

IGF-Vorhaben: 17248 BG

Bewilligungszeitraum: 01.08.2011 - 31.12.2014

Forschungsthema: AKR-Gesteinskörnungs-Prüfungen: Erweiterung der Datenbasis mit dem BTU-SP-Schnelltest unter besonderer Berücksichtigung vorbeugender Maßnahmen gegen eine schädigende Alkali-reaktion im Beton bei Verwendung von E II-Gesteinskörnungen

1 Einleitung und Forschungsziel

Die Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [DAf13] fordert bei alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen (Alkaliempfindlichkeitsklassen: E II-O, E II-OF, E III-O, E III-OF und E III-S) Maßnahmen in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsklasse des Bauteils und vom Zementgehalt (**Tabelle 1**). Diese sind bisher der Austausch der Gesteinskörnung oder die Verwendung von Zementen mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt (NA-Zementen nach DIN 1164-10) (**Tabelle 2**). Um noch differenziertere Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden infolge einer AKR entwickeln und damit die regional verfügbaren stofflichen Ressourcen effizienter nutzen zu können, kann die Einführung einer Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S auch für die „weiteren Gesteinskörnungen“ gemäß Ausgabe 2013 [DAf13] bzw. nach Teil 3 gemäß Ausgabe 2007 [DAf07] der Alkali-Richtlinie sinnvoll sein. Während bei Gesteinskörnungen mit Opalsandstein einschließlich Kieselkreide und Flint eine solche Einstufung (E II-O, E II-OF) schon seit 1974 mit der Einführung der „Vorläufigen Alkali-Richtlinie“ [DAf74] existiert, wurde eine Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S bisher nicht definiert, weil die bisherigen Untersuchungsergebnisse eine so weitgehende Differenzierung nicht zuließen.

Tabelle 1 Vorbeugenden Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton gemäß [DAf13]

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt kg/m ³	Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse		
		WO (trocken)	WF (feucht)	WA (feucht + Alkalizufuhr)
E I, E I-O, E I-OF, E I-S	ohne Festlegung	keine		
E II-O	≤ 330	keine		NA-Zement
E III-O		keine	NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung
E II-OF	> 330	NA-Zement		
E III-OF		keine	NA-Zement	Austausch der Gesteinskörnung
E III-S	≤ 300	keine		
	≤ 350	keine		Performance Prüfung ¹⁾ oder NA-Zement
	> 350	keine	Performance-Prüfung ¹⁾ oder NA-Zement	Performance Prüfung ¹⁾ oder Austausch der Gesteinskörnung
¹⁾ Bis auf Weiteres erfolgt die Festlegung von vorbeugenden Maßnahmen auf Grundlage eines Gutachtens.				

Der VDZ und die Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg (BTU) untersuchten deshalb, ob es möglich ist, auf der Basis des 40 °C-Betonversuchs mit Nebel-

kammerlagerung eine Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S zu definieren. Darüber hinaus wurden auch Kriterien für das Schnellprüfverfahren und den 60 °C-Betonversuch sowie den BTU-SP-Schnelltest abgeleitet.

Darauf aufbauend wurden auf die potenziellen E II-S-Gesteinskörnungen abgestimmte Maßnahmen erarbeitet, mit denen eine betonschädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) vermieden werden kann.

Tabelle 2 Zusätzliche Anforderungen an NA-Zemente nach DIN 1164-10

Zementart	Hüttensandgehalt [M.-%]	Anforderungen an das Na ₂ O-Äquivalent [M.-%]
CEM I, CEM II (außer CEM II/B-S) CEM IV, CEM V	ohne Angabe	≤ 0,60
CEM II/B-S	20 bis 35	≤ 0,70
CEM III/A	36 bis 49	≤ 0,95
	50 bis 65	≤ 1,10
CEM III/B	66 bis 80	≤ 2,00
CEM III/C	81 bis 95	

2 Untersuchungen

2.1 Vorgehen

Die BTU Cottbus-Senftenberg untersuchte die Alkaliaktivität von 17 deutschen Gesteinskörnungen mit dem Schnellprüfverfahren, der Nebelkammerlagerung (40 °C) und dem 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie [DAf13]. Auf der Basis der Ergebnisse der 40 °C- Nebelkammerlagerung wurden Orientierungswerte für die Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S zur Kategorisierung mittel alkalireaktiver Gesteinskörnungen abgeleitet.

Die Ergebnisse der Prüfungen wurden mit den Ergebnissen der Nebelkammerlagerung (Referenzverfahren) verglichen. Für das Schnellprüfverfahren und den 60 °C-Betonversuch wurden schließlich Orientierungswerte mit dem Ziel definiert, dass kein anderes Verfahren zu einer günstigeren Einstufung kommen darf als die Nebelkammerlagerung.

Zusätzlich wurden 31 Gesteinskörnungen mit dem BTU-SP-Schnelltest geprüft. Für dieses Verfahren wurde ein Grenzwert für E I-S- und potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen abgeleitet.

Der VDZ leitete für potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen die Maßnahmen durch AKR-Performance-Prüfungen an Betonen ab. Die Betone wurden mit drei Portlandzementen und sieben Gesteinskörnungen hergestellt. 20 Betone für die Feuchtigkeitsklasse WF (feuchte Umgebung) und 24 Betone für die Feuchtigkeitsklasse WA (feuchte Umgebung + Alkalizufuhr von außen, z. B. durch Tausalz) wurden mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen (WA) und ohne Alkalizufuhr (WF) geprüft. Die Untersuchungen für die Feuchtigkeitsklasse WA wurden i. d. R. mit zwei Natriumchlorid-Konzentrationen (3%ige und 10%ige Prüflösung) durchgeführt. Die Maßnahmen gemäß **Tabelle 3** wurden als Arbeitshypothese angenommen.

Tabelle 3 Arbeitshypothese zur Ableitung vorbeugender Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt kg/m ³	Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse		
		WO (trocken)	WF (feucht)	WA (feucht + Alkalizufuhr)
E II-S	≤ 300	keine		
	≤ 350	keine		keine
	> 350	keine	keine	NA-Zement

2.2 Ausgangsstoffe und Betone

Gesteinskörnungen

31 Gesteinskörnungen wurden in den Korngruppen 2/8 und 8/16 geliefert. Die Beton für die Betonversuche mit Nebelkammerlagerung, die 60 °C-Betonversuche und die AKR-Performance-Prüfungen wurden Natursand 0/2 (Rheinsand) der Alkaliempfindlichkeitsklasse E I eingesetzt.

Zemente und Flugasche

Zur Herstellung der Betone wurden Zemente gemäß **Tabelle 4** verwendet. Als Zementhauptbestandteile zur Herstellung von Laborzementen wurden der Hüttensand S und Kalkstein LL gemäß **Tabelle 5** eingesetzt.

Der Portlandkomposit- und der Hochofenzement wurden im Labor durch Mischen mit dem Portlandzement CEM I 32,5 R (Nr. 1, **Tabelle 4**) hergestellt. Das Na₂O-Äquivalent des Portlandzements wurde durch Zugabe von Kaliumsulfat zum Zugabewasser auf ein Na₂O-Äquivalent von 1,20 M.-% erhöht. Dadurch wurde erreicht, dass im Portlandkomposit- und im Hochofenzement der gleiche Klinker mit einem hohen Alkaligehalt vorhanden war.

Die Flugasche FA gemäß **Tabelle 5** wurde als Zusatzstoff für einen typischen Transportbeton verwendet. Die Flugasche wurde mit $k_f = 0,4$ auf den äquivalenten Wasserzementwert angerechnet.

Tabelle 4 Zemente, Zusammensetzung und Na₂O-Äquivalent

Nr.	Zement	Anteil ¹⁾ /Bestandteil [M.-%]	Na ₂ O-Äquivalent [M.-%]
1	CEM I 32,5 R	-	1,30 ³⁾
2	CEM I 42,5 R	-	1,01
3	CEM I 42,5 N	-	0,81
4	CEM I 32,5 R	-	1,30 ³⁾
5	CEM I 32,5 R	-	1,20 ³⁾
6	CEM II/B-M (S-LL) ²⁾	65 % CEM I 32,5 R (Nr. 5) + 20 % S + 15 % LL	1,20 ³⁾ bezogen auf CEM I 0,97 Gesamtzement
7	CEM III/A ²⁾	60 % CEM I 32,5 R (Nr. 5) + 40 % S	1,20 ³⁾ bezogen auf CEM I 1,09 Gesamtzement

¹⁾ Anteil bezogen auf den sulfatträgerfreien Zement
²⁾ Laborzement
³⁾ Na₂O-Äquivalent durch Zugabe von K₂SO₄ eingestellt

Tabelle 5 Chemische Zusammensetzung, Blaine-Wert von Hüttensand (S), Kalkstein (LL) und Steinkohlenflugasche (FA)

		S	LL	FA
Blaine [cm ² /g]		4050	n. b.	3100
Chemische Zusammen- setzung glühverlusthaltig [M.-%]	Calciumoxid	54,2	38,8	5,1
	Silizium(IV)-oxid	0,94	36,2	48,2
	Aluminiumoxid	0,21	11,9	23,2
	Kaliumoxid	0,03	0,60	2,30
	Natriumoxid	0,01	0,53	0,96
Natriumäquivalent		0,03	0,92	2,47
Glasgehalt Hüttensand [M.-%]		96	-	-
Methylenblau Wert [g/100g Füller]	nach DIN EN 933-9	0,07	-	-
Reaktionsfähige Kieselsäure [%]	wie def. in EN 197-1	-	-	36,43

Betone

Die Betone für die AKR-Performance-Prüfungen wurden in Anlehnung an die Betonversuche nach Alkali-Richtlinie zusammengesetzt (siehe **Tabelle 6**). Außerdem wurde ein typischer Transportbeton der Festigkeitsklasse C30/37 mit 320 kg/m³ Zement, 80 kg/m³ Flugasche und einem äquivalenten Wasserzementwert von 0,49 ($k_f = 0,4$) untersucht. Die Daten wurden [BTB08] entnommen.

