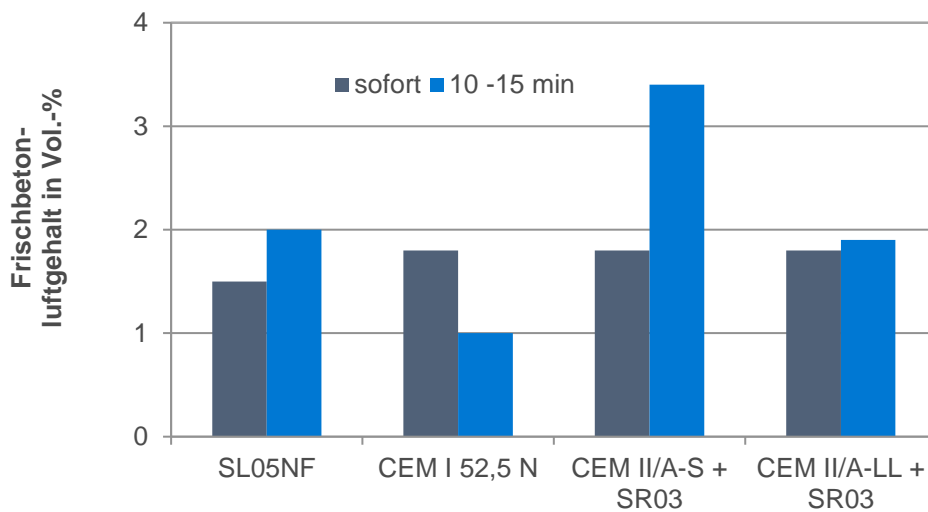
	Startzeit in min	Mischdauer in min
Gesteinskörnung mit Vorfeuchtwasser mischen	0:00	0:15
Zement mit Verzögerer zugeben	5:00	-
Zugabewasser (während 30 s) zugeben	5:00	0:30
Fließmittel zugeben	5:30	2:00

### 5.3.2 Frischbetoneigenschaften

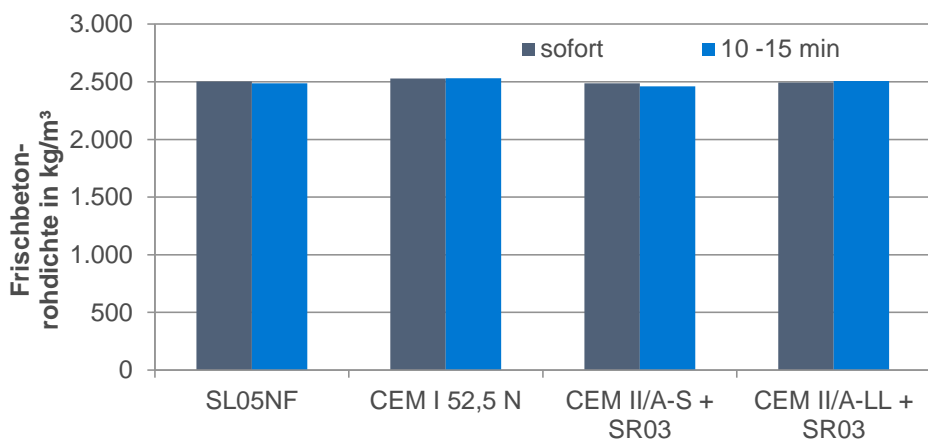
Direkt nach Mischungsende wurde die Frischbetontemperatur gemessen. Die Frischbetonkonsistenz wurde anhand des Verdichtungsmaßes nach DIN EN 12350-4 sofort, sowie 10 min, 20 min, 30 min und ggf. 40 min nach Mischungsende bestimmt. Der Luftgehalt wurde mittels Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350-7 und die Frischbetonrohichte nach DIN EN 12350-6 bestimmt. Als Zielkonsistenz wurde ein Verdichtungsmaß zwischen 1,15 und 1,25 festgelegt. Die Verarbeitbarkeitszeit wurde mittels Knetbeuteltest in Anlehnung an DIN 18218 bestimmt. Hierzu wurde eine Frischbetonprobe von etwa 1 l ohne Verdichten in einen Kunststoffbeutel gefüllt. Die Eindrücktiefe wurde in einem zeitlichen Abstand von 5 min bestimmt. Die Frischbetoneigenschaften zeigen **Bild 25** bis **Bild 28** sowie **Tabelle 22**.



**Bild 25** Verdichtungsmaß



**Bild 26** Frischbetonluftgehalt



**Bild 27** Frischbetonrohddichte

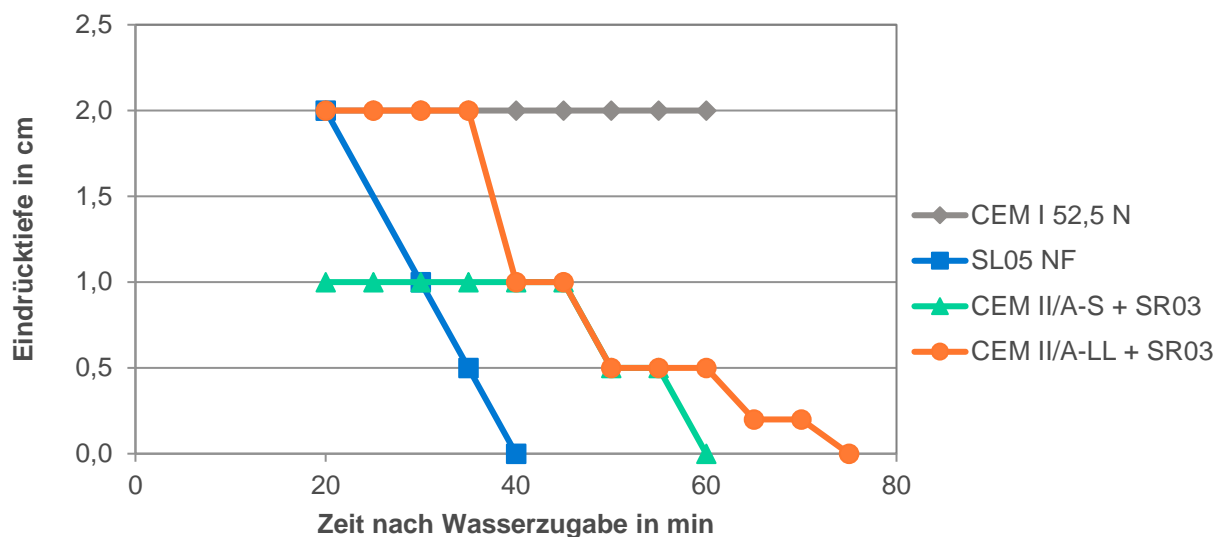


Bild 28 Knetbeuteltest

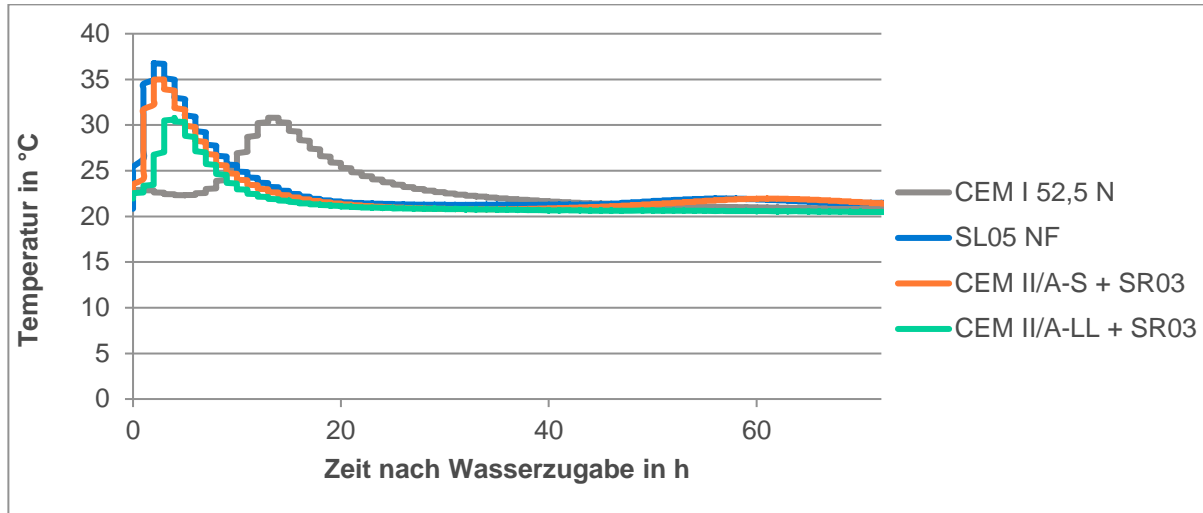
Tabelle 22 Frischbetoneigenschaften

		Beton mit			
		CEM 52,5 N	SL05 NF	60% CEM II/A-S + 40 % SR03	60 % CEM II/A-LL + 40 % SR03
Verdichtungsmaß	sofort	1,14	1,13	1,21	1,30
	10 min	1,14	1,20	1,29	1,32
	20 min	1,18	1,31	1,30	1,30
	30 min	1,18	1,36	1,30	1,32
	40 min	1,18	1,34	1,30	nicht bestimmt
Frischbetonluftgehalt in Vol.-%	sofort	1,8	1,5	1,8	1,8
	10 -15 min	1,0	2,0	3,4	1,9
Frischbetonrohddichte in kg/m³	sofort	2500	2530	2490	2490
	10 -15 min	2490	2530	2460	2510
Eindrücktiefe in cm	20 min	2	2	1	2
	30 min	2	1	1	2
	40 min	2	0	1	1
	50 min	2	0	0,5	0,5
	60 min	2	0	0	0,5
	75 min	2	0	0	0

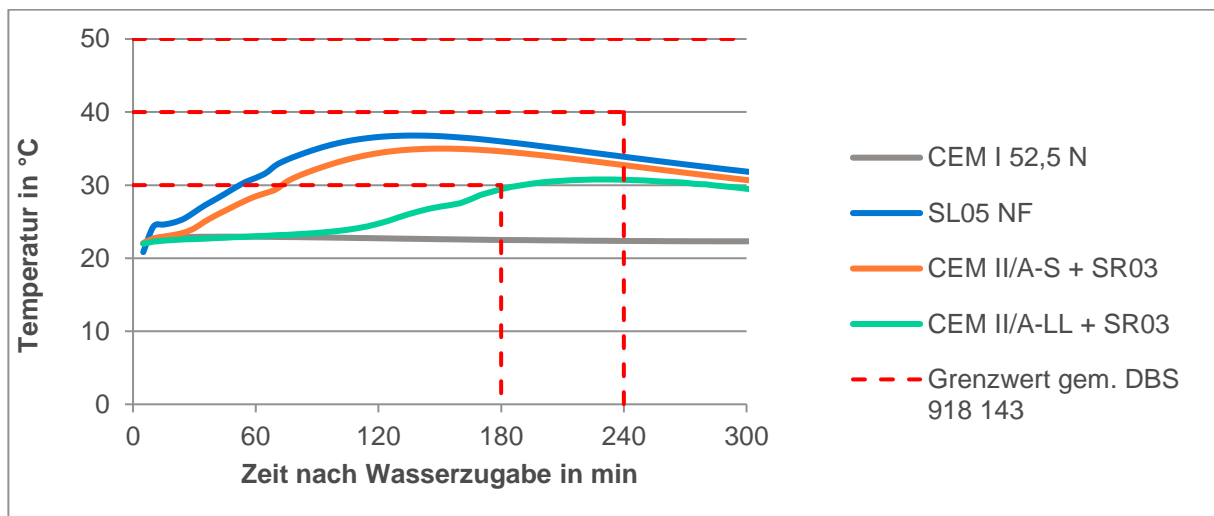
### 5.3.3 Hydratationswärmeentwicklung

Die Hydratationswärmeentwicklung wurde in Anlehnung an DIN EN 12390-14 (teiladiabatisches Verfahren) bestimmt. Abweichend von DIN EN 12390-14 lagerte der mit Frischbeton gefüllte 5 l-Eimer ohne wärmedämmende Ummantelung im Klimaraum bei einer Lufttemperatur von  $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchte von  $(65 \pm 5) \%$ . Die so bestimmte Hydratationswärmeentwicklung ist in Bild 29 dargestellt. Gemäß DBS 918 143 [12] ist die maximale Betontemperatur im Kern einer Betonschwelle auf  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  begrenzt. 3 Stunden nach dem Verdichten darf die maximale Betontemperatur im Schwellenkern  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  betragen. 4 Stunden nach dem Verdichten darf die Betontemperatur im Schwellenkern  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  nicht überschreiten.

Diese Grenzwerte sind im **Bild 30** eingetragen. Bei der Einordnung der Prüfergebnisse ist zu beachten, dass die Prüfkörpergeometrie sowie die Lagerungsbedingungen nicht vergleichbar sind mit der Herstellung im Schwellenwerk. Zur Einordnung der Ergebnisse werden Prüfergebnisse der RAILONE (s. Kapitel 7) herangezogen.



**Bild 29** Hydratationswärme



**Bild 30** Hydratationswärme (0 bis 5 Stunden)

### 5.3.4 Betondruckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Betone wurde nach DIN EN 12390-3 im Alter von 12 Stunden, 1 Tag, 2 Tagen, 7 Tagen und 28 Tagen an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm bestimmt. Die Probekörper lagerten zunächst 24 Stunden in den Formen vor Zugluft und Austrocknung geschützt bei einer Lufttemperatur von  $(20 \pm 2)$  °C. Nach 24 Stunden wurden die Probekörper entformt und bis zur Prüfung der Betondruckfestigkeit in einem Wasserbad mit  $(20 \pm 1)$  °C gelagert. Die Probekörper für die Prüfung nach 12 h wurden direkt vor der Prüfung entformt. Die Ergebnisse zeigen **Bild 31** und **Tabelle 23**. Mit allen Betonen wurde die Mindestdruckfestigkeitsklasse C50/60 gemäß DBS 918 143 [12] bzw. DIN EN 206 erreicht.

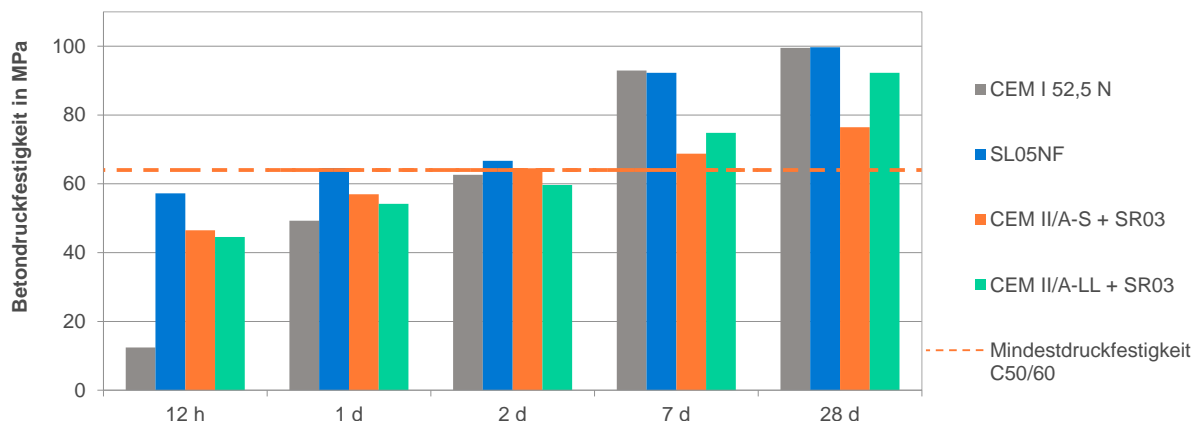


Bild 31 Betondruckfestigkeit

Tabelle 23 Betondruckfestigkeit

		Beton mit			
		CEM 52,5 N	SL05 NF	60% CEM II/A-S + 40 % SR03	60 % CEM II/A-LL + 40 % SR03
Betondruckfestigkeit in MPa	12 h	12,4	57,2	46,5	44,6
	1 d	49,3	64,6	57,0	54,2
	2 d	62,6	66,7	64,5	59,7
	7 d	93,0	92,3	68,8	74,8
	28 d	99,5	99,7	76,4	92,3

### 5.3.5 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit der Betone wurde im Alter von 12 Stunden, 1 Tag, 2 Tagen, 7 Tagen und 28 Tagen gemäß DIN EN 12390-5 an Probekörpern mit den Abmessungen 100 x 100 x 500 mm<sup>3</sup> bestimmt. Die Probekörper lagerten zunächst 24 Stunden in den Formen vor Zugluft und Austrocknung geschützt bei einer Lufttemperatur von  $(20 \pm 2)$  °C. Nach 24 Stunden wurden die Probekörper entformt und bis zur Prüfung der Betondruckfestigkeit in einem Wasserbad mit  $(20 \pm 1)$  °C gelagert. Die Ergebnisse sind in Bild 32 und in Tabelle 24 angegeben. Mit Betonen mit den Zementen CEM I 52,5 N, SL05NF sowie mit der Kombination aus CEM II/A-S und SR03 wurde die Mindestbiegezugfestigkeit von 6 MPa im Alter von 7 Tagen gemäß DBS 918 143 [12] eingehalten.

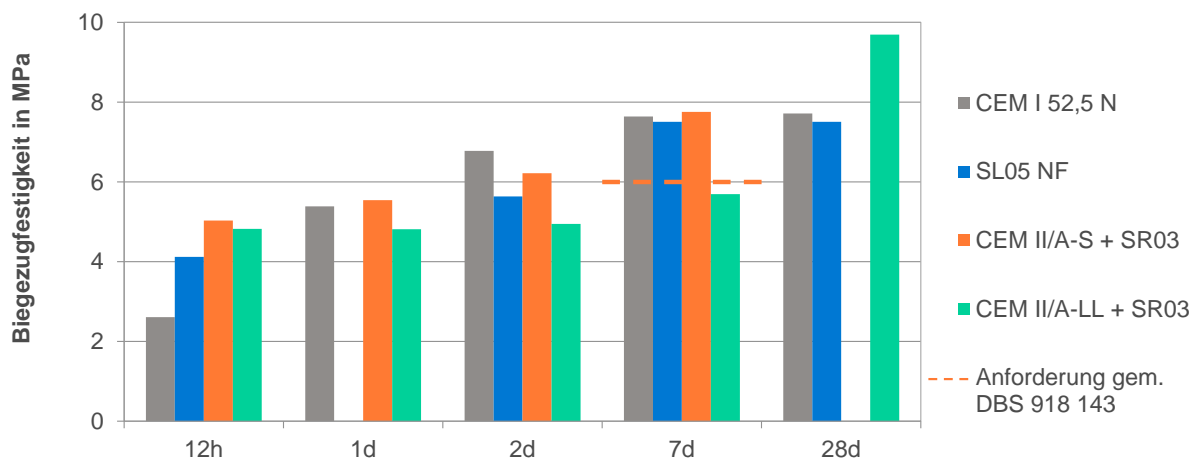


Bild 32 Biegezugfestigkeit

Tabelle 24 Biegezugfestigkeit

		Beton mit			
		CEM 52,5 N	SL05 NF	60% CEM II/A-S + 40 % SR03	60 % CEM II/A-LL + 40 % SR03
Biegezugfestigkeit in MPa	12 h	2,6	4,1	5,0	4,8
	1 d	5,4	n. b.	5,5	4,8
	2 d	6,8	5,6	6,2	4,9
	7 d	7,6	7,5	7,8	5,7
	28 d	7,7	7,5	n. b.	9,7

n. b.: nicht bestimmt

### 5.3.6 Chlorideindringwiderstand

Der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit Hilfe des Schnellverfahrens (Migrationstest) gemäß [13] ermittelt. Die Probekörper (Würfel 150 mm) zur Bestimmung des Migrationskoeffizienten wurden 1 d abgedeckt in der Schalung und anschließend bis zur Prüfung bei einer Temperatur von  $(20 \pm 1)$  °C unter Wasser gelagert. Im Alter von 28 bzw. 98 Tagen wurde jeweils aus der Mitte eines Würfels ein Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm herausgebohrt. Aus jedem Zylinder wurde ein Prüfkörper mit einer Höhe von 50 mm herausgesägt. Die Prüfkörper wurden weiter unter Wasser gelagert. Die Prüfergebnisse zeigen Bild 33 und Tabelle 25.

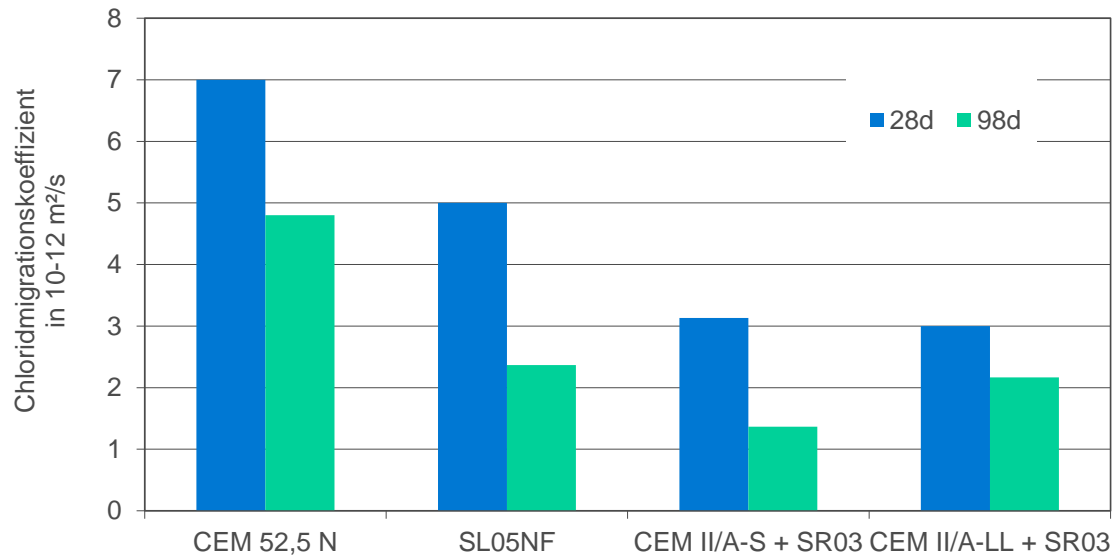


Bild 33 Chloridmigrationskoeffizienten der Betone

Tabelle 25 Chloridmigrationskoeffizient  $D_{Cl,M}$  der Betone

Beton	Alter	Temperatur	Prüfdauer	Eindringtiefe		$D_{Cl,M}$	
	d	°C	s	mm		$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	
				EW	MW	EW	MW
CEM 52,5 N	28	20,2	86400	16,4	16,1	7,1	7,0
				16,1		7,0	
				15,8		6,9	
	91	19,7	172800	19,5	20,7	4,5	4,8
				21,1		4,9	
				21,6		5,0	
SL05 NF	28	20,3	172800	21,6	21,6	5,0	5,0
				20,3		4,7	
				22,9		5,3	
	91	19,9	172800	8,4	10,8	1,8	2,4
				12,3		2,7	
				11,7		2,6	
60% CEM II/A-S + 40 % SR03	28	20,2	86400	12,9	14,3	2,8	3,1
				14,2		3,1	
				15,9		3,5	
	91	19,5	172800	7,6	6,7	1,6	1,4
				6,7		1,4	
				5,7		1,1	
60 % CEM II/A-LL + 40 % SR03	28	19,4	172800	14,1	13,6	3,1	3,0
				14,8		3,3	
				11,8		2,6	
	91	19,9	172800	9,9	9,8	2,2	2,2
				10,5		2,3	
				9,1		2,0	

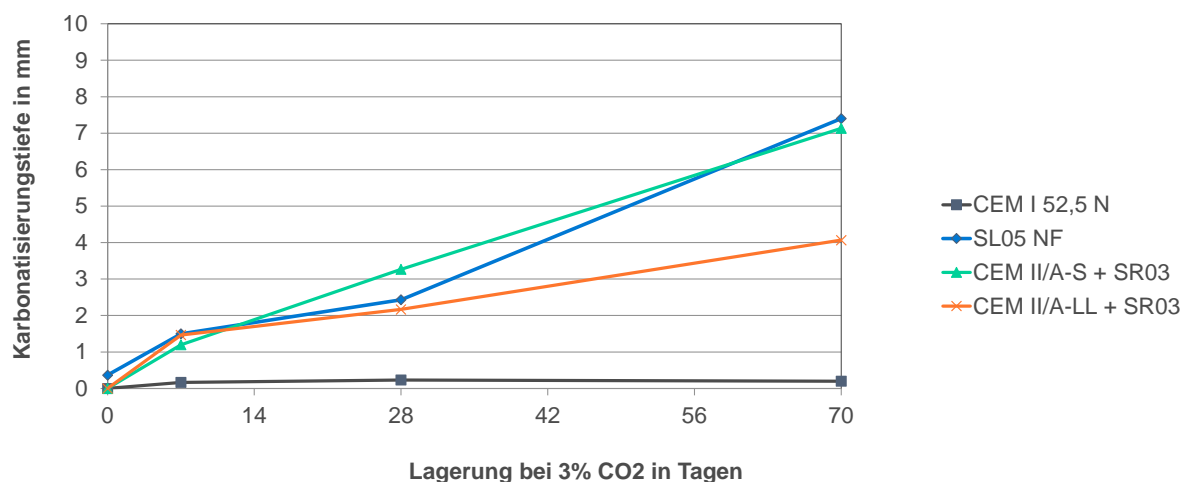


### 5.3.7 Karbonatisierung

Der Karbonatisierungswiderstand wurde gemäß DIN EN 12390-12 an drei Probekörpern je Beton mit den Abmessungen 500 mm x 100 mm x 100 mm<sup>3</sup> bestimmt. Die CO<sub>2</sub> – Konzentration in der Prüfung betrug 3 %. Zur Prüfung der Karbonatisierungstiefe im Alter von 42, 49, 70 und 112 Tagen wurde von jedem Probekörper jeweils ein ca. 30 mm langes Stück abgespalten und mit Phenolphthaleinlösung besprüht. Nach rd. 24 Stunden wurden die Karbonatisierungstiefen jeder Seite der abgespalteten Stücke ermittelt und die mittlere Karbonatisierungstiefe wurde berechnet. Die Eckbereiche blieben unberücksichtigt. Die ermittelten Karbonatisierungstiefen sind in **Tabelle 26** und **Bild 34** zusammengestellt.

**Tabelle 26** Karbonatisierungstiefe

Alter in Tagen	Lagerung bei 3% CO <sub>2</sub> in Tagen	Beton mit			
		CEM 52,5 N	SL05 NF	60% CEM II/A-S + 40 % SR03	60 % CEM II/A-LL + 40 % SR03
		Karbonatisierungstiefe in mm			
42	0	0,0	0,4	0,0	0,0
		0,0	0,4	0,0	0,0
		0,0	0,3	0,0	0,0
<b>Mittelwert</b>		<b>0,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>
49	7	0,2	1,5	1,1	1,5
		0,2	1,5	1,1	1,5
		0,1	1,5	1,4	1,4
<b>Mittelwert</b>		<b>0,2</b>	<b>1,5</b>	<b>1,2</b>	<b>1,5</b>
70	28	0,3	2,5	3,1	2,3
		0,2	2,4	3,2	2,2
		0,2	2,4	3,5	2,0
<b>Mittelwert</b>		<b>0,2</b>	<b>2,4</b>	<b>3,3</b>	<b>2,2</b>
112	70	0,3	7,2	7,0	4,2
		0,1	7,2	6,8	4,0
		0,2	7,8	7,6	4,0
<b>Mittelwert</b>		<b>0,2</b>	<b>7,4</b>	<b>7,1</b>	<b>4,1</b>



**Bild 34** Karbonatisierungstiefe

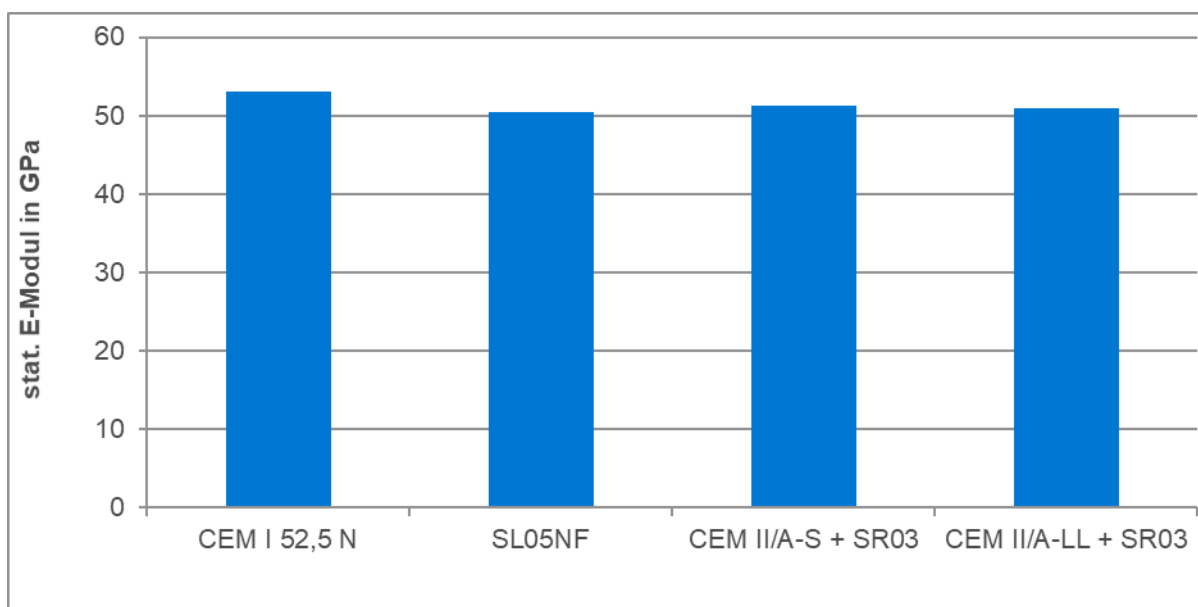
Die Karbonatisierungstiefen der Betone mit CSA-Zementen sind höher als beim Referenzbeton mit CEM I ( $w/z = 0,409$ ), liegen aber in einer Größenordnung, wie sie gemäß der VDZ Datenbank CEM I – Betone mit einem Wasserzementwert von  $w/z \approx 0,50$  bis  $0,55$  aufweisen.

