

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung:	VDZ Technology gGmbH
Forschungseinrichtung:	VDZ Technology gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie
IGF-Vorhaben-Nr.:	19842 N
Bewilligungszeitraum	01.01.2018 – 31.12.2020

Forschungsthema:

## **Differenzierung von E III-S-Gesteinskörnungen und Ableitung betontechnischer Maßnahmen**

### **1 Einleitung**

Die sogenannten „weiteren“ Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie sind in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (nicht alkali-reaktiv) oder in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S (alkali-reaktiv) einzustufen [DAfStb2013]. Eine Klasse für mäßig alkali-reaktive Gesteinskörnungen (E II-S), wie es sie z. B. in Canada, England und den USA gibt, konnte bisher für Deutschland nicht definiert werden. Bei E III-S-Gesteinskörnungen sind die Maßnahmen zur Vermeidung von AKR-Schäden auf den ungünstigsten Fall ausgelegt: Hoch alkali-reaktive Gesteinskörnungen und hoher Zementgehalt. Viele Gesteinskörnungen sind aber nur mäßig alkali-reaktiv, so wie es beispielsweise in Großbritannien für die meisten dort gewonnenen Gesteinskörnungen angenommen wird [BRE2004] und auch von RILEM für manche Länder vermutet wird [Nixon2016]. Bei diesen Gesteinskörnungen sind deshalb andere Maßnahmen möglich als bei hoch reaktiven Gesteinskörnungen.

In diesem Vorhaben wurden nunmehr Kriterien erarbeitet, um die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S in die zwei Klassen „E II-S“ und „E III-S<sup>neu</sup>“ aufteilen und die Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von Gesteinskörnungen differenzierter beschreiben zu können. Die weitere Differenzierung alkali-reaktiver Gesteinskörnungen verfolgt das Ziel, regional verfügbare stoffliche Ressourcen für Beton noch effizienter nutzen zu können. Grenzwerte für die Bewertung der Gesteinskörnung in AKR-Prüfverfahren sowie auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktivität der Gesteinskörnung ausgelegte vorbeugende Maßnahmen wurden erarbeitet. Mittels AKR-Performance-Prüfungen und Betonversuchen mit Freilagerung wurden für mäßig alkali-reaktive Gesteinskörnungen entsprechende AKR-vorbeugende Maßnahmen abgeleitet werden.

## 2 Untersuchungen

### 2.1 Vorgehensweise

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von 17 groben Gesteinskörnungen wurde mit verschiedenen Prüfverfahren bestimmt. Auf Basis der Dehnung in den Betonversuchen mit Nebelkammerlagerung wurden drei potenziell mäßig reaktive Gesteinskörnungen (E II-S) und eine hoch reaktive (E III-S<sup>neu</sup>) Gesteinskörnung ausgewählt.

Zur Ableitung AKR-vorbeugender Maßnahmen für mäßig alkali-reaktive Gesteinskörnungen wurden im zweiten Schritt mit diesen Gesteinskörnungen Betone hergestellt. Die Widerstände der Betone gegen eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion wurden mit AKR-Performance-Prüfverfahren untersucht.

### 2.2 Alkali-Kieselsäure-Reaktivität grober Gesteinskörnungen

#### 2.2.1 Ausgangsstoffe

Es wurden die in **Tabelle 1** aufgeführten Gesteinskörnungen und Zemente verwendet.

**Tabelle 1** Ausgangsstoffe und wesentliche Eigenschaften

Ausgangsstoffe	Wesentliche Eigenschaften
Rheinsand 0/2	Alkaliempfindlichkeitsklasse E I
17 Gesteinskörnungen	2/8 und 8/16 bzw. 2/5, 5/8, 8/11 und 11/16
CEM I 32,5 R (C1)	AKR-Prüfzement 03/2018 nach Alkali-Richtlinie [DAf13] 1,18 M.-% Na <sub>2</sub> O-Äquivalent, aufdotiert auf 1,30 M.-% mit 3,34 g K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> pro kg Zement
CEM I 42,5 R (C2)	RILEM Reference High-Alkali Cement [RIL16] 1,14 M.-% Na <sub>2</sub> O-Äquivalent, aufdotiert auf 1,25 M.-% mit 1,42 g NaOH pro kg Zement
CEM I 42,5 R (C3)	Zement mit mäßigen Alkaligehalt 0,85 M.-% Na <sub>2</sub> O-Äquivalent, aufdotiert auf 0,91 M.-% mit 0,76 g NaOH pro kg Zement

#### 2.2.2 Übersicht

**Tabelle 2** gibt eine Übersicht der Prüfverfahren zur Bestimmung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von Gesteinskörnungen und die Anzahl der geprüften Gesteinskörnungen. Die Betonzusammensetzungen der jeweiligen Prüfungen sind in **Tabelle 3** angegeben.

**Tabelle 2** Übersicht Gesteinskörnungsprüfungen

Prüfungen	Standard	Information	Anzahl
40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung	Alkali-Richtlinie [DAf13]	AKR-Prüfzement; Na <sub>2</sub> O-Äqu.= 1,30 M.-% (5,2 kg/m <sup>3</sup> ) z = 400 kg/m <sup>3</sup>	17
60 °C-Betonversuch			
Betonversuch mit Freilagerung	Partner-Projekt [Lin10]	w/z = 0,45	
Schnellprüfverfahren	Alkali-Richtlinie [DAf13]	AKR-Prüfzement; Na <sub>2</sub> O-Äqu.= 1,30 M.-%	7
60 °C-Betonversuch	RILEM AAR-4.1 [RIL16]	RILEM-reference cement Na <sub>2</sub> O-Äqu.= 1,25 M.-% (5,5 kg/m <sup>3</sup> )	7
Betonversuch mit Freilagerung	Partner-Projekt [Lin10]	z = 440 kg/m <sup>3</sup> w/z = 0,50	4
60 °C-Betonversuch	RILEM AAR-4.1 [RIL16]	CEM I 42,5 R Na <sub>2</sub> O-Äqu.= 0,91 M.-% (4,0 kg/m <sup>3</sup> )	9
Betonversuch mit Freilagerung	Partner-Projekt [Lin10]	z = 440 kg/m <sup>3</sup> w/z = 0,50	8

**Tabelle 3** Betonzusammensetzungen

Beton	nach Alkali-Richtlinie	nach RILEM AAR-4.1 (HA)	nach RILEM AAR-4.1 (MA)
Zement	CEM I 32,5 R (C1)	CEM I 42,5 R (C2)	CEM I 42,5 R (C3)
Zementgehalt	400 kg/m <sup>3</sup>	440 kg/m <sup>3</sup>	
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent <sup>1)</sup>	1,30 M.-% / 5,2 kg/m <sup>3</sup>	1,25 M.-% / 5,5 kg/m <sup>3</sup>	0,91 M.-% / 4,0 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	180 kg/m <sup>3</sup>	220 kg/m <sup>3</sup>	
Wasserzementwert	0,45	0,50	
	30 Vol.-% Rheinsand 0/2 mm		
Gesteinskörnung	40 Vol.-% Gesteinskörnung 2/8 mm <sup>2)</sup>		
	30 Vol.-% Gesteinskörnung 8/16 mm <sup>2)</sup>		
Luftgehalt	1,0 %		
<sup>1)</sup> aus dem Zement und durch Zugabe von K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> oder NaOH zum Zugabewasser			
<sup>2)</sup> ggf. 1:1 zusammengesetzt aus 2/5 und 5/8 sowie 8/11 und 11/16			

### 2.2.3 40 °C-Betonversuch und 60 °C-Betonversuch

Die 17 groben Gesteinskörnungen wurden in der Betonzusammensetzung „nach Alkali-Richtlinie“ gemäß **Tabelle 3** mit dem 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung und dem 60 °C-Betonversuch [DAfStb2013] untersucht. Aus demselben Beton wurde zusätzlich ein 300 mm-Würfel für die Lagerung im Außenlager (Freilagerung) hergestellt (siehe Kapitel 2.2.6).

### 2.2.4 Schnellprüfverfahren

Anhand der Dehnungen im 40 °C-Betonversuch wurden sieben grobe Gesteinskörnungen für Tests mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie [DAfStb2013] ausgewählt, um die ganze Bandbreite an Dehnungen im 40 °C-Betonversuch abzudecken. Die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm wurden im Verhältnis 57:43 als Korngemisch gemeinsam gebrochen und geprüft.

### 2.2.5 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1

Ausgewählte grobe Gesteinskörnungen mit verschiedenen Dehnungen im 40 °C-Betonversuch wurden in einer Betonzusammensetzung gemäß **Tabelle 3** mit dem 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1 [Nixon2016] geprüft. Abweichend wurde eine Kornzusammensetzung nach Alkali-Richtlinie bis zu einem Größtkorn von 16 mm anstatt von 22,4 mm eingesetzt. Der Betonversuch wurde in zwei Varianten durchgeführt.

Bei der ersten Variante wiesen die Betone ein hohes Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 5,5 kg/m<sup>3</sup> (HA) aus dem Portlandzement auf.

Die zweite Variante hatte ein mittleres Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 4,0 kg/m<sup>3</sup> (MA) aus dem Portlandzement. Dieser Alkali-Schwellenwert (alkali threshold) wurde von RILEM AAR 7.1 für den 38 °C-Betonversuch (AAR-3.2 - concrete prism test) und vom PARTNER-Projekt für den 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1 empfohlen [Nixon2016, CEN2007], um zwischen mäßig und hoch reaktiven Gesteinskörnungen differenzieren zu können. Die Prüfungen dieses Projekts sollten zeigen, ob das empfohlene Vorgehen geeignet ist, zwischen E II-S- und E III-S\*-Gesteinskörnungen eindeutig unterscheiden zu können.

## 2.2.6 Freilagerung

Parallel zu den Betonprüfungen bei 40 °C und 60°C lagerte jeweils ein 300 mm-Würfel im Freilager des VDZ, um die Ergebnisse der Laborprüfungen mit dem Praxisverhalten vergleichen zu können. Die Prüfung erfolgte wie im Partner-Projekt [Lindgård2010, Borchers2021a]. Freilagerungsversuche sind unabdingbar, um die Aussage von Laborergebnissen und die Effektivität betontechnischer Maßnahmen zur Vermeidung von AKR-Schäden bewerten zu können [Thomas2006]. Daher werden weltweit zunehmend Freilagerungsversuche durchgeführt [Ideker2012].