Tabelle 6 Betonzusammensetzungen

	Betonrezeptur 1	Betonrezeptur 2
Zement	400 kg/m ³	350 kg/m ³
Wasser	180 kg/m ³	157,5 kg/m ³
Wasserzementwert w/z	0,45	
0/2 mm	30 Vol.-% Natursand E I (Rheinsand)	
2/8 mm	40 Vol.-% der zu prüfenden Gesteinskörnung	
8/16 mm	30 Vol.-% der zu prüfenden Gesteinskörnung	

2.3 Gesteinskörnungsprüfungen

40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung

Die groben Gesteinskörnungen wurden mit dem 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie, Anhang B.3 [DAf13] untersucht. Es wurden die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm verwendet.

60 °C-Betonversuch

Die groben Gesteinskörnungen wurden mit dem 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie, Anhang C [DAf13] untersucht. Es wurden die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm verwendet.

Schnellprüfverfahren

Von den groben Gesteinskörnungen wurden die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm jeweils mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie, Anhang B.2 [DAf13] untersucht. Die Einzelergebnisse der Korngruppen ($\varepsilon_{2/8 \text{ mm}}$ und $\varepsilon_{8/16 \text{ mm}}$) wurden zu einem Gesamtergebnis (ε_{ges}) zusammengefasst, indem die Einzelergebnisse der Korngruppen entsprechend der Volumenanteile des 40 °C-Betonversuchs gemäß Gleichung 1 gewichtet wurden.

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \frac{4}{7} \varepsilon_{2/8 \text{ mm}} + \frac{3}{7} \varepsilon_{8/16 \text{ mm}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Nach Alkali-Richtlinie, Anhang B.2 [DAf13] werden bei gebrochenen und ungebrochenen Kiesen die Korngruppen im Volumenverhältnis 57:43 gemischt, gebrochen und gemeinsam geprüft.

BTU-SP-Test

Die Korngruppen 2/8 und 8/16 der groben Gesteinskörnungen wurden jeweils mit dem BTU-SP-Test untersucht. Dazu wurden die Gesteinskörnungen gebrochen und in die Korngruppen 0,25/0,5, 1/2 und 4/8 klassiert. Nach dem Waschen und der anschließenden Trocknung wurden jeweils 10 g einer Korngruppe in 0,1 M KOH-Lösung für die Lagerungsdauer von 10, 12 und 14 Tagen gelagert. Nach der jeweiligen Lagerungsdauer wurde die flüssige Phase filtriert und die Konzentrationen an gelöstem SiO_2 und Al_2O_3 nasschemisch bestimmt, um daraus den SiO_2 -Überschuss ($\text{SiO}_{2\text{üb}}$) nach Gleichung 2 zu ermitteln:

$$\text{SiO}_{2\text{üb}} = \text{SiO}_2 - 1,4 \times \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (\text{Gleichung 2})$$

Neben dem überschüssigen SiO_2 wurde an den ungebrochenen Gesteinskörnungen die offene Porosität (P_{off}) nach der DIN EN 1097-6 und DIN EN 1936 bestimmt.

Der SP_{AKR} -Wert wurde aus dem maximal überschüssigen SiO_2 ($\text{SiO}_{2\text{üb}}$) und der offenen Porosität (P_{off}) der Gesteinskörnung gemäß Gleichung 3 berechnet.

$$SP_{\text{AKR}} = \frac{\text{SiO}_{2\text{üb}}}{100} - P_{\text{off}} + 1 \quad (\text{Gleichung 3})$$

Die SP_{AKR} -Werte der Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm wurden gemäß Gleichung 4 zu einem SP_{AKR} -Wert zusammengefasst, bei dem die einzelnen Korngruppen entsprechend deren Volumenanteile in den Betonversuchen nach der Alkali-Richtlinie (40 Vol.-% 2/8 mm und 30 Vol.-% 8/16 mm) gewichtet wurden.

$$SP_{\text{AKR}} - \text{Wert} = \frac{4}{7} SP_{\text{AKR}, 2/8 \text{ mm}} + \frac{3}{7} SP_{\text{AKR}, 8/16 \text{ mm}} \quad (\text{Gleichung 4})$$

Erfahrungen der BTU Cottbus - Senftenberg zeigen, dass Gesteinskörnungen, die den 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung bestehen, SP_{AKR} -Werte ≤ 0 aufweisen.

2.4 AKR-Performance-Prüfungen

60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr

Die Betone für die Feuchtigkeitsklasse WF wurden mit dem „60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr“ geprüft. Der Prüfablauf entspricht dem 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie [DAf13]. Die Prüfungen wurden als bestanden bewertet, wenn die Dehnungen 140 Tage nach Beginn der Lagerung bei 60 °C $\leq 0,20$ mm/m betragen. Dieser Grenzwert wurde in Anlehnung an AFNOR FD P 18-456 [AFN 04a] gewählt. Der 60 °C-Betonversuch (ohne Alkalizufuhr) ist seit 2004 in AFNOR P 18-454 [AFN04b] genormt und wird in Frankreich und der Schweiz zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen angewendet [SIA12]. Schweizer Untersuchungen zeigen, dass mit dem Verfahren angemessen zwischen nicht reaktiven und potenziell reaktiven Betonen unterschieden werden kann, wenn die Betone mit Portlandzement hergestellt werden [Lee12, Lee13].

Die Betone mit hüttensandhaltigen Zementen und Flugasche lagerten nach dem Ausschalen für 27 Tage in den Edelstahlbehältern, die für den 60 °C-Betonversuch verwendet werden, bei 20 °C und einer relativen Feuchte von ≥ 98 %. Die Prüfung bei 60 °C begann bei diesen Prismen im Alter von 28 Tagen. Vor der Einlagerung wurde die Nullmessung bei 20 °C durchgeführt.

Untersuchungen des VDZ belegen zudem, dass die Ergebnisse des 60 °C-Betonversuchs (ohne Alkalizufuhr) in der Regel gut mit den Festlegungen der Alkali-Richtlinie übereinstimmen, wenn die o. g. Grenzwerte zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WF angewendet werden [Bor14].

60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

Die Betone der Feuchtigkeitsklasse WA wurden mit dem „60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr“ von außen geprüft [Bor14]. Je Beton und Prüflösung lagerten drei Betonprismen mit den Abmessungen 75 mm x 75 mm x 280 mm gemäß **Tabelle 7**. Die Alkalizufuhr erfolgte durch eine 3%ige bzw. eine 10%ige Natriumchlorid-Lösung (NaCl). Die Kriterien zur praxisgerechten Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen der Feuchtigkeitsklasse WA wurden im IGF-Vorhaben 16569 N definiert [Bor14, Mül14]. Zur Bewertung wird das Kriterium von 0,50 mm/m nach 10 Zyklen der Wechsellagerung (entspricht 168 Tagen) angesetzt, wenn mit einer 3%igen Natriumchlorid-Lösung geprüft wird. Das Verfahren bildet bei diesen Bedingungen die Festlegungen der Alkali-Richtlinie ab.

Tabelle 7 Lagerungsplan im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen

Lagerungsphase	Lagerungsdauer	Messung	Klima
Vorlagerung 28 Tage	1 d	-	abgedeckt in der Schalung
	6 d	-	20 °C und ≥ 98 % r. F.
	14 d	-	20 °C und 65 % r. F.
	6 d	-	60 °C und ≥ 98 % r. F.
	1 d	Nullmessung	20 °C und ≥ 98 % r. F.
Hauptlagerung Turnus 14 d 10 Wiederholungen	5 d	-	60 °C im Trockenschrank
	2 d	-	20 °C in Prüflösung
	6 d	-	60 °C und ≥ 98 % r. F.
	1 d	am Ende der Lagerung	20 °C und ≥ 98 % r. F.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Vergleich der Prüfverfahren (Gesteinskörnungsprüfungen)

Die Ergebnisse aller Gesteinskörnungsprüfungen sind in **Tabelle 8** zusammengefasst. Sie sind in Abhängigkeit von der Dehnung in der Nebelkammer sortiert. In den gelb markierten Fällen erfüllt das Ergebnis das Kriterium des jeweiligen Verfahrens für die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S. In den grünen Fällen ist das Kriterium für E I-S erfüllt.

Tabelle 8 Ergebnisse Gesteinskörnungsprüfungen, grün: E I-S, gelb: E III-S

Gesteinskörnung		40 °C-Betonversuch Nebelkammerlagerung 280 d		60 °C- Beton- versuch 140 d	Schnellprüfverfahren 13 d NaOH-Lagerung			BTU-SP- Test (gewichtet) 14 d KOH- Lagerung [-]
		Dehnung [mm/m]	Rissbreite [mm]	[mm/m]	2/8 [mm/m]	8/16 [mm/m]	(gewichtet) [mm/m]	
1	G9	2,26	0,30	1,71	2,23	2,35	2,28	6,6
2	K5g	1,53	0,20	1,12	1,53	1,56	1,54	4,9
3	K2	0,90	0,30	0,63	1,77	1,62	1,71	1,3
4	R2	0,75	0,30	1,29	2,00	1,98	1,99	1,3
5	Q1	0,66	0	0,75	2,44	2,31	2,38	14,7
6	A1	0,65	0,10	1,03	1,05	1,05	1,05	1,4
7	K5r	0,60	0	0,39	0,72	1,08	0,87	0,8
8	K4	0,55	0,25	0,45	1,60	1,48	1,55	-0,3
9	K6r	0,52	0,10	0,46	1,36	1,36	1,36	3,1
10	K1	0,51	0	0,37	1,62	1,38	1,52	-1,1
11	A2	0,47	0	0,71	0,60	0,61	0,60	0,8
12	R3	0,46	0	0,54	1,76	1,63	1,70	0,6
13	G2	0,42	0,30	0,41	2,06	1,91	2,00	2,2
14	G6	0,42	0	0,61	1,12	1,13	1,12	0,7
15	V2	0,40	0	0,31	-	-	0,17	0,4
16	V1	0,38	0	0,49	-	-	1,46	1,1
17	V3	0,34	0	0,24	-	-	0,13	-1,1
18	G10	-	-	-	-	-	-	8,2
19	G4	-	-	-	-	-	-	7,9
20	K7g	-	-	-	-	-	-	7,6
21	K12	-	-	-	-	-	-	5,1
22	K6g	-	-	-	-	-	-	3,9
23	K7r	-	-	-	-	-	-	3
24	K3	-	-	-	-	-	-	2,5
25	G1	-	-	-	-	-	-	2,2
26	G8	-	-	-	-	-	-	1,7
27	R1	-	-	-	-	-	-	1,1
28	G7	-	-	-	-	-	-	0,9
29	K8	-	-	-	-	-	-	0,4
30	K11	-	-	-	-	-	-	-1,6
31	K9	-	-	-	-	-	-	-2,8
E I-S ¹⁾		≤ 0,60	< 0,20	≤ 0,30	-	-	≤ 1,00	-
E III-S ¹⁾		> 0,60	≥ 0,20	> 0,30	-	-	-	-

¹⁾ Grenzwerte zur Einstufung in die jeweilige Alkaliempfindlichkeitsklasse

Die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs sind immer maßgebend für die endgültige Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse, da es das Referenzverfahren ist. Eine Gesteinskörnung wird mit E I-S bewertet, wenn nach der 9-monatigen Nebelkammerlagerung die Dehnung der Prismen $\leq 0,60$ mm/m und die maximale Rissbreite am Würfel $< 0,20$ mm betragen. Bei den Gesteinskörnungen G2 und K4 führte nur die maximale Rissbreite am Würfel zur Bewertung E III-S. Dies ist bei den folgenden Vergleichen zu berücksichtigen, da im weiteren Verlauf nur die Dehnungen der Prismen als Vergleich herangezogen werden.