### 5.3.8 Statischer E-Modul

Es wurden jeweils zwei Zylinder mit den Abmessungen  $\varnothing = 150$  mm Durchmesser,  $h = 300$  mm hergestellt. Die Probekörper wurden zunächst 24 Stunden in den Formen vor Zugluft und Austrocknung geschützt bei einer Lufttemperatur von  $(20 \pm 2)$  °C gelagert. Nach 24 Stunden wurden die Probekörper entformt und bei  $(20 \pm 2)$ °C unter Wasser gelagert.

Im Alter von 27 Tagen wurden die Probekörper planparallel geschliffen und bei den genannten Bedingungen weiter gelagert.

Der statische E-Modul wurde gemäß DIN EN 12390-13, Verfahren B geprüft. Als obere Prüfspannung wurde  $\frac{1}{3} * f_{c,cyl}$  gewählt. **Bild 35** und **Tabelle 27** zeigen die Ergebnisse.



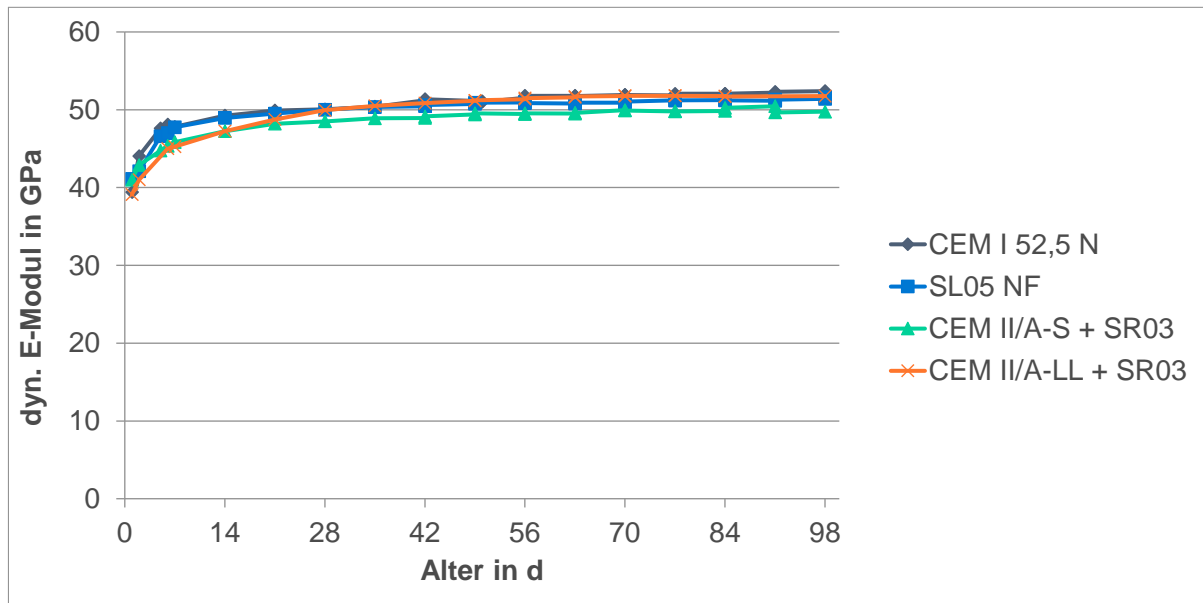
**Bild 35** Statischer E-Modul (Mittelwerte)

**Tabelle 27** Statischer E-Modul in GPa

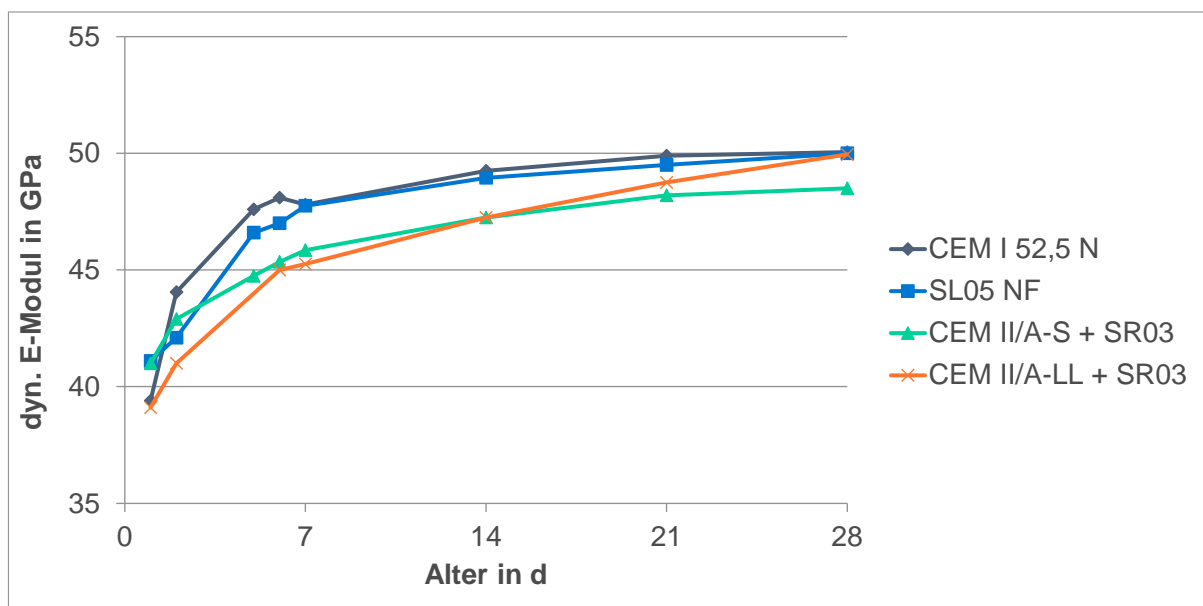
Alter in Tagen	Beton mit			
	CEM 52,5 N	SL05 NF	60% CEM II/A-S + 40 % SR03	60 % CEM II/A-LL + 40 % SR03
28	54,0	49,5	51,2	51,5
	52,1	51,3	nicht bestimmt	50,4
<b>Mittelwert</b>	<b>53,1</b>	<b>50,4</b>	<b>51,2</b>	<b>51,0</b>

### 5.3.9 E-Modul (Impulsresonanzmethode)

Der dynamische E-Modul wurde bis zum Alter von 98 Tagen durch Resonanzfrequenzmessung bestimmt. **Bild 36** und **Bild 37** zeigen die Ergebnisse.



**Bild 36** Dynamischer E-Modul (Impulsresonanzmethode)



**Bild 37** Dynamischer E-Modul (Impulsresonanzmethode), Ausschnitt

Im Alter von 28 Tagen weisen alle Betone vergleichbare statische bzw. dynamische E-Moduln auf.

### 5.3.10 Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)

#### 5.3.10.1 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

Das AKR-Potenzial der Betone gemäß **Tabelle 20** wurde auf Basis des DBS 918 143, Anhang G [14] mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr“ gemäß TP B-StB, Teil 1.1.09 [15] bzw. RILEM AAR-12 [16] bestimmt. Als Prüflösungen wurden eine 3 %ige und eine 10 %ige Natriumchlorid-Lösung (NaCl-Lösung) für jeweils drei Probekörper verwendet.

Die Dehnungen der Betone im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 10 %ige Natriumchlorid-Lösung sind in **Bild 38** dargestellt. Zum Bewertungszeitpunkt nach 10 Prüfzyklen (Betonalter 168 Tage) lagen die Dehnungen der Betone CEM 52,5 N und CEM II/A-S + SR03 mit 0,42 mm/m und 0,34 mm/m unter dem Grenzwert. Diese Betone weisen somit ein ausreichend geringes AKR-Potenzial im Sinne des DBS 918 143, Anhang G [14] auf.

Die Dehnungen der Betone SL05 NF und CEM II/A-LL + SR03 überschritten mit 1,81 mm/m bzw. 1,70 mm/m den Grenzwert deutlich. Für diese Betone konnte mit dieser Untersuchung ein ausreichender AKR-Widerstand im Sinne des DBS 918 143, Anhang G [14] nicht nachgewiesen werden. Die Betone zeigten somit auch bei Zementen mit niedrigen Na<sub>2</sub>O-Äquivalenten hohe Dehnungen (**Tabelle 18**). Die Dehnungen sind gemäß der Dünnschliffmikroskopie auf ein Ettringittreiben der Hydratationsprodukte des Calciumsulfataluminats infolge der Wechsellagerung des 60 °C-Betonversuchs zurückzuführen (**Tabelle 28**).

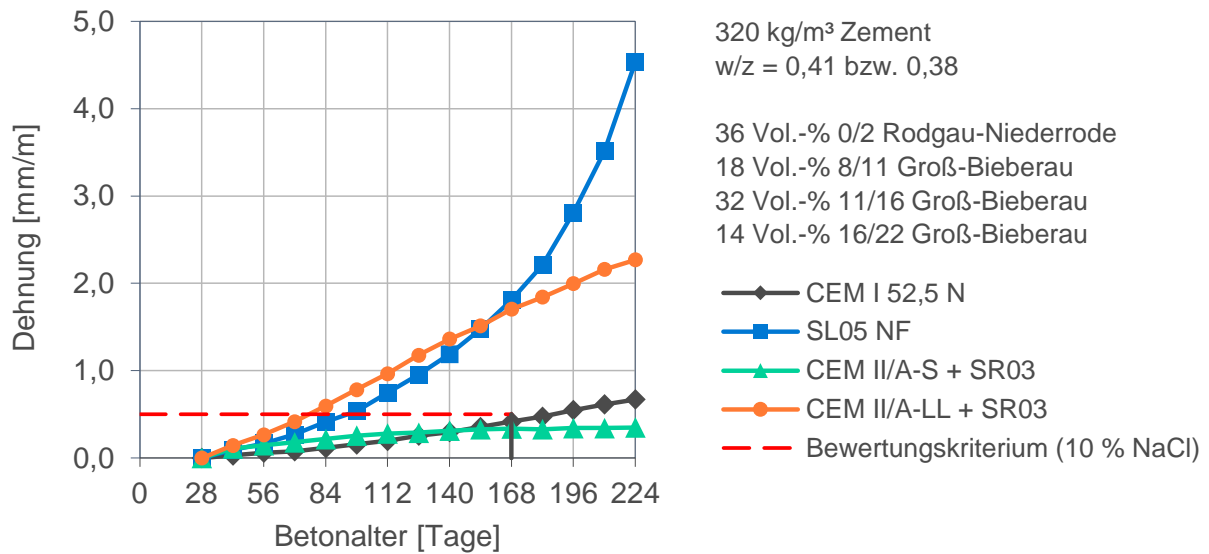
Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass wechselnde Beanspruchungen durch Feuchte und Temperaturen zwischen 20 °C und 60 °C sowie eine zusätzliche Alkalizufuhr von außen durch Tausalze eine späte Ettringitbildung in erhärteten, nicht wärmebehandelten Betonen aus CSA-Zementen begünstigen, da diese Bedingungen die thermodynamische Stabilität des Ettringits zyklisch verändern. Inwieweit diese Bedingungen praktisch relevant sind, müssen Praxisversuche zeigen.

**Tabelle 28** Lagerung der Probekörper während eines Zyklus der Wechsellagerung im 60°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

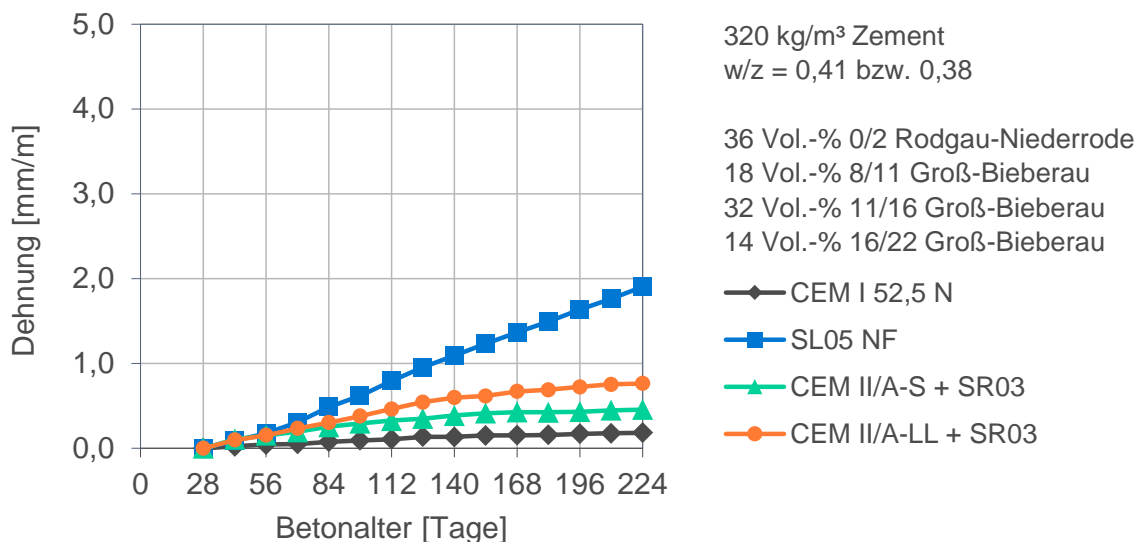
Lagerungsdauer [d]	Klima
5	(60 ± 2) °C im Trockenschrank
2	(20 ± 2) °C in Prüflösung
6	(60 ± 2) °C und ≥ 98 % r. F.
1	(20 ± 2) °C und ≥ 98 % r. F.

Erfahrungen mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr wurden im Wesentlichen an Betonen mit klinkerbasierten Zementen, vor allem mit Portlandzement (CEM I), abgeleitet [17] [18] [19]. Das AKR-Potenzial der Betone wurde ergänzend mit dem 38 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-10 [5] bestimmt.

Der DBS 918 143, Anhang G [14] sieht ausschließlich eine Prüfung mit einer 10 %igen NaCl-Lösung vor. Ergebnisse mit einer 3 %igen NaCl-Lösung sind in **Bild 39** aufgeführt.



**Bild 38** Dehnung von Betonen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr durch 10 %ige NaCl-Lösung



**Bild 39** Dehnung von Betonen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr von durch 3 %ige NaCl-Lösung

### 5.3.10.2 Dünnschliffmikroskopie

Nach 14 Zyklen der Wechsellagerung (Betonalter 224 Tage) im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung wurde aus einem Probekörper jedes Betons ein Dünnschliff hergestellt. Dazu wurde eine Scheibe aus dem Probekörper herausgesägt, mit Harz infiltriert, auf einen Objektträger geklebt und auf eine Dicke von etwa 30 µm präpariert. Das verwendete Harz fluoresziert unter UV-Licht. Der Dünnschliff wurde unter dem Lichtmikroskop mit linear polarisiertem Licht, bei gekreuzten Polarisatoren und unter UV-Licht auf Risse, Indizien für eine schädigende AKR (Reaktionsprodukte, Gefügeschäden) und sekundären Ettringit untersucht. Der Grad der Schädigung wurde qualitativ bewertet.

Der Beton enthielt natürlich gerundete Sandkörner mit Durchmessern bis ca. 2 mm. Die Sandkörner bestanden aus Kristallen von Quarz und Feldspat sowie aus Quarzit, quarzreichen Sedimentgesteinen und Chertgesteinen (**Bild 40, Bild 48**).

Daneben enthielt der Beton Splittkörner mit Durchmessern bis ca. 25 mm. Die Körner bestanden hauptsächlich aus einem SiO<sub>2</sub>-armen Plutonitgestein (**Bild 42, Bild 50**). Das Plutonitgestein bestand vorwiegend aus Plagioklas sowie aus Pyroxen, Biotit, Quarz, Amphibol und opaken Phasen. Feldspäte und Biotit zeigten teilweise geologische Alterationserscheinungen. Als Alterationsprodukte traten vor allem Chlorit und Serizit auf.

Der Beton enthielt wenige Luft- und Verdichtungsporen, die bei der Präparation mit fluoreszierendem Harz infiltriert wurden und im Dünnschliff in polarisiertem Licht gelb (**Bild 40**) und unter UV-Licht hellgrün erschienen (**Bild 41**).

In allen vier untersuchten Betonproben wurde eine geringe Anzahl von dünnen Rissen beobachtet, die teils um die Gesteinskörner, durch die Zementstein und teilweise durch die Sandkörner verliefen (**Bild 41, Bild 49, Bild 40**). Die Betone mit CEM I 52,5 N und SL05 NF zeigten zudem eine geringe Anzahl an Rissen, die sich ausgehend von den Splittkörnern in den Zementstein fortsetzten (**Bild 43, Bild 45**). Die Risse waren in allen Proben nicht gefüllt. Amorphe Reaktionsprodukte einer AKR wurden vereinzelt in Poren von Beton SL05 NF beobachtet (**Bild 46, Bild 47**). Auf Grundlage der beobachteten Indizien wurde die AKR in allen vier Betonen als schwach bzw. nicht-schädigend eingestuft.

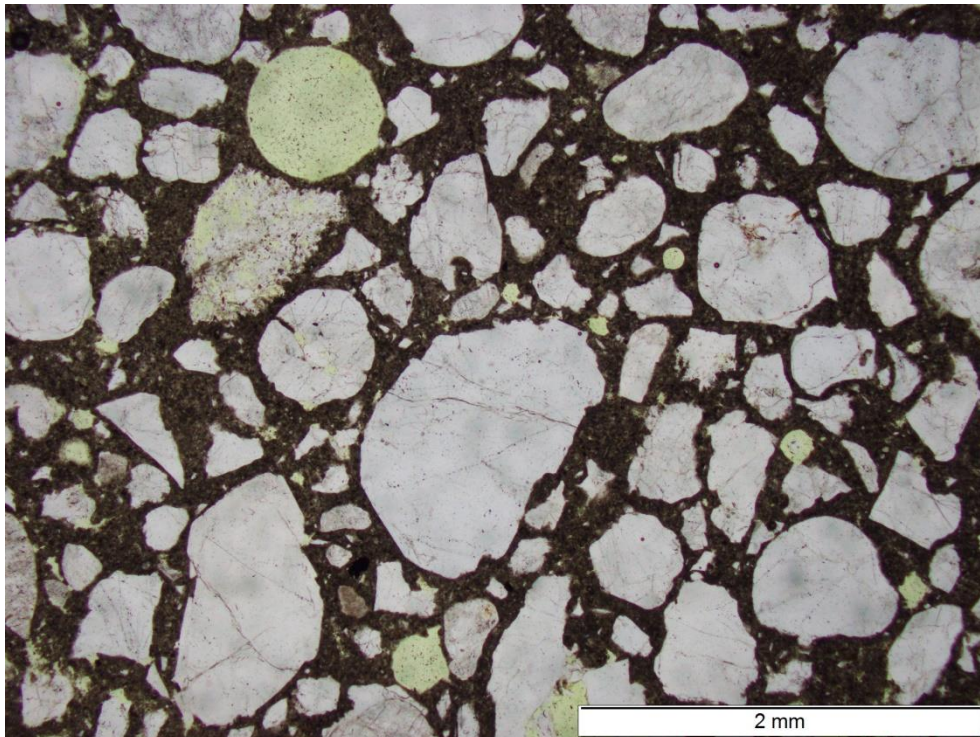
Die Dünnschliffproben der Betone SL05 NF und CEM II/A-LL + SR03 zeigten eine vergleichsweise höhere Anzahl an Rissen mit einer Rissweite von mehreren µm, die häufig entlang der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung verliefen und in einigen Bereichen in unmittelbarer Umgebung davon verliefen. Stellenweise konnte innerhalb dieser Risse feine, nadelförmige Kristalle beobachtet werden, bei denen es sich um sekundär gebildeten Ettringit handelte (**Bild 46, Bild 52**).

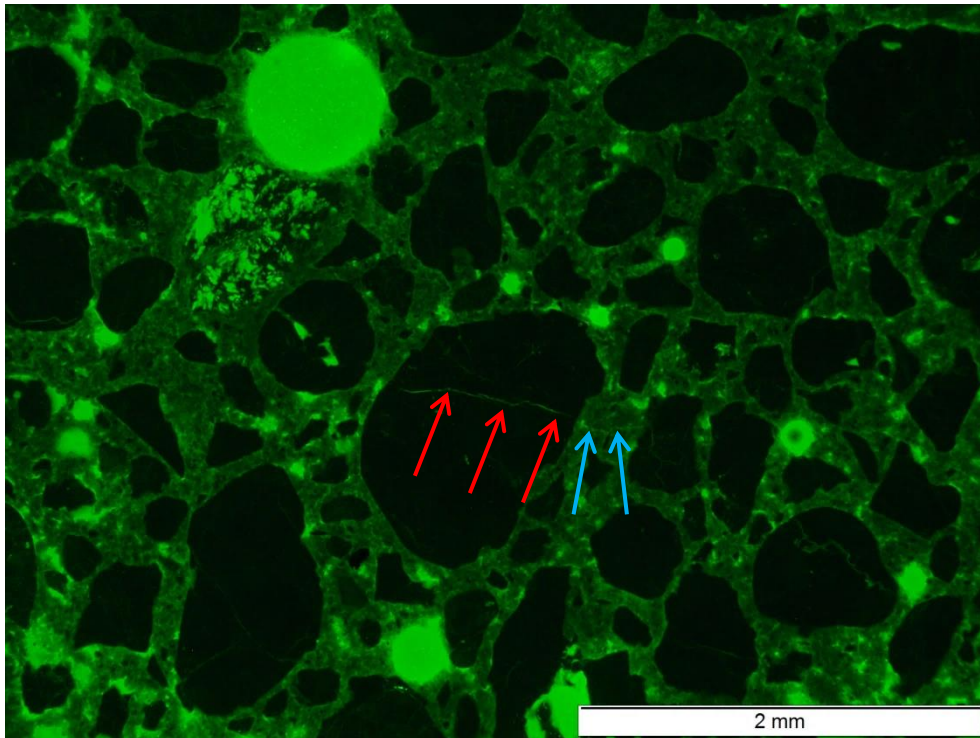
Da in den Dünnschliffen der Betone CEM I 52,5 N und CEM II/A-S + SR03 keine Hinweise auf eine schädigende sekundäre Ettringitbildung beobachtet wurden, wurde geschlossen, dass die vergleichsweise höheren Dehnungen der Betone SL05 NF und CEM II/A-LL + SR03 durch eine sekundäre Ettringitbildung verursacht wurden.

In **Tabelle 29** sind die Beobachtungen zu den Schädigungsmechanismen, aufgeschlüsselt nach Proben, zusammengefasst.