## 2.3 AKR-Widerstand von Betonen

### 2.3.1 Überblick

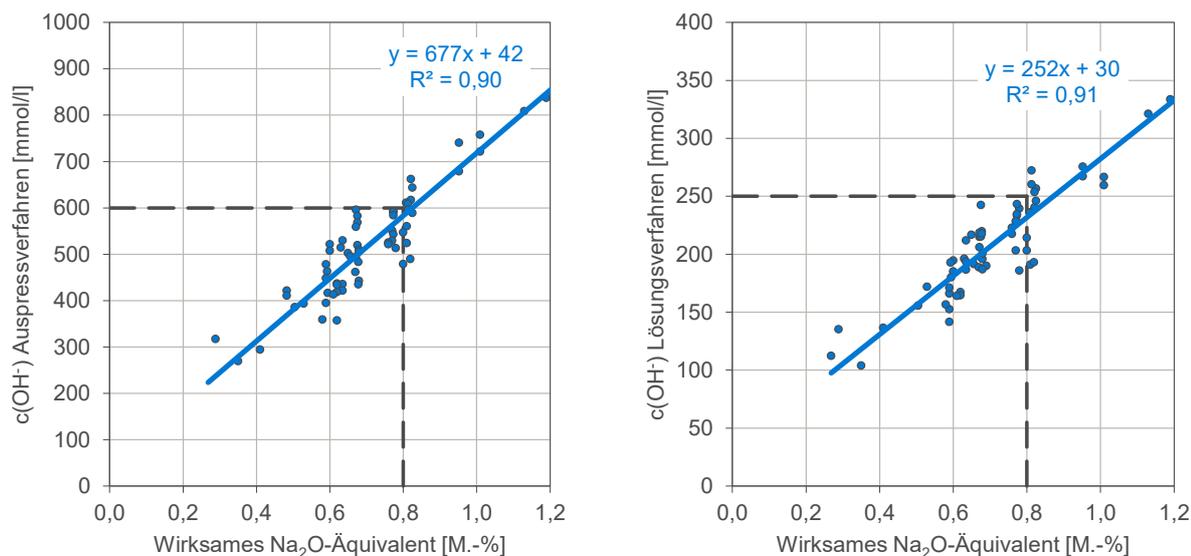
Der AKR-Widerstand der Betone mit drei potenziell mäßig alkali-reaktiven (E II-S-)Gesteinskörnungen und einer hoch alkali-reaktiven (E III-S-)Gesteinskörnung in Kombination mit verschiedenen Zementen wurde mit folgenden AKR-Performance-Prüfungen geprüft:

- 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie [DAfStb2013], NF P18-454 [AFNOR2004a] bzw. RILEM AAR-11 [Borchers2021c]  
Abweichung: Vorlagerung für 28 Tage bei 20 °C über einem Wasserbad
- 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (3%ige NaCl-Lösung) gemäß TP B-StB 1.1.09 [TPB1.1.09]
- Betonversuch mit Freilagerung eines 300 mm-Würfel analog [Lindgård2010, Borchers2021b] (nicht dargestellt).

Die aufgrund vorliegender Erfahrungen als realistisch angenommenen Maßnahmen für E II-S-Gesteinskörnungen gemäß **Tabelle 4** wurden in diesen Untersuchungen überprüft. Wesentliche Annahme war, dass Betone mit für E II-S-Gesteinskörnungen einen ausreichenden AKR-Widerstand haben, wenn die Zemente ein wirksames  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $\leq 0,80$  % oder im Alter von 28 Tagen eine Hydroxidionenkonzentration im Lösungsverfahren von  $\leq 250$  mmol/l oder im Auspressverfahren von  $\leq 600$  mmol/l aufweisen (**Bild 1**). Die Annahme basierte auf Ergebnissen des IGF-Vorhabens 19295 N [Borchers2021a], in dem Bewertungskriterien für NA-Zemente abgeleitet wurden.

**Tabelle 4** AKR vorbeugende Maßnahmen: Maßnahme E III-S (Empfehlung aus [Borchers2021a]) und Maßnahme E II-S (Annahme zur Bestätigung durch dieses Projekt)

Feuchtigkeitsklasse	Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	Maßnahme E III-S (Empfehlung [Borchers2021a])	Maßnahme E II-S (Annahme zur Bestätigung)
WF	350 ≤ 400	- NA-Zement - Wirksames $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent $\leq 0,60$ %	- Wirksames $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent $\leq 0,80$ % - $c(\text{OH}^-) \leq 250$ mmol/l Lösungsverfahren
WA	300 ≤ 350	- $c(\text{OH}^-) \leq 200$ mmol/l Lösungsverfahren - $c(\text{OH}^-) \leq 500$ mmol/l Auspressverfahren	- $c(\text{OH}^-) \leq 600$ mmol/l Auspressverfahren
WA	350 ≤ 400	AKR-Performance-Prüfung	- NA-Zement - Wirksames $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent $\leq 0,60$ % - $c(\text{OH}^-) \leq 200$ mmol/l Lösungsverfahren - $c(\text{OH}^-) \leq 500$ mmol/l Auspressverfahren



**Bild 1** Hydroxidionenkonzentration verschiedener Portlandzemente sowie hüttensand- und kalksteinhaltiger Zemente im Auspressverfahren (links) und im Lösungsverfahren (rechts) in Abhängigkeit vom wirksamen Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Zementes, Alter 28 Tage, Daten aus [Borchers2021a]

### 2.3.2 Ausgangsstoffe

Auf Basis der 40 °C-Betonversuche wurden die drei potenziell mäßig alkali-reaktiven E II-S-Gesteinskörnungen (Gesteinskörnungen Nr. 3, 9 und 10) sowie die hoch alkali-reaktive E III-S-Gesteinskörnung (Gesteinskörnung Nr. 16) ausgewählt. Die Gesteinskörnungen Nr. 3 (gebrochener Kies) und Nr. 10 (gebrochene Grauwacke) wurden als „Vertreter“ für die mäßig reaktiven Gesteinskörnungen (E II-S) ausgewählt, da diese Dehnungen in Höhe des geplanten Grenzwertes von 1,40 mm/m zeigten.

Zemente entsprechend der häufig verwendeten Zementarten CEM II/B-S, CEM II/B-M (S-LL) und CEM III/A sowie der neuen Zementarten CEM II/C und CEM VI wurden gemäß **Tabelle 5** im Labor hergestellt. Die Zemente hatten jeweils den für die entsprechende Zementart maximalen Klinkergehalt. Die Na<sub>2</sub>O-Äquivalente der Zemente und die Na<sub>2</sub>O-Äquivalente der Zemente ohne Hüttensand, Kalkstein und Flugasche ( $\bar{N}_{ZoS,oLL,oV}$ ) wurden bestimmt. Die wirksamen Na<sub>2</sub>O-Äquivalente der Zemente ( $\bar{N}_{eff}$ ) wurden gemäß Gleichung 1 in Kapitel 2 berechnet.

**Tabelle 5** Zementzusammensetzungen

		CEM II/B-S	CEM II/B-V	CEM II/B-M (S-LL)	CEM III/A	CEM II/C-M (S-LL)	CEM VI
CEM I (Z4)	%	-			65		50
CEM I (Z5)	%	79			-		
Hüttensand S	%	21	-	11	35	16	31
Kalkstein LL	%	-	-	10	-	19	19
Flugasche V	%	-	21	-	-		
Na <sub>2</sub> O-Äqu.	%	1,01	1,65	0,92	1,15	0,97	0,92
Na <sub>2</sub> O-Äqu. Zement ohne S und LL bzw. V ( $\bar{N}_{ZoS,oLL,oV}$ )	%	1,04			1,27		
Wirksames Na <sub>2</sub> O-Äqu. ( $\bar{N}_{eff}$ )	%	0,82			0,83		0,64
c(OH <sup>-</sup> ) Auspressverfahren 28 d	mmol/l	617	594	662	608	643	421
c(OH <sup>-</sup> ) Lösungsverfahren 28 d	mmol/l	254	224	240	272	257	187

### 2.3.3 Betone

12 Betone unter Verwendung der Ausgangsstoffe gemäß **Tabelle 6** wurden in einer Zusammensetzung gemäß **Tabelle 7** hergestellt. Die Zusammensetzung orientierte sich an dem Prüfplan des Deutschen Instituts für Bautechnik für eine bauaufsichtliche Zulassung eines CEM II/B-V als NA-Zement [VDZ2014].

**Tabelle 6** Betone

Nr.	Gesteinskörnung	Zement	S + LL bzw. V * [M.-%]	Na <sub>2</sub> O-Äqu. [M.-%]	$\bar{N}_{ZoS,oLL,oV}$ [M.-%]	$\bar{N}_{eff}$ [M.-%]	c(OH <sup>-</sup> ) AV [mmol/l]	c(OH <sup>-</sup> ) LV [mmol/l]
1	10	CEM II/B-M (S-LL)	22	0,92	1,04	0,82	662	240
2	3							
3	9							
4	16 (E III-S)							
5	10	CEM II/B-S		1,01			617	254
6	10	CEM II/B-V		1,65			594	224
7	10	CEM II/C-M (S-LL)	36	0,97	1,27	0,83	643	257
8	3							
9	9							
10	16 (E III-S)							
11	10	CEM III/A		1,15			608	260
12	10	CEM VI (S-LL)	51	0,92		0,64	421	187

\* sulfatträgerfrei  
AV: Auspressverfahren, LV: Lösungsverfahren  
 $\bar{N}_{ZoS,oLL,oV}$  Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Zementes ohne weitere Hauptbestandteile (d. h. aus Klinker, Sulfatträger und Nebenbestandteilen)  
 $\bar{N}_{eff}$  Wirksames Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Zements

**Tabelle 7** Betonzusammensetzung

	Beton
Zement	400 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	200 kg/m <sup>3</sup>
Wasserzementwert	0,50
Gesteinskörnung	30 Vol.-% Rheinsand 0/2 mm
	40 Vol.-% 2/8 mm <sup>2)</sup>
	30 Vol.-% 8/16 mm <sup>2)</sup>
Luftgehalt	1,0 %
<sup>1)</sup> Ggf. 1:1 zusammengesetzt aus 2/5 und 5/8 sowie 8/11 und 11/16	

### 2.3.4 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr

Betone der Feuchtigkeitsklasse WF (feuchte Umgebung) wurden mit dem „60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr“ geprüft [Borchers2014]. Der Prüfablauf entspricht dem 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie, Anhang C [DAfStb2013]. Das Verfahren ist bereits seit 2004 in Frankreich in NF P18-454 [AFNOR2004a] genormt und wird dort, wie auch in der Schweiz, zur Bewertung der Alkali-Reaktivität von Betonen angewendet [SIA2012]. Auch RILEM empfiehlt das Verfahren als AAR-11 [Borchers2021c]. Die Betone wurden 27 Tage bei 20 °C und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit vorgelagert, um eine ausreichende Hydratation der Zemente, insbesondere des Hüttensandes, zu ermöglichen.