In **Bild 1** ist die Dehnung der Prismen der maximalen Rissbreite am Würfel gegenübergestellt. Bei den Gesteinskörnungen G2 und K4 war die Rissbreite für die Einstufung in E III-S maßgebend.

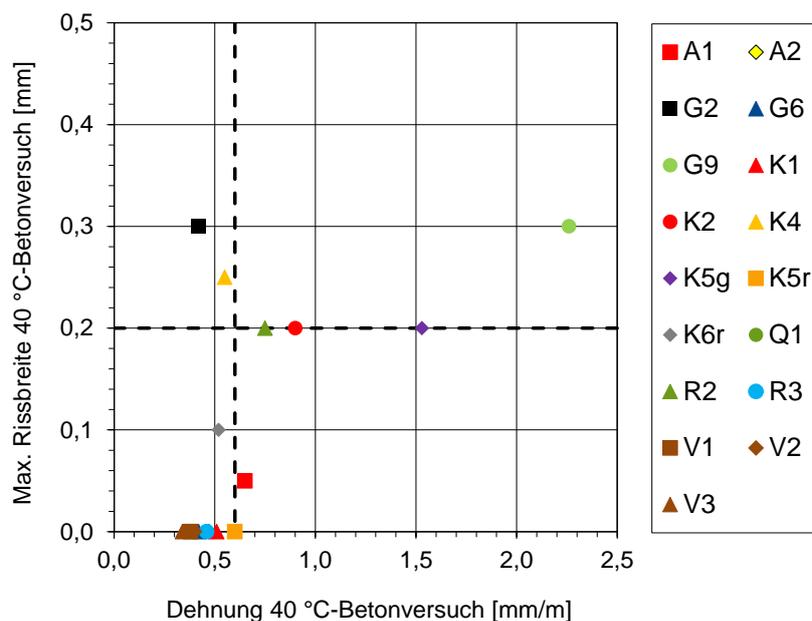


Bild 1 Maximale Rissbreite am Würfel im Vergleich zur Dehnung der Prismen im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen

Bild 2 bis **Bild 4** geben die Ergebnisse aller Gesteinskörnungsprüfungen (Schnellprüfverfahren, 60 °C-Betonversuch und BTU-SP-Test) im Vergleich zur Dehnung der Prismen im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen wieder. Die Ergebnisse sind in Abhängigkeit von der Prismendehnung im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung aufgetragen, da dieses Verfahren das Referenzverfahren zur Einstufung „weiterer Gesteinskörnungen“ (ehemals Teil 3 der Ausgabe 2007) der Alkali-Richtlinie ist. In keinem Fall trat die Situation auf, dass eine Gesteinskörnung, die mit dem 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung als E III-S bewertet wird, mit dem Schnellprüfverfahren oder dem 60 °C-Betonversuch in E I-S eingeordnet wird. Eine Gesteinskörnung ist mit diesen Verfahren als E I-S zu bewerten, wenn die Dehnung der Prismen im Schnellprüfverfahren $\leq 1,0$ mm/m oder im 60 °C-Betonversuch $\leq 0,30$ mm/m beträgt [DAf13].

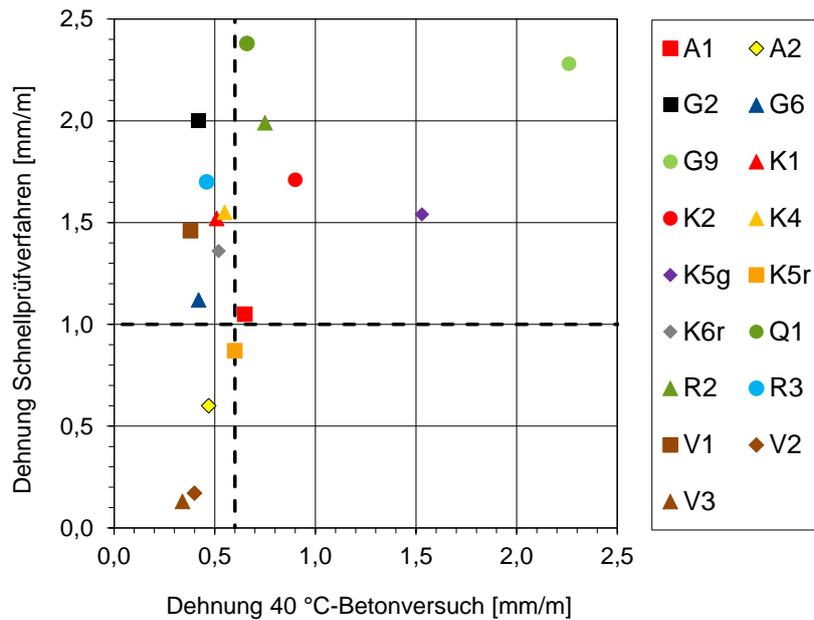


Bild 2 Dehnung der Mörtelprismen im Test mit dem Schnellprüfverfahren im Vergleich zur Dehnung der Prismen im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen

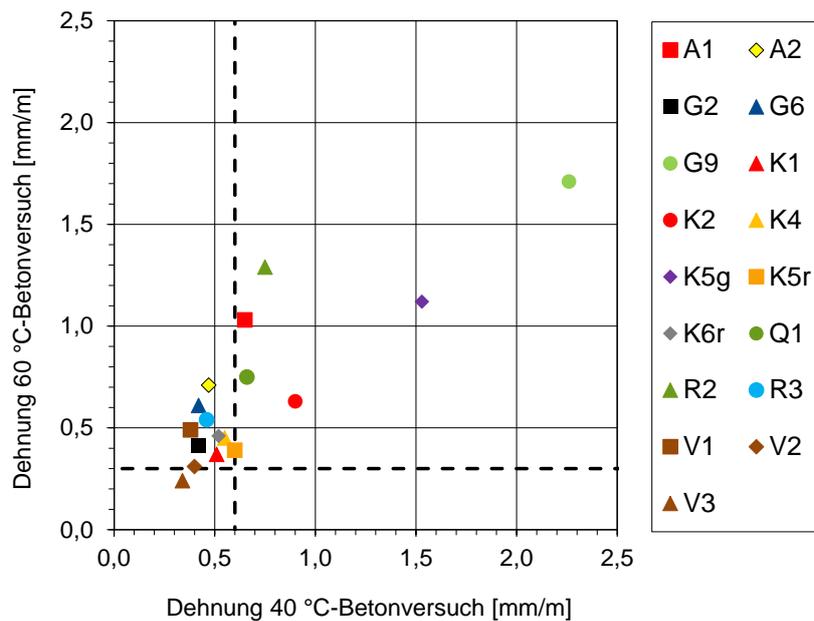


Bild 3 Dehnung der Prismen im 60 °C-Betonversuch im Vergleich zur Dehnung der Prismen im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen

3.2 BTU-SP-Test

Der BTU-SP-Test ist bisher kein Verfahren zur Einstufung „weiterer Gesteinskörnungen“ (bzw. nach Teil 3 der Ausgabe 2007) nach Alkali-Richtlinie. Ein Grenzwert ist deshalb nicht festgelegt. Die Ergebnisse zeigen, dass Gesteinskörnungen, die den 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung bestehen, i. d. R. SP_{AKR} -Werte kleiner 0 aufweisen. Eine Ausnahme ist die Gesteinskörnung K4, die den 40 °C-Betonversuch aufgrund zu großer Rissbreiten

nicht bestand (**Bild 4**). Es ist zu prüfen, ob K4 (Kies) unter die „weiteren Gesteinskörnungen“ (ehemals Teil 3 nach Ausgabe 2007) der Alkali-Richtlinie fällt. Sollte K4 eine Gesteinskörnung sein, die nach Alkali-Richtlinie nach Anhang B (Betonversuche mit Nebelkammerlagerung oder Schnellprüfverfahren) zu prüfen ist, dann müsste der Orientierungswert für den SP_{AKR} -Wert kleiner $-0,3$ betragen (**Bild 4**).