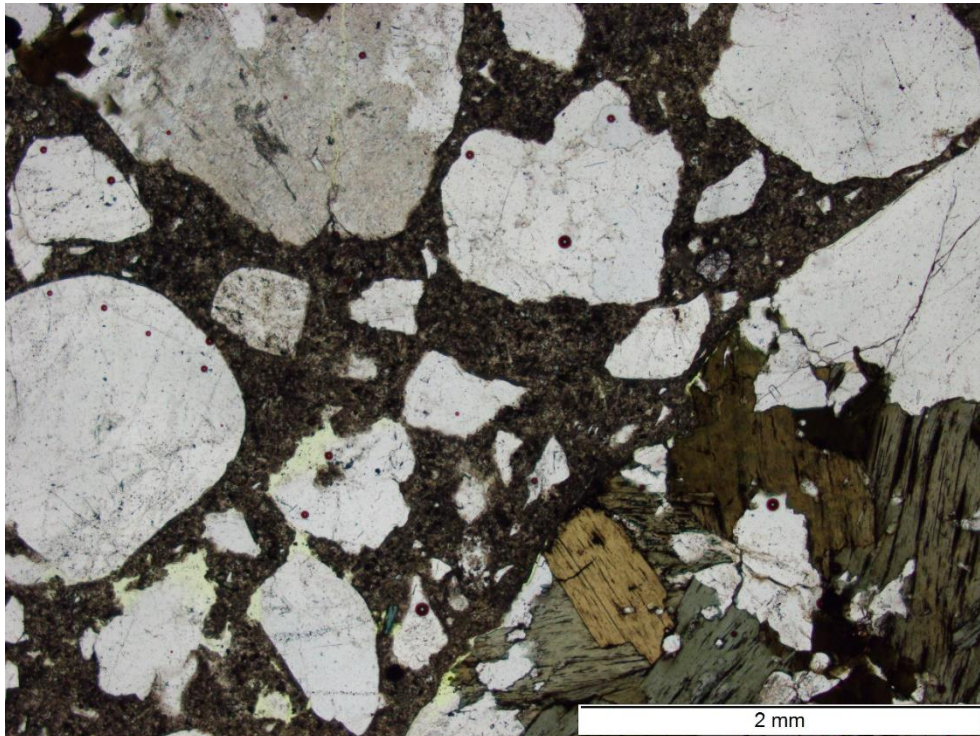
**Tabelle 29** Qualitative Bewertung der Anzeichen der Schädigung anhand lichtmikroskopischer Untersuchungen an einem Dünnschliff nach dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

Probe	Risse	AKR-Produkte	Sekundärer Ettringit
CEM I 52,5 N	o	o	o
SL05 NF	++	o	++
CEM II/A-S + SR03	o	o	o
CEM II/A-LL + SR03	++	o	++
o	keine oder wenig, nicht oder schwach schädigend		
+	deutlich, geringer Schädigungsgrad		
++	sehr deutlich, starker Schädigungsgrad		

**Bild 40** CEM I 52,5 N; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Betongefüge; Aufnahme bei polarisiertem Licht

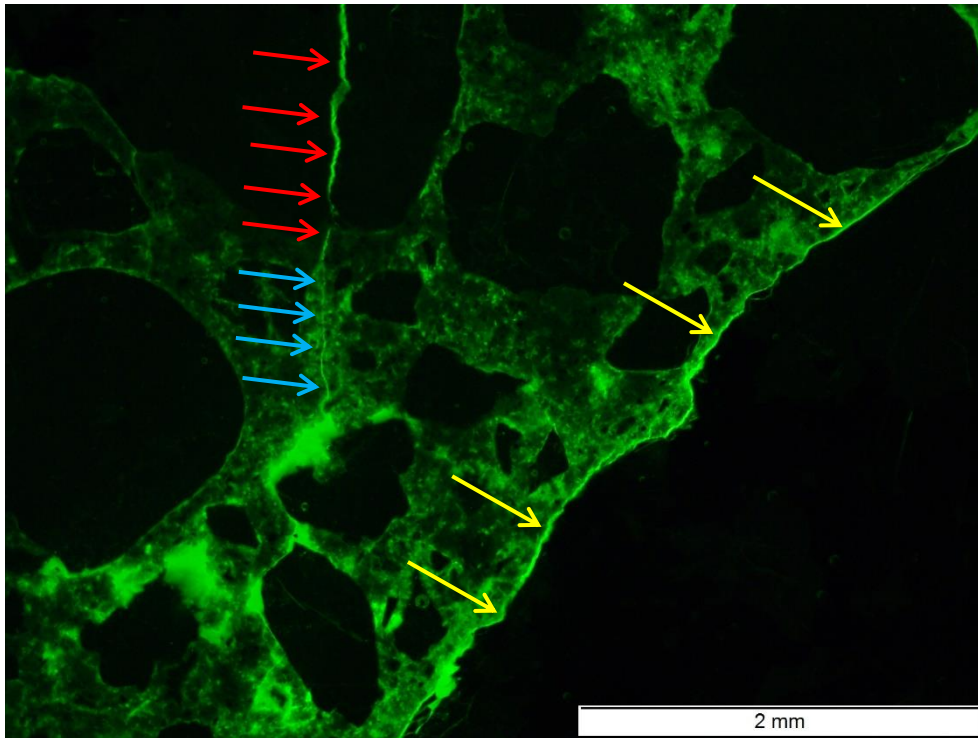


**Bild 41** CEM I 52,5 N; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Riss durch Sandkorn (rote Pfeile) und Zementstein (blaue Pfeile); Aufnahme bei polarisiertem Licht (zirkulare Polarisation); gleicher Ausschnitt wie **Bild 40**; Aufnahme unter UV-Aufflicht

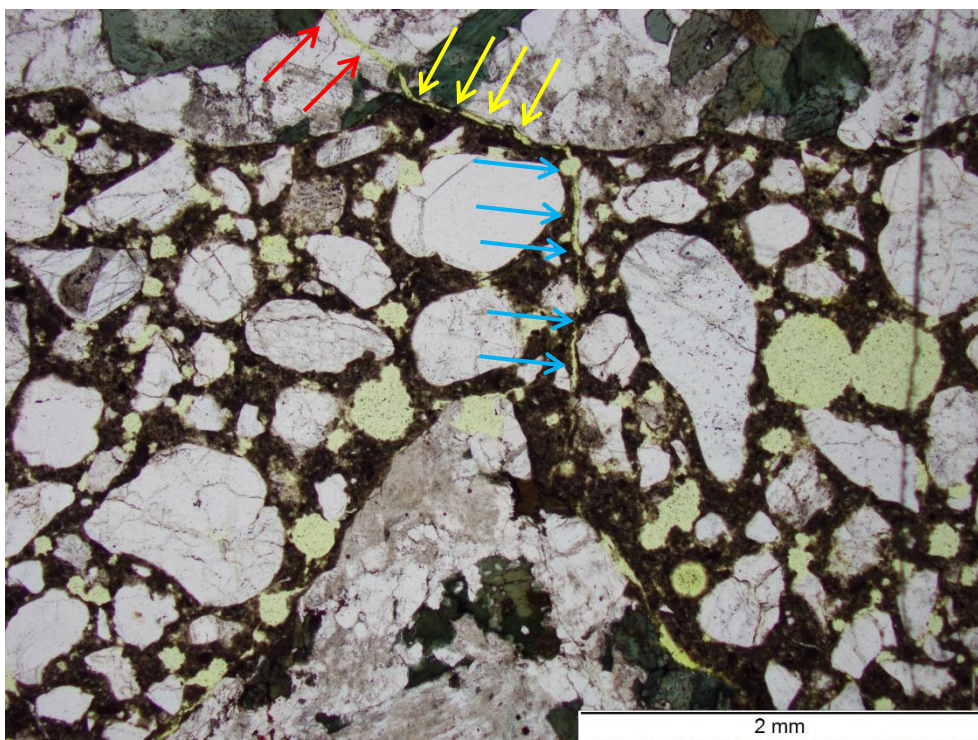


**Bild 42** CEM I 52,5 N; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Betongefüge; Aufnahme bei polarisiertem Licht

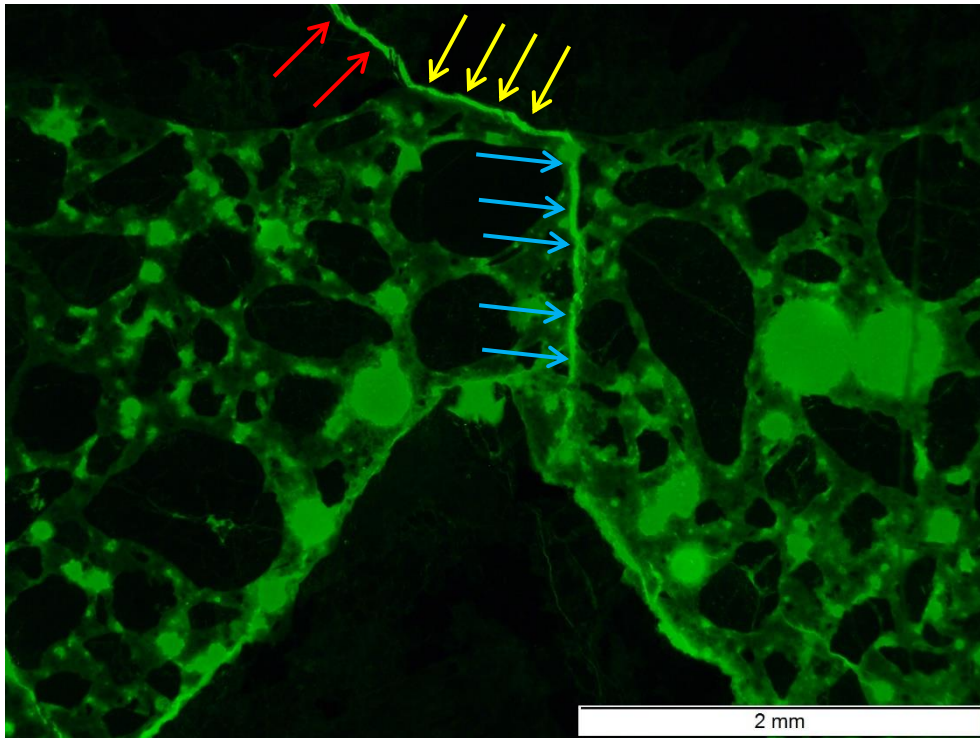




**Bild 43** CEM I 52,5 N; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Betongefüge mit Rissen um Splittkorn (gelbe Pfeile) und durch Splittkorn (rote Pfeile) sowie Zementstein (blaue Pfeile); gleicher Ausschnitt wie **Bild 42**; Aufnahme unter UV-Auflicht



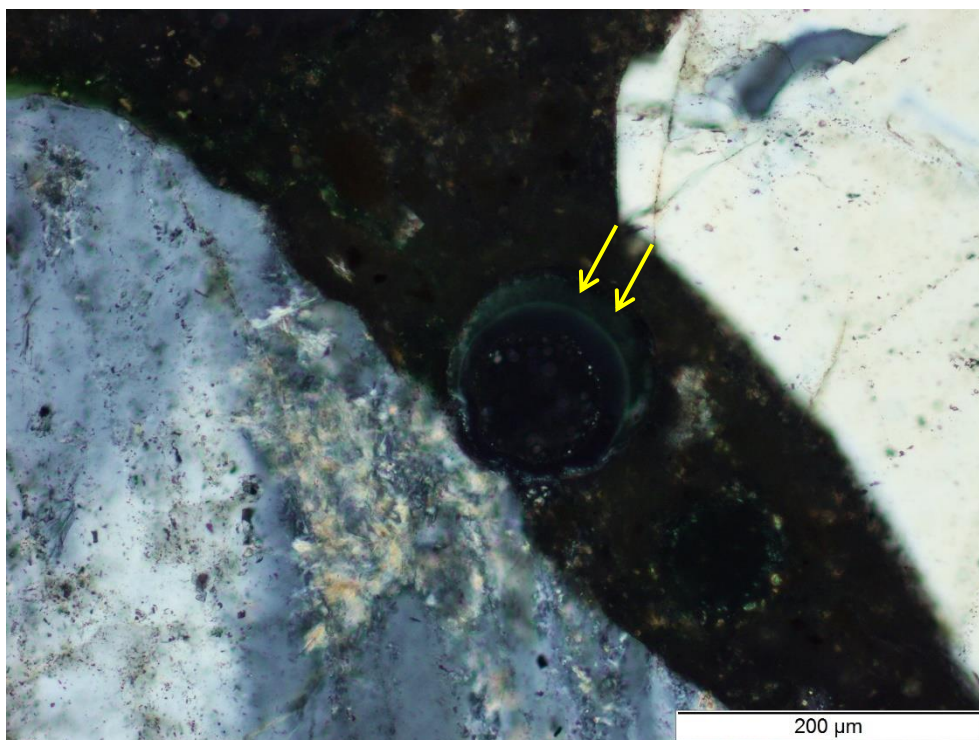
**Bild 44** SL05 NF; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Riss durch Splittkorn (rote Pfeile), entlang der ITZ (gelbe Pfeile) und Zementstein (blaue Pfeile); Aufnahme bei polarisiertem Licht



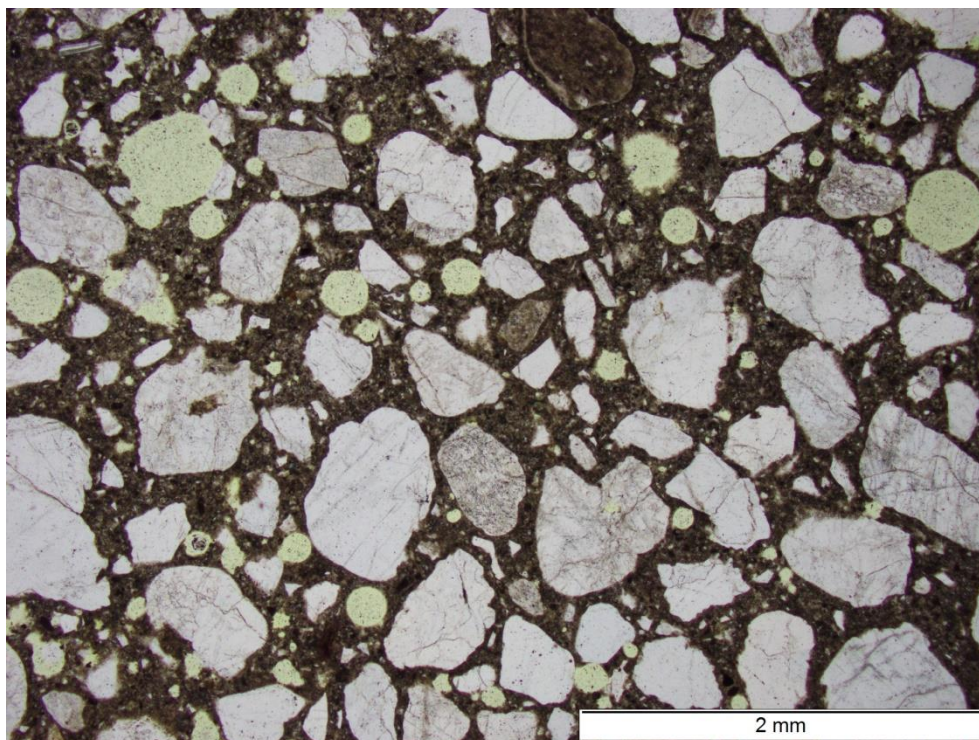
**Bild 45** SL05 NF; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Riss durch Splittkorn (rote Pfeile), entlang der ITZ (gelbe Pfeile) und Zementstein (blaue Pfeile); gleicher Ausschnitt wie **Bild 44**; Aufnahme unter UV-Auflicht



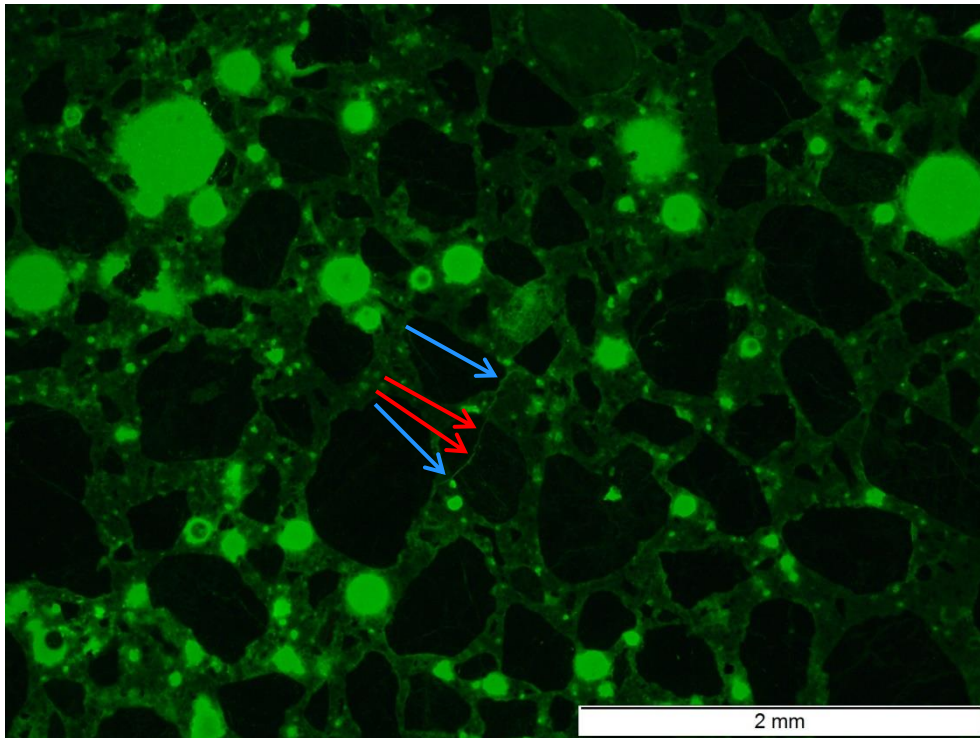
**Bild 46** SL05 NF; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); AKR-Produkte in Luftpore (gelbe Pfeile), Aufnahme bei polarisiertem Licht



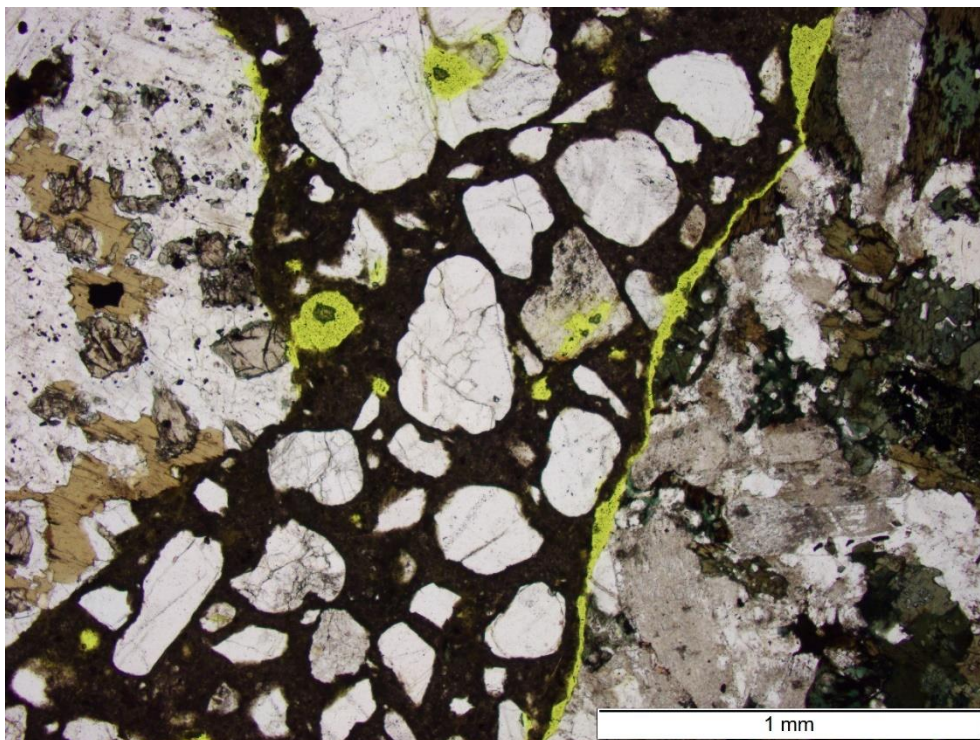
**Bild 47** SL05 NF; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); amorphe AKR-Produkte in Luftpore (gelbe Pfeile), Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren (zirkulare Polarisation)



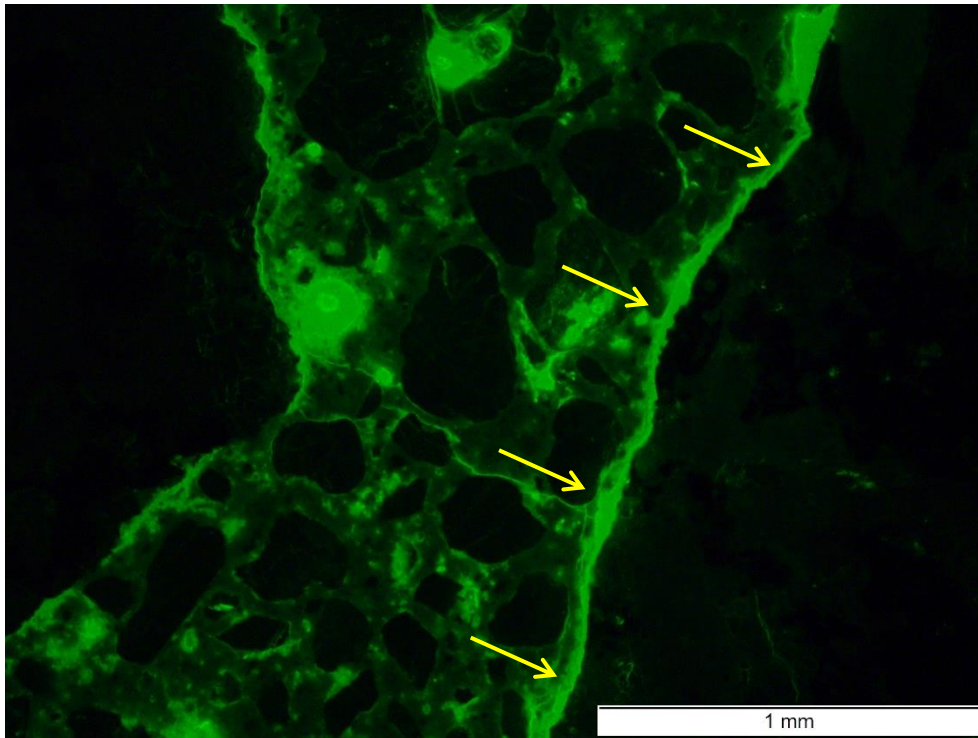
**Bild 48** CEM II/A-S + SR03; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Betongefüge; Aufnahme bei polarisiertem Licht



**Bild 49** CEM II/A-S + SR03; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Riss durch Sandkorn (rote Pfeile) und Zementstein (blaue Pfeile); Aufnahme bei polarisiertem Licht (zirkuläre Polarisation); gleicher Ausschnitt wie **Bild 48**; Aufnahme unter UV-Aufflicht



**Bild 50** CEM II/A-LL + SR03; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Betongefüge; Aufnahme bei polarisiertem Licht



**Bild 51** CEM II/A-LL + SR03; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Betongefüge mit Rissen im Übergang Zementstein-Gesteinskörnung (gelber Pfeil); gleicher Ausschnitt wie **Bild 50**; Aufnahme unter UV-Auflicht

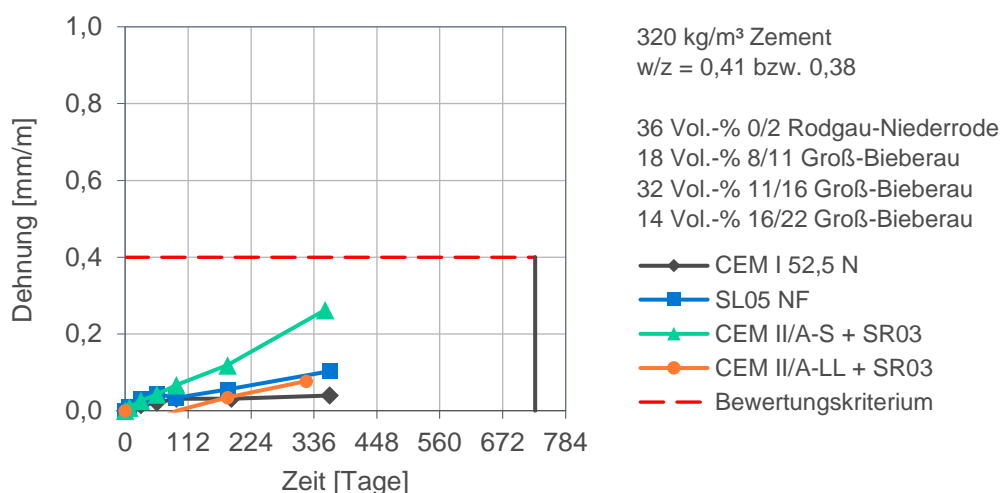


**Bild 52** CEM II/A-LL + SR03; Dünnschliff nach 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung); Riss entlang des Übergangs Zementstein-Gesteinskörnung stellenweise verfüllt mit nadeligen Kristallen aus Ettringit (gelbe Pfeile), Aufnahme bei polarisiertem Licht

### 5.3.10.3 38 °C Betonversuch über Wasser

Das AKR-Potenzial der Betone gemäß **Tabelle 20** wurde ergänzend mit dem 38 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-10 [5] bestimmt. Dazu lagerten drei Prismen (400 mm x 100 mm x 100 mm) je Beton bei  $(38 \pm 2)^\circ\text{C}$  in Behältern über einem Wasserbad. Abweichend von RILEM AAR-10 lagerten die Prismen bis zum siebten Tag bei  $20^\circ\text{C}$  über Wasser und ab dem siebten Tag bei  $38^\circ\text{C}$ . Die Nullmessung erfolgte am achten Tag. Zur Bewertung wurden die Kriterien nach ASTM C1778 [20] für Performance-Tests mit dem  $38^\circ\text{C}$ -Betonversuch nach ASTM C1293 [21] angesetzt. Gemäß ASTM C1778 sind Betone mit einer Dehnung  $< 0,4$  mm/m nach zwei Jahren für Bauwerke geeignet. Zwischen verschiedenen Umwelteinwirkungen wird nicht differenziert.

Nach einem Jahr lagen die Dehnungen der vier Betone unter der Grenze von  $0,4$  mm/m (**Bild 53**). Der Beton CEM II/A-S + SR03 zeigte jedoch eine deutliche Zunahme der Dehnung, so dass innerhalb der zwei Jahre mit einem Überschreiten des Grenzwertes zu rechnen ist. Die Dehnung ist insofern plausibel, als dass der Zement im Auspressverfahren den höchsten wirksamen Alkaligehalt der vier Zemente aufwies (Kapitel 5.2, **Tabelle 19**). Die Ergebnisse deuteten zum Berichtszeitpunkt für die anderen drei Betone (CEM I 52,5 N, SL05 NF und CEM II/A-LL + SR03) ein geringes AKR-Potenzial an. Die Prüfungen werden bis zu zwei Jahren fortgeführt.



**Bild 53** Dehnung von Betonen bei  $38^\circ\text{C}$  über Wasser gemäß RILEM AAR-10

## 6 Versuche und Ergebnisse – TU München

### 6.1 Betonversuche

#### 6.1.1 Allgemeines

Die Rezepturen und die Herstellung der Betone ist in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Davon abweichend wurden die Rezepturen der Serie mit CEM I mit den für die CSA-Betone verwendeten Fließmitteln sowie mit einem Verzögerer mit Gehalten von 0,95 % v. Z. und 0,30 % v. Z. hergestellt sowie das Saug- und Zugabewasser auf 8°C temperiert.

Der für die Frischbetonuntersuchungen verwendete Beton wurde im Anschluss an die Prüfungen zur Herstellung der Probekörper für die Festbetonuntersuchungen verwendet. Hierzu wurde der Beton direkt nach den Frischbetonuntersuchungen zurück in den Mischer gegeben und für ca. 10 Sekunden aufgemischt. Um eine Beeinflussung der Festbetonergebnisse durch eine mögliche Bildung erster Hydratphasen bis zum Zeitpunkt der Probekörperherstellung auszuschließen, wurden für drei Serien des Betons mit SL05 NF Festigkeitsprobekörper jeweils vor und nach der Zugabe von Beton aus den Frischbetonuntersuchungen (Frischbetonalter von ca. 30 Minuten) hergestellt und zu unterschiedlichen Betonaltern geprüft. Es konnte dabei kein signifikanter Einfluss durch die Zugabe von Beton aus den Frischbetonuntersuchungen auf die Druckfestigkeit festgestellt werden (**Tabelle 30**).

**Tabelle 30** Einfluss erneuten Aufmischens im Betonalter von rd. 30 Minuten auf die Festigkeitsentwicklung des Betons

		SL05 NF	SL05 NF	SL05 NF
Prüfalter	[d]	1	7	7
Druckfestigkeit ohne erneutes Aufmischen min/max	[MPa]	52,7* 51,9 / 53,2	71,4* 68,2 / 73,5	74,9** 72,3 / 78,0
Druckfestigkeit nach dem Aufmischen min/max	[MPa]	51,5* 50,6 / 53,1	74,2* 66,8 / 78,8	75,4** 71,7 / 79,3
*Mittelwert aus 3 Probekörpern ** Mittelwert aus 6 Probekörpern				

Nach der Herstellung wurden alle Probekörper mit feuchten Jutetüchern und Plastikfolie bei Raumtemperatur nachbehandelt und nach ca. 24 h ausgeschalt. Bis zu einem Alter von 7 Tagen wurden die Proben in einem Wasserbad bei 20°C und anschließend bei einem Klima von 20°C und 65 % r. H. gelagert.

Abweichungen von der Rezeptur (siehe Kapitel 5.3.1), der oben genannten Herstellungsmethode oder der Nachbehandlung sind im jeweiligen Kapitel vermerkt.

#### 6.1.2 Frischbetoneigenschaften

Jeder Beton wurde in einer Charge in einem Laborzwangsmischer hergestellt. Direkt nach dem Mischen (entspricht einem Prüfzeitpunkt von ca. 5 Minuten nach der Wasserzugabe) wurden das Verdichtungsmaß, die Frischbetontemperatur, die Frischbetonrohichte sowie der Frischbetonluftgehalt bestimmt. Anschließend wurden drei weitere Verdichtungsmaße 15, 30 und 45 Minuten nach der Wasserzugabe gemäß DIN EN 12350-4:2019 bestimmt.

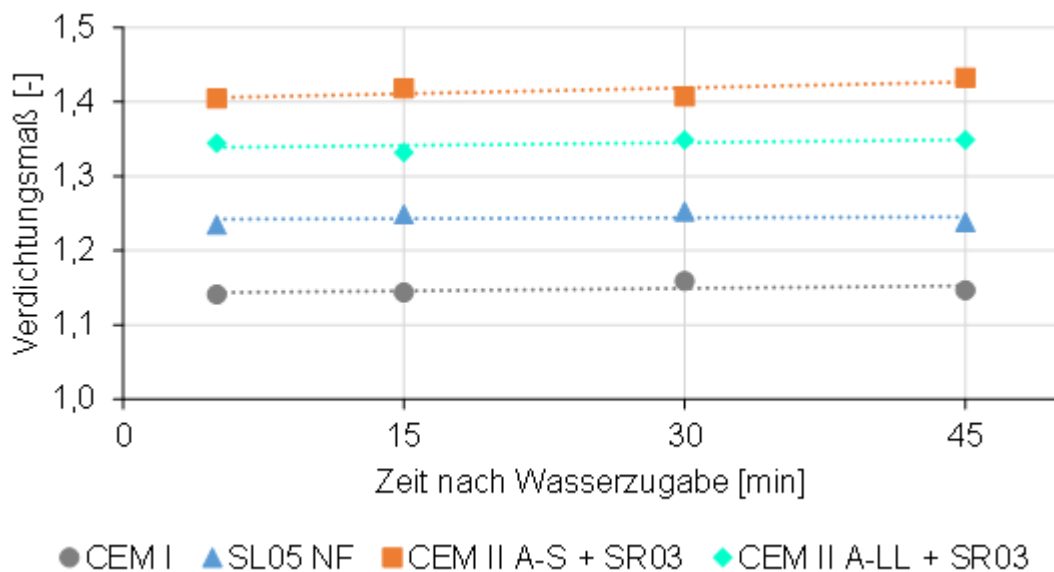
Nach jeder Prüfung wurde das Material zurück in den Mischer gegeben und direkt vor der erneuten Prüfung für ca. 10 Sekunden aufgemischt. Die Frischbetoneigenschaften sind in **Tabelle 31** dargestellt.