Die Prüfungen wurden als bestanden bewertet, wenn die Dehnungen 140 Tage nach Beginn der Lagerung bei 60 °C  $\leq 0,20$  mm/m waren. Dieser Grenzwert wurde in Anlehnung an FD P 18-456 [AFNOR2004b] gewählt, da in Deutschland bisher kein Bewertungskriterium für den AKR-Widerstand von Betonen existiert.

Untersuchungen des VDZ zeigten, dass die Ergebnisse des 60 °C-Betonversuchs (ohne Alkalizufuhr) in der Regel gut mit den Festlegungen der Alkali-Richtlinie übereinstimmen, wenn das o. g. Kriterium zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WF angewendet wird [Borchers2014]. Betone mit Portlandzementen und Hochofenzementen, die unter Berücksichtigung der vorbeugenden Maßnahmen der Alkali-Richtlinie hergestellt wurden, zeigten in den Laborversuchen bei Anwendung dieser Kriterien fast ausnahmslos ein regelwerkgerichtetes Verhalten. Sowohl bei hüttensandhaltigen Zementen als auch bei Verwendung von Flugasche wird eine Vorlagerung von 28 Tagen bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 100 % empfohlen [Dressler2013].

### 2.3.5 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

Betone der Feuchtigkeitsklasse WA (feuchte Umgebung + Alkalizufuhr von außen) wurden mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr“ geprüft [TPB1.1.09]. Das Prüfverfahren wurde an den Festlegungen zu Maßnahmen der Alkali-Richtlinie kalibriert [Borchers2014]. Die Festlegungen der Alkali-Richtlinie spiegeln die Erfahrungen mit Betonen in Deutschland wieder, die entweder keine AKR-Schäden aufweisen oder mit denen nachweislich AKR-Schäden aufgetreten sind. Um die Alkalien von außen dem Beton zuzuführen, werden die Betonprismen zeitweise in einer 3%igen Natriumchlorid-Lösung (NaCl) gelagert.

Zur Bewertung des AKR-Widerstandes von Betonen für die Feuchtigkeitsklasse WA gibt es bislang kein in Regelwerken verankertes Kriterium. Auf Basis von Forschungsergebnissen

empfiehlt der VDZ eine maximale Dehnung von 0,50 mm/m nach 10 Zyklen der Wechsellaagerung (entspricht 168 Tagen), wenn mit einer 3%igen Natriumchlorid-Lösung geprüft wird [Borchers2014]. Dieses Kriterium wurde bereits in Zulassungsverfahren des DIBt zur Bewertung in Ansatz gebracht.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Gesteinskörnungsprüfungen

##### 3.1.1 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Gesteinskörnungsprüfungen sind in **Tabelle 8** zusammengefasst und in Abhängigkeit von der Dehnung des 40 °C-Betonversuchs mit Nebelkammerlagerung (Referenzverfahren) sortiert. Die Werte innerhalb einer Spalte sind abhängig von der relativen Größe farblich markiert: hohe Werte rot, mittlere Werte gelb und geringe Wert grün.

**Tabelle 8** Ergebnisse der Prüfung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität grober Gesteinskörnungen mit verschiedenen Verfahren

Gesteinskörnung	Freilager (rd. 2,5 a) [mm/m]	40 °C-BV		60 °C-BV			Schnellprüfverfahren [mm/m]
		Dehnung [mm/m]	Rissbreite [mm]	RILI [mm/m]	AAR-4.1 (HA) [mm/m]	AAR-4.1 (MA) [mm/m]	
16	0,47	1,96	0,45	1,49	1,57	0,22	1,82
17	0,41	1,85	0,40	1,82	-	0,28	-
6	0,56	1,74	0,50	1,39	-	-	-
1	0,81	1,62	0,50	1,46	-	0,23	1,82
4	0,39	1,54	0,35	1,10	-	-	-
7	0,38	1,46	0,50	1,20	-	0,22	-
5	0,58	1,45	0,60	0,92	-	-	-
10	0,46	1,40	0,70	1,80	1,63	0,41	2,02
3	0,25	1,37	0,50	1,21	0,87	0,16	1,06
2	0,58	1,24	0,50	1,46	-	0,18	-
9	0,19	0,98	0,85	1,54	1,82	0,09	2,02
13	0,17	0,85	0,50	1,52	-	0,12	2,01
8	0,04	0,76	1,00	0,82	1,49	-	-
12	0,11	0,60	0,35	0,82	1,18	-	-
15	0,15	0,54	0,60	0,66	-	-	-
14	0,12	0,53	0,20	0,57	-	-	-
11	0,12	0,49	0,00	0,54	0,62	-	1,48

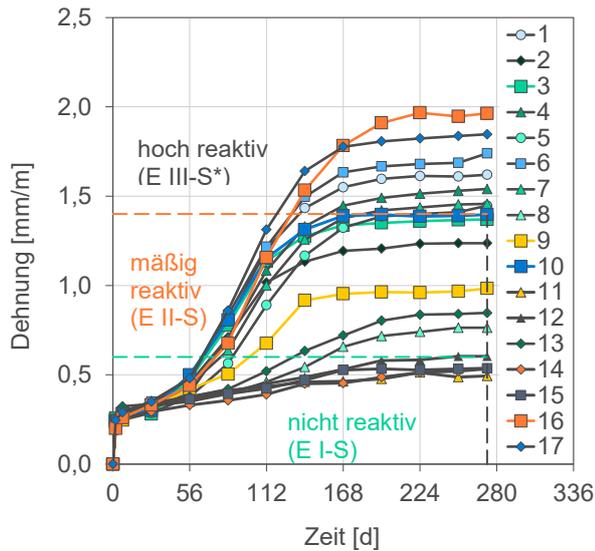
BV = Betonversuch

HA = hohes Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 5,5 kg/m<sup>3</sup> aus dem Portlandzement im 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1

MA = mittleres Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 4,0 kg/m<sup>3</sup> aus dem Portlandzement im 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1

##### 3.1.2 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung

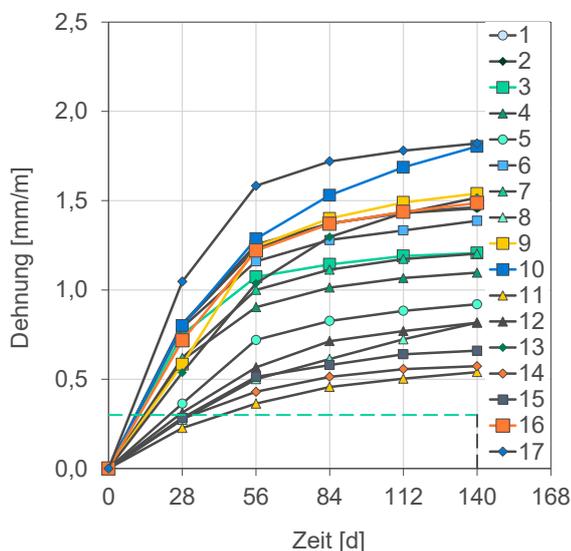
Auf Basis der 40 °C-Betonversuche wurden die drei potenziell mäßig alkali-reaktiven E II-S-Gesteinskörnungen (Nr. 3, Nr. 9 und Nr. 10) sowie die hochreaktive E III-S-Gesteinskörnung (16) ausgewählt (**Bild 2**). Die Gesteinskörnungen Nr. 3 (gebrochener Kies) und Nr. 10 (gebrochene Grauwacke) wurden verwendet, da deren Dehnungen in Höhe des angestrebten Grenzwertes für E II-S-Gesteinskörnungen von 1,40 mm/m lagen. Diese Gesteinskörnungen wurden für die AKR-Performance-Prüfungen verwendet. 16 der 17 Gesteinskörnungen bestanden den 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung anhand der aktuell gültigen Bewertungskriterien nicht. Nur die Gesteinskörnung mit der Nr. 11 bestand die Prüfung.



**Bild 2** Dehnungen von Betonprismen in der 40 °C-Nebelkammer für 17 verschiedene grobe Gesteinskörnungen, Grenzwert für nicht alkali-reaktive Gesteinskörnungen (E I-S)  $\leq 0,60$  mm/m, vorgeschlagener Grenzwert für mäßig alkali-reaktive Gesteinskörnungen (E II-S)  $\leq 1,40$  mm/m

### 3.1.3 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie

Alle 17 Gesteinskörnungen zeigten im 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie bereits nach 56 Tagen Dehnungen über dem Grenzwert von 0,30 mm/m (**Bild 3**).

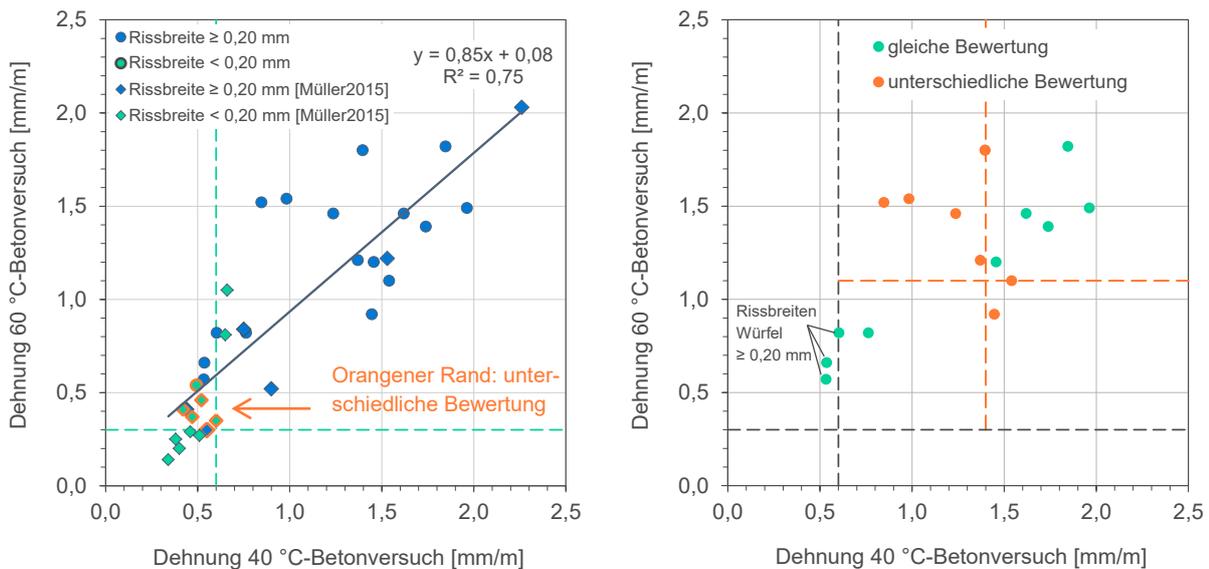


**Bild 3** Dehnungen von Betonprismen im 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie

Die Betonversuche bei 40 °C und 60 °C führten bei Verwendung der Bewertungskriterien nach Alkali-Richtlinie in 28 von 34 Fällen zur gleichen Bewertung der Alkali-Reaktivität (**Bild 4** links). Sechs Gesteinskörnungen wurden unterschiedlich bewertet (orangene Umrandung). Fünf Gesteinskörnungen bestanden den 40 °C-Betonversuch nicht, weil die Rissbreiten am Würfel  $\geq 0,20$  mm waren. Unterschiede bei Dehnungen im 60 °C-Betonversuch traten bei Werten zwischen 0,30 mm/m und 0,54 mm/m auf. Der 60 °C-Betonversuch ist etwas „schärfer“ als der 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung. Versuche des Partner-Projekts bestätigten, dass mäßig alkali-reaktive Gesteinskörnungen, die in Auslagerungsversuchen

zu AKR-Schäden führten, mit dem 60 °C-Betonversuch identifiziert wurden [Lindgård2010, Borchers2021].