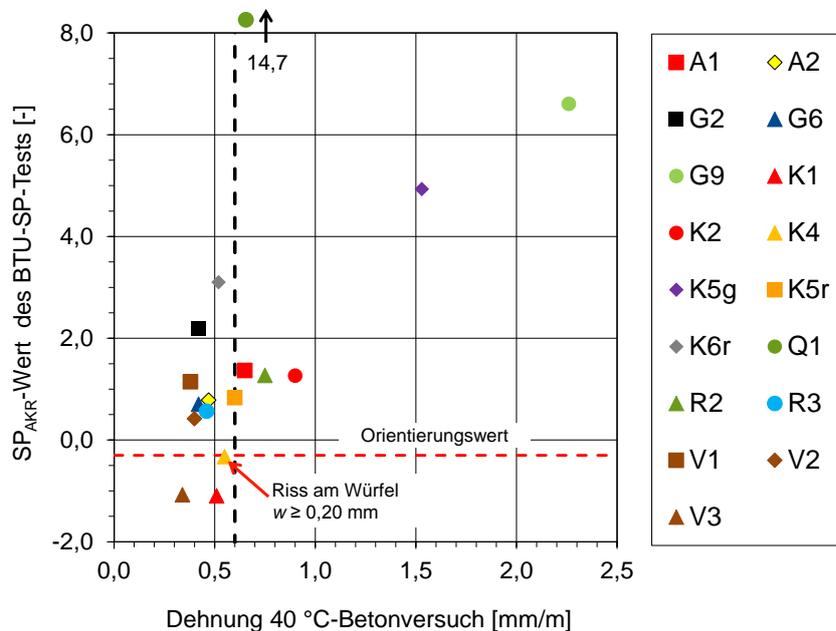


Bild 4 SP_{AKR} -Wert des BTU-SP-Tests im Vergleich zur Dehnung im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen

3.3 Definition von E II-S-Gesteinskörnungen

Die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs mit Nebelkammerlagerung sind stets maßgebend für die endgültige Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse, da es das Referenzverfahren ist. **Bild 5** zeigt die Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs mit der Nebelkammerlagerung von 17 Gesteinskörnungen. Die Gesteinskörnungsauswahl deckt ein breites Spektrum von alkaliunempfindlichen (E I-S, blau) und alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen (E III-S, schwarz und grau) ab. Bei vielen Gesteinskörnungen liegt die Dehnung und die maximale Rissbreite der Betone nah an den Grenzwerten bzw. unter- oder überschreiten diese nur geringfügig (möglicher E II-S-Bereich, graue Kurven).

Eine Gesteinskörnung wird mit E I-S bewertet, wenn nach der 9-monatigen Nebelkammerlagerung die Dehnung $\leq 0,60$ mm/m und die maximale Rissbreite $< 0,20$ mm betragen. Der erste Riss mit einer maximalen Breite $w \geq 0,20$ mm am 30-cm-Würfel ist in **Bild 5** hellblau markiert.

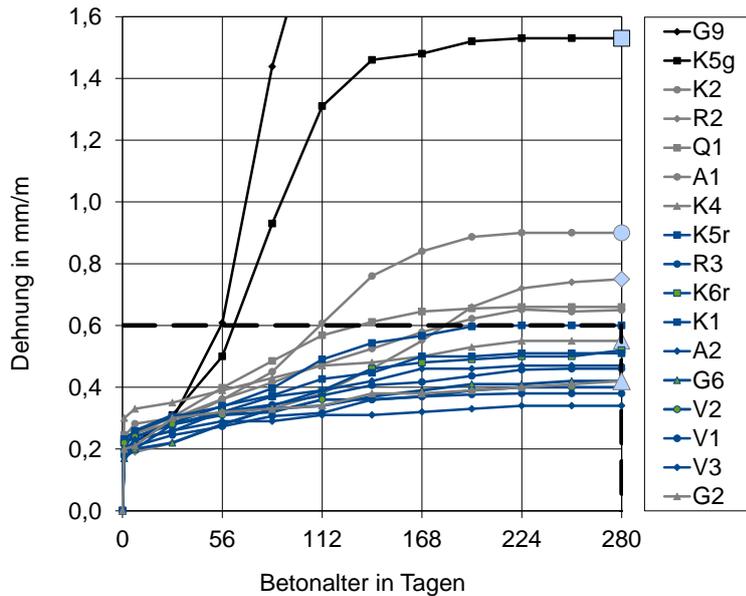


Bild 5 Dehnungen der Prismen von 17 Gesteinskörnungen im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (40°C), hellblaue Marker: Erster Riss mit maximaler Breite $w \geq 0,20$ mm am Würfel

Aufgrund der Ergebnisse des 40 °C-Betonversuchs mit der Nebelkammerlagerung und auch der AKR-Performance-Prüfungen (siehe Abschnitt 3.4, Seite 16) wurden potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen (graue Kurven **Bild 5**) identifiziert. Für eine Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S wurde aus den Untersuchungen ein Orientierungswert für die Dehnung der Prismen im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung von $0,60 \text{ mm/m} < \epsilon \leq 0,90 \text{ mm/m}$ abgeleitet.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung wurden für die anderen Gesteinskörnungsprüfungen ebenfalls Orientierungswerte für die Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S mit dem Ziel definiert, dass kein anderes Verfahren zu einer günstigeren Einstufung kommen kann als die Nebelkammerlagerung.

Betonversuch mit Nebelkammerlagerung

In **Bild 6** sind die Prismendehnung und die maximale Rissbreite im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung einander gegenübergestellt. Die Grenze zwischen E II-S- und E III-S-Gesteinskörnungen liegt zwischen K2 (roter Punkt) und K5g (lila Raute). Die genaue Lage muss durch weitere Versuche bestätigt werden. Die AKR-Performance-Prüfungen in Abschnitt 3.4 auf Seite 16 zeigen, dass K2 in jedem Fall eine potenzielle E II-S-Gesteinskörnung ist. Deshalb liegt der Orientierungswert für E II-S (rote senkrechte gestrichelte Linie) bei einer Dehnung von $0,90 \text{ mm/m}$. Damit alle potenziellen E II-S-Gesteinskörnungen die Nebelkammerlagerung bestehen (auch G2, schwarzes Quadrat), muss die Grenze für die maximale Rissbreite bei $\leq 0,30 \text{ mm}$ liegen. Alle Gesteinskörnungen, deren Werte im blauen Feld liegen, sind potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen.

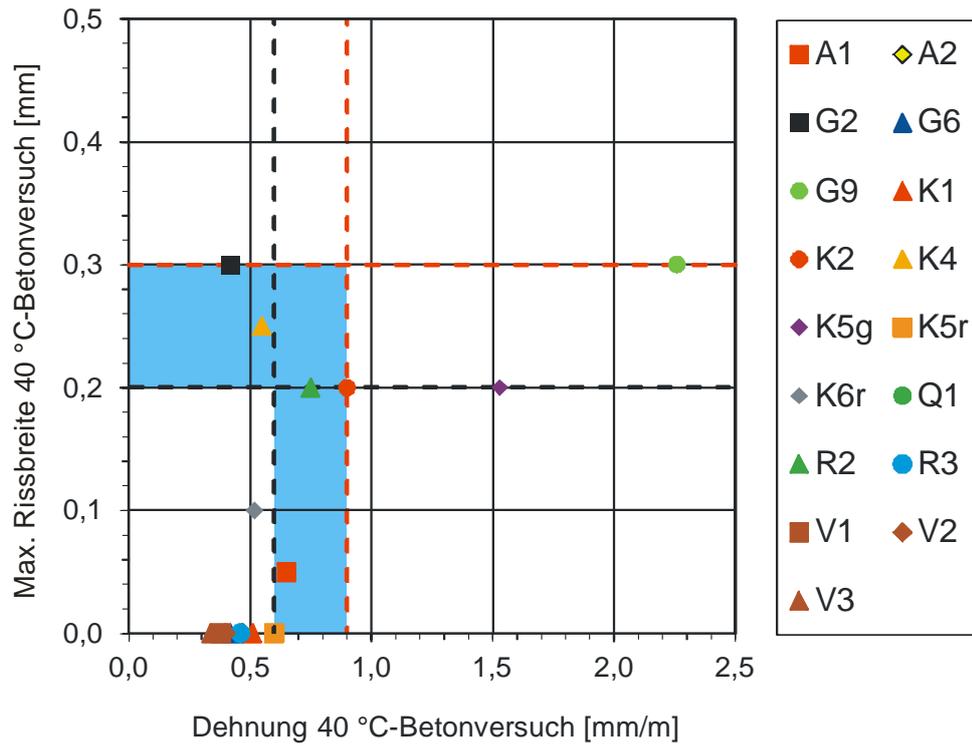


Bild 6 Maximale Rissbreite am Würfel im Vergleich zur Prismendehnung im 40 °C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen
Blauer Bereich: potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen

Schnellprüfverfahren

In **Bild 7** sind die Dehnungen im Schnellprüfverfahren der Dehnung der Nebelkammerlagerung gegenübergestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass für das Schnellprüfverfahren Dehnungen $\leq 1,50$ mm/m für die Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S anzunehmen sind. Bei Dehnungen unter 1,50 mm/m erfüllen Gesteinskörnungen immer auch die Kriterien an die Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S der Nebelkammerlagerung. Bei Dehnungen über 1,50 mm/m im Schnellprüfverfahren können bei der Nebelkammerlagerung Dehnungen oberhalb des Orientierungswertes von 0,90 mm/m auftreten, wie die Gesteinskörnungen G9 und K5g zeigen.

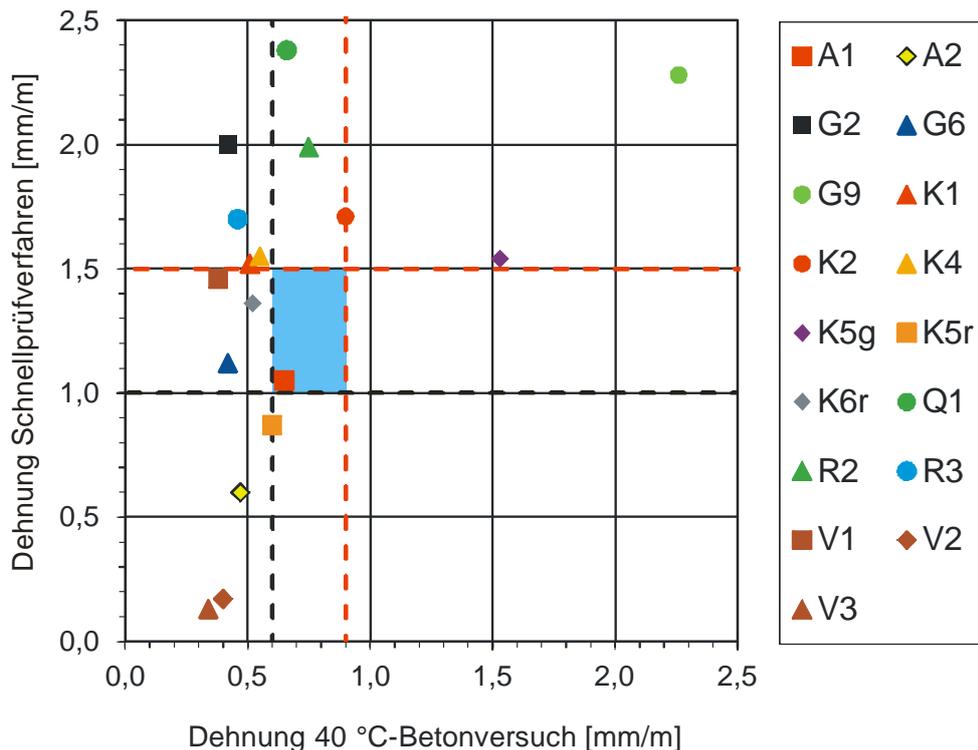


Bild 7 Dehnung im Test mit dem Schnellprüfverfahren im Vergleich zur Dehnung im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen
Blauer Bereich: potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen

60 °C-Betonversuch

Für den 60 °C-Betonversuch wurde ein Orientierungswert für die Dehnung von $\leq 1,00$ mm/m abgeleitet (siehe **Bild 8**). Die Ergebnisse zeigen, dass bei einer Prismendehnung von $\leq 1,00$ mm/m im 60 °C-Betonversuch der Orientierungswert für die Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S von 0,90 mm/m für die Nebelkammerlagerung nicht überschritten wird. Bei Prismendehnungen im 60 °C-Betonversuch über 1,00 mm/m können in der Nebelkammerlagerung Dehnungen von größer 0,90 mm/m wie bei den Gesteinskörnungen K5g (lila Raute) und G9 (grüner Kreis) auftreten.

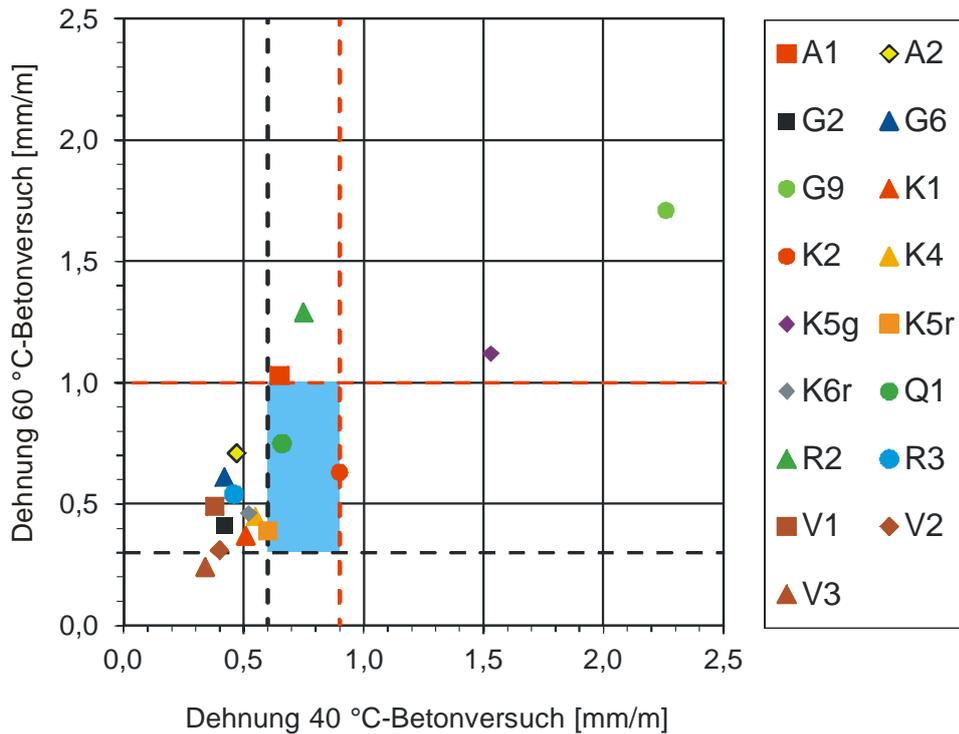


Bild 8 Dehnungen im 60 °C-Betonversuch im Vergleich zur Dehnung im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen
Blauer Bereich: potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen

BTU-SP-Test

Für die Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S konnte beim BTU-SP-Test ein orientierender Bereich für den SP_{AKR} -Wert von $-0,3 < SP_{AKR} \leq 3,0$ bestimmt werden (**Bild 9**). Die untere Grenze von $-0,3$ leitet sich aus der Rissbreite am Würfel mit der Gesteinskörnung K4 von 0,25 mm bei der Nebelkammerlagerung ab. Die obere Grenze ist durch weitere Untersuchungen abzusichern, um bei einer Überschreitung des SP_{AKR} -Wertes von 3,0 eine breitere Datenbasis mit weiteren Gesteinskörnungen zu generieren.

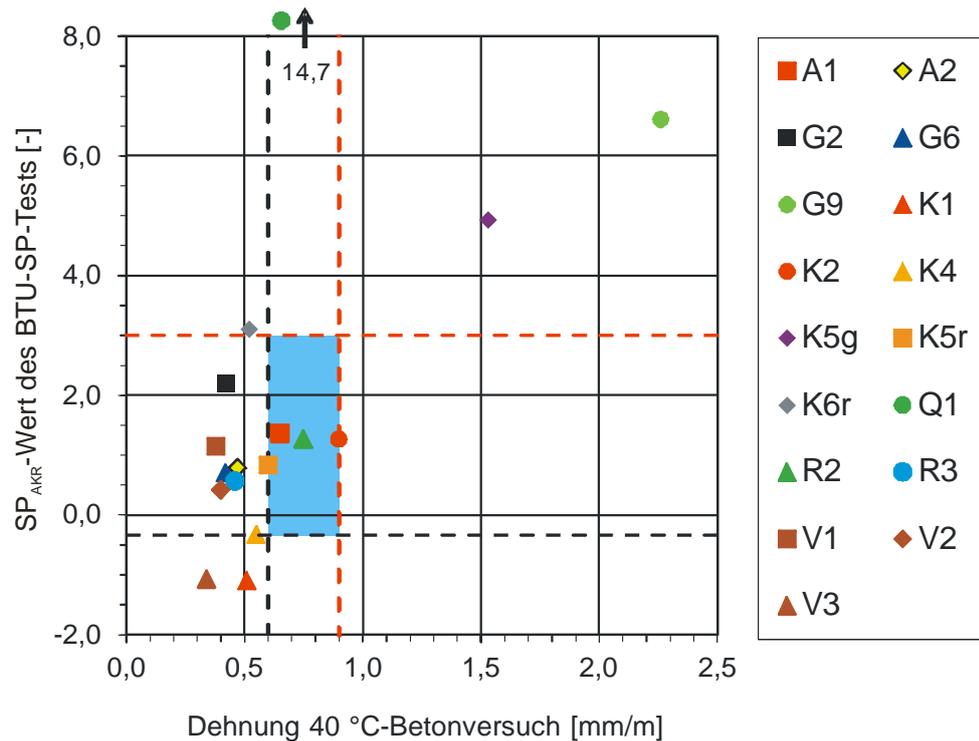


Bild 9 SP_{AKR} -Wert des BTU-SP-Tests im Vergleich zur Dehnung im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für 17 Gesteinskörnungen
Blauer Bereich: potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen

Tabelle 9 Mögliche Definition der Alkaliempfindlichkeitsklassen gemäß dem Stand der Untersuchungen

Prüfverfahren	E I-S	E II-S	E III-S
40 °C-Nebelkammerlagerung	$\varepsilon \leq 0,60 \text{ mm/m}$	$\varepsilon \leq 0,90 \text{ mm/m}$	$\varepsilon > 0,90 \text{ mm/m}$
	$w < 0,20 \text{ mm}$	$w \leq 0,30 \text{ mm}$	$w > 0,30 \text{ mm}$
60 °C-Betonversuch	$\varepsilon \leq 0,30 \text{ mm/m}$	$\varepsilon \leq 1,00 \text{ mm/m}$	-
Schnellprüfverfahren	$\varepsilon \leq 1,00 \text{ mm/m}$	$\varepsilon \leq 1,50 \text{ mm/m}$	-
BTU-SP-Test	$SP_{AKR} < -0,3$	$SP_{AKR} \leq 3,0$	-

Die sieben Gesteinskörnungen A2, G6, K2, K5r, K5g, R2 und R3 wurden für die weiteren AKR-Performance-Prüfungen ausgewählt, da diese Gesteinskörnungen - mit Ausnahme von K5g - potenzielle E II S-Gesteinskörnungen sind. Die Gesteinskörnung K5g (E III-S) wurde verwendet, um den Übergangsbereich von E II-S- zu E III-S-Gesteinskörnungen zu untersuchen.

3.4 Ableitung vorbeugender Maßnahmen

Feuchtigkeitsklasse WF

In **Bild 10** links sind die Dehnungen der Betone für die **Feuchtigkeitsklasse WF** dargestellt. In Anlehnung an AFNOR P 18-456 [AFN 04a] und an Erfahrungen des VDZ [Bor14] wurde ein Grenzwert nach 0,20 mm/m für die Dehnung im Betonalter von 140 Tagen angesetzt. Die Untersuchungen zeigen, dass für die Betone der Feuchtigkeitsklasse WF bei Zementgehalten $> 350 \text{ kg/m}^3$ vorbeugende Maßnahmen angewendet werden müssen, da für alle Betone mit den jeweiligen Gesteinskörnungen der Grenzwert überschritten wurde, wenn ein Portlandzement mit einem hohen Na_2O -Äquivalent von 1,30 M.-% eingesetzt wird. Welche Maßnahme neben der Verwendung von NA-Zement möglich wäre, zeigt **Bild 10** rechts. Die sechs potenziellen E II-S-Gesteinskörnungen weisen Dehnungen unter dem Grenzwert auf, wenn 400 kg/m^3 Portlandzement mit einem Na_2O -Äquivalent von 1,01 M.-% verwendet werden. Für die E III-S-Gesteinskörnung K5g, die keine potenzielle E II-S-Gesteinskörnung mehr ist, überschreitet die Dehnung des Betons den Grenzwert. Bei dieser Gesteinskörnung wäre ein NA-Zement, wie es die Alkali-Richtlinie festlegt, anzuwenden.