**Tabelle 31** Frischbetoneigenschaften der Betone

		CEM I	SL05 NF	CEM II A-S + SR03	CEM II A-LL + SR03
Temperatur	[°C]	20,4	n. b.	21,5	22,3
Frischbetonrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2496	2510	2522	2522
Luftporengehalt	[Vol.-%]	1,9	2,8	3,3	2,0
5 min Verdichtungsmaß	[-]	1,14	1,23	1,40	1,34
15 min Verdichtungsmaß	[-]	1,14	1,25	1,42	1,33
30 min Verdichtungsmaß	[-]	1,16	1,25	1,41	1,35
45 min Verdichtungsmaß	[-]	1,15	1,24	1,43	1,35

n. b.: nicht bestimmt

Alle vier Betone wiesen ein annähernd konstantes Verdichtungsmaß über die Verarbeitbarkeitsdauer von 45 Minuten auf (**Bild 54**). Dabei ließen sich alle Betone trotz der Unterschiede in den Absolutwerten der Verdichtungsmaße (zwischen 1,12 und 1,42) gut verarbeiten.



**Bild 54** Verarbeitbarkeit der Betone über die Zeit

### 6.1.3 Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

Die Betone wurden in einem Laborzwangsmischer hergestellt. Direkt nach dem Mischen wurden das Verdichtungsmaß, die Frischbetontemperatur, die Frischbetonrohddichte sowie der Frischbetonluftgehalt bestimmt. Anschließend erfolgte die Herstellung der Probekörper für die Festbetonuntersuchungen. Je Beton wurden acht Würfel (Kantenlänge 150 mm) hergestellt, wovon fünf Probekörper mit in die Schalungen seitlich eingelegten Teflonplatten hergestellt wurden. Aus den fünf mit Teflonplatten hergestellten Würfeln wurde jeweils ein CDF- und ein CF-Prüfkörper hergestellt. Die Probenvorbereitung entsprach DIN CEN/TS 12390-



9:2017--0-5. Die Frischbetoneigenschaften und Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen sind in **Tabelle 32** dargestellt.

**Tabelle 32** Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone zur Bestimmung des Frost-Tau(salz)-Widerstands

		CEM I (1)	CEM I (2)	SL05 NF	CEM II A-S + SR03	CEM II A-LL + SR03
Temperatur	[°C]	n. b.	22,9	n. b.	n. b.	21,6
Verdichtungsmaß	[-]	1,10	1,11	1,19	1,38	1,35
Frischbetonrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2570	2550	2500	2530	2490
Luftporengehalt	[Vol.-%]	0,9	0,9	2,1	2,9	2,8
Druckfestigkeit 28d* min/max	[MPa]	78,5 69,7 / 92,6	87,0 81,9 / 89,4	89,6 87,9 / 90,9	82,2 78,4 / 85,9	77,2 76,0 / 79,5

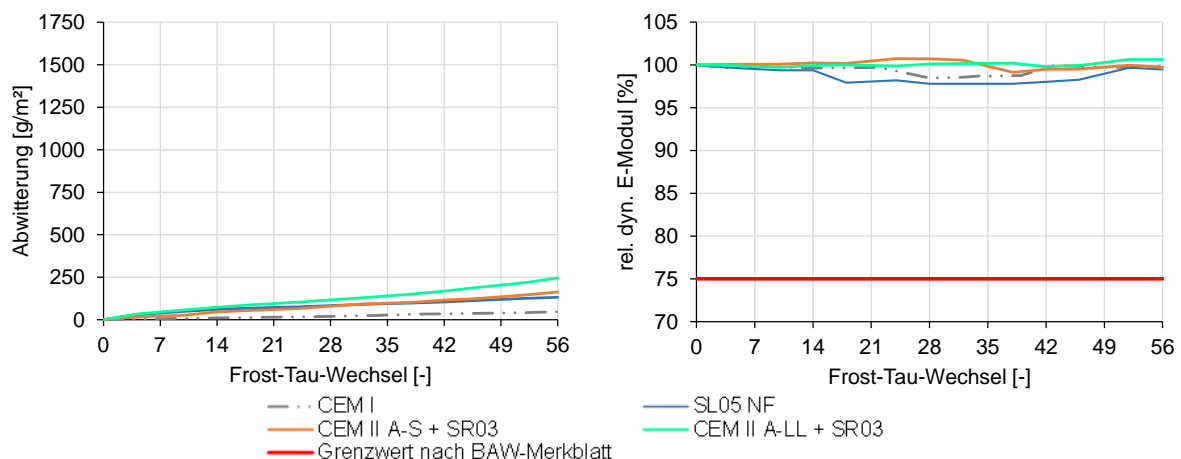
n. b.: nicht bestimmt

\*Mittelwert aus 3 Probekörpern

Aufgrund der hohen Streuung der Festigkeit des Referenzbetons mit CEM I (vgl. **Tabelle 32** „CEM I (1)“) und deutlichen Abweichung zu am WDI durchgeführten Vergleichsuntersuchungen wurde die CDF-Prüfung- an der Referenzmischung wiederholt (vgl. **Tabelle 32** „CEM I (2)“).

## Frostwiderstand

Der Frostwiderstand der vier Betone wurde mittels CF-Verfahren nach DIN CEN/TS 12390-9:2017--0-5 geprüft. In **Bild 55** sind die kumulierte Abwitterung und der relative dynamische E-Modul dargestellt. Mit fortschreitender Anzahl an Frost-Tau-Wechseln löste sich das als Seitenabdichtung verwendete aluminiumkaschierte Butylkautschukband an der kurzen Probenseite zunehmend ab. Dies führte zu Verfälschungen des Ultraschallsignals entlang der kurzen Probenseite. Daher wurde lediglich die lange Probenseite ausgewertet.



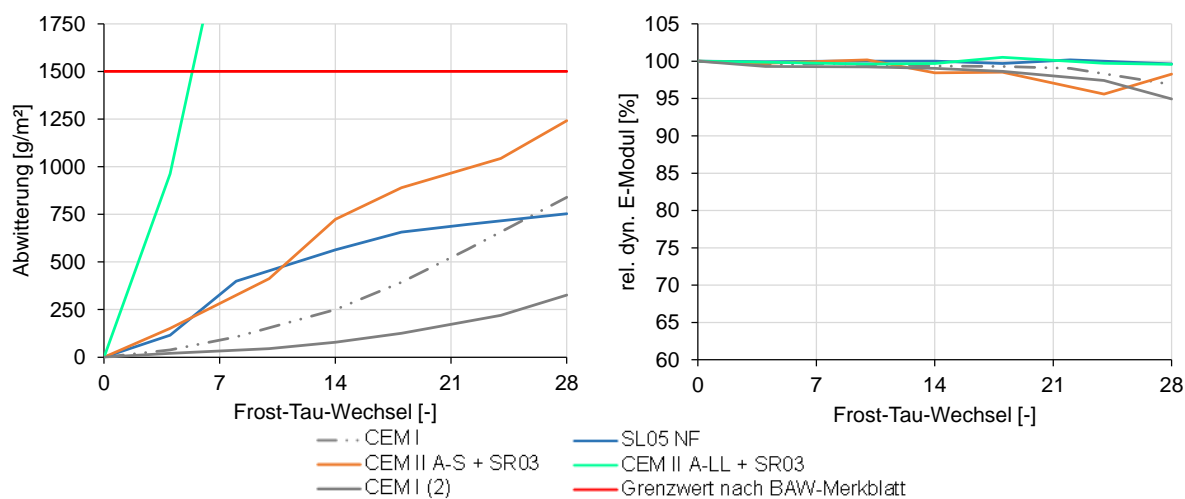
**Bild 55** Frostwiderstand im CF Verfahren; links Abwitterung der untersuchten Betonrezepturen, rechts zugehörige relative dynamische E Moduln, bestimmt durch die Messung der Ultraschalllaufzeit entlang der langen Probenseite

Die relativen dynamischen E-Moduln der Betone zeigten keine Auffälligkeiten. Die Messwerte lagen nach 56 Frost-Tau--Wechseln bei  $\geq 99$  %, womit das Grenzkriterium von 75 %

nach [3] eingehalten wurde. Die kumulierten Abwitterungen lagen in den untersuchten Betonen unter  $250 \text{ g/m}^2$  nach 56 Frost-Tau-Wechseln (Grenzwert:  $1000 \text{ g/m}^3$  nach [3]).

### Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand der vier Betone wurde mittels CDF-Verfahren nach DIN CEN/TS 12390-9:2017-0-5 geprüft. In **Bild 56** sind die kumulierte Abwitterung und der relative dynamische E-Modul dargestellt. Wie schon bei den Prüfungen zum Frostwiderstand kam es auch bei diesen Versuchsserien zum Ablösen des aluminiumkaschierten Butylkautschukbands an der kurzen Probenseite mit fortschreitender Anzahl an Frost-Tau-Wechseln und so zu Verfälschungen des Ultraschallsignals, weswegen die hier dargestellten rel. dyn. E-Moduln auf die Messungen der Ultraschalllaufzeiten entlang der langen Probenseiten beschränkt sind.



**Bild 56** Frost-Tausalz-Widerstand im CDF Verfahren; links Abwitterung der untersuchten Betonrezepturen, rechts zugehörige relative dynamische E Moduln, bestimmt durch die Messung der Ultraschalllaufzeit entlang der langen Probenseite

Die Abwitterungen der Betone mit den Zementen CEM I, SL05 NF und der Zementmischung CEM II A--S + SR03 liegen unterhalb des von der BAW [3] festgelegten Grenzwerts von  $1.500 \text{ g/m}^2$ . Der Beton mit CEM II A-LL + SR03 überschreitet den Grenzwert bereits nach 10 Frost--Tau---Wechseln. Der Einsatz in tausalzexponierten Bereichen, beispielsweise im Bereich von Bahnhöfen oder Bahnübergängen, ist für diese Betonzusammensetzung nicht zu empfehlen. Alle Betone wurden jedoch ohne die Zufuhr künstlicher Luftporen (bspw. mittels LP-Bildner als Betonzusatzmittel) hergestellt. Eine Verbesserung der Frost-Tausalzbeständigkeit der untersuchten Betonrezepturen ist aus betontechnologischer Sicht also möglich.

In Bezug auf eine innere Schädigung liegen auch in der CDF-Prüfung alle untersuchten Betone unterhalb des Grenzwertes für den relativen dynamischen E-Modul [3].

Die untersuchten Betone mit CSA-Zementen weisen im Vergleich zum CEM I - Beton einen verringerten, wenngleich für die Betone mit SL05 NF und mit CEM II A-S mit SR03 ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand auf. Weitere betontechnologische Optimierungen zur Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstand - beispielsweise die Zugabe von luftporenbildenden Betonzusatzmitteln – wären möglich.

### 6.1.4 Kriechversuche

An den Serien CEM I, SL05 NF und SR03 mit CEM II A-S wurde das Kriechverhalten nach DIN EN 12390-17:2018---04 untersucht. Unmittelbar nach dem Mischen wurden das Verdichtungsmaß, die Frischbetontemperatur, die Frischbetonrohddichte sowie der Frischbetonluftgehalt bestimmt. Anschließend erfolgte die Herstellung der Probekörper für die Festbetonuntersuchungen. Je Beton wurden 12 Zylinder (Durchmesser 150 mm; Höhe 300 mm) hergestellt, von denen je 3 für die Messung des Kriechverhaltens, des Schwindverhaltens, der Druckfestigkeit und des E-Moduls verwendet wurden. Die ermittelten Frisch- und Festbetonkenndaten sind in **Tabelle 33** aufgeführt.

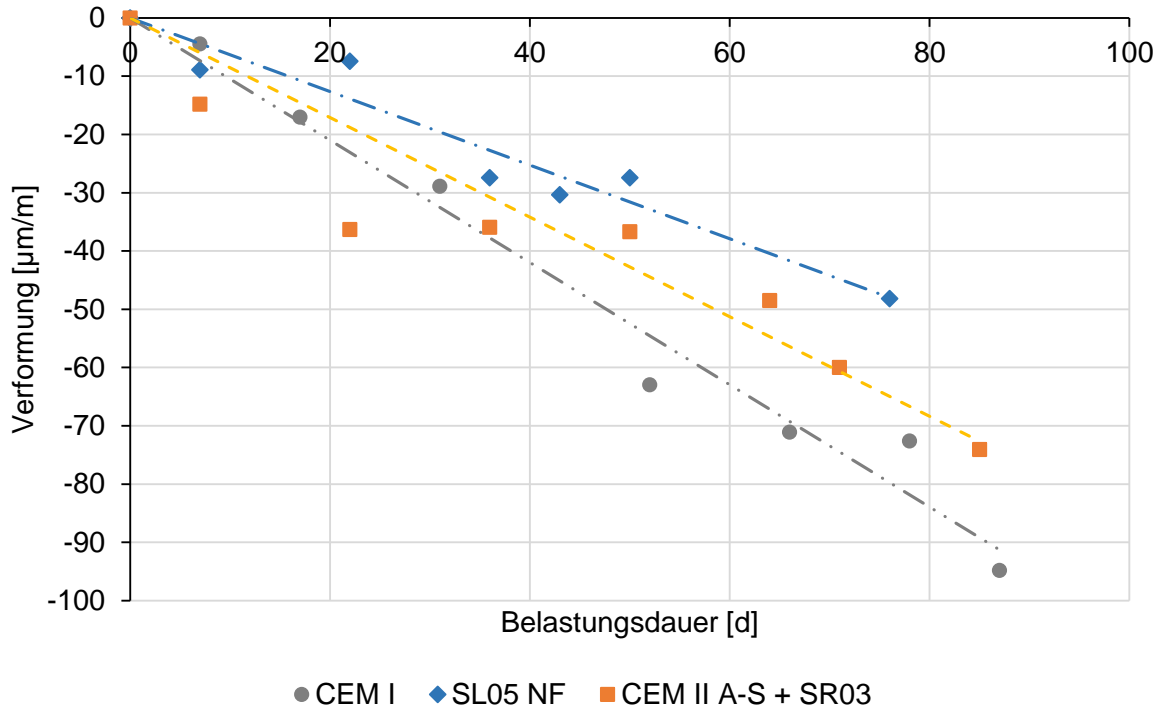
**Tabelle 33** Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone zur Bestimmung des Kriechverhaltens

Parameter	Einheit	CEM I	SL05 NF	CEM II A-S + SR03
Frischbetontemperatur	[°C]	n. b.	19,2	23,2
Frischbetonrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2570	2486	2510
Luftporengehalt	[Vol.-%]	0,9	2,3	3,0
Verdichtungsmaß	[-]	1,10	1,15	1,31
Druckfestigkeit nach 28 d min/max	[MPa]	68,7* 58,7/76,5	83,4* 82,0/85,7	69,5* 68,4/71,6
E-Modul nach 28 d min/max	[GPa]	49,19* 48,53 / 49,79	47,43* 46,69 / 48,02	46,15* 45,17 / 47,92

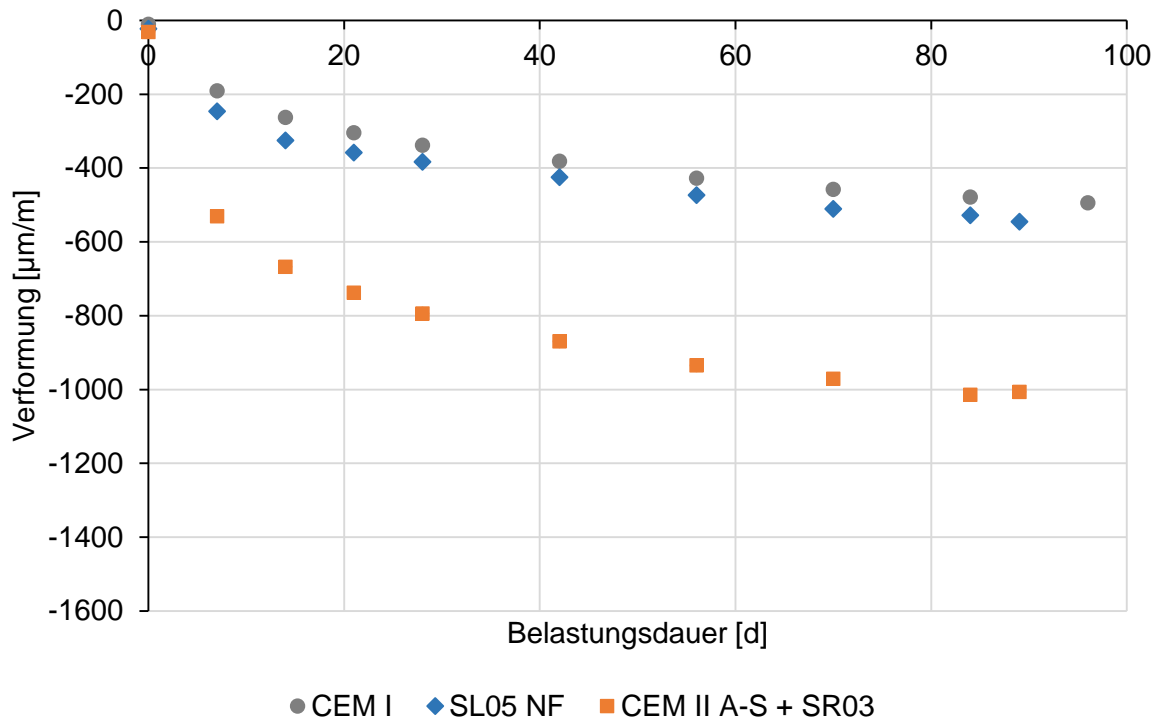
n. b.: nicht bestimmt

\*Mittelwert aus 3 Probekörpern

Die Untersuchung des Kriechverhaltens erfolgte an der MFPA Leipzig an je drei Zylindern mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe je Beton. Die jeweiligen Prüfberichte sind dem Anhang zu entnehmen. Die Prüfung erfolgte im Normklima bei 20 °C und 65 % r. F. über einen Zeitraum von rund 90 Tagen. Die Erstbelastung erfolgte in einem Betonalter von 28 Tagen. Als Prüflast wurden 33,3 % der zuvor an der TU München im Druckversuch ermittelten Zylinderdruckfestigkeit verwendet. Parallel zu den Kriechversuchen wurde das Schwindverhalten der Betone an Zylindern mit gleichen Abmessungen geprüft (vgl. **Bild 57**). Um aus der in den Kriechversuchen ermittelten Gesamtverformung die Kriechverformung zu erhalten, wurde von der gemessenen Gesamtverformung die Schwindverformung abgezogen. Die daraus resultierende Kriechverformung ist in **Bild 58** dargestellt.



**Bild 57** Schwindverformung der Betone ab einem Alter von 28 Tagen



**Bild 58** Kriechverformung der unterschiedlichen Betone (um die ebenso ermittelte Schwindverformung bereinigt)

Der Beton mit SR03 + CEM II A-S wies eine erhöhte Kriechverformung auf. Da es sich bei Bahnschwellen um vorgespannte Bauteile handelt, bedingt das stärkere Kriechverhalten einen erhöhten Spannkraftverlust, welcher im Rahmen der Bauteiluntersuchungen gesondert betrachtet werden sollte.

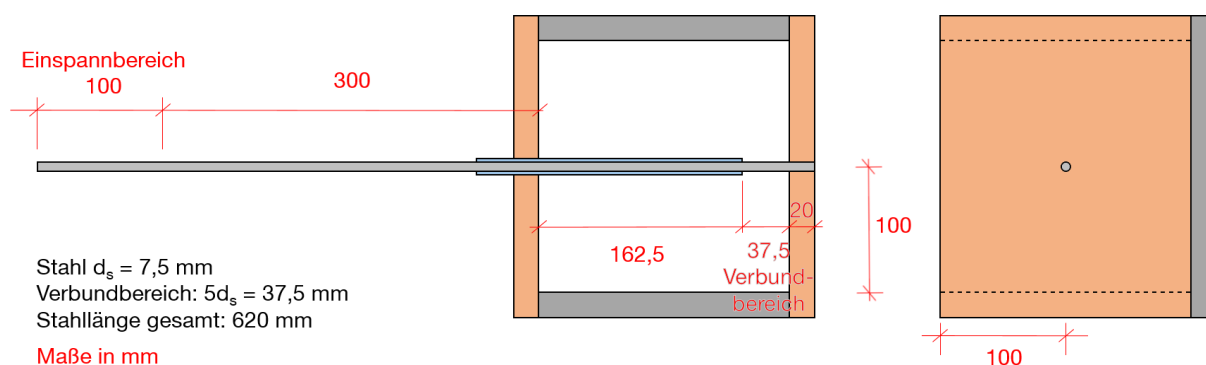
### 6.1.5 Verbundeigenschaften – Pull-Out Versuche

Die Verbundeigenschaften zwischen Beton und Spannstahl wurden in Anlehnung an die „RC 6 Bond test for reinforcement steel - 2. Pull-out-Test“ [22] ermittelt. Je Beton und Stahlsorte wurden 6 Verbundprobekörper und 9 Würfel zur Prüfung der Druckfestigkeit hergestellt. Die Frisch- und Festbetoneigenschaften sind in **Tabelle 34** angegeben. Für die Verbundprobekörper wurden Spannstähle mit einem Durchmesser von 7,5 mm und 9,0 mm mittig durch die Betonwürfel geführt (vgl. Skizze in **Bild 59** für einen Spannstahldurchmesser von 7,5 mm). Die Verbundlänge entsprach dem 5-fachen des Stahldurchmessers.

**Tabelle 34** Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone für die Tests zu den Verbundeigenschaften

Parameter	Einheit	CEM I (9,0 mm)	CEM I (7,5 mm)	CEM II A-S + SR03 (9,0 mm)	CEM II A-S + SR03 (7,5 mm)
Frischbetontemperatur	[°C]	20,8	21,2	22,6	25,2
Frischbetonrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2540	2527	2564	2519
Luftporengehalt	[Vol.-%]	1,2	1,2	2,2	2,4
Verdichtungsmaß	[-]	1,10	1,09	1,25	1,30
Druckfestigkeit zum Prüfzeitpunkt min/max	[MPa]	84,8* 83,6 / 86,2	84,2* 80,4 / 86,6	79,6* 77,3 / 81,4	81,9* 79,5 / 84,0

\* Mittelwert aus 3 Probekörpern



**Bild 59** Skizze „Pull-Out“ – Versuch

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse trotz leichter Schwankungen in der Festigkeit sicherzustellen, wurden diese in Anlehnung an RILEM RC 6 [22] mit der nachfolgenden Formel auf einen einheitlichen Wert normiert. Aufgrund der hohen Festigkeiten der untersuchten Betone wurde abweichend auf 80,0 MPa anstelle 30,0 MPa normiert.

$$\tau_{dm} = \frac{1}{5 * \pi} * \frac{F}{d_s^2} * \frac{f_{cm}}{f_c}$$

In **Tabelle 35** und **Bild 60** sind die normierten Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen für die jeweiligen Stahldurchmesser aufgetragen. Es zeigen sich je Stahldurchmesser vergleichbare Maximalspannungen.

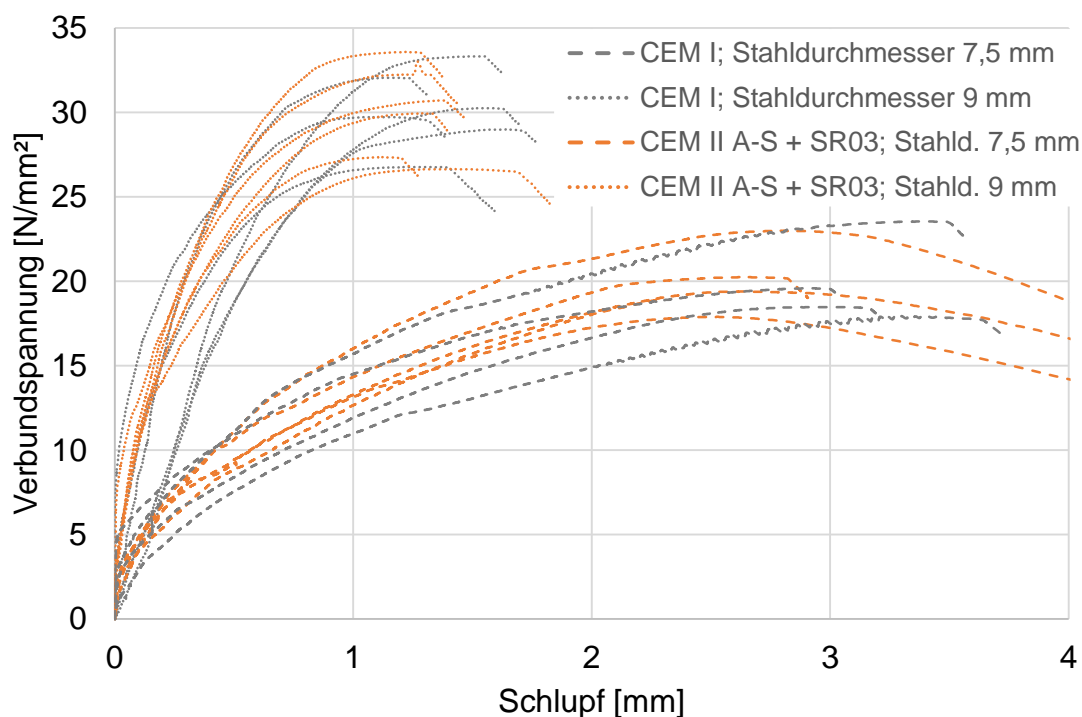
**Tabelle 35** Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen der Pull-Out Versuche

			CEM I (9,0 mm)	CEM I (7,5 mm)	CEM II A-S + SR03 (9,0 mm)	CEM II A-S + SR03 (7,5 mm)
Spannung bei Schlupf von	0,01 mm	[MPa]	2,48*	2,57**	3,98*	1,76***
	0,1 mm	[MPa]	7,65*	4,71**	11,17*	4,42***
Max. Spannung		[MPa]	30,18*	19,88**	30,20*	20,02***
Schlupf bei max. Spannung		[mm]	1,38*	3,14**	1,28*	2,68***

\*Mittelwert aus 6 Probekörpern

\*\*Mittelwert aus 4 Probekörpern

\*\*\*Mittelwert aus 5 Probekörpern

**Bild 60** Spannungs-Schlupf Verläufe der Betone mit CEM I und SR03 + CEM II A-S mit je zwei Stahldurchmessern

Der Einsatz von CSA-Zementen wirkt sich nicht negativ auf das Verbundverhalten zwischen Stahl und Beton aus.

### 6.1.6 Spannungsrisskorrosion

Um die Neigung zur Spannungsrisskorrosion abschätzen zu können, wurden Porenlösungen der CSA-Betone im Alter von 28 und 56 Tagen nach der Herstellung ausgepresst und chemisch analysiert. Ergänzend wurde vom CEM I als Vergleich nach 56 Tage Porenlösung ausgepresst und analysiert.

Je Beton wurden 9 Würfel (Kantenlänge = 150 mm) zur Festigkeitsermittlung sowie 2 PE-Flaschen **Tabelle 36** zu entnehmen. Die PE-Flaschen wurden, abweichend von der üblichen Nachbehandlung, direkt nach der Herstellung verschlossen und anschließend bei 20 °C gelagert. Die Gewinnung der Porenlösung erfolgte mit einer Auflast von rund 900 MPa.