Bei höheren Werten der beiden Verfahren korrelierten die Dehnungen weniger. Ein Orientierungswert für den 60 °C-Betonversuch zur Bewertung mäßig alkali-reaktiver Gesteinskörnungen (E II-S) wurde mit 1,1 mm/m angesetzt. Da die Dehnungen bei hohen Werten deutlicher streuen, würden beide Verfahren 7 von 16 Gesteinskörnungen unterschiedlich bewerten (Bild 4 rechts, orange Punkte). 9 Gesteinskörnungen würden gleich bewertet (grüne Punkte).



**Bild 4** Dehnungen von Betonprismen im 40 °C- und 60 °C-Betonversuchen sowie die maximale Rissbreite am 300 mm-Würfel nach Alkali-Richtlinie für verschiedene grobe Gesteinskörnungen,

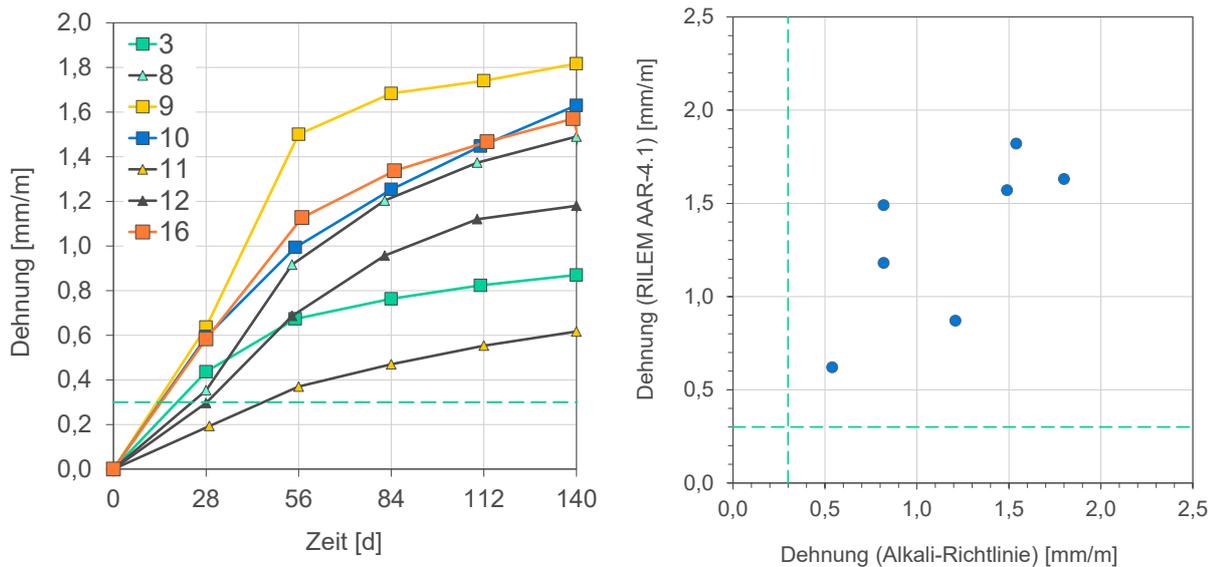
Links: orangener Rand = unterschiedliche Bewertung durch beide Verfahren

Rechts: 16 Betone dieses Projekts, die den 40 °C-Betonversuch nicht bestanden

### 3.1.4 60 °C-Betonversuch nach RILEM

#### Betone mit hohem $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des Portlandzements

In den 60 °C-Betonversuchen nach RILEM AAR-4.1 mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 1,25 % des Portlandzements (entspricht einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent im Beton von 5,5 kg/m<sup>3</sup> aus dem Portlandzement) lagen alle Dehnungen über der Grenze von 0,30 mm/m nach [Lindgård2010, Nixon2016] (Bild 5 links). Die 60 °C-Betonversuche nach RILEM AAR-4.1 lieferten vergleichbare Bewertungen wie die 60 °C-Betonversuche nach Alkali-Richtlinie ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 1,30 % des Zements bzw. 5,2 kg/m<sup>3</sup>) (Bild 5 rechts).



**Bild 5** Links: Dehnungen von Betonprismen in der 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1, Rechts: Dehnungen von Betonprismen im 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1 und nach Alkali-Richtlinie

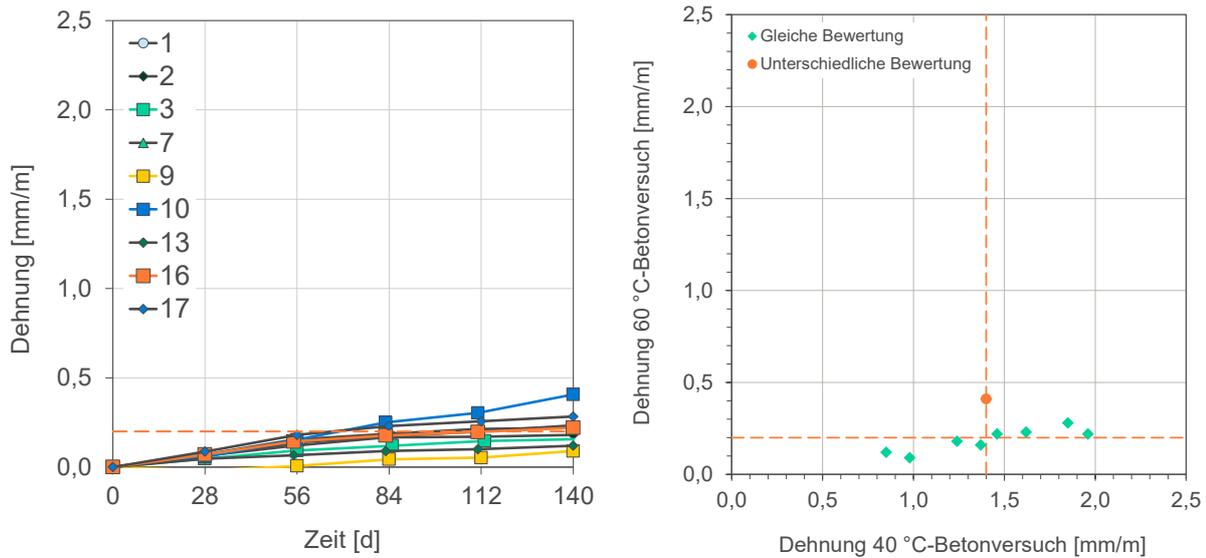
### Betone mit mittlerem $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des Portlandzements

Die Betone mit dem mittleren  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 0,91 % des Portlandzements (entspricht einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent im Beton von  $4,0 \text{ kg/m}^3$  aus dem Portlandzement) zeigten erwartungsgemäß deutlich geringere Dehnungen (**Bild 5**). Als Grenze wurden in Anlehnung an die französischen Kriterien für Performance-Prüfungen  $0,20 \text{ mm/m}$  angesetzt [AFNOR2004b]. Diese Grenze zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der  $40 \text{ °C}$ -Betonversuche mit Nebelkammerlagerung: 8 von 9 Gesteinskörnungen wurden im Beton gleich bewertet.

Die Dehnungen der Betone mit den Gesteinskörnungen Nr. 3 und 9 lagen nach 140 Tagen unter  $0,20 \text{ mm/m}$ . Wider Erwarten überschritt die Dehnung des Betons mit der Gesteinskörnung Nr. 10 mit  $0,41 \text{ mm/m}$  das Kriterium deutlich, so dass auf Basis dieses Ergebnisses die Gesteinskörnung als hoch reaktiv zu betrachten wäre. Die Dehnung im Außenlager (**Bild 8**) und in den Performance-Prüfungen deuten ebenfalls auf eine hohe Reaktivität der Gesteinskörnung Nr. 10 hin.

Die hohe Reaktivität der Gesteinskörnung Nr. 16 wurde im Betonversuch wie angenommen identifiziert, da die Dehnung mit  $0,22 \text{ mm/m}$  über dem Kriterium von  $0,20 \text{ mm/m}$  lag.

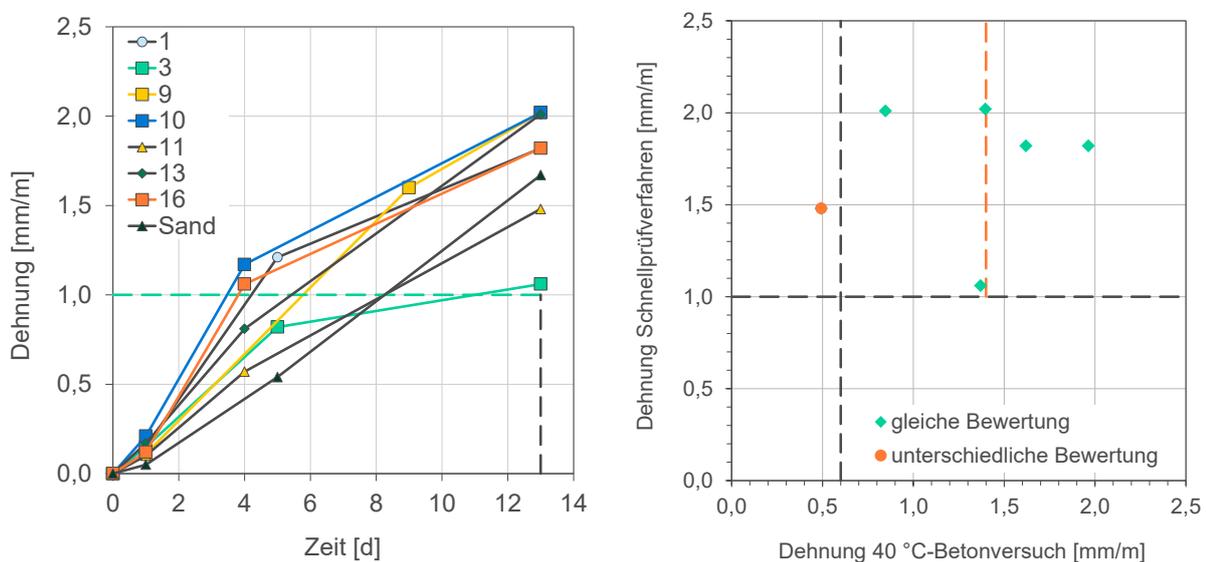
Die Ergebnisse bestätigen, dass die vom europäischen Forschungsprojekt „Partner“ [Lindgård2010] empfohlene Prüfung nach RILEM AAR-4.1 mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent im Beton von  $4,0 \text{ kg/m}^3$  aus dem Portlandzement [CEN2007] geeignet ist, zwischen einer mäßigen und einer hohen Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von Gesteinskörnungen zu differenzieren.