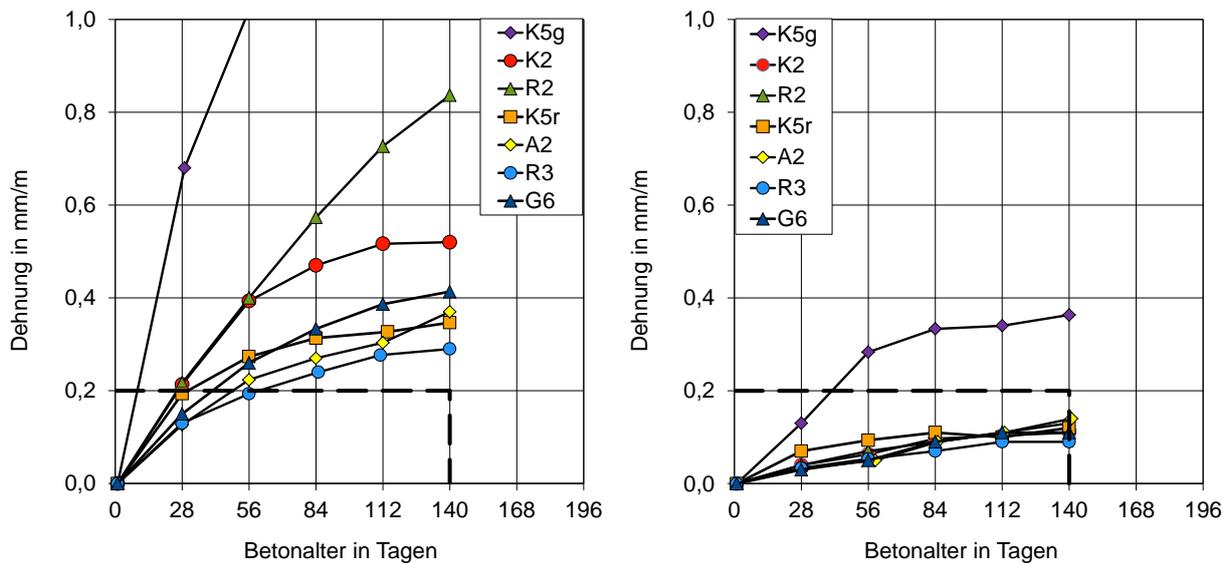


Bild 10 Dehnung verschiedener Betone im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr von außen
 links: 400 kg/m³ CEM I 32,5 R, Na₂O-Äqu. = 1,30 M.-%, w/z = 0,45
 rechts: 400 kg/m³ CEM I 42,5 R, Na₂O-Äqu. = 1,01 M.-%, w/z = 0,45

Für die Ableitung von Maßnahmen wurden im ersten Schritt Portlandzemente verwendet. Diese sind stellvertretend für gleichwertige Zemente und betontechnische Lösungen, wie sie in der Praxis eingesetzt werden, zu betrachten. Im zweiten Schritt wurden die Ergebnisse auf CEM II- und CEM III-Zemente sowie auf eine Kombination von CEM I-Zemente und Flugasche übertragen. In Deutschland wurden 2013 rd. 70 % CEM II- und CEM III-Zemente eingesetzt [VDZ14]. Außerdem enthalten Transportbetone i. d. R. immer Flugasche [BTB08]. Deshalb ist es sinnvoll, praxisorientierte Maßnahmen für diese Zemente und für flugaschehaltige Betone abzuleiten.

Bild 11 zeigt die Dehnungen von zwei Betonen mit der potenziellen E II-S-Gesteinskörnung K2. Die Beton wurden mit einem CEM II/B-M (S-LL) und einem CEM III/A hergestellt. Die Zemente wurden im Labor so zusammengesetzt, dass das Na_2O -Äquivalent bezogen auf

den Zement ohne Hüttensand und Kalkstein mit 1,20 M.-% hoch ist. Das Gesamt- Na_2O -Äquivalent beträgt durch den geringeren Klinkeranteil 0,97 M.-% beim CEM II/B-M (S-LL) und 1,09 M.-% beim CEM III/A. Die Dehnungen liegen nach 140 Tagen unter dem Grenzwert von 0,20 mm/m. Auch beim Beton mit dem gleichen CEM II/B-M (S-LL) und der Gesteinskörnung R2 liegen die Dehnungen unter dem Grenzwert (**Bild 12**). Diese Versuche zeigen, dass CEM III/A- und CEM II/B-Zemente als Maßnahme möglich wären, um AKR-Schäden bei E II-S-Gesteinskörnungen und Zementgehalten $> 350 \text{ kg/m}^3$ in der Feuchtigkeitsklasse WF zu vermeiden. Dies ist durch weitere Untersuchungen mit anderen potenziellen E II-S-Gesteinskörnungen und Portlandkompositzementen zu bestätigen.

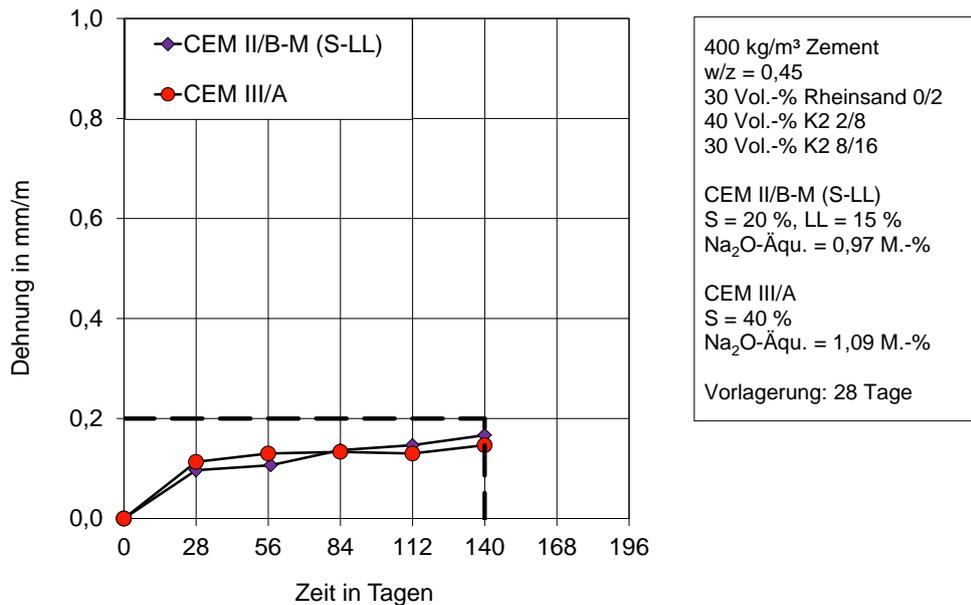


Bild 11 Dehnung verschiedener Betone im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr, 28 Tage Vorlagerung bei 20 °C

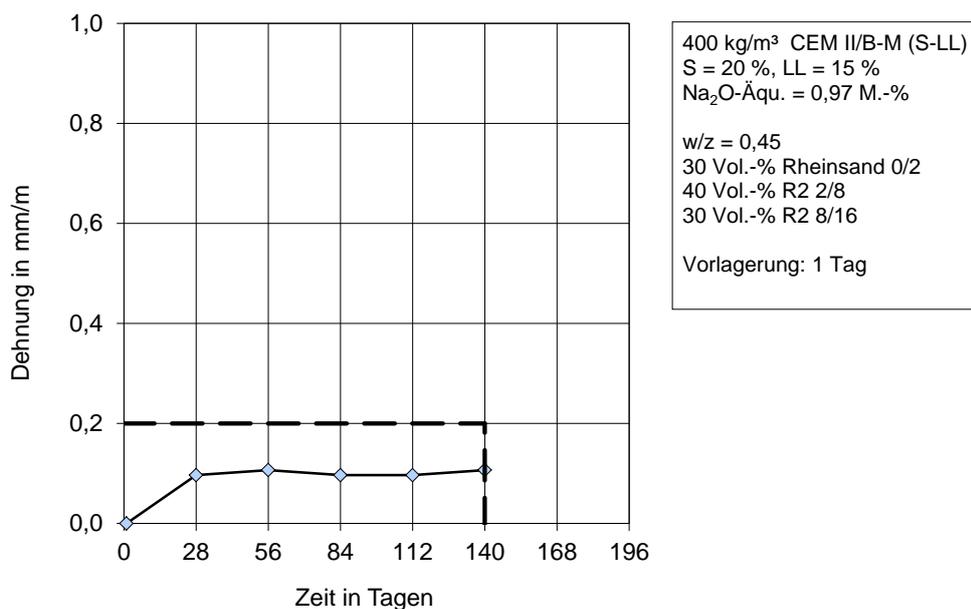


Bild 12 Dehnung eines Betons im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr, 1 Tag Vorlagerung

Bei einem durchschnittlichen C30/37 Transportbeton mit 20 % Flugasche besteht bei E II-S-Gesteinskörnungen ein ausreichender Widerstand gegen AKR in der Feuchtigkeitsklasse WF. Die Dehnung des Betons liegt sowohl nach 140 Tagen und nach einem Jahr unter dem jeweiligen Grenzwert von 0,20 mm/m bzw. 0,30 mm/m (**Bild 13**). Dies war zu erwarten, da in der Alkali-Richtlinie bei E III-S-Gesteinskörnungen und Zementgehalten $\leq 350 \text{ kg/m}^3$ keine Maßnahmen in der Feuchtigkeitsklasse WF festgelegt sind (siehe auch **Tabelle 1**).