**Tabelle 36** Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone zur Bestimmung des Kriechverhaltens

		CEM I	SL05 NF	CEM II A-S + SR03	CEM II A-LL + SR03
Temperatur	[°C]	22,7	24,2	-	24,5
Frischbetonrohddichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2552	2539	2525	2537
Luftporengehalt	[Vol.-%]	1,0	1,4	1,7	2,1
Verdichtungsmaß	[-]	1,13	1,26	1,23	1,31
Druckfestigkeit nach 7 d min/max	[MPa]	82,9* 81,1 / 83,9	84,3* 83,9 / 84,8	58,9* 58,2 / 59,8	56,1* 52,9/59,4
Druckfestigkeit nach 28 d min/max	[MPa]	88,6* 82,6 / 97,5	87,5* 80,1 / 91,4	71,6 66,6 / 74,2	84,4* 80,7 / 86,5

\*Mittelwert aus 3 Probekörpern

Da beim Beton CEM II A-S + SR03 festgestellt wurde, dass aus den in den Flaschen gelagerten Proben keine Porenlösung gewinnbar war, wurden die Flaschen für alle weiteren Mischungen 7 Tage vor dem Auspressen in 1 cm breite Streifen geschnitten und für 7 Tage in demineralisiertem Wasser bei 20 °C gelagert. Hierdurch ist lediglich eine qualitative Betrachtung der Ergebnisse möglich. Zudem liegen für die Mischung CEM II A-S + SR03 erst nach 35 Tagen Daten vor, was auf die chemische Zusammensetzung nur geringfügige Auswirkungen hat. In **Tabelle 37** sind die Ergebnisse der chemischen Analyse dargestellt.

**Tabelle 37** Ergebnisse der chemischen Analyse der Porenlösungen

		CEM I	SL05 NF		CEM II A-S + SR03		CEM II A-LL + SR03	
Alter	d	56	28	56	35	56	28	56
pH	[-]	13,13	13,0	13,1	13,1	13,1	12,6	12,5
Na	mg/l	1181	1663	1961	1709	1854	697	531
K	mg/l	3456	1321	1905	1768	1767	426	426
Ca	mg/l	110,93	33,9	77,0	87,1	40,5	144,6	107,7
Mg	mg/l	0,07	0,09	0,04	0,61	0,00	0,00	0,04
Al	mg/l	5,09	4,7	7,6	14,1	6,5	5,2	4,9
Si	mg/l	2,82	12,4	5,8	4,4	4,0	3,9	5,6
S	mg/l	30,93	59,9	45,4	29,3	25,7	10,8	14,4
Cl [Fot]	mg/l	33,85	118,0	91,5	78,4	117,0	44,0	40,2
SO <sub>4</sub>	mg/l	92,67	179,1	135,9	-	-	32,5	43,4

Die gemessenen Ionengehalte liegen meist in der gleichen Größenordnung wie beim Referenzbeton mit CEM I. Ausnahme hierbei sind die Alkaliionen Na und K des Betons CEM II A-LL + SR03, die eine deutlich geringere Konzentration aufweisen.

Ein erhöhtes Risiko für Spannungsrisskorrosion aufgrund des Einsatzes von CSA-Zementen ist anhand der Daten nicht erkennbar.

### 6.1.7 Korrosionsneigung

#### Versuchsbeschreibung

Zur Bewertung, ob durch den Einsatz von CSA-Zementen eine gesteigerten Korrosionsneigung des Bewehrungsstahls auftritt, wurden Bewehrungsstähle in Mörteln mit CEM I, SL05NF, CEM II A-S + SR03 bzw. CEM II A-LL + SR03 eingebettet.

Die Mörtel entsprachen in ihrer Zusammensetzung dem Mörtelanteil der Betone. Der Fließmittelgehalt wurde bei den Mörteln mit SL05NF und CEM II A-S + SR03 reduziert. Die Zusammensetzung und Frischmörteleigenschaften der Mörtel sind in **Tabelle 38** zusammengestellt.

**Tabelle 38** Mörtelzusammensetzungen zur Bestimmung der Korrosionsneigung

		<b>CEM I</b>	<b>SL05 NF</b>	<b>CEM II A-S + SR03</b>	<b>CEM II A-LL + SR03</b>
Sand	[kg/m <sup>3</sup> ]	1385	1369	1388	1383
Zementmischung	[kg/m <sup>3</sup> ]	619	612	629	628
w/z-Wert	[-]	0,41	0,41	0,38	0,38
Fließmittelgehalt	[%] v.Z.	0,9	0,7	1,0	1,4
Verzögerergehalt	[%] v.Z.	0,3	0,8	0,9	0,9

Je Mörtel wurden 5 Probekörper für Korrosionsuntersuchungen und 21 Prismen für Festigkeits- und Elektrolytwiderstandsmessung hergestellt. Die Proben wurden nach ca. 24 h ausgeschalt. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt geringen Festigkeit des Mörtels mit CEM I wurde für diesen der Zeitpunkt des Ausschalens auf 48 h verschoben.



**Tabelle 39** Frisch- und Festmörteleigenschaften

Parameter	Einheit	CEM I	SL05 NF	CEM II A-S + SR03	CEM II A-LL + SR03
Frishmörteltemperatur	[°C]	n. b.	18,6	18,9	n. b.
Frishmörtelrohichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	2310	2200	2190	2200
Luftporengehalt	[Vol.-%]	n. b.	3,8	3,8	5,7
Ausbreitmaß	[-]	250	238	221	205
Druckfestigkeit nach 24 h min/max	[MPa]	n. b.	56,2* 50,0 / 61,6	56,9* 55,5 / 57,9	39,5* 37,6 / 42,6
Druckfestigkeit nach 48 h min/max	[MPa]	29,3* 20,7 / 34,1	n. b.	n. b.	n. b.
Druckfestigkeit nach 3 d min/max	[MPa]	57,5* 55,2 / 60,0	56,9* 54,6 / 60,2	61,1* 58,2 / 64,2	46,9* 45,5 / 48,5
Druckfestigkeit nach 7 d min/max	[MPa]	76,2* 76,4 / 80,4	66,7* 63,8 / 69,6	71,9* 70,4 / 72,5	50,4* 45,4 / 54,6
Druckfestigkeit nach 28 d min/max	[MPa]	n. b.	78,8* 77,9 / 81,9	82,6* 80,5 / 83,3	83,8* 78,9 / 87,4
Druckfestigkeit nach 29 d min/max	[MPa]	93,2* 87,9 / 96,8	n. b.	n. b.	n. b.
Druckfestigkeit nach 56 d min/max	[MPa]	94,4* 90,2 / 100,0	n. b.	n. b.	89,0* 86,1 / 90,7
Biegezugfestigkeit nach 24 h min/max	[MPa]	n. b.	7,9** 7,5 / 8,2	7,6** 7,3 / 8,2	2,8** 2,5 / 3,1
Biegezugfestigkeit nach 48 h min/max	[MPa]	4,8** 4,7 / 4,9	n. b.	n. b.	n. b.
Biegezugfestigkeit nach 3 d min/max	[MPa]	7,5** 6,5 / 8,7	5,7** 4,6 / 6,5	7,0** 6,8 / 7,3	6,0** 5,9 / 6,2
Biegezugfestigkeit nach 7 d min/max	[MPa]	8,9** 8,5/9,4	7,3** 7,1 / 7,6	7,2** 7,0 / 7,6	5,8** 5,3 / 6,2
Biegezugfestigkeit nach 28 d min/max	[MPa]	n. b.	9,4** 9,1 / 9,9	10,4** 10,0 / 10,6	11,3** 11,0 / 11,8
Biegezugfestigkeit nach 29 d min/max	[MPa]	11,2** 11,1 / 11,3	n. b.	n. b.	n. b.
Biegezugfestigkeit nach 56 d min/max	[MPa]	12,6** 12,2 / 13,3	n. b.	n. b.	12,5** 11,8 / 13,1

\*Mittelwert aus 6 Probekörpern

\*\*Mittelwert aus 3 Probekörpern

n. b.: nicht bestimmt

Die Probekörper wurden in einer gesättigten Calciumhydroxid-Lösung gelagert, wobei sich die Probekörper bis ca. 1 cm unter der Oberkante in Lösung befanden. Im Anschluss wurde der potentiostatische Halteversuch für eine Dauer von 35 Tagen durchgeführt. Dabei wurde das Ruhepotential des eingebetteten Stahls gegen eine gesättigte Silber/Silberchlorid-Referenzelektrode (SAE) gemessen, anschließend mit Hilfe eines Potentiostaten um +301 mV (auf +500 mV<sub>NHE</sub>) ausgelenkt und während des gesamten Zeitraums gleichbleibend aufrecht erhalten. In diesem Zeitraum wurde das Potential gemessen und der Strom zwischen dem eingebetteten Stahl und einem Titanmischoxidgitter aufgezeichnet, welches als Gegenelektrode fungierte. Für die Berechnung der Stromdichte wurde die gesamte Fläche des Stahlstabs herangezogen, welche in Kontakt mit dem untersuchten Mörtel war. Eine Korrosion des Stahls kann sowohl durch einen signifikanten und permanenten Anstieg der Korrosionsströme als auch durch Korrosionsstellen nach Ausbau der Stähle festgestellt werden. Kann keines der beiden Phänomene festgestellt werden, ist davon auszugehen, dass der Stahl im

eingebetteten Mörtel vor Korrosion geschützt ist. Die Prüfdauer wurde im Vergleich zur DIN EN 480-14 verlängert. Damit soll eine belastbare Aussage ermöglicht werden. Der Vergleich von Ruhepotentialen vor der Dauerpolarisation mit den Werten nach der Dauerpolarisation erlaubt eine qualitative Aussage, ob sich die Stahloberfläche durch die Dauerpolarisation beeinflussen ließ. Eine Entwicklung zu niedrigeren Werten deutet hier auf Korrosion der Oberfläche hin.

Unmittelbar nach Beendigung der Polarisation im potentiostatischen Halteversuch wurde das Potential des eingebetteten Stahls für eine Dauer von sieben Tagen aufgezeichnet. Des Weiteren wurden das Ruhepotential und die Stromdichte-Potential-Kurve mittels eines 3-Elektroden-Setups gemessen. Dies erfolgte als erstes an dem Tag, an dem der potentiostatische Halteversuch gestartet wurde. Sieben Tage nach Beendigung der Polarisation fand eine weitere Messung statt. Anhand der Stromdichte-Potential-Kurve wurde der lineare Polarisationswiderstand bestimmt, wobei die Auswertung auf einer Auslenkung um das Ruhepotential von  $\pm 5$  mV basierte. Der Polarisationswiderstand gibt zusätzlich Aufschluss zur Frage, inwieweit die Stahloberfläche zur anodischen Teilreaktion neigt. Der Vergleich der Werte vor und nach den Halteversuchen, wie er für die Ruhepotentiale durchgeführt wurde, kann zu einer Aussage zur Veränderung der Stahloberfläche herangezogen werden. Niedrige Polarisationswiderstände deuten eine größere Korrosionsgeschwindigkeit an.

Abschließend wurden die Stahlstäbe aus dem Mörtel entnommen und augenscheinlich hinsichtlich vorhandener Korrosionsstellen überprüft.

Der Ladungstransport von der Kathode zur Anode ist bei einem Korrosionselement (Makro-zelle) mit starker Schädigungswirkung (z.B. lokale Lochfraßkorrosion) ein entscheidender Faktor. Es ist somit wichtig zu ermitteln, welchen Widerstand das Einbettmaterial um den Stahl herum gegen diesen Ladungstransport besitzt. Hierfür wurde der Elektrolytwiderstand bestimmt, indem sechs Prismen ( $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ) je Serie hergestellt wurden. Davon wurden jeweils drei Prismen in Leitungswasser und jeweils drei Prismen in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung gelagert. In einem 2-Elektroden-Setup wurde der Wechselstromwiderstand ( $R_e$ , Wechselstrom,  $f = 120 \text{ Hz}$ ) in regelmäßigen Abständen während eines Zeitraums von drei Monaten gemessen. Die Berechnung des spezifischen Elektrolytwiderstands ( $\rho_e$ ) erfolgte mit der folgenden Gleichung.

$$\rho_e = R_e \cdot \frac{A}{l}$$

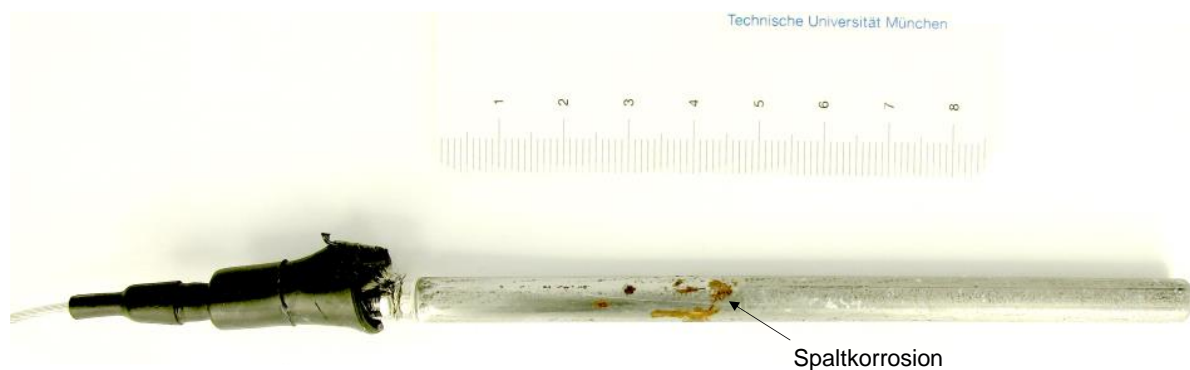
Dazu wurden die Querschnittsfläche ( $A$ ) und der Abstand zwischen beiden Elektroden ( $l$ ) ermittelt. Im Anschluss wurde jeweils der Mittelwert der spezifischen Elektrolytwiderstände über die Länge, Breite und Höhe der Prismen bestimmt.

Alle Untersuchungen wurden bei Raumtemperatur ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ) durchgeführt.

Zur Durchführung des potentiostatischen Halteversuchs wurden fünf Probekörper je Serie in Anlehnung an DIN EN 480-14 hergestellt. Die Probekörper hatten einen Durchmesser von 46 mm und eine Höhe von 130 mm. Dabei war jeweils ein Stab aus Stahl B500A+G nach DIN 488 mit einem Durchmesser von 7 mm über eine Länge von 70 mm zentrisch mit einer Überdeckung von ca. 20 mm in den zu untersuchenden Mörtel eingebettet. Es wurde Stahl verwendet, der frei von Korrosionsstellen war. Vor Herstellung des Probekörpers wurde die

Walzhaut auf der Oberfläche des Stahls mit einem Schmirgelpapier (Feinheitsgrad 400) entfernt und die Stahloberfläche mit Ethanol entfettet.

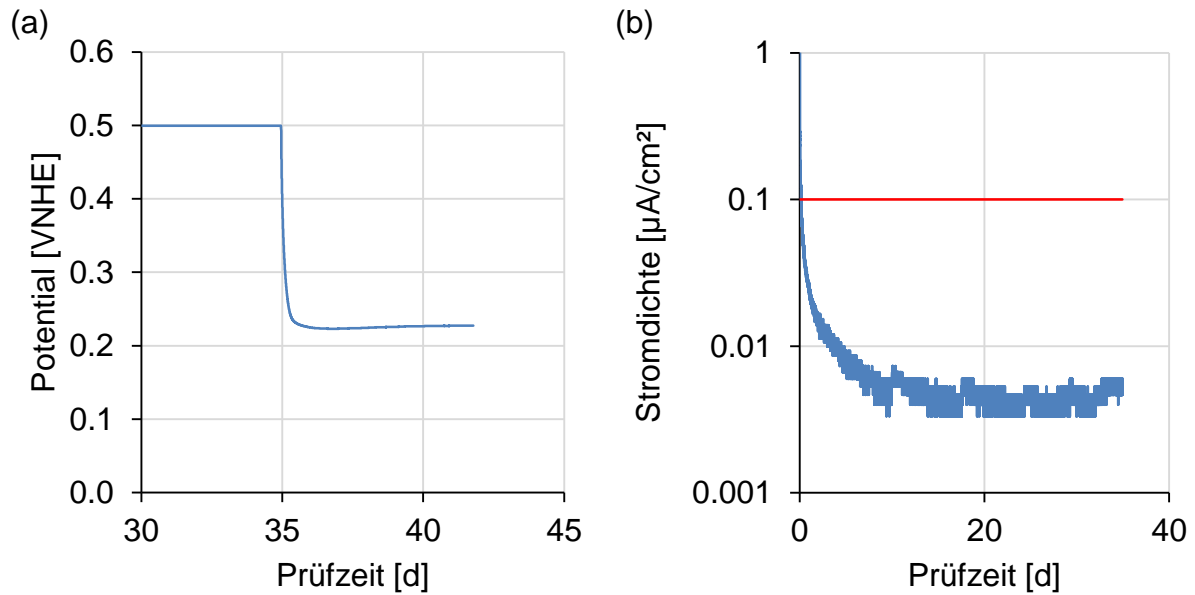
Anschließend wurde ein Messkabelanschluss am Stahlstab installiert und in Epoxidharz eingegossen. Die nicht zu prüfenden Bereiche des Stahlstabs wurden isoliert. Dazu wurde ein Wärmeschrumpfschlauch mit Innenkleber verwendet. Bei den ersten Vorversuchsserien mit dem Probekörperaufbau nach DIN EN 480-14- wurde Spaltkorrosion auf dem Stahl unter dem Wärmeschrumpfschlauch gefunden (siehe **Bild 61**). Die Spaltkorrosion trat vermutlich infolge von Sauerstoffarmut als ein Versuchsartefakt auf. Deshalb wurden die Untersuchungsergebnisse verworfen und die Untersuchungen mit optimiertem Probekörperaufbau wiederholt. Der Probekörperaufbau wurde wie folgt verändert: Auf die zu isolierenden Bereiche des Stahlstabs wurde eine dünne Schicht (etwa 1-2 mm) aus alkalischem Mörtel aufgebracht. Sobald dieser erhärtet war, wurde ein Wärmeschrumpfschlauch mit Innenkleber auf den Mörtel appliziert. Die kritischen Bereiche des Stahlstabs unter dem Wärmeschrumpfschlauch waren somit durch ein alkalisches Milieu vor Korrosion geschützt.



**Bild 61** Stahlstab (Nr. 27, Vorversuchsserie CEM I) mit Spaltkorrosion unter dem Wärmeschrumpfschlauch

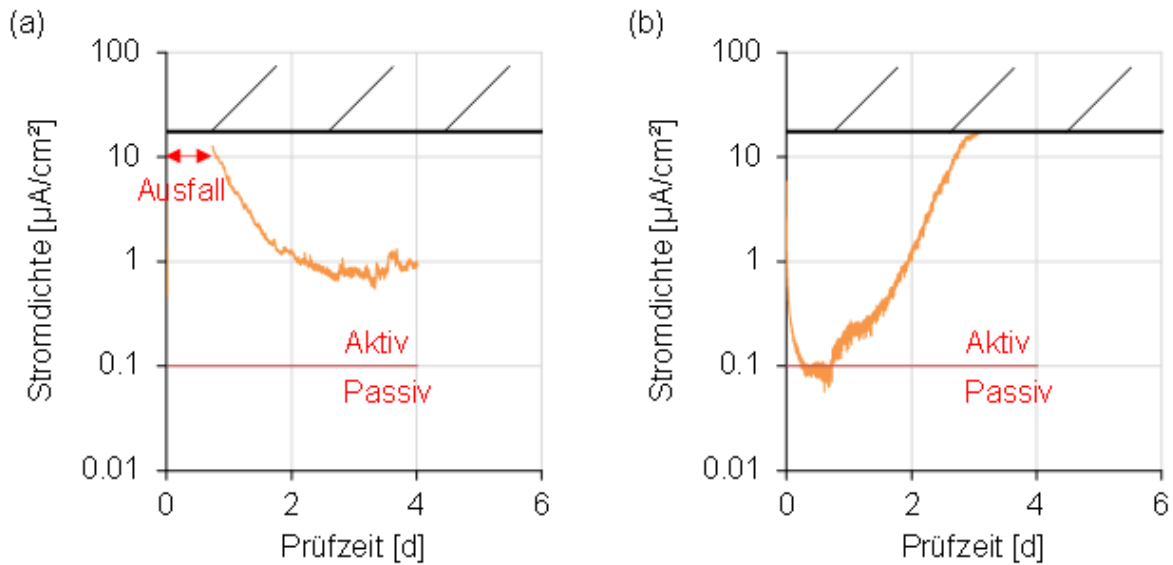
## Ergebnisse

**Bild 62** zeigt den zeitlichen Verlauf des Potentials und der Stromdichte des im Mörtel eingebetteten Stahlstabs während des potentiostatischen Halteversuchs exemplarisch im Fall einer nicht korrodierenden Probe. Während der Polarisation auf  $+500 \text{ mV}_{\text{NHE}}$  ( $\cong 0,5 \text{ V}_{\text{NHE}}$ ) sank die Stromdichte auf Werte kleiner  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (rote Linie) und blieb auf diesem niedrigen Niveau, was nach [23] einer zu vernachlässigenden Korrosionsaktivität entspricht. Nach Beendigung der Polarisation fiel das Potential von  $+500 \text{ mV}_{\text{NHE}}$  innerhalb von wenigen Tagen um mehrere hundert Millivolt ab und erreichte schließlich ein konstantes Niveau.



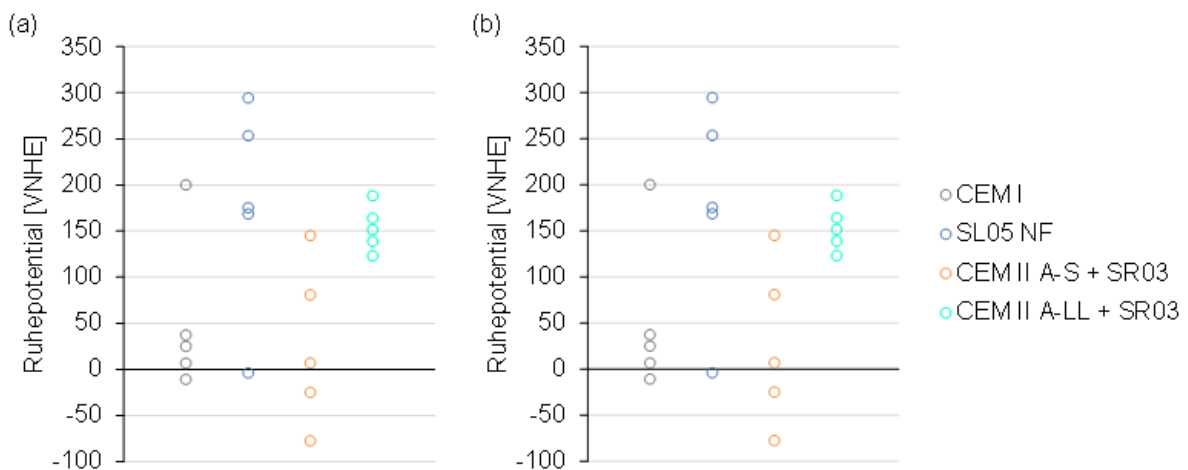
**Bild 62** Zeitlicher Verlauf (a) des Potentials und (b) der Stromdichte des im Mörtel eingebetteten Stahlstabs während des potentiostatischen Halteversuchs exemplarisch im Fall einer passiven Probe (Mörtel mit SL05NF, Probe 3)

**Bild 63** zeigt den zeitlichen Verlauf der Stromdichte des im Mörtel eingebetteten Stahlstabs während des potentiostatischen Halteversuchs für die Proben 2 und 4. Da Probe 2 nach einem anfänglichen Abfall der Stromdichte ausgefallen war, wurde die Messzelle gewechselt und der potentiostatische Halteversuch fortgeführt, was mit einem erneuten Abfall der Stromdichte verbunden war. Die Stromdichte fiel auf Werte von ca.  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ab. Da die sich einstellende Stromdichte über dem Grenzwert von  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  (rote Linie) lag, wurde der potentiostatische Halteversuch vorzeitig beendet und verworfen. Bei Probe 4 fiel die Stromdichte zunächst auf Werte von ca.  $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ab und stieg anschließend kontinuierlich und überschritt schließlich den vorhandenen Messbereich (schraffierter Bereich) des eingesetzten Messgeräts. Der Halteversuch wurde zu diesem Zeitpunkt ebenfalls vorzeitig beendet.



**Bild 63** Zeitlicher Verlauf der Stromdichte des im Mörtel mit SR03 + CEM II A-S eingebetteten Stahlstabs während des potentiostatischen Halteversuchs für (a) Probe 2 und (b) Probe 4

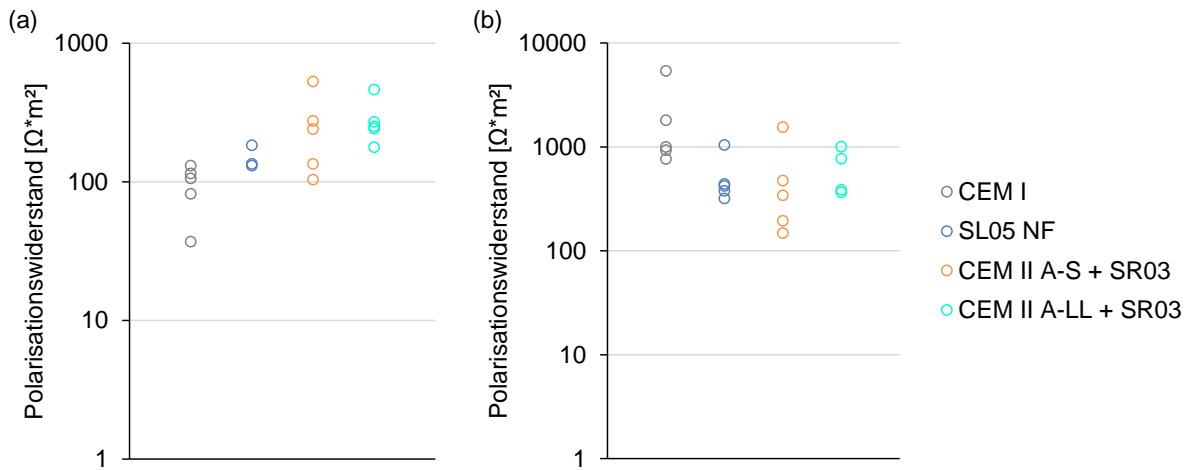
**Bild 64** zeigt das Ruhepotential des im Mörtel eingebetteten Stahlstabs. Bei SL05 NF wurden zwei der fünf Messwerte verworfen, da diese Messwerte nicht stabil waren. Unmittelbar vor Beginn des potentiostatischen Halteversuchs befanden sich die Ruhepotentiale bei allen Serien im Bereich von 0 bis 150 mV<sub>NHE</sub>. Sieben Tage nach Beendigung der Polarisation verschoben sich die Ruhepotentiale bei CEM I und SR03 + CEM II A-S tendenziell zu niedrigeren Werten, wohingegen sich die Ruhepotentiale eher zu höheren Werten bei SL05 NF (bis auf eine Ausnahme) und SR03 + CEM II A-LL verschoben.