**Bild 6** Links: Dehnungen von Betonprismen in der 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1 mit einem mittlerem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 0,91 % des Zements (4,0 kg/m<sup>3</sup>), Rechts: Dehnungen im 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1 mit einem mittleren Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 0,91 % des Zements (4,0 kg/m<sup>3</sup>) in Abhängigkeit vom 40 °C-Betonversuch

### 3.1.5 Schnellprüfverfahren

Im Schnellprüfverfahren [DAfStb2013] lagen die Dehnungen von sieben groben Gesteinskörnungen über dem Grenzwert von 1,0 mm/m (**Bild 7**, links).



**Bild 7** Links: Dehnungen von Mörtelprismen mit verschiedenen groben Gesteinskörnungen und eines Sandes im Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie Rechts: Dehnungen im Schnellprüfverfahren und im 40 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie für verschiedene grobe Gesteinskörnungen

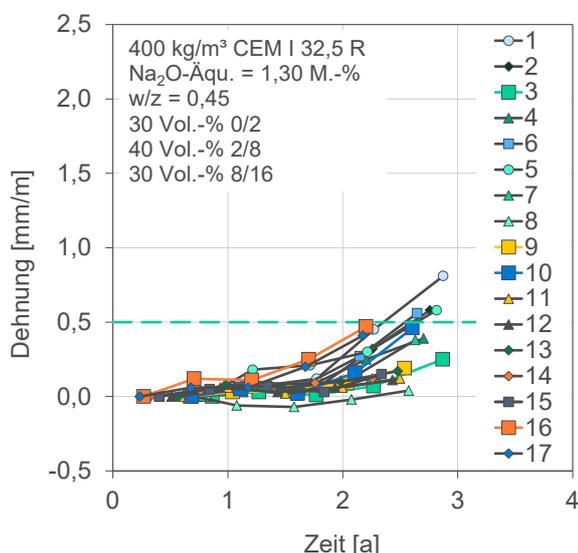
Der Sand hatte eine Dehnung von 1,1 mm/m. Die sieben groben Gesteinskörnungen wurden auf Grund der unterschiedlich hohen Dehnungen im 40 °C-Betonversuch ausgewählt. Ein Zusammenhang der Dehnungen im Schnellprüfverfahren und in der Nebelkammer ist nicht erkennbar, eine Vergleichbarkeit in der Bewertung aber sehr wohl: Sechs Gesteinskör-

nungen wurden gleichermaßen als alkali-reaktiv bewertet (**Bild 7**, rechts). Eine Unterteilung des Bereichs mit Dehnungen im Schnellprüfverfahren oberhalb einer Dehnung von 1,0 mm/m war auf Basis dieser Ergebnisse nicht sinnvoll.

### 3.1.6 Freilagerung

Parallel zu den 40 °C- und 60 °C-Betonversuchen wurden für die 17 groben Gesteinskörnungen Betonwürfel zur Lagerung im Freilager des VDZ hergestellt. Die Dehnungen und die Rissbreiten werden über das Ende der Projektlaufzeit hinaus gemessen und langfristig mit den Ergebnissen der Laborversuche verglichen. Die Würfel im Außenlager zeigten für einige Gesteinskörnungen bereits nach rund 2,5 Jahren deutliche Dehnungen (**Bild 8**).

Ab einer Dehnung von mehr als 0,50 mm/m kann von einer schädigenden AKR ausgegangen werden [Fournier2018]. Im europäischen "PARTNER" Projekt (2002-2006) überschritten die Dehnungen von Betonen mit hoch alkali-reaktiven Gesteinskörnungen diese Grenze innerhalb der ersten sechs Jahre. Tendenziell zeichnen sich in diesem Projekt nach etwa 2,5 Jahren zwei „Gruppen“ ab. Einige Gesteinskörnungen werden die Grenze im Alter zwischen 2 und 4 Jahren überschreiten. Dazu zählen die E III-S-Gesteinskörnung Nr. 16 und die potentielle E II-S-Gesteinskörnung Nr. 10. In der zweiten Gruppe ist ein Überschreiten des Grenzwertes noch nicht absehbar. Hierbei könnte es sich dann um die mäßig alkali-reaktiven Gesteinskörnungen handeln. In diese Gruppe könnten die potentiellen E II-S-Gesteinskörnungen Nr. 3 und Nr. 9 fallen. Nach sechs Jahren sollte eine neue Bewertung der Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens erfolgen.



**Bild 8** Dehnungen von Betonwürfeln im Außenlager für verschiedene grobe Gesteinskörnung in einer Betonzusammensetzung nach Alkali-Richtlinie mit 400 kg/m<sup>3</sup> CEM I 32,5 R, Na<sub>2</sub>O-Äqu. 1,30 M.-%, w/z = 0,45

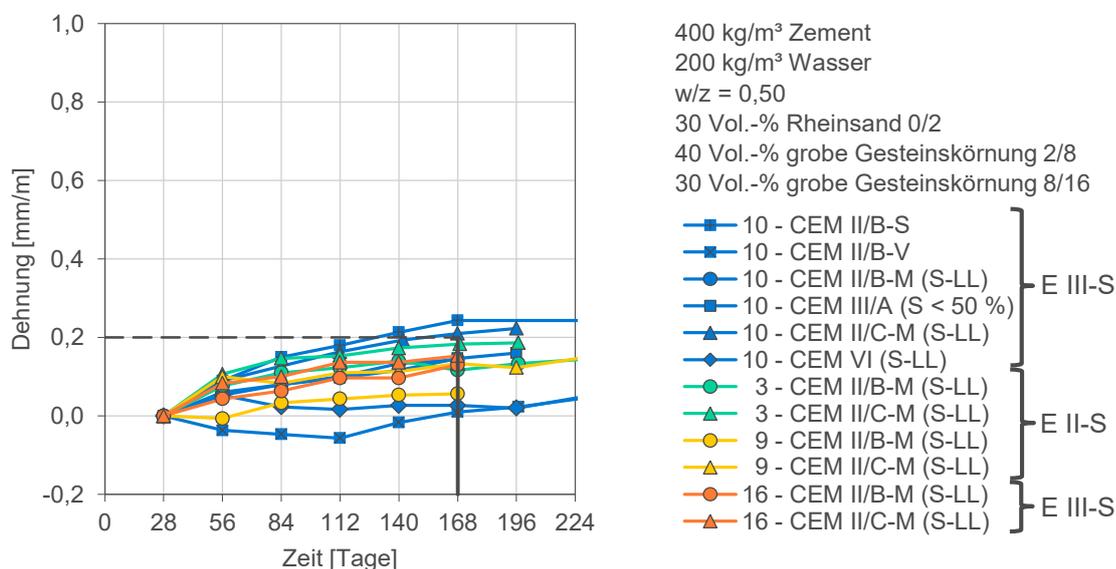
## 3.2 Validierung der Bewertungskriterien

### 3.2.1 Laborversuche (AKR-Performance-Prüfungen)

Mit den AKR-Performance-Prüfungen und den Betonversuchen mit Freilagerung wurden die für E II-S-Gesteinskörnungen vorgeschlagenen AKR-vorbeugenden Maßnahmen verifiziert. Dazu wurde der AKR-Widerstand von Betonen mit den potenziell mäßig alkali-reaktiven

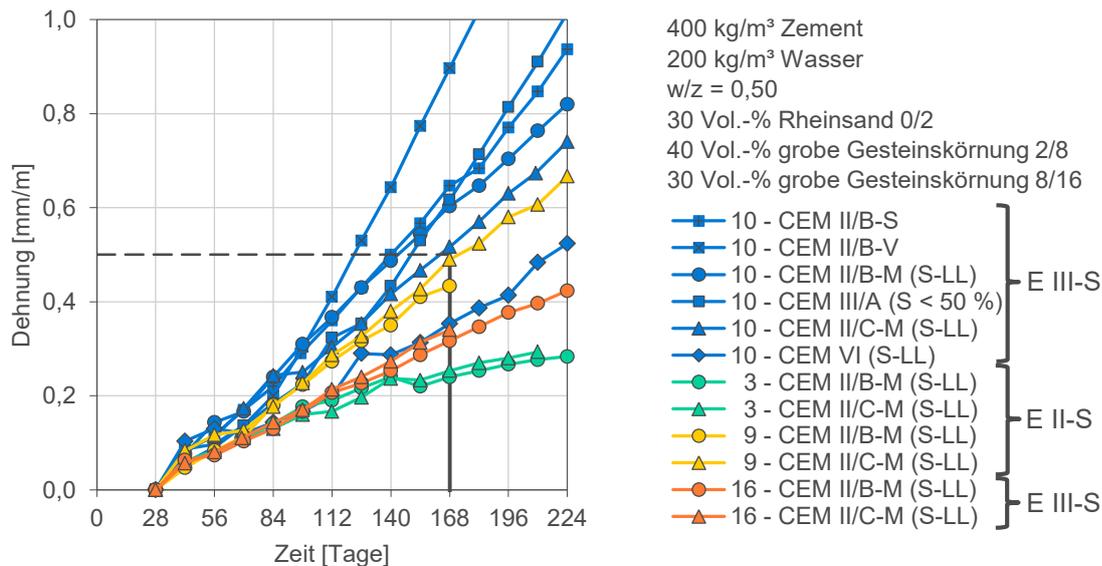
(E II-S-)Gesteinskörnungen Nr. 3 und Nr. 9 und der hoch alkali-reaktiven E III-S-Gesteinskörnung Nr. 16 in Kombination mit verschiedenen Zementen untersucht. Mit der Gesteinskörnung Nr. 10 wurden ebenfalls Betonversuche durchgeführt. Wegen der Dehnung im 40 °C-Betonversuch wurde diese am Anfang des Projekts als mäßig alkali-reaktiv bewertet. Auf Grund der Ergebnisse des Freilagerungsversuchs (Abschnitt 3.1.6, **Bild 8**) und des 60 °C-Betonversuchs nach RILEM AAR-4.1 mit einem mittleren Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Portlandzements (Abschnitt 3.1.4, **Bild 5** links) wurde die Gesteinskörnung Nr. 10 gegen Ende des Projektes als hoch alkali-reaktiv klassifiziert.