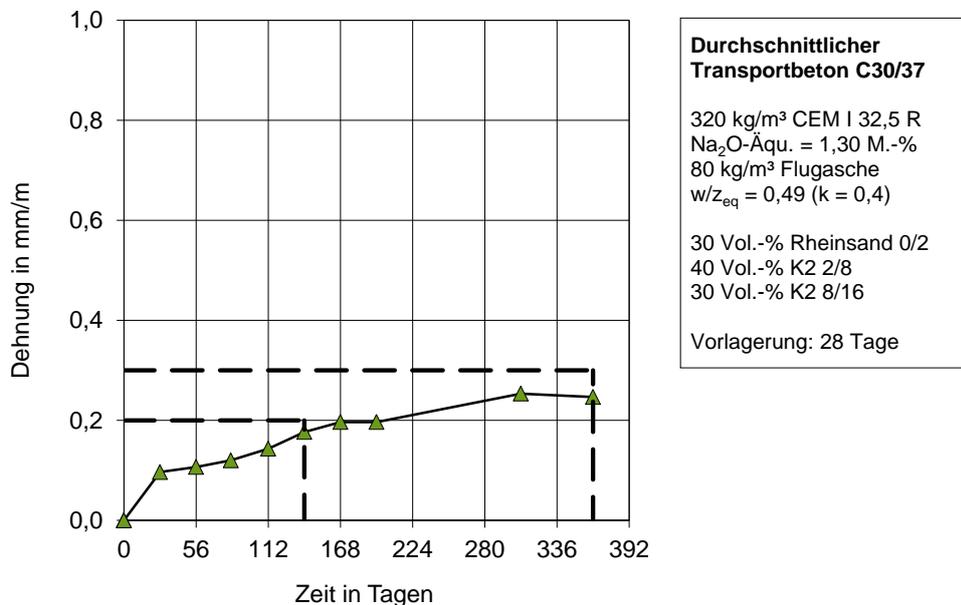


Bild 13 Dehnung eines Betons im 60 °C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr, 28 Tage Vorlagerung bei 20 °C

Feuchtigkeitsklasse WA

In der **Feuchtigkeitsklasse WA** ist bei E III-S-Gesteinskörnungen und Zementgehalten $\leq 350 \text{ kg/m}^3$ gemäß Alkali-Richtlinie NA-Zement einzusetzen (siehe auch **Tabelle 1**). Zur Ableitung der Maßnahmen für potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen wurde die Hypothese aufgestellt, dass in diesem Fall keine Maßnahmen erforderlich sind. Deshalb wurden Betone mit 350 kg/m^3 CEM I 32,5 R (Na₂O-Äqu. = 1,30 M.-%) hergestellt. **Bild 14** links gibt die Ergebnisse wieder. Zur Bewertung wird das Kriterium von 0,50 mm/m nach 10 Zyklen der Wechsellaagerung (entspricht 168 Tagen) angesetzt, dass im IGF-Vorhaben 16569 N für eine Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung abgeleitet wurde [Bor12, Mül14]. Bei Gesteinskörnung R2 überschreitet die Dehnung des Betons den Grenzwert. Bei K2 liegt sie darunter. Das bedeutet, dass bei potenziellen E II-S-Gesteinskörnungen Maßnahmen festzulegen sind, da in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung eine schädigende AKR auftreten kann.

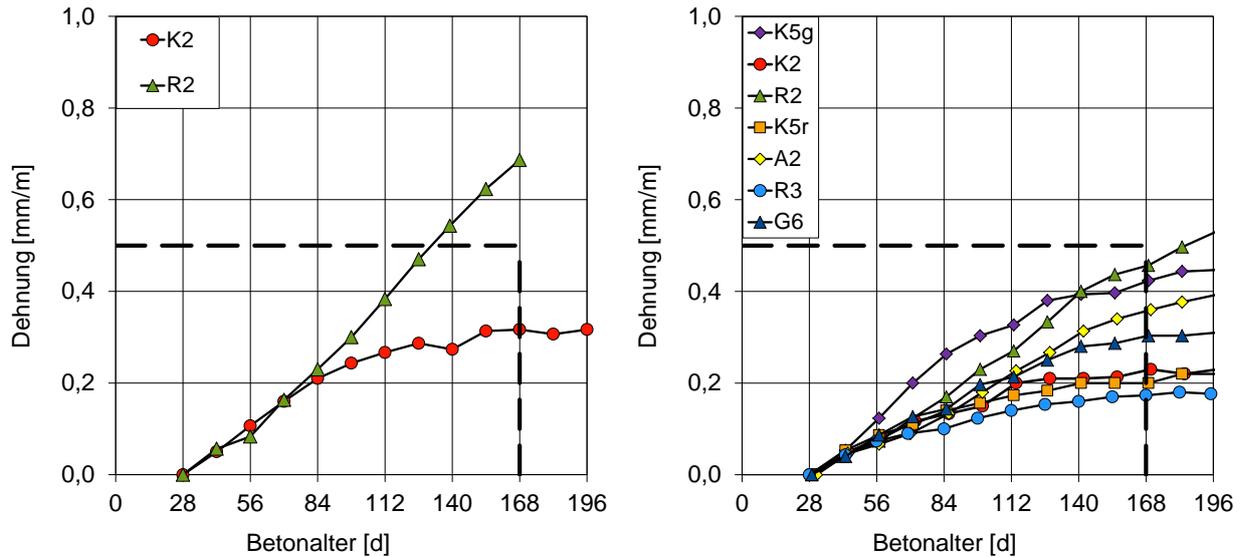


Bild 14 Dehnung verschiedener Betone im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung,
 links: 350 kg/m³ CEM I 32,5 R, Na₂O-Äqu. = 1,30 M.-%, w/z = 0,45
 rechts: 350 kg/m³ CEM I 42,5 R, Na₂O-Äqu. = 1,01 M.-%, w/z = 0,45

Im zweiten Schritt wurden die Betone mit 350 kg/m³ CEM I 42,5 R (Na₂O-Äqu. = 1,01 M.-%) hergestellt. Alle Betone wiesen Dehnungen unterhalb des o. g. Kriteriums auf (**Bild 14** rechts). Dies trifft auch auf den Beton mit der E III-S-Gesteinskörnung K5g zu. Die Untersuchungen zeigen, dass bei potenziellen E II-S-Gesteinskörnungen kein NA-Zement als Maßnahme erforderlich wäre. Betone mit einem Zementgehalt von ≤ 350 kg/m³ und einem Portlandzement mit einem Na₂O-Äquivalent von 1,00 M.-% hätte einen ausreichenden Widerstand gegen AKR. Diese Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit den Ergebnissen zur Feuchtigkeitsklasse WF, die ebenfalls zeigen, dass bei potenziellen E II-S-Gesteinskörnungen anstelle eines NA-Zementes ein Portlandzement mit einem Na₂O-Äquivalent von 1,01 M.-% verwendet werden kann (siehe **Bild 10** rechts, Abschnitt 0, Seite 16). Da für diese Zemente keine normativen Kategorien existieren, müssten weitere Untersuchungen klären, wie geeignete Zemente zu definieren wären.

Bei Zementgehalten > 350 kg/m³ ist diese Maßnahme nicht mehr ausreichend. Betone mit 400 kg/m³ CEM I 42,5 R (Na₂O-Äqu. = 1,01 M.-%) wiesen Dehnungen oberhalb des Grenzwertes auf (**Bild 15** links). Erst bei einem geringeren Alkaligehalt von ≤ 0,80 M.-% lagen die Dehnungen darunter. Dies zeigen die Betone, die mit 400 kg/m³ CEM I 42,5 N (Na₂O-Äqu. = 0,81 M.-%) hergestellt wurden (**Bild 15** rechts). Auch die E III-S-Gesteinskörnung K5g bestand die Prüfung.

Aus den Ergebnissen folgt, dass unter folgenden Bedingungen NA-Zement nach DIN 1164-10 als Maßnahme sinnvoll wäre:

- Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S,
- Feuchtigkeitsklasse WA und
- Zementgehalt > 350 kg/m³.

Durch die Festlegung würde ein Sicherheitsabstand von 0,20 M.-% im Na_2O -Äquivalent zum Ergebnis der Laborprüfungen bestehen und man würde auf eine bereits normative geregelte Zementeigenschaft zurückgreifen können. Mit der Einführung der Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S in die Alkali-Richtlinie könnten solche Gesteinskörnungen, die gegenwärtig noch E III-S sind, mit NA-Zement eingesetzt werden. Zurzeit sind diese Gesteinskörnungen für den o. g. Fall ausgeschlossen.

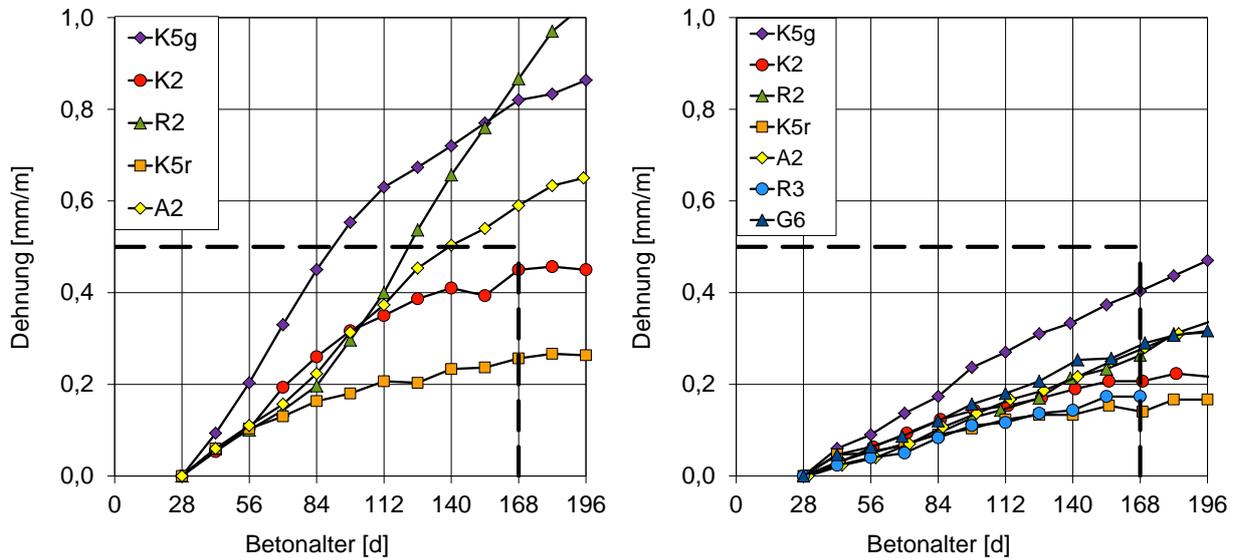


Bild 15 Dehnung verschiedener Betone im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung
 links: 400 kg/m³ CEM I 42,5 R, Na_2O -Äqu. = 1,01 M.-%, w/z = 0,45
 rechts: 400 kg/m³ CEM I 42,5 N, Na_2O -Äqu. = 0,81 M.-%, w/z = 0,45

Um praxismäßige Maßnahmen abzuleiten, wurden Betone mit CEM II/B-M (S-LL) und CEM III/A (**Bild 16** und **Bild 17**) sowie ein typischer Transportbeton C30/37 mit Flugasche als Betonzusatzstoff (**Bild 18**) untersucht. Die Versuche zeigen, dass mit den in der Praxis häufig verwendeten Zementen und mit einem typischen Transportbeton C30/37 keine schädigende AKR zu erwarten ist. Diese Aussage gilt für potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen. Sollte diese Alkaliempfindlichkeitsklasse definiert werden, wären weitere Untersuchungen zur Verifizierung dieser Aussage notwendig. Dazu sollten weitere potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen und eine größere Bandbreite an CEM II/B- als auch CEM II/A-Zementen einbezogen werden.