**Bild 64** Ruhepotential des im Mörtel eingebetteten Stahlstabs (a) unmittelbar vor Beginn des potentiostatischen Halteversuchs und (b) sieben Tage nach Beendigung der Polarisation

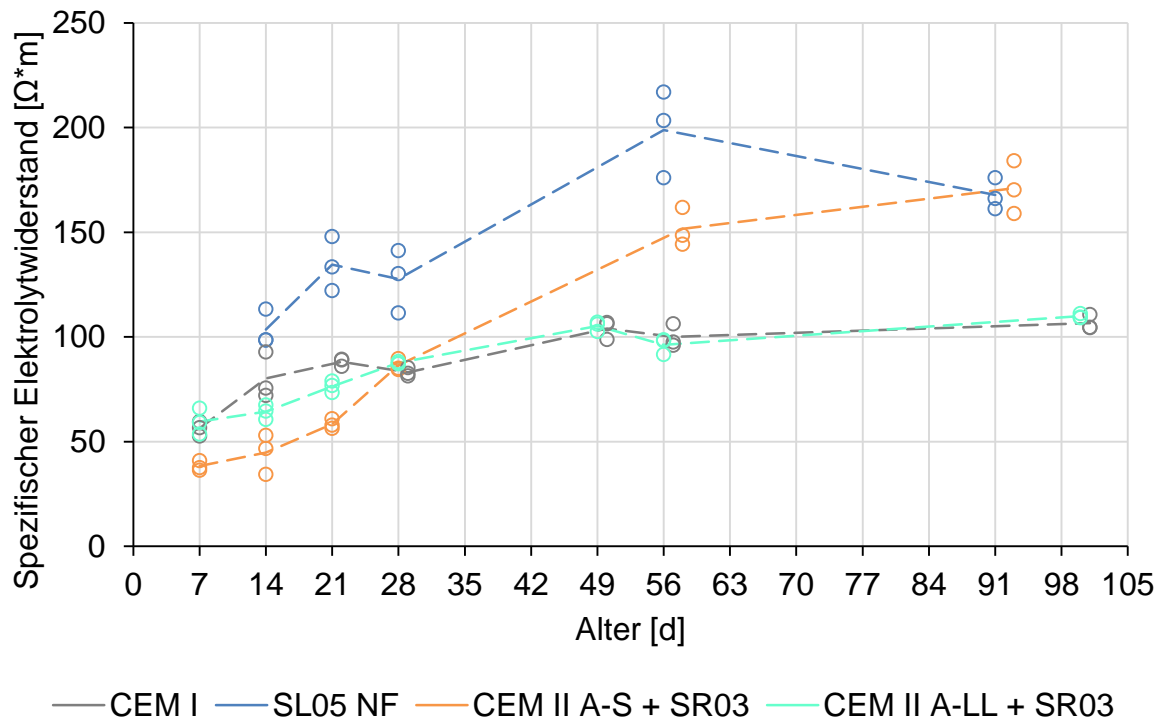
**Bild 65** zeigt den Polarisationswiderstand des im Mörtel eingebetteten Stahlstabs. Bei SL05 NF wurden zwei der fünf Messwerte verworfen, da diese Messwerte nicht stabil waren. Unmittelbar vor Beginn des potentiostatischen Halteversuchs lag der Polarisationswiderstand

bei CEM I im Bereich von  $100 \Omega\text{m}^2$ . Im Vergleich zum CEM I wiesen die übrigen Serien etwas höhere Polarisationswiderstände auf. Sieben Tage nach Beendigung der Polarisation verschoben sich der Polarisationswiderstand bei CEM I zu deutlich höheren Werten, wohingegen sich die Polarisationswiderstände bei den übrigen Serien nur leicht erhöhten. Alle Ergebnisse liegen in einer bei Korrosionsversuchen üblichen Streuung und sind weit oberhalb Polarisationswiderständen, die z. B. nach [19], [20] auf eine aktive Korrosion hindeuten würden.



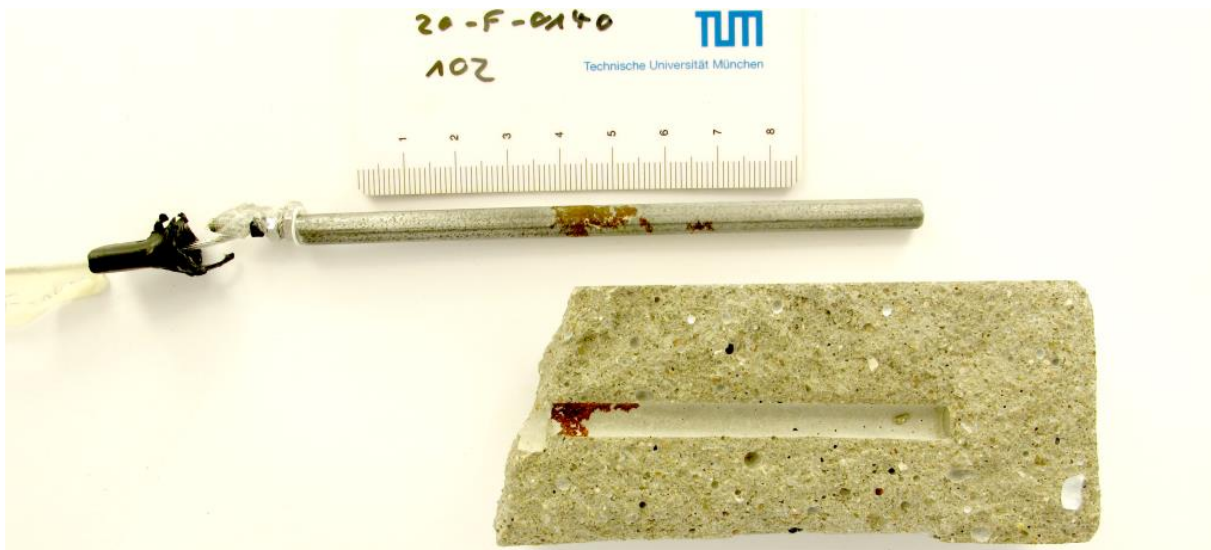
**Bild 65** Polarisationswiderstand des im Mörtel eingebetteten Stahlstabs (a) unmittelbar vor Beginn des potentiostatischen Halteversuchs und (b) sieben Tage nach Beendigung der Polarisation

**Bild 66** zeigt die zeitliche Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands der Mörtelprismen. Der spezifische Elektrolytwiderstand der in Calciumhydroxid-Lösung gelagerten Portlandzementmörtelprismen stieg auf einen Wert von ca.  $100 \Omega\text{m}$ . Der Mörtel mit CEM II A-LL + SR03 wies einen vergleichbaren Verlauf auf. Im Gegensatz dazu stiegen die spezifischen Elektrolytwiderstände bei SL05NF und CEM II A-S + SR03 auf deutlich höhere Werte im Bereich von 150 bis  $200 \Omega\text{m}$ .

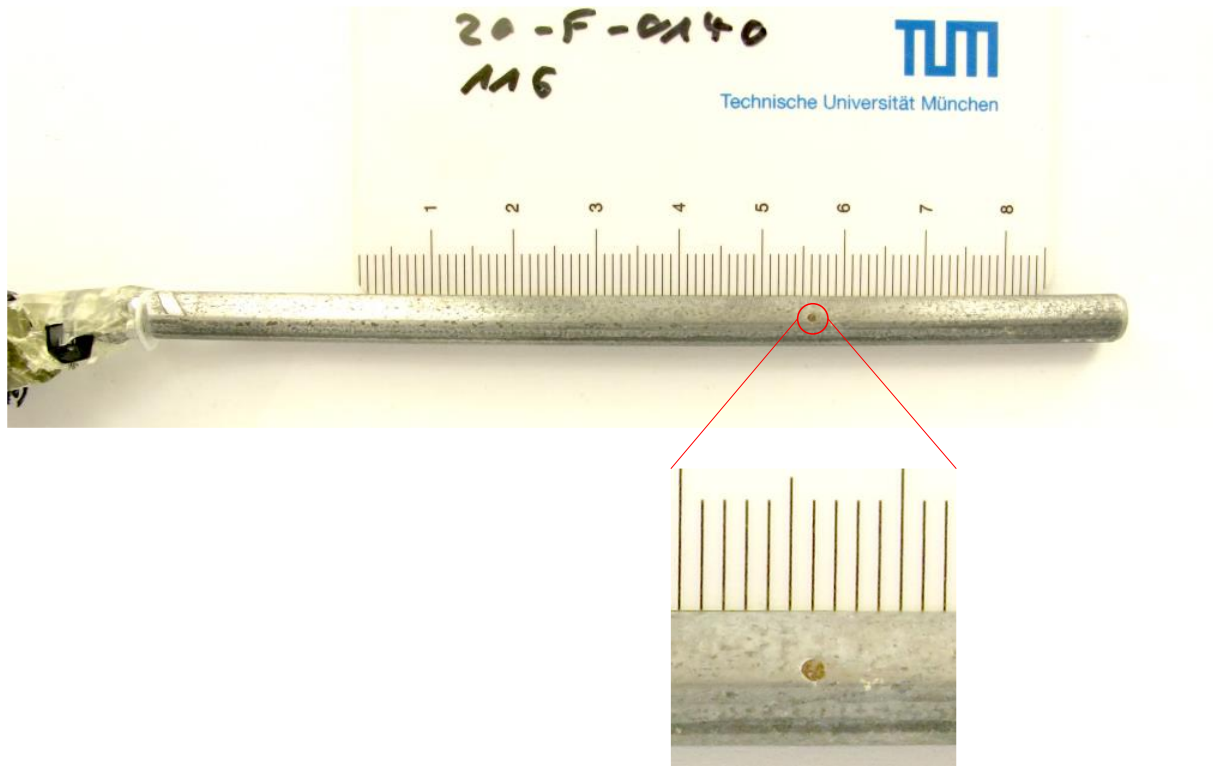


**Bild 66** Zeitliche Entwicklung des spezifischen Elektrolytwiderstands der Mörtelprismen in Calciumhydroxid-Lösung

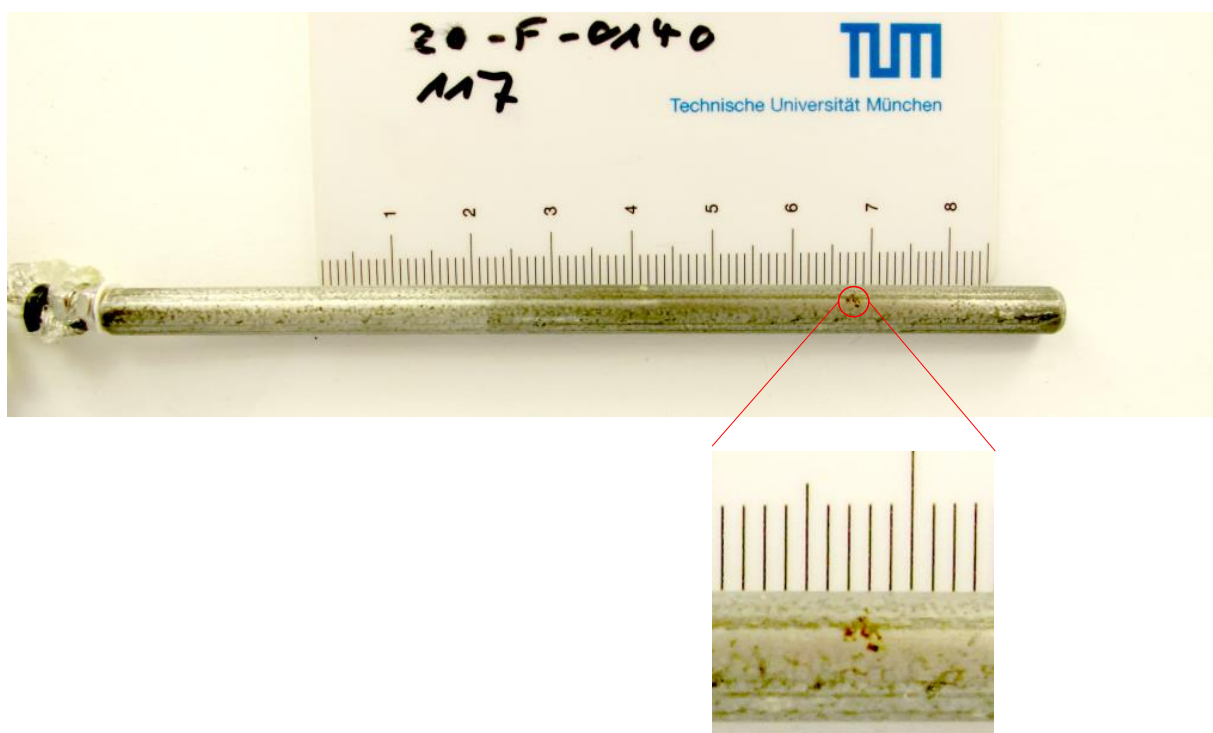
**Bild 67** bis **Bild 69** zeigen die Beispiele aus den Inspektionen nach Beendigung des potentiostatischen Halteversuche für solche Stahlstäbe, die Auffälligkeiten aufwiesen. In **Bild 67** wurde Korrosion über einen größeren Bereich auf dem Stahlstab, welcher in Kontakt mit dem zu prüfenden Mörtel war, gefunden. Bei den Stahlstäben in **Bild 68** und **Bild 69** wurden kleine Korrosionsstellen gefunden.



**Bild 67** Visuelle Inspektion des Stahlstabs (SR03 + CEM II A-S, Probe 2)



**Bild 68** Visuelle Inspektion des Stahlstabs (SR03 + CEM II A-LL, Probe 1)



**Bild 69** Visuelle Inspektion des Stahlstabs (SR03 + CEM II A-LL, Probe 2)

Die restlichen Stahlstäbe waren frei von Korrosionsstellen. Auch bei CEM II A-S + SR03 Probe 4 wurden keine Korrosionsstellen gefunden, obwohl beim potentiostatischen Halteversuch ein beträchtlicher Anstieg der Stromdichte gemessen wurde.



Die Ergebnisse der potentiostatischen Halteversuche in Anlehnung an DIN EN 480-14 sind in der **Tabelle 40** zusammengefasst. In allen Fällen wurden fünf Proben geprüft und davon gab es jeweils mindestens drei bestandene Proben (=keine Überschreitung des Grenzstroms, passiv und keine sichtbare Korrosion an der Stahloberfläche). Die Serien des CEM I und des SL05 NF lieferten keine Korrosionsstellen bzw. aktiven Ströme. Die Serien mit den Kompositzementen (CEM II A-S und CEM II A-LL) liegen zwar im Bereich des Bestehens im Sinne der DIN EN 480-14, sollten jedoch zur Absicherung der Aussage nochmals wiederholt werden.

**Tabelle 40** Zusammenfassung der Ergebnisse im potentiostatischen Halteversuch und bei der visuellen Inspektion

Serie	Probe	Strommessung: aktiv / passiv	Inspektion	Bewertung
CEM I	1	passiv	keine Korrosion	Bestanden
CEM I	2	passiv	keine Korrosion	
CEM I	3	passiv	keine Korrosion	
CEM I	4	ausgefallen	keine Korrosion	
CEM I	5	passiv	keine Korrosion	
SL05 NF	1	passiv	keine Korrosion	Bestanden
SL05 NF	2	passiv	keine Korrosion	
SL05 NF	3	passiv	keine Korrosion	
SL05 NF	4	passiv	keine Korrosion	
SL05 NF	5	passiv	keine Korrosion	
CEM II A-S + SR03	1	passiv	keine Korrosion	Bedingt bestanden
CEM II A-S + SR03	2	aktiv	Korrosion	
CEM II A-S + SR03	3	passiv	keine Korrosion	Wiederholung empfohlen
CEM II A-S + SR03	4	aktiv	keine Korrosion	
CEM II A-S + SR03	5	passiv	keine Korrosion	
CEM II A-LL + SR03	1	passiv	Korrosion	Bedingt bestanden
CEM II A-LL + SR03	2	ausgefallen	Korrosion	
CEM II A-LL + SR03	3	passiv	keine Korrosion	Wiederholung empfohlen
CEM II A-LL + SR03	4	passiv	keine Korrosion	
CEM II A-LL + SR03	5	passiv	keine Korrosion	

Zusammenfassend können folgende Punkte festgehalten werden:

- Die Elektrolytwiderstände der Mörtel mit CSA-modifizierten Bindemitteln lagen mindestens auf dem Niveau der Mörtel mit Portlandzement. Somit kann davon ausgegangen werden, dass dem elektrolytischen Ladungstransport im Falle einer Korrosion mindestens derselbe – jedoch größtenteils höherer Widerstand durch CSA-modifizierte Bindemittel (insbesondere bei SL05 NF) entgegensteht.
- Die Ruhepotentiale lagen im Bereich von Werten, die auf Passivität hindeuten. Ein aktiv korrodierender Stahl zeigt üblicher Weise Potentiale um  $E_{\text{Fe}^{2+}} = 440 \text{ mV}_{\text{NHE}}$ , wohingegen hier Werte von  $-80 \text{ mV}_{\text{NHE}}$  nicht unterschritten wurden. In den Halteversuchen verschoben sich die Ruhepotentiale insbesondere für SL05 NF in Richtung Passivität.
- Die Polarisationswiderstände bestätigten die in den Ruhepotentialen beobachtete Passivität. Hohe Werte deutlich oberhalb von aktiven Polarisationswiderständen deuten

auf eine träge und nicht korrodierende Stahloberfläche hin. Bis auf wenige Ausnahmen, die auf Versuchsartefakte hindeuten, konnte dies durch die Inspektion nach Ausbau der Stähle bestätigt werden.

- Die potentiostatischen Halteversuche können für die Serie SL05 NF als bestanden gewertet werden. Hier lagen weder erhöhte Korrosionsstromdichten während der Versuche noch Korrosionserscheinungen nach Ausbau der Stahlproben vor. Dies gilt ebenfalls für die Portlandzementserie. Für die übrigen beiden CSA-Serien sollten erneute Versuche zur Absicherung der Ergebnisse durchgeführt werden. Dabei ist anzumerken, dass keine der zuvor diskutierten Korrosionskenngrößen auf einen deutlichen Nachteil für die CSA-Zemente im Vergleich zum Portlandzement hinweist.

## **7 Versuche und Ergebnisse – PCM RAILONE AG**

### **7.1 Durchgeführte Versuche**

#### **7.1.1 Hintergrund**

Zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit des CSA-Zements wurden in praxisnahen Versuchen vorgespannte Betonschwellen von der PCM RAILONE AG hergestellt. Die geprüften Kennwerte wurden mit denen auf Basis des bisher verwendeten Zements verglichen. Für die Versuche wurden 8 Schwellen B70 in 2 Formen am Produktionsstandort der RAILONE GmbH in Aschaffenburg hergestellt. Der hierfür notwendige Zement und die Zusatzmittel wurden von der Firma Dyckerhoff zur Verfügung gestellt. Sand und Splitt wurden aus den Lagersilos der Regelproduktion entnommen. Das Anmachwasser war Leitungswasser aus dem Versorgungsnetz der Stadt Aschaffenburg. Je eine Mischung wurde zum Füllen einer Form (mit je 4 Schwellen) und diversen Proben für Frisch- und Festbetonuntersuchungen verwendet. Im Einzelnen wurden folgende Versuche durchgeführt:

Frischbeton: w/z-Wert und Frischbetonrohichte

- Festbeton: Würfeldruckfestigkeit zum Zeitpunkt des Ausschalens, nach 7 Tagen und nach 28 Tagen
- Festbeton: E-Modulprüfung an Zylindern nach 28 Tagen
- Schwind- und Kriechverformung am Produkt über einen Zeitraum bis 90 Tagen
- Temperaturentwicklung des Frisch- und Festbetons bis zum Zeitpunkt des Ausschalens
- Produktprüfung: statische Belastung am Schienenaufleger und in Schwellenmitte, dynamische Belastung am Schienenaufleger

#### **7.1.2 Betonrezeptur**

Der Beton war wie folgt zusammengesetzt:

- CSA-Zement SR03, Herstellwerk Trino, 40 %
- CEM II/A-S 42,5 R, Herstellwerk Deuna, 60 %
- Zusatzmittel Viscocrete 3360, Hersteller SIKA, 1,33 M.-% bezogen auf Zement
- Zusatzmittel Berolan RT 5, Berolan in Arbing (Österreich), 0,9 M.-% bezogen auf Zement
- Sand 0/2: Mainquarzsand der Firma Weiss, Anteil 36 Vol.-% des Gesamtzuschlags
- Splitt 8/11: Gabbro Edelsplitt der Firma OHI Bieberau, Anteil 18 Vol.-% des Gesamtzuschlags
- Splitt 11/16: Gabbro Edelsplitt der Firma OHI Bieberau, Anteil 32 Vol.-% des Gesamtzuschlags
- Splitt 16/22: Gabbro Edelsplitt der Firma OHI Bieberau, Anteil 14 Vol.-% des Gesamtzuschlags
- Wasser: 145,2 l
- w/z-Wert: 0,38
- angestrebter Luftgehalt: 1,5 %
- Frischbetonrohichte: 2490 kg/m<sup>3</sup>

### 7.1.3 Herstellung

Die Herstellung der Schwellen erfolgte in der Serienfertigung der Produktionsanlage für vorgespannte Gleisschwellen. Mit Ausnahme der Herstellung des Betons erfolgten alle Prozessschritte entsprechend der üblichen Fertigung von vorgespannten Betonschwellen. Bei der Betonherstellung wurde die Einwaage bzw. das Einfüllen des Zements und des Zusatzmittels manuell durchgeführt, da der notwendige Zement und die Zusatzmittel in vorab abgewogenen Plastikeimern angeliefert wurden und somit nicht über die Lagersilos in den Mischer dosiert werden konnten. Alle anderen Prozesse der Betonherstellung liefen automatisch innerhalb des Regelprozesses ab. Im Folgenden sind Fotos der Herstellung wiedergegeben.



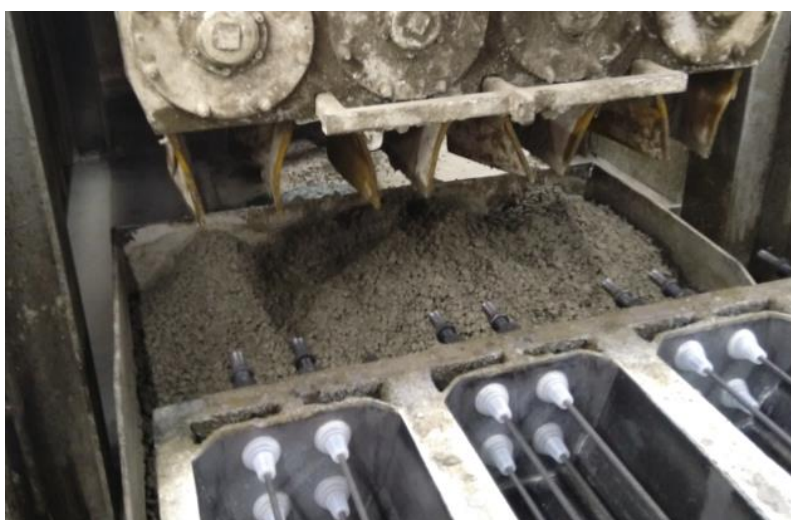
**Bild 70:** Für das Vorspannen vorbereitete Form



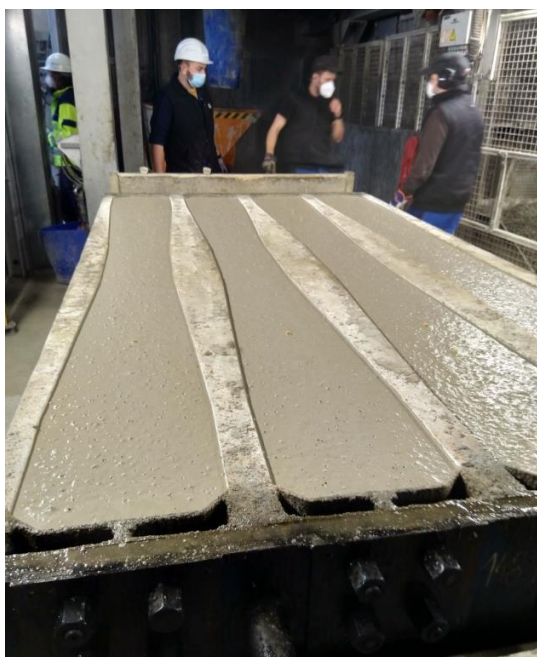
**Bild 71:** Kontrolle der Vorspannkraft



**Bild 72:** Manuelles Einfüllen des in Plastikeimern angelieferten Zements in die Mischanlage



**Bild 73:** Fertig gemischter Beton wird in den Behälter für die Probekörperherstellung entleert



**Bild 74:** Vollständig gefüllte und verdichtete erste Form mit 4 Betonschwellen



**Bild 75:** Betonage der zweiten Form mit 4 Betonschwellen



**Bild 76:** Form mit 4 Betonschwellen mit für die Nachbehandlung aufgebrachtem Wasser und Thermosensoren

## 7.2 Ergebnisse

### 7.2.1 Produktionskennwerte und Ausschalzeitpunkt

Die Herstellung der 8 Schwellen erfolgte am Mittwoch, den 16. Februar 2022. Für die Herstellung wurden 2 Formen benötigt. Nach dem automatischen Vorspannen wurde an allen Spannstählen die Vorspannkraft überprüft. Das Ergebnis ist der folgenden Tabelle zu entnehmen:

**Tabelle 41:** Ergebnisse der Spannkraftmessung an den Formen für die Bauteilversuche

Datum	Uhrzeit	Form	Schwellen-Nr.	Vorspannkraft [kN]					Soll
				Draht 1	Draht 2	Draht 3	Draht 4	Summe	
16.02.2022	08:48	1469	1	82,4	83,3	83,8	83,2	332,7	330 ± 10
	08:51	1469	2	82,8	83,2	83,0	83,0	332,0	
	08:53	1469	3	82,6	82,7	82,7	82,3	330,3	
	08:56	1469	4	82,3	82,4	81,8	82,4	328,9	
	09:07	703	1	81,7	81,9	82,2	81,2	327,0	
	09:10	703	2	82,0	82,3	82,3	82,1	328,7	
	09:14	703	3	81,3	80,4	81,8	81,6	325,1	
	09:14	703	4	82,2	82,4	82,3	81,9	328,8	

Da der Beton nach 24 Stunden noch keine ausreichend hohe Festigkeit erreicht hatte, wurde entschieden, einen weiteren Tag zu warten, bevor die Vorspannkraft auf die Schwelle aufgebracht wurde. Das Umspannen erfolgte ca. 47 Stunden nach der Herstellung des Betons.

### 7.2.2 Frischbetonuntersuchungen

Am Frischbeton wurden die Frischbetontemperatur, die Verarbeitbarkeit (Ausbreitmaß) und der w/z-Wert durch Darren bestimmt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle gegenüber den Sollwerten zusammengestellt.

**Tabelle 42:** Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen der Bauteilversuche

	Verdichtungsmaß [--]	Frischbetontemperatur [°C]	Frischbetonroh-dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	w/z-Wert [--]
IST	1,18	21,3	2,51	0,387
SOLL	≈ 1,2	≈ 20	2,49	0,38

### 7.2.3 Untersuchung mechanische Kennwerte

Für die Untersuchung der Würfeldruckfestigkeit wurden aus beiden Mischungen Proben entnommen, gemäß den Vorgaben der DIN EN 12390-2 Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt und diese auf einem Labor-Rütteltisch verdichtet. Die Würfelschalungen verblieben 24 Stunden gemeinsam mit den Formen der hergestellten Schwellen in der Erhärtungskammer. Danach wurden die Würfel ausgeschalt und entweder geprüft oder für die weitere Prüfung im Normklima (24 °C, 65 % r. F.) gelagert (Lagerungsbedingungen nach DIN EN 12390-2/A20 – nationaler Anhang NA). Die Prüfung selbst erfolgte an einer Klasse-1 Prüfmaschine (gemäß ISO 7500-1) und gemäß den Vorgaben der DIN EN 12390-3. Alle geprüften Würfel zeigten zufriedenstellende Bruchbilder. Die Ergebnisse sind in der folgenden

Tabelle zusammengefasst und den Werten der Serienfertigung aus dem gleichen Produktionsmonat gegenübergestellt. Die angegebenen Druckfestigkeits-Werte sind bereits mit dem Faktor von 0,92 auf die Referenzlagerung (Wasserbad) umgerechnet.

**Tabelle 43:** Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung des Betons mit CSA-Zement der Bauteilversuche

Zeitpunkt der Prüfung [h, d]	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]		Druckfestigkeit $f_{c,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		
	Einzelwert mit CSA	Mittelwert mit CSA	Einzelwert mit CSA	Mittelwert mit CSA	Serienfertigung mit CEM I
23,25 h	2,51	2,51	45,9	45,3	62,2
25,25 h	2,50		44,3		
47 h	2,51		45,7		
7d	2,49	2,49	54,5	55,2	wird nicht bestimmt
	2,49		53,4		
	2,49		57,7		
28d	nicht bestimmt		72,0	69,8	91,8
			64,4		
			73,4		
			69,4		

Die Prüfung des Biegezugs erfolgte in Übereinstimmung mit der DIN EN 12390-5 nach 7 Tagen an Balken mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm x 70 cm. Die Balken wurden nach dem Herstellen feucht und nach dem Ausschalen bis zur Prüfung unter Wasser bei 20 °C gelagert. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst und den Werten der Serienfertigung aus dem gleichen Produktionsmonat gegenübergestellt.