Im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr lagen die Dehnungen der Betone mit zwei Ausnahmen unter dem Bewertungskriterium von 0,20 mm/m (**Bild 9**). Nur die Betone mit der Gesteinskörnung Nr. 10 in Kombination mit dem CEM II/B-S und CEM II/C-M (S-LL) überschritten die Grenze knapp, was abermals die hohe Alkali-Reaktivität der Gesteinskörnung Nr. 10 bestätigt.



**Bild 9** Dehnungen von Betonprismen im 60 °C-Betonversuch (ohne Alkalizufuhr), 28 Tage Vorlagerung bei 20 °C über Wasser

Die 60 °C-Betonversuche mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige Natriumchlorid-Prüflösung bestanden alle Betone mit den E II-S-Gesteinskörnungen Nr. 3 und Nr. 9 (**Bild 10**). Fünf Betone mit der Gesteinskörnung Nr. 10 und in Kombination mit Zementen, die im Lösungsverfahren Hydroxidionenkonzentrationen über 200 mmol/l aufwiesen (**Tabelle 6**), bestanden die Prüfung nicht. Nur mit dem CEM VI (S-LL), der als einziger Zement mit Hydroxidionenkonzentrationen von 187 mmol/l im Lösungsverfahren und von 421 mmol/l im Auspressverfahren einem NA-Zement entspricht, lag die Dehnung unter der Grenze von 0,50 mm/m. Dies spricht dafür, dass die Gesteinskörnung Nr. 10 den hoch alkali-reaktiven Gesteinskörnungen zuzuordnen ist und ein NA-Zement als Maßnahme erforderlich ist. Die Betone mit der E III-S-Gesteinskörnung Nr. 16 wiesen Dehnungen unter dem Grenzwert von 0,50 mm/m auf, obwohl sich der Beton mit dieser Gesteinskörnung im Freilagerungsversuch (Gesteinskörnungsprüfung mit CEM I mit Na<sub>2</sub>O-Aquivalent 1,30 %) am schnellsten dehnte und die Gesteinskörnung hoch alkali-reaktiv ist.



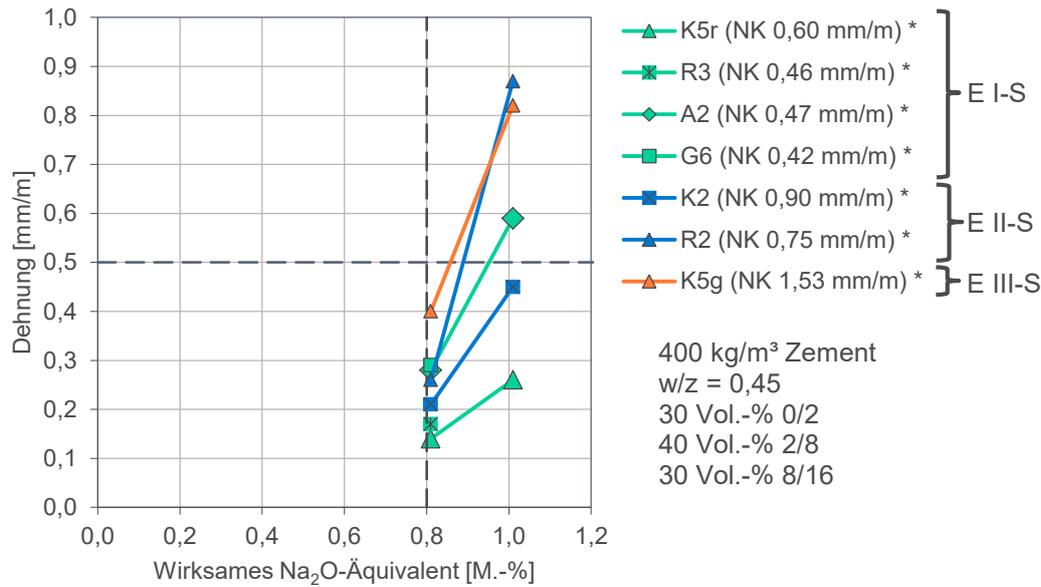
**Bild 10** Dehnungen von Betonprismen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung

### 3.2.2 Gegenüberstellung Lösungsverfahren und Betonversuche

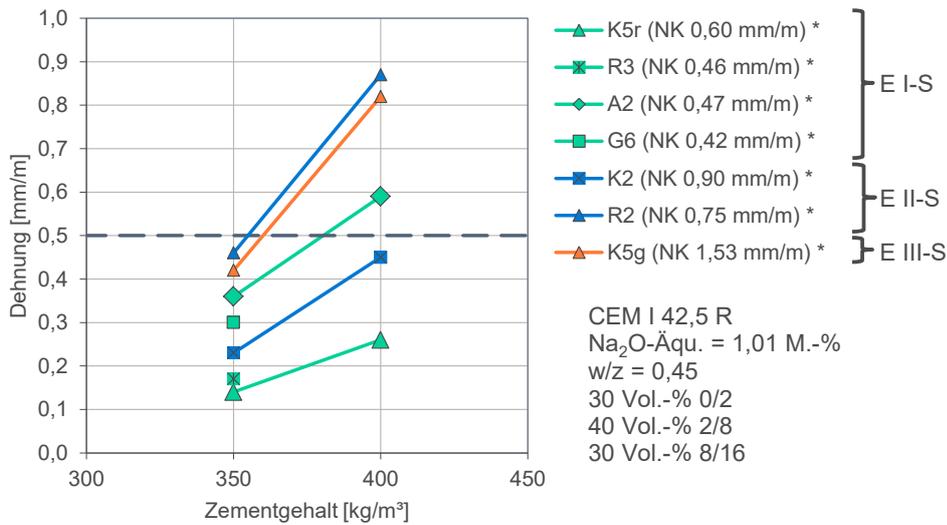
Die Ergebnisse des IGF-Vorhabens 17248 BG [Müller2015] zeigten (**Bild 11**), dass mit sinkendem wirksamen Na<sub>2</sub>O-Äquivalent der Portlandzemente die Dehnungen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung bei allen Gesteinskörnungen abnahmen. Bei einem wirksamen Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Zementes von rund 0,81 M.-% und bei 400 kg/m<sup>3</sup> Zement lagen die Dehnungen unter dem Bewertungskriterium von 0,50 mm/m [Borchers2014]. Auch eine Verringerung des Zementgehalts von 400 kg/m<sup>3</sup> auf 350 kg/m<sup>3</sup> reduzierte die Dehnungen (**Bild 12**), so dass bei 350 kg/m<sup>3</sup> Portlandzement mit einem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 1,01 M.-% die Dehnungen das Bewertungskriterium nicht mehr überschritten.

Im Projekt wurde daher die Grenze von 0,80 M.-% für das wirksame Na<sub>2</sub>O-Äquivalent für verschiedene klinkereffiziente Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen sowie für weitere Gesteinskörnungen überprüft. Bei Werten ≤ 0,80 M.-% waren die Dehnungen der Betone mit den Gesteinskörnungen Nr. 3, 9 und 16 und 400 kg/m<sup>3</sup> Zement in 60 °C-Betonversuchen mit Alkalizufuhr unterhalb des Bewertungskriteriums von 0,50 mm/m (**Bild 13**, oben). Eine Ausnahme waren die Betone mit der Gesteinskörnung Nr. 10, die zum Ende des Projekts aufgrund der Betonversuche mit Freilagerung und nach RILEM AAR-4.1 als hoch alkali-reaktiv bewertet wurden. Fünf der sechs Betone dehnten sich mehr als 0,50 mm/m und überschritten das Bewertungskriterium, was die hohe Alkali-Reaktivität bestätigte.

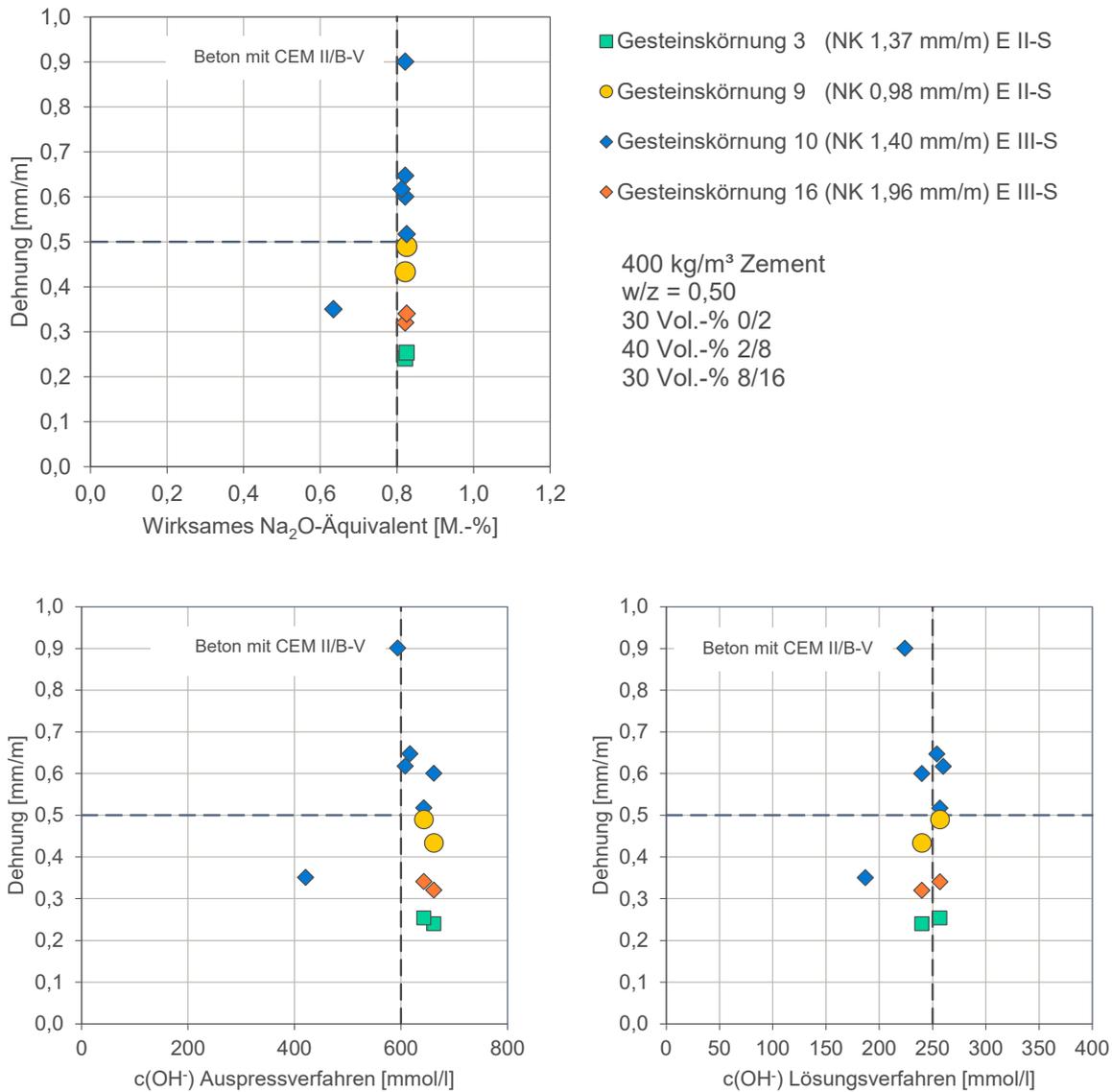
Zusätzlich zum wirksamen Alkaligehalt wurden Kriterien für die Hydroxidionenkonzentration im Auspress- und im Lösungsverfahren abgeleitet (**Bild 13**, unten und **Bild 1** auf Seite 5). Mit Ausnahme der Betone mit der Gesteinskörnung 10 waren die Dehnungen unkritisch, wenn die Hydroxidionenkonzentration der Zemente in Alter von 28 Tagen ≤ 600 mmol/l im Auspressverfahren und ≤ 250 mmol/l im Lösungsverfahren waren.



**Bild 11** Dehnung von Betonprismen nach 10 Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige NaCl-Lösung für verschiedene grobe Gesteinskörnungen (NK: Dehnung im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung) und verschiedene Zemente in Abhängigkeit vom wirksamen Na<sub>2</sub>O-Äquivalent der Zemente, \* Daten aus IGF-Vorhaben 17248 BG [Müller2015]



**Bild 12** Dehnung von Betonprismen nach 10 Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige NaCl-Lösung für verschiedene grobe Gesteinskörnungen (NK: Dehnung im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung) in Abhängigkeit vom Zementgehalt, \* Daten aus IGF-Vorhaben 17248 BG [Müller2015]



**Bild 13** Dehnung von Betonprismen nach 10 Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige NaCl-Lösung für verschiedene grobe Gesteinskörnungen (NK: Dehnung im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung) und verschiedene Zemente in Abhängigkeit  
 Oben: vom wirksamen Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Zements  
 Unten links: von der Hydroxidionenkonzentration im Auspressverfahren (Alter 28 Tage)  
 Unten rechts: von der Hydroxidionenkonzentration im Lösungsverfahren (Alter 28 Tage)

### 3.2.3 Verifizierung durch alte Freilagerungsversuche

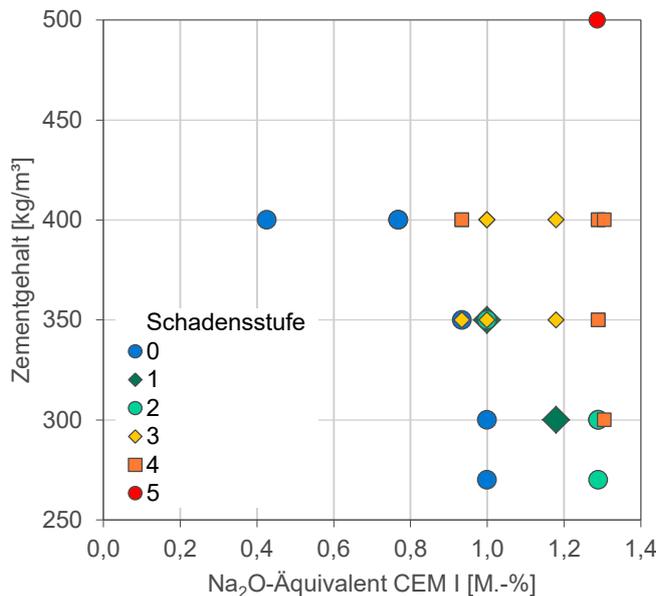
Zur Überprüfung der Bewertungskriterien wurden aus dem IGF-Vorhaben 12539 [Borkern2002] Betone mit Gesteinskörnungen ausgewählt, die mit dem alkalireichen AKR-Prüfzement in Betonversuchen mit Nebelkammerlagerung Dehnungen zwischen 1,49 mm/m und 1,64 mm/m aufwiesen. In dem Vorhaben waren Betone mit verschiedenen Kiesen und gebrochenen Kiesen vom Oberrhein hergestellt worden, die seit 17 bis 18 Jahren im Freilager des VDZ lagern.

**Bild 14** zeigt die aktuellen Schadensstufen der Würfel (**Tabelle 9**) in Abhängigkeit vom Na<sub>2</sub>O-Äquivalent der Portlandzemente und vom Zementgehalt im Beton. Bis zu einem maximalen

Zementgehalt von 400 kg/m<sup>3</sup> waren die Betone der Feuchtigkeitsklasse WF (feucht) schadenfrei (Schadensstufe 0), wenn das Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Portlandzements ≤ 0,77 M.-% betrug. Da bei Portlandzement das Gesamt-Na<sub>2</sub>O-Äquivalent dem wirksamen Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Zements gemäß der Definition des IGF-Vorhabens 19295 N [Borchers2021a] entspricht, können diese Ergebnisse auch auf hüttensand- und kalksteinhaltige Zemente übertragen werden. Damit bestätigen die Freilagerungsversuche die in Laborversuchen abgeleitete Grenze von 0,80 M.-% für das wirksame Na<sub>2</sub>O-Äquivalent, zur Vermeidung einer schädigenden AKR in Betonen mit mäßig alkali-reaktiven Gesteinskörnungen. Bei einem Zementgehalt ≤ 300 kg/m<sup>3</sup> traten AKR-Schäden erst ab Na<sub>2</sub>O-Äquivalenten des Portlandzements von größer 1,00 M.-% auf. Dies sollte bei der Festlegung von vorbeugenden Maßnahmen berücksichtigt werden.

**Tabelle 9** Schadenskategorie gemäß [Bonzel1973, Bonzel1986]

Schadensstufe	Rissbild von Balken oder Würfeln der Außen- oder der Nebelkammerlagerung	Dehnungen von Prismen bei Nebelkammerlagerung [mm/m]
0	keine Risse	< 0,3
1	einzelne feine Risse	0,3 bis 0,5
2	mehrere feine Risse	0,5 bis 0,8
3	einige größere Risse (über 0,2 mm Rissweite), teilweise auch feine Risse	0,8 bis 1,5
4	mehrere größere und feine Risse	1,5 bis 3
5	sehr starke Rissbildung auf allen Flächen	> 3



**Bild 14** Schadensstufe von Betonwürfeln (Tabelle 9) im Alter von 17 bis 18 Jahren im Außenlager in Abhängigkeit vom Na<sub>2</sub>O-Äquivalent der Portlandzemente und vom Zementgehalt im Beton, Gesteinskörnungen mit Dehnungen im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (400 kg/m<sup>3</sup> CEM I mit Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 1,29 bzw. 1,31 M.-%) zwischen 1,49 mm/m und 1,64 mm/m

## 4 Zusammenfassung

Die sogenannten „weiteren“ Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie sind in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (nicht alkali-reaktiv) oder in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S (alkali-reaktiv) einzustufen. Eine Klasse für mäßig alkali-reaktive Gesteinskörnungen (E II-S), wie es sie z. B. in Canada, England und den USA gibt, konnte bisher für Deutschland nicht definiert werden. In diesem Vorhaben wurden nunmehr Kriterien erarbeitet, um die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S in die zwei Klassen „E II-S“ und „E III-S<sup>neu</sup>“ aufteilen und die Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von Gesteinskörnungen differenzierter beschreiben zu können. Die weitere Differenzierung alkali-reaktiver Gesteinskörnungen verfolgt das Ziel, regional verfügbare stoffliche Ressourcen für Beton noch effizienter nutzen zu können. Grenzwerte für die Bewertung der Gesteinskörnung in AKR-Prüfverfahren sowie auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktivität der Gesteinskörnung ausgelegte vorbeugende Maßnahmen wurden erarbeitet.

### Gesteinskörnungsprüfungen und Kriterien für E II-S

17 grobe Gesteinskörnungen wurden mit dem 40 °C- und dem 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie untersucht. Anschließend wurden einige Gesteinskörnungen ausgewählt und mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie sowie dem 60 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-4.1 in zwei Varianten geprüft. Die 60 °C-Betonversuche nach RILEM AAR-4.1 wurden mit einem mittleren (0,91 M.-%) und einem hohen Na<sub>2</sub>O-Äquivalent (1,25 M.-%) des Portlandzements durchgeführt. Die Ergebnisse der Gesteinskörnungsprüfungen wurden miteinander verglichen, um Grenzwerte zur Differenzierung zwischen mäßig und hoch alkali-reaktiven Gesteinskörnungen ableiten zu können. Die Verfahren sollten möglichst häufig dieselbe Bewertung der Alkali-Reaktivität aufweisen.

Beim Vergleich der Ergebnisse des 40 °C- und des 60 °C-Betonversuchs zeigte sich, dass relativ hohe Dehnungen der Betone bei Verwendung des Portlandzements mit dem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 1,30 M.-% wenig korrelierten. In der Folge würde es häufig zu unterschiedlichen Bewertungen kommen, wenn Grenzwerte auf einem hohen Dehnungsniveau festgelegt würden. Die Prüfungen sollten daher mit einem Portlandzement mit einem mittleren Na<sub>2</sub>O-Äquivalent durchgeführt werden, weil die Bewertung dann auf einem geringeren Dehnungsniveau erfolgen würde.

Für das Schnellprüfverfahren konnte kein Bewertungskriterium zur Unterscheidung zwischen mäßig und hoch reaktiven Gesteinskörnungen empfohlen werden, da bei den untersuchten Gesteinskörnungen Dehnungen in einer Höhe auftraten, die keinen Zusammenhang zur Dehnung im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung erkennen ließen.