**Tabelle 44:** Ergebnisse der Biegezugfestigkeits-Prüfung der Bauteilversuche

Zeitpunkt der Prüfung	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		
	Einzelwert mit CSA	Mittelwert mit CSA	Serienfertigung mit CEM I
7d	8,1	8,4	8,0
	8,8		
	8,4		

Die Prüfung des E-Moduls erfolgte in Anlehnung an die Vorgaben der DIN 1048-5 an einer Klasse 1 Prüfmaschine (gemäß ISO 7500-1) und einer Messeinrichtung mit kalibrierten Verformungsaufnehmern. Die Probekörper wurden nach einem Tag ausgeschalt, für 7 Tage unter Wasser gelagert und dann für die restliche Zeit bis zur Prüfung im Normklima (24 °C, 65 % r. F.) gelagert. Die Unterspannung wurde mit 0,5 N/mm<sup>2</sup> und die Oberspannung auf 25,0 N/mm<sup>2</sup> (rund 1/3  $f_c$ ) festgelegt. Die Probe wurde vor dem Belastungszyklus 5-mal vorbelastet. Im Belastungszyklus wurde die Kraft für 30 Sekunden auf dem Halteplateau gehalten. Nach dem Ende der Prüfung des E-Moduls wurden die Zylinder auf ihre Druckfestigkeit geprüft. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung wurden zwecks Vergleich mit Würfeldruckfestigkeiten mit dem Faktor 1,2 umgerechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst und den Werten der Serienfertigung aus dem gleichen Produktionsmonat gegenübergestellt. Da grundsätzlich die Druckfestigkeit des Betons mit CSA-Zement niedriger ausfiel, war auch ein niedrigerer E-Modul zu erwarten. Tatsächlich lag dieser rund 12 % niedriger als der Vergleichsbeton mit CEM I. Ein niedrigerer E-Modul ist in Hinsicht auf die



Verwendung in Spannbetonschwellen günstig zu werten, da dadurch die Duktilität gesteigert und die Wahrscheinlichkeit für eine mögliche Erstrissbildung unter Belastung im Gleis tendenziell niedriger ausfallen wird.

**Tabelle 45:** Ergebnisse der E-Modul-Prüfung der Bauteilversuche

Zement	Zeitpunkt der Prüfung [d]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]		Druckfestigkeit $f_{c,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
		Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert
CSA	28	44.844	43.970	72,0	74,0
		43.221		73,0	
		43.846		77,1	
CEM I		48.476	49.926	87,8	92,6
		48.449		96,0	
		52.854		93,9	

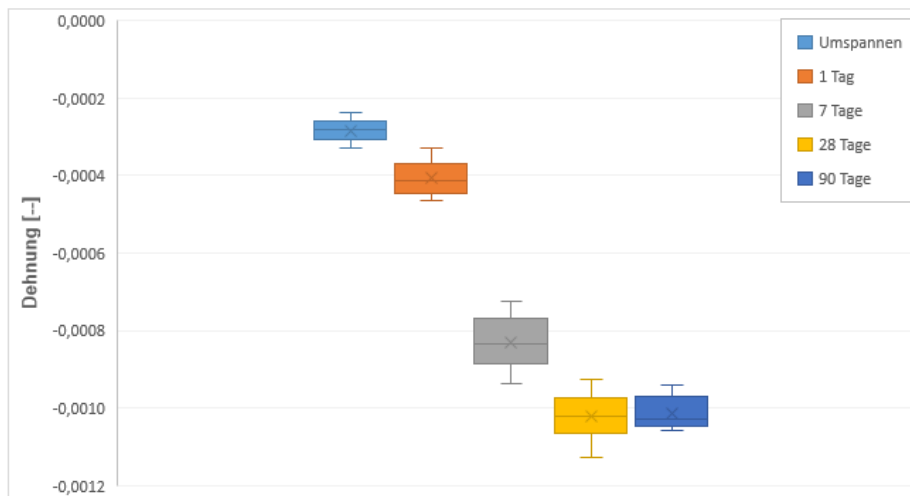
#### 7.2.4 Schwind- und Kriechverformungen

Für diese Untersuchung wurden nach 24 Stunden auf der frei in der Form liegenden Schwellenunterseite Messmarken angebracht, so dass sich 3 Messstrecken im mittleren Drittel der Schwelle befanden. Alle Messstrecken lagen zentrisch mit einer Toleranz von +/- 5mm in der Schwellenachse.



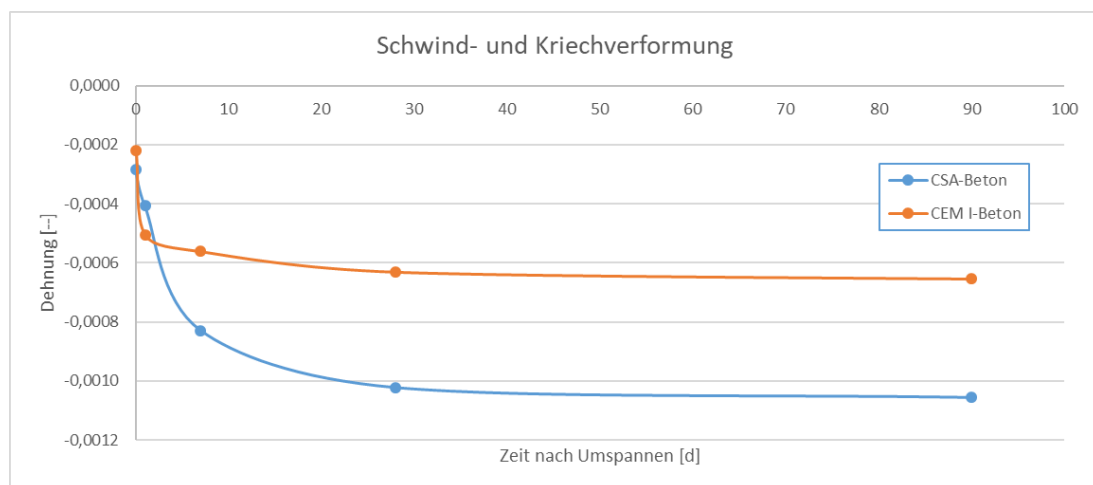
**Bild 77:** Aufnahme auf die Unterseite der in der Form liegenden Schwelle mit geklebten Messmarken für die Verformungsmessung

Die Messmarken wurden mit einem schwindfreien Zweikomponenten-Kleber (MC-Quicksolid) geklebt. Jede Messstrecke wurde mit einem kalibrierten Setzdehnmessgerät mit einer Auflösung von 0,001 mm vermessen. Vor jeder Messung an einer Schwelle wurde das Messgerät mit Hilfe eines Kalibrierstabes auf Null gesetzt. Die Erstmessung erfolgte an der noch nicht umgespannten Schwelle in der Erhärtungskammer. Alle weiteren Messungen erfolgten im Labor (20 °C, 50 % Luftfeuchte). Aufgrund der erfahrungsgemäß sehr geringen Messgrößen wurde zum Nachweis der korrekten Durchführung der Messung überprüft, ob eine Standard-Normalverteilung aller Messwerte vorliegt. Diese wurde nach Anderson-Darling und einem Annahmekriterium von  $p > 0,05$  durchgeführt. Die Analyse ergab, dass Normalverteilung vorlag. Darüber hinaus wurde eine Überprüfung hinsichtlich Ausreißern nach Grubbs für ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 5 \%$  durchgeführt. Die Analyse ergab, dass alle Messungen ohne Ausreißer verwendbar waren. Im folgenden Bild ist die Streuung aller Messreihen dargestellt.



**Bild 78:** Darstellung der Streuung der Messwerte der Schwind-/Kriechverformungsmessung

Im folgenden Bild ist das gemittelte Ergebnis aller Messtrecken über die Zeit bis 90 Tage nach dem Umspannen gegenüber einem Beton mit CEM I dargestellt.



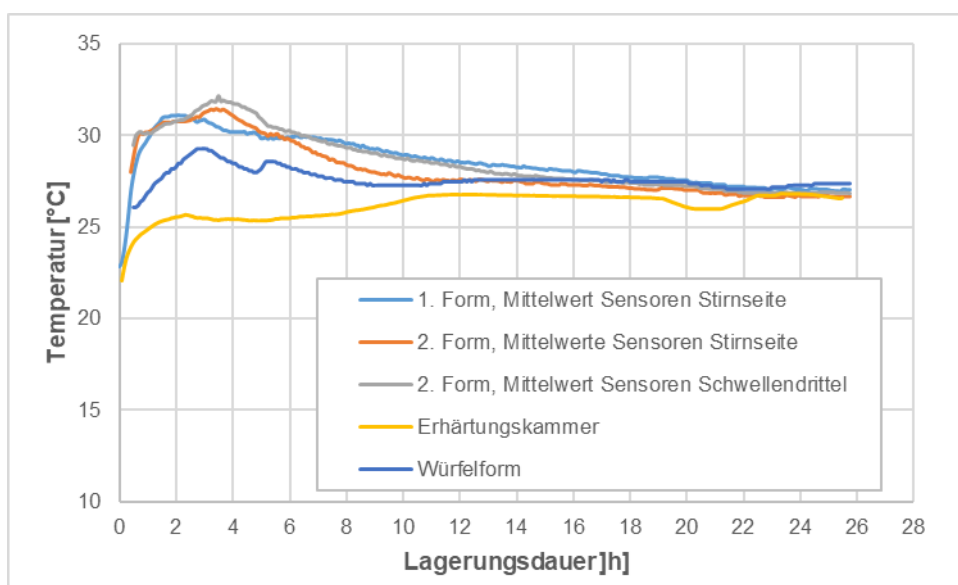
**Bild 79:** Darstellung der Schwind-/Kriechverformung über einen Zeitraum von bis zu 90 Tagen

Es ist zu erkennen, dass die Verwendung von CSA-Zement nach 90 Tagen zu einer rund 60 % stärkeren Schwind- und Kriechverformung führt.

### 7.2.5 Temperaturentwicklung

Die Thermolemente für diese Versuche wurden durch die Verschweißung von Thermodräh-ten (NiCr-Ni, Typ K, Durchmesser 2 mm) mit einem Thermolement-Schweißgerät der Firma TL-Weld hergestellt. Vor der Verwendung wurde die Thermolemente in einem temperierten Wasserbad mit Hilfe einer Zweipunktmessung überprüft. Bei einer Abweichung von  $> 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$  vom Mittel wurde diese Abweichung bei der Auswertung der Messwerte kompensiert. Die Aufzeichnung der Temperatur erfolgte durch einen kalibrierten 12-Kanal-Datenlogger PCE-T 1200 und einen kalibrierten 4-Kanal Datenlogger der Firma Ahlborn. Die Feuchtemessung erfolgte ebenfalls über den Datenlogger der Firma Ahlborn.

Für die Messung wurden die verschweißten Thermolemente direkt in den Frischbeton so eingesteckt, dass diese in etwa in der Mitte des Betonquerschnitts lagen und unmittelbar danach wurde die Messung gestartet. Bei jeder der 8 Schwellen wurde je ein Thermolement rund 20 cm vom Schwellenende, bei weiteren 3 Schwellen ein zusätzliches Thermolement rund 80 cm vom Schwellenende platziert. Ein weiteres Thermolement wurde in einem Probekörper für die Druckfestigkeitsbestimmung platziert. Zusätzlich wurde die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchte in der Erhärtungskammer gemessen. Die Ergebnisse der Messungen sind in der folgenden Grafik dargestellt:



**Bild 80:** Darstellung der Temperaturverläufe in einigen ausgewählten Versuchsschwellen, der Umgebung während der Erhärtung und eines gleich gelagerten Probewürfels

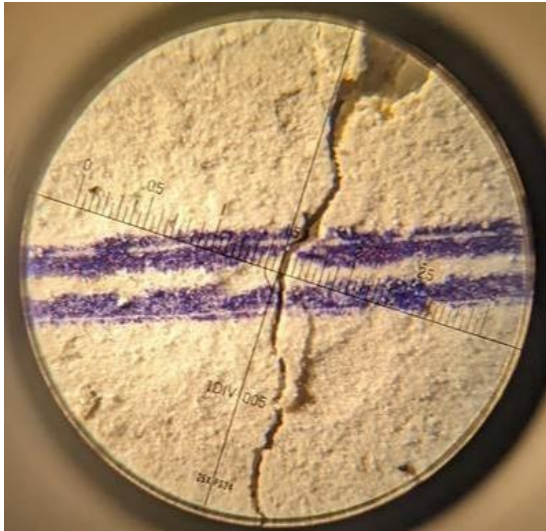
Die maximale Temperatur wurde 2-4 Stunden nach der Wasserdosierung erreicht. Danach nahm die Temperatur kontinuierlich bis auf die Temperatur der Erhärtungskammer ab. Es ist erkennbar, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Lage der Sensoren auf der Stirnseite und der Lage der Sensoren im Schwellendrittel bestand, also die gesamte Schwelle unter ähnlichen Temperaturbedingungen erhärtet. Der Beton in der Würfelform zeigte eine geringere Temperaturentwicklung als die Schwellen.

## 7.2.6 Statische und dynamische Produktprüfung

Es wurden Produktprüfungen gemäß DIN EN 13230-1 und DIN EN 13230-2 durchgeführt. Diese Produktprüfungen werden i.d.R. für die Zulassung der Schwellen vor Beginn der Serienfertigung vorgenommen. Alle statischen Versuche fanden im Herstellwerk in Aschaffenburg an einer kalibrierten Klasse-1 Prüfmaschine (gemäß ISO 7500-1) statt. Der dynamische Versuch erfolgte im Versuchslabor des Instituts für Eisenbahn- und Landverkehrswege der Technischen Universität München. Alle Versuche wurden an Schwellen in einem Alter zwischen 28 Tagen und 25 Tagen nach Herstellung sowie nach einer ca. 3-stündigen Wasserlagerung durchgeführt. Die Kontrolle der Rissbreite von 0,05 mm erfolgte mit einer Risslupe, siehe **Bild 37**. Die Ergebnisse der Versuche sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst und sowohl den Soll-Werten als auch den Werten von Schwellen B70 mit CEM I gegenübergestellt.

**Tabelle 46:** Ergebnisse der Produktprüfungen

Versuch	Kenngröße	Schwelle	Istwert [kN]			Sollwert [kN]
			B70 mit CSA		B70 mit CEM I	
			Einzelwert	Mittelwert	Mittelwert	
Statische Prüfung in Schwellenmitte (positiv)	F <sub>Cm</sub>	1496-1	53	55,5	51	32
		1496-2	58			
	F <sub>C<sub>Bn</sub></sub>	1496-1	98	98	91	--
		1496-2	98			
Statische Prüfung unter dem Schienenaufleger (negativ)	Fr <sub>0</sub>	--	176		176	
	Fr <sub>r</sub>	703-1/B	211	215	245	187
		703-1/C	216			
		1469-3/B	216			
		1469-3/C	216			
	Fr <sub>0,05</sub>	703-1/B	331	330	345	288
		703-1/C	336			
		1469-3/B	326			
1469-3/C		326				
Fr <sub>B</sub>	703-1/B	411		430	384	
Dynamische Prüfung	Fr <sub>0</sub>	703-2/B	128		128	
	Fr <sub>r</sub>	703-2/B	228	--	228	--
	Fr <sub>0,05</sub>	703-2/B	294,4		314,4	230,4
	Fr <sub>B</sub>	703-2/B	> 314,4		377,6	294,4



**Bild 81:** Foto eines mit einer Risslupe aufgenommenen Biegerisses bei einer statischen Produktprüfung

### 7.3 Bewertung der Bauteilversuche

Die Herstellung von vorgespannten Betonschwellen mit CSA-Zement konnte ohne Veränderungen im Ablauf im Vergleich zu Schwellen mit Portlandzement (CEM I) erfolgen. Die Herstellung des Betons, das Verbringen in die Form, die anschließende Verdichtung und das Ausschalen war ohne Änderung oder Anpassung des Regelbetriebs möglich.

Die mechanischen Kennwerte des Festbetons unterschieden sich zum Teil von den in den Laborversuchen der Kooperationspartner festgestellten Werten. Die Druckfestigkeit zum Umspannzeitpunkt, die Druckfestigkeit nach 28 Tagen und der statische E-Modul waren geringer als die Werte des Betons aus der Serienfertigung. Die Kennwerte lagen aber alle noch innerhalb der nach Norm geforderten Werte.

Positiv ist die Entwicklung der Temperatur innerhalb des Produkts. Denn bei der Herstellung von Schwellen mit CEM I ist das Risiko einer sekundären Ettringitbildung nicht unerheblich. Die Temperaturentwicklung der Schwellen mit CSA-Zement zeigte, dass ein Risiko einer sekundären Ettringitbildung bei der Erhärtung nicht vorliegt, da die Temperaturen bei der Erhärtung grundsätzlich deutlich unter 50°C lagen (siehe **Bild 80**).

Die Versuche am Produkt haben gezeigt, dass sämtliche in der Norm geforderten Kennwerte etwas niedriger ausfallen als in der bisherigen Produktion, dennoch aber erreicht werden. Bei einer Zulassungsprüfung würden diese Schwellen die Anforderungen erfüllen.

Die Festigkeit zum Zeitpunkt des Umspannens (i.d.R. 24 Stunden nach der Wasserzugabe) konnte dagegen nicht erreicht werden. Dies widerspricht den Ergebnissen aus den Laborversuchen der Kooperationspartner. Es wird vermutet, dass der in den Bauteilversuchen verwendete CSA-Zement schon ein wenig „gealtert“ war und somit seine volle Reaktionsgeschwindigkeit nicht voll entfalten konnte.

## **8 Ökobilanz**

### **8.1 Grundlage der Ökobilanz, Produktkategorieregeln (PCR)**

Die Ökobilanzierung wurde anhand der Regeln der europäischen Normen

- EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021, in Zusammenhang mit CEN/TR 16970:2016, sowie
- EN 16757:2017 – Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Product Category Rules for concrete and concrete elements

durchgeführt.

### **8.2 Untersuchungsrahmen der Ökobilanz**

#### **8.2.1 Deklarierte/funktionale Einheit**

Es wird eine Ökobilanz für den Bahnschwellenbeton und eine Ökobilanz für eine aus diesem Beton hergestellte Bahnschwelle durchgeführt.

Für den Bahnschwellenbeton ist die deklarierte Einheit ein Kubikmeter (1 m<sup>3</sup>) Beton.

Für die Bahnschwelle ist die funktionale Einheit 1 Stück Bahnschwelle.

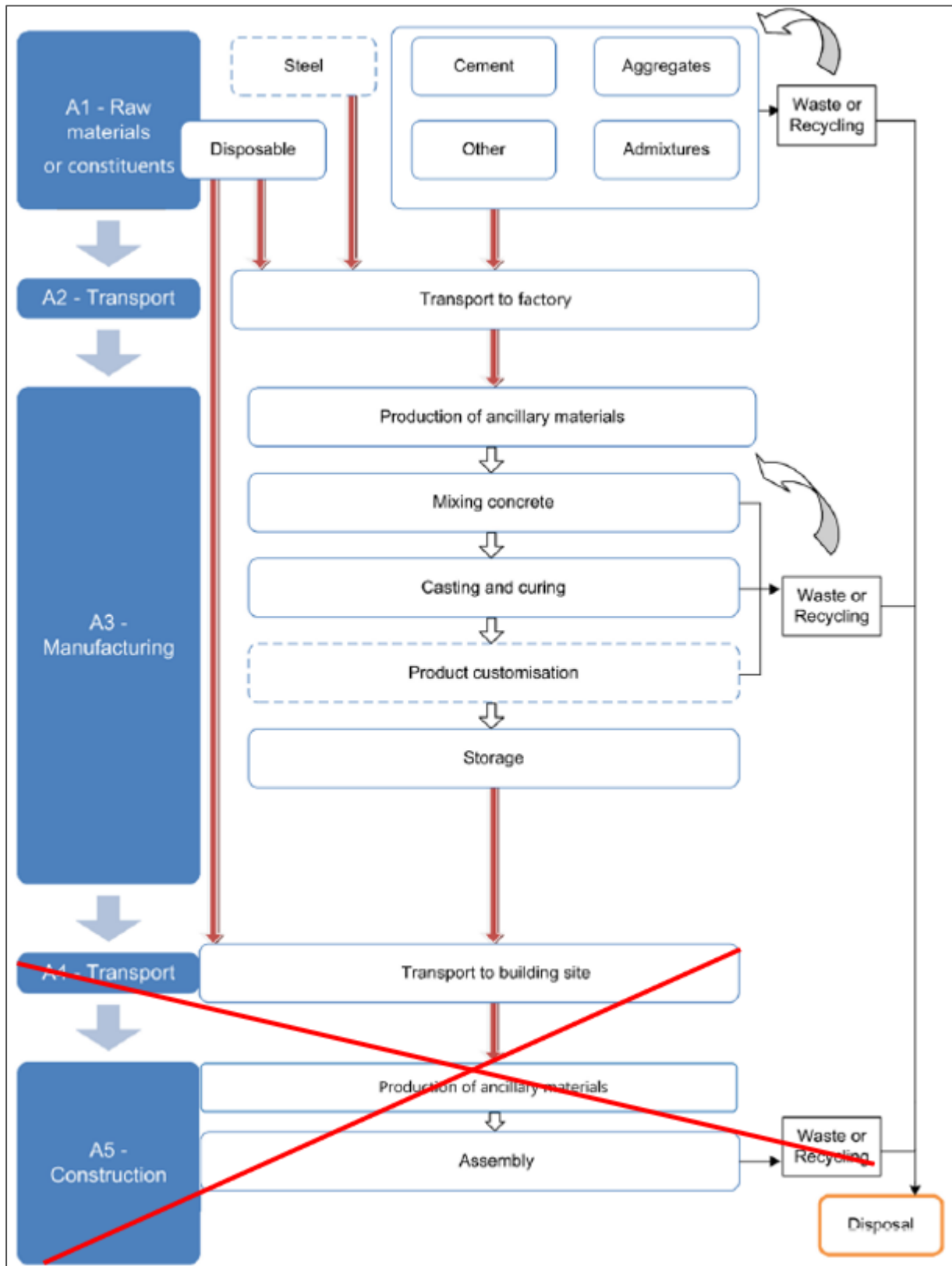
### **8.3 Systemgrenzen**

#### **8.3.1 Betrachtete Lebenszyklusphasen**

Typ der Ökobilanz: „Von der Wiege bis zum Werkstor“. Deklariert werden die Module A1 bis A3 nach [26].

#### **8.3.2 Graphische Darstellung der Systemgrenzen**

Für die Ökobilanzierung der Herstellung von Bahnschwellen gelten die Systemgrenzen in **Bild 82**.



**Bild 82** Betrachtete Systemgrenzen der Herstellung von Bahnschwellen aus Beton (basierend auf den Systemgrenzen für Betonfertigteile nach [27])

### **8.3.3 Beschreibung der betrachteten Lebenszyklusphasen**

#### **Modul A1: Rohstoffgewinnung und –aufbereitung**

Dieses Modul umfasst:

- die Produktion von Zement
- die Gewinnung von Sand, Kies und Splitt
- die Herstellung von Betonzusatzmitteln
- die Bereitstellung von Wasser
- die Herstellung von Stahlbewehrung und Einbauteilen (für die Bahnschwellen).

#### **Modul A2: Transport**

Dieses Modul umfasst:

- den Transport der Betonausgangsstoffe, des Spannstahls und der Einbauteile zum Bahnschwellenwerk Aschaffenburg

#### **Modul A3: Herstellung**

Dieses Modul umfasst:

- das Herstellen des Bahnschwellenbetons aus den Betonausgangsstoffen
- das Herstellen der Bahnschwellen aus dem Bahnschwellenbeton, der Stahlbewehrung und Einbauteilen.

Die Module A1, A2 und A3 werden als ein aggregiertes Modul A1-A3 ausgewiesen.

### **8.3.4 Kriterien für eine Nichtbetrachtung von Inputs und Outputs (Abschneideregeln)**

Gemäß EN 15804 müssen für einen (Einheits-)Prozess die Abschneidekriterien von 1 % des erneuerbaren und des nicht erneuerbaren Einsatzes von Primärenergie und 1 % der Gesamtmasse dieses Einheitsprozesses eingehalten werden. Darüber hinaus darf die Gesamtsumme der vernachlässigten Input-Flüsse im Modul A1-A3 höchstens 5 % des Energie- und Masseinsatzes betragen.

Innerhalb dieser Ökobilanzierung wurden die Betonschalung vernachlässigt (vgl. Abschnitt 8.6.1.6).

## **8.4 Datenquellen, Beurteilung der Datenqualität generischer Daten**

Folgende Datenquellen waren die Grundlage der Ökobilanzierung:

- Information über die Zusammensetzung des Bahnschwellenbetons wurden dem VDZ durch die Dyckerhoff GmbH zur Verfügung gestellt (Auskunft Frau Klische am 22.3.2022).



- Für die verwendeten Zemente (CEM II/A-S, produziert in Deuna und SR03, produziert in Trino, Italien) wurden Ökobilanzen durch die Dyckerhoff GmbH erstellt. Die ermittelten Ökobilanzindikatoren wurden dem VDZ zur Verfügung gestellt (CEM II/A-S von Herrn Dr. Hainer am 6.9.21; SR03 von Herrn Canonico am 10.3.22).
- Angaben zu Prozessen im Bahnschwellenwerk sowie zum Stahl und Einbauteilen in den Schwellen machte Herr Dr. Friedl (RAILONE, per E-Mail am 7./22. April 2022 sowie am 27.7.2022). Des Weiteren stellte Herr Dr. Friedl Umweltproduktdeklarationen für zwei der drei Spannstähle zur Verfügung, die im Bahnschwellenwerk Aschaffenburg zur Herstellung von Bahnschwellen verwendet werden.

Für die verwendeten Betonzusatzmittel

- Verzögerer „Berolan RT5“ und
- Fließmittel „Sika ViscoCrete 3360“

standen keine produktspezifischen Ökobilanzen zur Verfügung. Aus diesem Grunde wurde auf Umweltproduktdeklarationen (EPDs) der European Federation of Concrete Admixtures Associations (EFCA) zurückgegriffen (**Tabelle 47**). Die Beurteilung der Datenqualität erfolgte mittels **Tabelle 48**.

**Tabelle 47** EPDs der EFCA für Betonzusatzmittel und Bewertung der Datenqualität gemäß EN 15804+A2, Tabelle E1

	Datum EPD	Referenz-jahr	Art	Geogra-fisch	Technisch	Zeitlich
EFCA Concrete admix-tures – Retarders	16.12.2021	nicht ange-geben	Industrie-daten	gut	sehr gut	sehr gut
EFCA Concrete admix-tures – Plasticizers and Superplasticizers	16.12.2021	nicht an-gegeben	Industrie-daten	gut	sehr gut	sehr gut

**Tabelle 48** Beurteilung der Datenqualität (Tabelle E1 aus EN 15804+A2)

Quality level	Geographical representativeness	Technical representativeness	Time representativeness
<b>Very good</b>	Data from area under study	Data from processes and products under study. Same state of technology applied as defined in goal and scope (i.e. identical technology)	Less than 3 years difference between the reference year according to the documentation, and the time period for which data are representative
<b>Good</b>	Average data from larger area in which the area under study is included	Data from processes and products under study (with similar technology). Evidence of deviations in state of technology, e.g. different by-product.	Less than 6 years of difference between the reference year according to the documentation, and the time period for which data are representative
<b>Fair</b>	Data from area with similar production conditions	Data from processes and products under study but from different technology. This score is also applied when not technology is specified; e.g. wheat (no further specification)	Less than 10 years of difference between the reference year according to the documentation, and the time period for which data are representative
<b>Poor</b>	Data from area with slightly similar production conditions	Data on related processes or products; organic wheat under study, data for organic rye provided.	Less than 15 years of difference between the reference year according to the documentation, and the time period for which data are representative
<b>Very poor</b>	Data from unknown or distinctly different area (North America instead of Middle East, OECD-Europe instead of Russia)	Data on related processes on but with a different scale or from different technology; organic wheat under study, data for conventional wheat provided.	Age of data unknown or more than 15 years of difference between the reference year according to the documentation, and the time period for which data are representative

Anmerkung: Für die Ökobilanzierung des Bahnschwellenbetons stellte die Dyckerhoff GmbH für den in Trino produzierten SR03 Zement die Werte der Ökobilanzindikatoren nach EN 15804:2012+A1:2013 zur Verfügung. Für alle anderen o.g. Ausgangsstoffe wurden Ökobilanzen auf Grundlage der neuen Normversion EN 15804:2012+A2:2019 ermittelt. Zwischen beiden Normversionen bestehen zum Teil entscheidende Unterschiede:

- mit der EN 15804+A2 wurden neue Umweltindikatoren eingeführt,
- bereits gem. EN 15804+A1 auszuweisende Indikatoren werden laut EN 15804+A2:2019 anders berechnet bzw. haben andere Einheiten (z.B. wird das Versauerungspotenzial nach EN 15804+A1 in [kg SO<sub>2</sub>-Äq], nach EN 15804+A2 aber in [mol H<sup>+</sup> Äq] ausgedrückt). Eine Umrechnung von alten in neue Indikatoren ist ohne die entsprechenden Hintergrunddaten nicht möglich.