RILEM empfiehlt für diesen Fall den 38 °C-Betonversuch nach RILEM AAR-3 mit einem mittleren Alkaligehalt des Zements [Nixon2016]. Das europäische Forschungsprojekt „Partner“ [Lindgård2010] empfahl den europäischen Normungsgremien CEN/TC154 und CEN/TC104 den 60 °C-Betonversuch nach AAR-4.1 [CEN2007]. In diesem Projekt bildeten die 60 °C-Betonversuche mit einem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Portlandzements von 0,91 M.-% das Verhalten der Betone nach 2,5 Jahren im Freilager besser ab als die 40 °C-Betonversuche mit Nebelkammerlagerung unter Verwendung des Portlandzements mit einem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 1,30 M.-%. Daher wird der 60 °C-Betonversuch mit dem mittleren Na<sub>2</sub>O-Äquivalent aus dem Portlandzement von 4,0 kg/(m<sup>3</sup> Beton) und mit einem Grenzwert für die Dehnung von

≤ 0,20 mm/m nach 140 Tagen als Prüfverfahren zur Unterscheidung mäßig und hoch reaktiver Gesteinskörnungen empfohlen.

Auf Basis der Ergebnisse der Gesteinskörnungsprüfungen wurden zwei mäßig und zwei hoch alkalireaktive Gesteinskörnungen für die AKR-Performance-Prüfungen ausgewählt.

### AKR-Performance-Prüfungen und Auswertung von Freilagerungsversuchen

Insgesamt 12 Betone wurden mit den zwei mäßig und zwei hoch reaktiven Gesteinskörnungen in Kombination mit verschiedenen Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen hergestellt. Der AKR Widerstand dieser Betone wurde mit verschiedenen AKR-Performance-Prüfungen untersucht, um AKR-vorbeugende Maßnahmen abzuleiten. Im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung lagen die Dehnungen der Betone unter dem Bewertungskriterium, wenn das wirksamer Na<sub>2</sub>O-Äquivalent der Zemente ≤ 0,80 M.-% betrug. Diese Grenze konnte auch mit Betonen bestätigt werden, die seit 17 bis 18 Jahren im Freilager lagern.

Ergänzend zu den Betonversuchen im Labor (Gesteinskörnungs- und AKR-Performance-Prüfungen) wurden Betonwürfel hergestellt, die im Freilager des VDZ lagern. Die Dehnungen werden über das Ende der Projektlaufzeit hinaus gemessen, um die Ergebnisse dieses Projekts zukünftig verifizieren zu können.

### Empfehlung AKR-vorbeugender Maßnahmen

Als Ergebnis dieses Projektes werden für Betone mit mäßig alkali-reaktiven Gesteinskörnungen die AKR-vorbeugenden Maßnahmen gemäß **Tabelle 10** empfohlen. Bezogen auf die Ergebnisse der 60 °C-Betonversuche mit einer Alkalizufuhr beinhalten die vorgeschlagenen Maßnahmen der Feuchtigkeitsklasse WA zwei zusätzliche Sicherheitselemente: Das wirksame Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von ≤ 0,80 M.-% wird bis zu einem Zementgehalt von ≤ 350 kg/m<sup>3</sup> empfohlen und bei einem Zementgehalt ≤ 400 kg/m<sup>3</sup> wird das wirksame Na<sub>2</sub>O-Äquivalent der Zemente auf ≤ 0,60 M.-% begrenzt.

**Tabelle 10** Empfehlungen für vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton mit mäßig alkali-reaktiven Gesteinskörnungen einer potenziellen Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S

	Feuchtigkeitsklasse	Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	Na <sub>2</sub> O-Äquivalent CEM I [M.-%]	Wirksames Na <sub>2</sub> O-Äquivalent S- und LL-haltiger Zemente [M.-%]	c(OH <sup>-</sup> ) Auspressverfahren [mmol/l]	c(OH <sup>-</sup> ) Lösungsverfahren [mmol/l]
1	WF	≤ 300	≤ 1,00	≤ 1,00	≤ 700	≤ 300
2		≤ 400	≤ 0,80	≤ 0,80	≤ 600	≤ 250
3	WA	≤ 350	≤ 0,80	≤ 0,80	≤ 600	≤ 250
4		≤ 400	≤ 0,60	≤ 0,60	≤ 500	≤ 200

Die Maßnahmen wurden in Abhängigkeit des im IGF-Vorhaben 19842 N [Borchers2021a] definierten „wirksamen Na<sub>2</sub>O-Äquivalents des Zements“ festgelegt, da dieser Kennwert auch auf klinkereffiziente Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen anwendbar ist und diese in Deutschland einen Anteil von 73 % [VDZ2020a] des Zementversands ausmachen. Das wirksame Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des Zements ergibt sich aus den Alkalien des Klinkers, der Nebenbestandteile und des Sulfatträgers bezogen auf die Zementmenge und wird aus dem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent des (Gesamt-)Zements abzüglich der anteiligen Na<sub>2</sub>O-Äquivalente des

Hüttensandes und des Kalksteines berechnet. Dieser Kennwert wurde für die werkseigene Produktionskontrolle entwickelt.

Die Eignung der Zemente kann alternativ mit dem Auspress- oder dem Lösungsverfahren nachgewiesen werden. Dazu werden im Prüfalter von 28 Tagen Hydroxidionenkonzentrationen von  $\leq 600$  mmol/l im Auspressverfahren und von  $\leq 250$  mmol/l im Lösungsverfahren für Zemente zur Vermeidung einer schädigenden AKR in Betonen mit mäßig alkali-reaktiven Gesteinskörnungen vorgeschlagen. Aufgrund der Prüfdauer sind diese Verfahren besonders für die Fremdüberwachung geeignet.

## 5 Literaturverzeichnis

- [AFNOR2004a] NF P18-454:2004-12-01, Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction – Essai de performance, Association Française de Normalisation, Paris, 2004
- [AFNOR2004b] FD P18-456:2004-11-01, Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali réaction – Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance, Association Française de Normalisation, Paris, 2004
- [Bokern2002] Bokern, J.; Siebel, E.: Beurteilung der Auswirkung von Oberrhein-Zuschlag auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton. Schlussbericht zum AiF-Vorhaben Nr. 12539 N/1. 2002
- [Bonzel1973] Bonzel, J.; Dahms, J.: Alkalireaktion im Beton. In: beton 23 (1973) 11, S. 495-500 und H. 12, S. 547-554
- [Bonzel1986] Bonzel, J.; Krell, J.; Siebel, E.: Alkalireaktion im Beton. In: beton 36 (1986) 9, S. 345-348; 10, S. 385-388
- [Borchers2014] Borchers, I.; Müller, Ch.: Praxisgerechte Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA in AKR-Performance-Prüfungen. In: Beton 64 (2014) 10, S. 403-409
- [Borchers2021a] Borchers, Ingmar; Müller, Christoph. Prüfung und Bewertung des wirksamen Alkaligehalts von Zementen: IGF-Vorhaben 19295 N. 2021 (<https://vdz.info/8f6mq>)
- [Borchers2021b] Borchers, I.; Lindgård, J.; Müller, C: Evaluation of laboratory test methods for assessing the alkali reactivity potential of aggregates by field site tests. In: Lopes Batista, António; Santos Silva, António; Fernandes, Isabel; Oliveira Santos, Luís; Custódio, Joao; Serra, Carlos, Hrsg. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete : Volume I (Lissabon 2021-2022.) Lisboa: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, LNEC, 2021, S. 699-710
- [Borchers2021c] Borchers, I.; Lindgård J.; Rønning T. F.; Wigum, B. J.: Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-11: 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. Materials and Structures, (in press)
- [BRE2004] Building Research Establishment, BRE, Hrsg. Alkali-silica reaction in concrete : Background to the guidance notes. Watford, 2004 (Digest 330 : Part 1)

- [CEN2007] CEN/TC 104 N 810: Executive summary of the final report of the PARTNER project and recommendations to CEN/TC154 and CEN/TC104, 2007
- [DAfStb2013] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton : Alkali-Richtlinie. Berlin : Beuth, 2013
- [Dressler2013] Dressler, Anne: Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton. Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt (BGU), 2013
- [Fournier2018] Fournier B, Lindgård J, Wigum B, Borchers I (2018) Outdoor exposure site testing for preventing Alkali-Aggregate Reactivity in concrete – a review. MATEC Web Conf. 199 03002 (2018), DOI: 10.1051/mateconf/201819903002
- [Ideker2012] Ideker, Jason H.; Drimalas, Thanos; Fournier, Benoit; Thomas, M.D.; Folliard, Kevin J.; Hooton, R. Douglas: The importance of exposure site testing. In: Drimalas, Thanos; Ideker, Jason H.; Fournier, Benoit (Hrsg): 14th international conference on alkali-aggregate reactions : Proceedings (Austin, Tx. 20.-25.05.2012). Austin, 2012
- [Lindgård2010] Lindgård, J., Nixon, P.J., Borchers, I., Schouenborg, B., Wigum, B.J., Haugen, M., Åkesson, U.: The EU "PARTNER" Project - European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations, Cement and Concrete Research, 40 (2010) pp. 611-635
- [Nixon2016] Nixon, Philip J., Sims, Ian (Eds.): RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures, State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 219-ACS, Springer Verlag 2016
- [SIA2012] Merkblatt SIA 2042: Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten, 2012
- [Thomas2006] Thomas, Michael; Fournier, Benoit; Folliard, Kevin J.; Ideker, Jason; Shehata, Medhat: Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete. In: Cement and Concrete Research 36 (2006) 10, S.1842-1856
- [TPB1.1.09] TP Beton-StB Teil 1.1.09: Technischen Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen – Teil 1.1.09, AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (60 °C-Beton-versuch mit Alkalizufuhr). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2018
- [VDZ2014] Auszug aus Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Portlandflugaschzement als NA-Zement des Deutschen Instituts für Bautechnik. Fassung September 2011(unveröffentlicht)
- [Müller2015] Müller, C.; Hüniger, K.-J.; Borchers, I.; Kronemann, J.: AKR-Gesteinskörnungs-Prüfungen: Erweiterung der Datenbasis mit dem

BTU-SP-Schnelltest unter besonderer Berücksichtigung vorbeugender Maßnahmen gegen eine schädigende Alkalireaktion im Beton bei Verwendung von E II-Gesteinskörnungen, IGF-Forschungsvorhaben 17248 BG. Düsseldorf , 2015 (<https://vdz.info/16569n>)

[VDZ2020]

Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Zahlen und Daten - Zementindustrie in Deutschland. 2020

### **Förderhinweis**

Das IGF-Vorhaben 19842 N der VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.