Für den Zement SR03 konnten keine Ökobilanzindikatoren nach EN 15804+A2 zur Verfügung gestellt werden. Da dieser Zement einen entscheidenden Einfluss auf die Ökobilanz des Bahnschwellenbetons hat, konnten keine vollständigen Ökobilanzen nach [26] erstellt werden. Es wurde daher entschieden, sich in der vorliegenden Ökobilanz auf den Indikator Treibhauspotenzial zu beschränken. Zwar haben sich auch für diesen Indikator die Charakterisierungsfaktoren, die die Umrechnung verschiedener Treibhausgase zur Einheit [kg CO<sub>2</sub>-Äq] bestimmen, mit Einführung der EN 15804+A2 geändert. Für die Zement- und Betonherstellung kann aber davon ausgegangen werden, dass das Treibhausgas Kohlendioxid maßgebend für das Treibhauspotenzial ist. Andere Treibhausgase (z.B. Methan oder Lachgas) haben nur einen geringen Einfluss. Sowohl nach EN 15804+A1 als auch nach EN 15804+A2

ist der Charakterisierungsfaktor für Kohlendioxid "1" (d.h. jedes emittierte kg CO<sub>2</sub> wird als 1 kg CO<sub>2</sub>-Äq ausgedrückt). Daher kann davon ausgegangen werden, dass für das Treibhauspotenzial nach beiden Normversionen ähnliche Werte berechnet werden.

Die Ökobilanzierung wurde mit der Software GaBi 10.6.1.35 (Sphera Solutions GmbH) durchgeführt. Die generischen Datensätze aus der GaBi/Sphera sowie der Ecoinvent-Datenbank in **Tabelle 49** wurden verwendet. Die Berechnung des Treibhauspotenzials erfolgte nach [26] mittels der Charakterisierungsfaktoren des „Environmental Footprints“ (EF 3.0).

**Tabelle 49** Generische GaBi-Datensätze und Bewertung der Datenqualität gemäß EN 15804+A2, Tabelle E1

	Datum EPD	Referenzjahr	Art	Geografisch	Technisch	Zeitlich
DE: Truck (EN15804 A4), Sphera	1.3.2022	2021	Versch. Datenbanken	sehr gut	sehr gut	sehr gut
DE, Electricity grid mix (2020), Sphera	1.3.2022	2020	Industrie- und Literaturdaten	sehr gut	sehr gut	gut
DE, Sand (grain size 0/2, EN 15804 A1-A3) undried, Sphera	1.3.2022	2021	Literaturdaten	sehr gut	sehr gut	sehr gut
DE, Limestone, crushed gravel (grain size 2/15, EN 15804 A1-A3), Sphera	1.3.2022	2021	Literaturdaten	sehr gut	sehr gut	sehr gut
RER, glass fibre reinforced plastic production, polyamide, injection moulded, Ecoinvent 3.8	1.3.2022	nicht angegeben	Literaturdaten	gut	sehr gut	?
RER, ethylene vinyl acetate copolymer production, Ecoinvent 3.8	1.3.2022	nicht angegeben	Literaturdaten	gut	sehr gut	?

Zusammenfassend kann die technologische Repräsentativität der verwendeten generischen Daten als „sehr gut“, die zeitliche und geographische Repräsentativität als „gut“ bis „sehr gut“ beurteilt werden.

## 8.5 Allokation von Co-Produkten

Für den Hüttensand, der im CEM II/A-S aus Deuna verwendet wurde, wurde gemäß EN 15804+A2 eine ökonomische Allokation durchgeführt.

## 8.6 Sach- und Wirkungsbilanz

### 8.6.1 Treibhauspotenzial des Bahnschwellenbetons

#### 8.6.1.1 Zusammensetzung des Bahnschwellenbetons

Tabelle 50 zeigt die Zusammensetzung des Bahnschwellenbeton

**Tabelle 50** Zusammensetzung des Bahnschwellenbetons

	Anteil [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Volumenanteil [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Beton]
Zement CEM II/A-S	192	3.080	0,0623
Zement SR03	128	2.870	0,0446
Wasser	121,6	1.000	0,1216
Luftgehalt angenommen			0,01
Gesteinskörnung			0,756
<b>Summe</b>			<b>1,0</b>
Sand (36 Vol.-% der GK)	704,9	2.590	0,272
Splitt (64 Vol.-% der GK)	1.350	2.790	0,484
Berolan RT5 (0,9 M.-% vom Zement)	2,9		
Sika ViscoCrete 3360 (1,3 M.-% vom Zement)	4,2		
<b>Summe</b>	<b>2.504</b>		

#### 8.6.1.2 Zemente

Laut Angaben der Dyckerhoff GmbH wurde das Treibhauspotenzial (GWP) der beiden verwendeten Zemente wie in **Tabelle 51** dargestellt berechnet. Angegeben sind jeweils

- der Bruttowert, der die Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Abfällen einschließt,
- der Nettowert ohne die Emissionen aus der Verbrennung von fossilen Abfällen.

Da bei der Herstellung des SR03 nach Angaben der Dyckerhoff GmbH keine Abfälle verbrannt werden, entspricht der Bruttowert dem Nettowert.

**Tabelle 51** Treibhauspotenzial der beiden für die Herstellung des Bahnschwellenbeton verwendeten Zemente

	CEM II/A-S 52,5 R (Deuna)	SR03 (Trino)
GWP total brutto	755,4 kg CO <sub>2</sub> -Äq/kg Zement	669 kg CO <sub>2</sub> -Äq/kg Zement
GWP total netto	579,5 kg CO <sub>2</sub> -Äq/kg Zement	669 kg CO <sub>2</sub> -Äq/kg Zement

#### 8.6.1.3 Gesteinskörnung

Sand für die Herstellung des Bahnschwellenbetons wird aus Rodgau, Nieder-Roden (Landkreis Offenbach) bezogen. Der Splitt kommt aus Groß-Bieberau (Landkreis Darmstadt-Dieburg). Für die Ökobilanzierung wurden generische Daten herangezogen (**Tabelle 49**).

#### 8.6.1.4 Zusatzmittel

Der Verzögerer Berolan RT5 wird von der Firma Berolan in Arbing (Österreich) bezogen, das Fließmittel Sika ViscoCrete 3360 von der Firma Sika in Leimen (Baden-Württemberg). Für beide Zusatzmittel wurden Ökobilanzen der EFCA herangezogen (**Tabelle 47**). Für den Verzögerer ist dort ein GWP total von 1,23 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg angegeben, für das Fließmittel ein GWP total von 1,53 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg.

#### 8.6.1.5 Stromverbrauch

Seitens RAILONE wurde der Stromverbrauch für das Herstellen des Bahnschwellenbetons mit 10,3 kWh pro m<sup>3</sup> Beton angegeben (E-Mail, Herr Dr. Friedl 7. April 2022).

Davon entfallen

- rund 35 % auf die Kühl- und Heizanlage für die Betonzuschläge
- rund 30% auf die Umlaufanlage
- rund 13 % auf die die Mischanlage.

Beim Vergleich des Treibhauspotenzials des Bahnschwellenbeton mit einem typischen Transportbeton ist zu bedenken, dass im Treibhauspotenzial des Transportbetons der Energieverbrauch für z.B. das Verdichten nicht enthalten ist.

Für die Ökobilanzierung des Stroms wird ein generischer Datensatz herangezogen (**Tabelle 49**).

#### 8.6.1.6 Schalung

Laut Aussage von Herrn Dr. Friedl werden Schalungen in Bahnschwellenwerken der RAILONE sehr lange benutzt. Beispielsweise seien im Werk in Coswig (Aufbau 1992) immer noch die ersten Schalungen im Einsatz. Für die Ökobilanzierung wurde hier die Schalung daher vernachlässigt.

#### 8.6.1.7 Transporte

Alle Betonausgangsstoffe werden mit LKWs zum Bahnschwellenwerk Aschaffenburg transportiert. **Bild 83** fasst die Transportentfernungen zusammen. Gemäß **Tabelle 52** wird eine Gesamt-Transportkapazität von 228,5 tkm je m<sup>3</sup> Beton berechnet.

Für Transporte wurde ein generischer GaBi-Datensatz herangezogen (**Tabelle 49**). Der Parameter "utilization" (Ausnutzung) ist bei diesem Datensatz fest auf 55 % eingestellt, um leere Rücktransporte zu berücksichtigen.



**Bild 83** Transportentfernungen für die Betonausgangsstoffe zum Bahnschwellenwerk Aschaffenburg

**Tabelle 52** Ermittlung der Transportkapazität [in tkm] (je m<sup>3</sup> Beton)

	Masse je m <sup>3</sup> Beton [t]	Transportentfernung [km]	Transportkapazität [t km]
CEM II/A-S	0,192	300	57,6
SR 03	0,128	780	99,8
Splitt	1,350	50	33,7
Sand	0,705	25	35,2
Fließmittel	0,0042	130	0,5
Verzögerer	0,0029	540	1,6
<b>Summe</b>			<b>228,5</b>

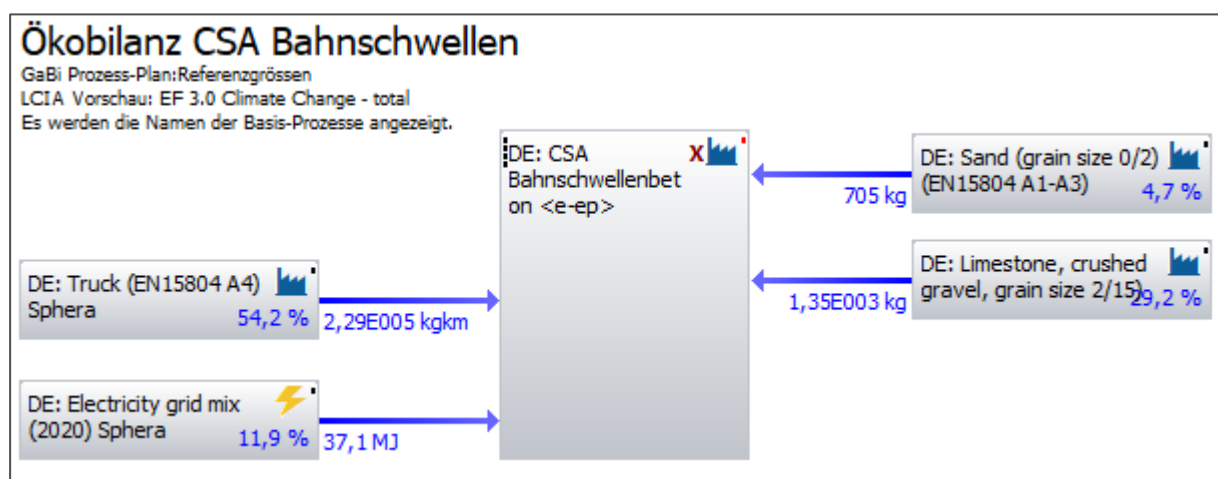
### 8.6.1.8 Modellierung der Betonherstellung in der Software „GaBi“

Das GaBi-Modell für die Prozesse

- Strom
- Gesteinskörnung
- Transporte

ist in **Bild 84** dargestellt.

Mit GaBi wird für diese Prozesse ein Treibhauspotenzial GWP total von 35,2 kg CO<sub>2</sub>-Äq/m<sup>3</sup> Beton berechnet.



**Bild 84** GaBi-Modell für Modul A1-A3 (Strom, Gesteinskörnung, Transporte)

### 8.6.1.9 Berechnung des Gesamt-Treibhauspotenzials der Herstellung von Bahnschwellenbeton

Das Gesamt-Treibhauspotenzial der Herstellung von Bahnschwellenbeton lässt sich wie in **Tabelle 53** dargestellt berechnen.

**Tabelle 53** Berechnung des Treibhauspotenzials (GWP total) der Herstellung von Bahnschwellenbeton

	GWP brutto [kg CO <sub>2</sub> -Äq/m <sup>3</sup> ]	GWP netto [kg CO <sub>2</sub> -Äq/m <sup>3</sup> ]
CEM II/A-S	145,0	111,3
SR 03		85,6
Splitt, Sand, Strom, Transporte		35,2
Fließmittel		6,4
Verzögerer		3,6
<b>Summe</b>	<b>275,8</b>	<b>242,1</b>

### 8.6.1.10 Vergleich mit typischem Transportbeton mit Portlandzement

RAILONE gibt an, dass der hergestellte Bahnschwellenbeton in die Festigkeitsklasse C50/60 eingeordnet werden kann. Das Concrete Sustainability Council gibt für einen Beton dieser Festigkeitsklasse einen Branchenreferenzwert von 325 kg CO<sub>2</sub>-Äq/m<sup>3</sup> netto an [28]. Dieser Branchenreferenzwert wurde auf Grundlage der veröffentlichten Umweltproduktdeklarationen von Beton unter Annahme ermittelt, dass ein Portlandzement CEM I verwendet wird.

**Das Treibhauspotenzial des Bahnschwellenbetons beträgt 74,5% des Branchenreferenzwerts für einen Beton der Festigkeitsklasse C50/60 gemäß CSC in Deutschland.**

## 8.6.2 Ökobilanzierung der Herstellung einer Bahnschwelle

### 8.6.2.1 Betonbedarf, Stahlbedarf, Einbauteile

RAILONE gibt an, dass je Bahnschwelle 130 l Beton benötigt werden. In jeder Schwelle sind vier Spannstähle mit einem Durchmesser von jeweils 9,5 mm verbaut. Dies entspricht einer Masse von 5,7 kg Stahl je Schwelle (Angaben Herr Dr. Friedl, E-Mail 7. April 2022).

Einbauteile und Schrauben je Schwelle werden seitens RAILONE wie folgt angegeben (E-Mail-Herr Dr. Friedl 27. Juli 2022):

- 4 Schrauben Ss 35, Stahl mit Festigkeit 5.6, je 0,659 kg
- 4 Spannklemmen, SKL 13, Federstahl 38 Si7, je 0,492 kg
- 4 Winkelführungsplatten, Wfp14, PA6 mit GF, je 0,134 k
- 2 Zwischenlagen, Zw687, EVA, je 0,161 kg
- 4 Dübel, Sdü35, PA6 mit GF, je 0,033 kg

Diese Einbauteile und Schrauben werden für die Ökobilanzierung wie folgt zusammengefasst:

- 4 Schrauben Ss 35, Stahl mit Festigkeit 5.6, je 0,659 kg, entspricht 2,64 kg Stahl
- 4 Spannklemmen, SKL 13, Federstahl 38 Si7, je 0,492 kg, entspricht 1,97 kg Stahl
- 4 Winkelführungsplatten, Wfp14, PA6 mit GF, je 0,134 kg -> Glasfaserverstärktes Polyamid 0,54 kg
- 2 Zwischenlagen, Zw687, EVA, je 0,161 kg -> Ethylvinylacetat 0,32 kg
- 4 Dübel, Sdü35, PA6 mit GF, je 0,033 kg -> Glasfaserverstärktes Polyamid 0,13 kg

In Summe sind dies je Bahnschwelle:

- 4,60 kg Stahl; 0,67 kg Glasfaserverstärktes Polyamid; 0,32 kg Ethylvinylacetat

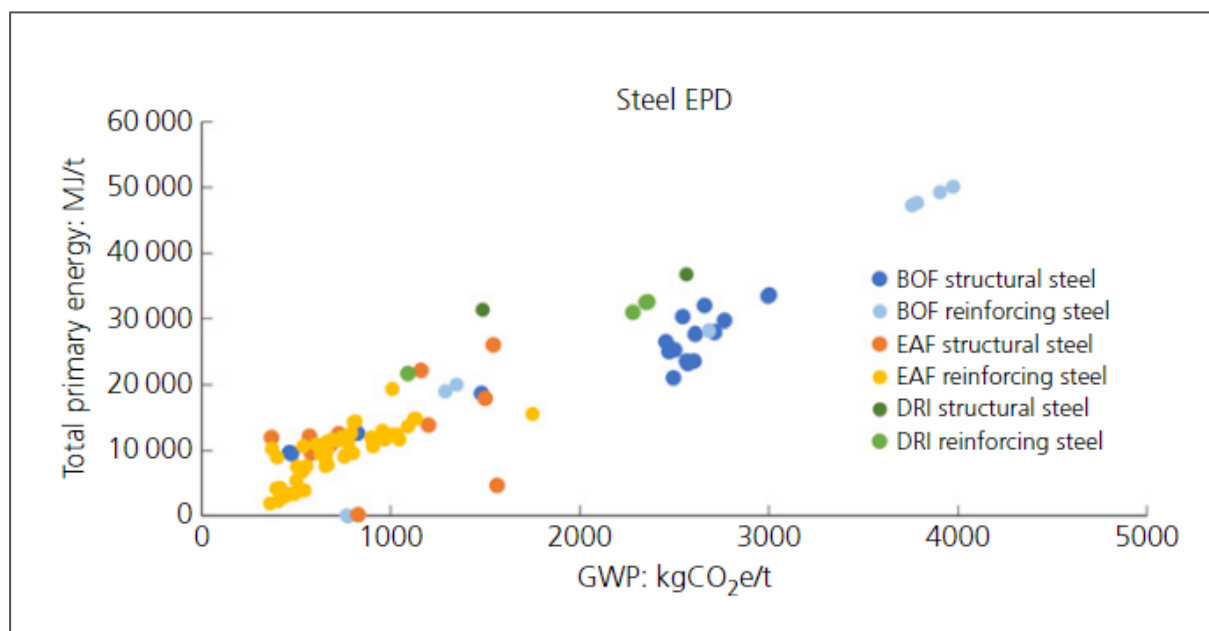
### 8.6.2.2 Verwendete Ökobilanzdaten für Spannstahl

Stahl in Europa wird meist über die Hochofen-Route (BOF) und die Elektrolichtbogenofen-Route (EAF) hergestellt [29]:

- Hochöfen produzieren Eisen aus Eisenerz. In einem zweiten Schritt verwandelt ein Sauerstoffkonverter Eisen mit Schrottzusätzen zu Stahl.
- Elektrolichtbogenöfen produzieren Stahl hauptsächlich aus recyceltem Stahlschrott.

Die Produktionsroute bestimmt entscheidend, welches Treibhauspotenzial mit der Stahlherstellung verbunden ist (**Bild 85**).





**Bild 85** Treibhauspotenzial und Primärenergiebedarf für die Herstellung einer Tonne Stahl [8]

Im Schwellenwerk Aschaffenburg wird Spannstahl von drei verschiedenen Lieferanten eingesetzt (Angabe Herr Dr. Friedl 25.Mai/30.Mai 2022). Für zwei der drei Hersteller liegen Angaben zum Treibhauspotenzial der Stahlherstellung vor:

- Saarstahl AG - "Product Carbon Footprint Wire Rod, Sphera 2021": 2,42 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg Stahl
- Nedri Spanstaal BV - "Prestressing steel (strand and wire) for application in prestressed concrete" (17.1.2022): 1,84 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg Stahl

Vom dritten Lieferanten ist nur bekannt, dass der Stahl über die Hochofenroute hergestellt wird. Der Stahl dieses Lieferanten wird in der vorliegenden Ökobilanz nicht betrachtet.

### 8.6.2.3 Verwendete Ökobilanzdaten für Einbauteile und Schrauben

Für die Einbauteile und Schrauben aus Stahl liegt keine Ökobilanz vor. Da das Treibhauspotenzial 2,42 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg Stahl gemäß Product Carbon Footprint der Saarstahl AG im mittleren Bereich der Spannweite in **Bild 85** liegt, wird dieser Wert auch für die Einbauteile und Schrauben aus Stahl angenommen.

Für glasfaserverstärktes Polyamid wird der Ecoinvent-Datensatz „RER, glass fibre reinforced plastic production, polyamide, injection molded“ herangezogen (**Tabelle 49**). Hiermit berechnet sich ein Treibhauspotenzial von 8,78 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg Polyamid.

Für Ethylvinylacetat wird der Ecoinvent-Datensatz „RER, ethylene vinyl acetate copolymer production“ herangezogen (**Tabelle 49**). Hiermit berechnet sich ein Treibhauspotenzial von 2,16 kg CO<sub>2</sub>-Äq/kg Ethylvinylacetat.

#### 8.6.2.4 Transporte von Spannstahl, Schrauben und Einbauteilen

Spannstahl, Schrauben und Einbauteile werden mit LKWs zum Bahnschwellenwerk Aschaffenburg transportiert.

Für den Spannstahl der beiden Hersteller betragen die Transportentfernungen

- Saarstahl AG (Völklingen): 230 km
- Nedri Spanstaal BV (Venlo): 320 km.

Bei 5,7 kg Spannstahl je Schwelle berechnet sich mit dem generischen Datensatz "DE Truck (EN 15804 A4) Sphera" (**Tabelle 49**) ein Treibhauspotenzial (GWP total) von 0,11 kg CO<sub>2</sub>-Äq für Spannstahl der Saarstahl AG und ein Treibhauspotenzial (GWP total) von 0,15 kg CO<sub>2</sub>-Äq für Spannstahl von Nedri Spanstaal BV.

Für Schrauben und Einbauteile sind die Transportentfernungen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Ökobilanz nicht bekannt. Die Masse der Schrauben und Einbauteile entspricht näherungsweise der des Spannstahls.

Das Treibhauspotenzial für Transporte von Spannstahl, Schrauben und Einbauteilen trägt nur in geringem Maße zum Treibhauspotenzial der Herstellung einer Bahnschwelle bei (vgl. **Tabelle 54**). Basierend auf den ermittelten Werten für den Transport des Spannstahls, wird es mit 0,3 kg CO<sub>2</sub>-Äq je Schwelle abgeschätzt.

#### 8.6.2.5 Berechnung des Gesamt-Treibhauspotenzials der Herstellung einer Bahnschwelle

Das Gesamt-Treibhauspotenzial der Herstellung von einer Bahnschwelle lässt sich wie in **Tabelle 54** dargestellt berechnen.

**Tabelle 54** Berechnung des Treibhauspotenzials (GWP total) der Herstellung einer Bahnschwelle

	Menge	GWP brutto [kg CO <sub>2</sub> -Äq]	GWP netto [kg CO <sub>2</sub> -Äq]
Bahnschwellenbeton	0,13 m <sup>3</sup>	35,9	31,5
Spannstahl Saarstahl	5,7 kg		13,8
<i>Spannstahl Nedri (alternativ)</i>	<i>5,7 kg</i>		<i>10,4</i>
Einbauteile/Schrauben aus Stahl	4,6 kg		11,1
Glasfaserverstärktes Polyamid	0,67 kg		5,9
Ethylenvinylacetat	0,32 kg		0,7
Transporte			0,3
<b>Summe (Spannstahl Saarstahl)</b>		<b>67,7</b>	<b>63,3</b>
<b>Summe (Spannstahl Nedri)</b>		<b>64,3</b>	<b>59,9</b>

## 9 Unterschriften

Düsseldorf, 08.11.2022

---

Ort, Datum



---

Rechtsverbindliche Unterschrift

VDZ Technology gGmbH

München, 15.11.2022

---

Ort, Datum



---

Rechtsverbindliche Unterschrift

Technische Universität München, Centrum Baustoffe  
und Materialprüfung

Neumarkt, 21.11.2022

---

Ort, Datum



---


Rechtsverbindliche Unterschrift

PCM RAILONE AG

Wiesbaden, 23.11.2022

---

Ort, Datum



---

Rechtsverbindliche Unterschrift

Dyckerhoff GmbH

## 10 Literatur und Dokumente

- [1] Borchers, Ingmar; Müller, Christoph. *Prüfung und Bewertung des wirksamen Alkaligehalts von Zementen: IGF-Vorhaben 19295 N.* 2021 (<https://vdz.info/8f6mq>)
- [2] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). *Merkblatt: Chlorideindringwiderstand von Beton.* Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, BAW 2012
- [3] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). *Merkblatt: Frostprüfung von Beton (MFB).* Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, BAW 2012
- [4] 2012. *Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Beton*
- [5] Rønning, T. F., Wigum, B. J. & Lindgård, J. *Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-10: determination of binder combinations for non-reactive mix design using concrete prisms – 38 °C test method.* Materials and Structures 2021, **204**
- [6] Deutsches Institut für Bautechnik. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.15-2130.* 2016
- [7] Gartner, E.. *Industrially interesting approaches to „low-CO2” cements.* Cement and Concrete Research 34 2004, S. 1489-1498
- [8] Bogliolo, R.; Buzzi, L.; Canonico, F.; Paris, M.. *Comparison of technical and environmental performance of concretes made with sulphoaluminate and ordinary Portland cement.* Congresso CTE (Rom) 27.-28.10.2016
- [9] Muzhen, S.; Kurdowski, W.; Sorrentino, F.P.. *Development in Non-Portland Cements.* Proc. 9th Int. Congr. Chem. Cem, New Delhi 1992, **Vol. 1**, S. 317-354
- [10] P.K. Metha. *Mechanisms of expansion associated with ettringite formation.* Cem Concr. Res. 1973, S. 1-6
- [11] TGL 28104/17. *Zemente, Zuschlagstoffe, Füllergüsse, Bestimmung der Alkalien.* 1989-04
- [12] Deutsche Bahn. *DBS 918 143: Technische Lieferbedingungen - Gleis- und Weichenschwellen aus Beton für Schotteroberbau (SchO) und Fest Fahrbahn (FF).* März 2018
- [13] Bundesanstalt für Wasserbau. *Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC).* Karlsruhe: BAW 2019
- [14] DBS 918 143 (März 2018) - Anhang G. *Beurteilung des AKR-Potentials von Schwellenbetonen - AKR-Performance-Prüfung und Rezepturbewertung*
- [15] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Hrsg. *TP B-StB - Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen: Teil 1.1.09*

- AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr)*. 2018
- [16] Borchers, Ingmar. *Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-12: determination of binder combinations for non-reactive mix design or the resistance to alkali-silica reaction of concrete mixes using concrete prisms – 60 °C test method with alkali supply*. *Materials and Structures* 2021, **202**
- [17] Müller, C.; Borchers, I.; Eickschen, E.. *Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren: Hinweise zur Ableitung praxisgerechter Bewertungskriterien für Performance und WS-Grundprüfungen*. *Beton*. 2012 (62) 10, S. 397-404
- [18] Müller, C.; Borchers, I.; Eickschen, E.. *Experience with ASR test methods: advice on obtaining practical evaluation criteria for performance testing and aggregate testing*. *Cement International*. 2013 (11) 3, S. 70-77
- [19] Borchers, Ingmar; Müller, Christoph. *Praxisgerechte Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA in AKR-Performance-Prüfungen: Practical testing of alkali reactivity of concrete compositions of the WF and WA moisture classes in ASR performance tests*. *Beton* 64 (2014), **10**, S. 403-409
- [20] ASTM C1778-20. *Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*.
- [21] ASTM C1293-20. *Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction*
- [22] RILEM. *RILEM technical recommendations for the testing and use of construction materials*. 1994
- [23] Andrade, C.; Alonso, C. . *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site*. *Construction and Building Materials* 10(5) 1996, S. 315-328
- [24] Harnisch, J.. *Zum zeitabhängigen Verhalten elektrochemischer und morphologischer Kenngrößen bei der chloridinduzierten Korrosion von Stahl in Beton*. *Dissertation RWTH Aachen*.  
<https://publications.rwth-aachen.de/record/62839/files/4028.pdf>  
2012
- [25] Osterminski, K.. *Zur voll-probabilistischen Modellierung der Korrosion von Stahl in Beton (Ein Beitrag zur Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauteilen)*. *Dissertation TU München*. <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1164926> 2013
- [26] EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction products*

- [27] EN 16757:2017. *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Product Category Rules for concrete and concrete elements*
- [28] Bundesverband Transportbeton. *Concrete Sustainability Council, Technisches Handbuch CO2-Modul, 10.1.2022*
- [29] <https://www.eurofer.eu/about-steel/learn-about-steel/what-is-steel-and-how-is-steel-made/>