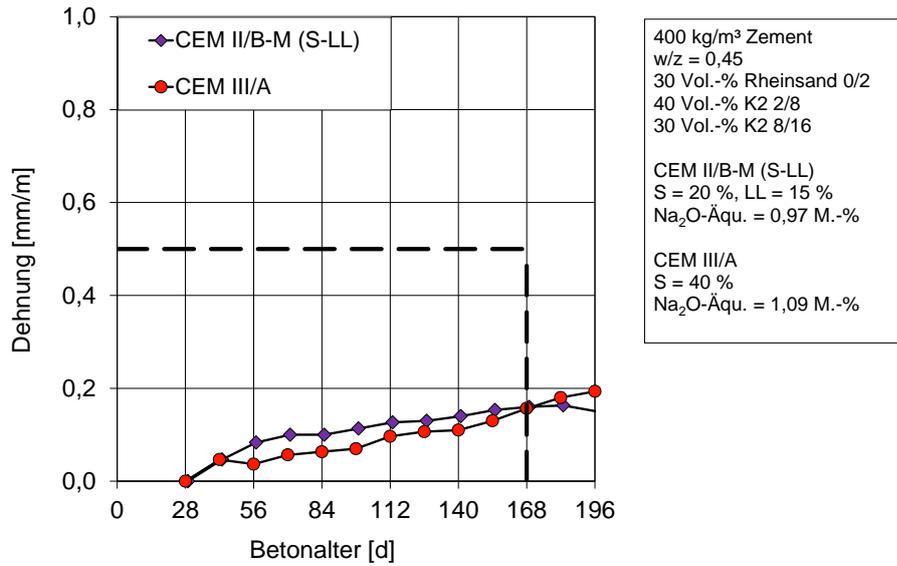


Bild 16 Dehnung von Betonen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung

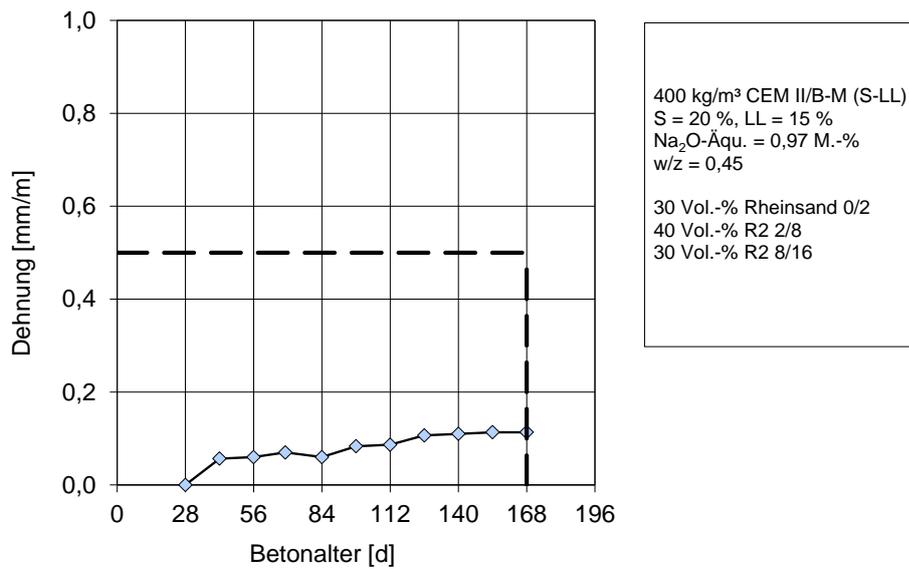


Bild 17 Dehnung von Beton im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung

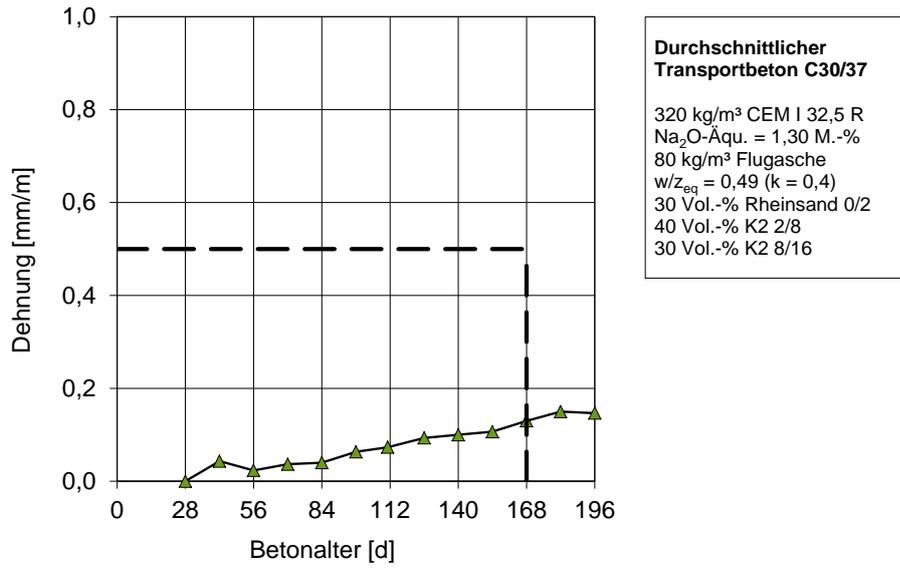


Bild 18 Dehnung von Beton im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung

4 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

Im IGF-Vorhabens 17248 BG leiteten der VDZ und die Brandenburgische Technische Universität Cottbus - Senftenberg (BTU) Kriterien für eine Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S und die darauf abgestimmten Maßnahmen ab, mit denen eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) vermieden werden kann.

Orientierungswerte Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S

Aufgrund der Ergebnisse der Nebelkammerlagerung und der AKR-Performance-Prüfungen wurden potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen identifiziert. Für eine Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S wurde ein Orientierungswert für die Dehnung in der Nebelkammer von $\leq 0,90$ mm/m abgeleitet. Auf dieser Grundlage wurden für weitere Gesteinskörnungsprüfungen ebenfalls Orientierungswerte mit dem Ziel definiert, dass kein anderes Verfahren zu einer günstigeren Einstufung kommen sollte als die Nebelkammerlagerung. In **Tabelle 10** sind die Kriterien zur Definition der Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S zusammengefasst. Diese müssten durch weitere Untersuchungen bestätigt werden, in dem weitere Gesteinskörnungen einbezogen werden, die Dehnungen zwischen 0,90 mm/m und 1,40 mm/m nach 280 Tagen in der Nebelkammer aufweisen.

Tabelle 10 Empfehlungen zur Definition der Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S gemäß dem Stand der Untersuchungen und mögliche Kriterien für den BTU-SP-Test

Prüfverfahren	Beurteilungszeitpunkt	E I-S	E II-S	E III-S
40 °C-Nebelkammerlagerung	Betonalter 280 Tage	$\epsilon \leq 0,60$ mm/m	$\epsilon \leq 0,90$ mm/m	$\epsilon > 0,90$ mm/m
		$w < 0,20$ mm	$w \leq 0,30$ mm	$w > 0,30$ mm
60 °C-Betonversuch	Betonalter 140 Tage	$\epsilon \leq 0,30$ mm/m	$\epsilon \leq 1,00$ mm/m	-
Schnellprüfverfahren	13 Tage NaOH-Lagerung	$\epsilon \leq 1,00$ mm/m	$\epsilon \leq 1,50$ mm/m	-
BTU-SP-Test	14 Tage KOH-Lagerung	$SP_{AKR} < -0,3$	$SP_{AKR} \leq 3,0$	-

Vergleich der Gesteinskörnungsprüfungen

Die Ergebnisse von 17 Gesteinskörnungsprüfungen (Schnellprüfverfahren und 60 °C-Betonversuch) wurden mit den Ergebnissen der Nebelkammerlagerung (Referenzverfahren) verglichen. In keinem Fall wurde eine Gesteinskörnung mit der Nebelkammer als E III-S bewertet, die mit dem Schnellprüfverfahren oder dem 60 °C-Betonversuch in E I-S eingeordnet wurde.

Orientierungswert BTU-SP-Test

Der BTU-SP-Test ist kein Verfahren nach Alkali-Richtlinie. Ein Grenzwert zur Einstufung existiert bisher nicht. Gesteinskörnungen, welche die Nebelkammerlagerung bestanden, wiesen SP_{AKR} -Werte $< -0,3$ auf.

Maßnahmen Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S

Maßnahmen für potenzielle E II-S-Gesteinskörnungen wurden mit AKR-Performance-Prüfungen abgeleitet. Dafür wurden Portlandzemente verwendet, die stellvertretend für gleichwertige Zemente und betontechnische Lösungen, wie sie in der Praxis eingesetzt werden, zu betrachten sind. In **Tabelle 11** sind die Na_2O -Äquivalente bezogen auf Portlandze-

mente aufgeführt, bei denen die AKR-Performance-Prüfungen mit den potenziellen E II-S-Gesteinskörnungen bestanden wurden.

Tabelle 11 Na₂O-Äquivalent bezogen auf Portlandzement, bei denen die AKR-Performance-Prüfungen bestanden wurden

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt kg/m ³	Na ₂ O-Äquivalent bezogen auf CEM I für die Feuchtigkeitsklasse		
		WO (trocken)	WF (feucht)	WA (feucht + Alkalizufuhr)
E II-S	≤ 300	keine	keine	Keine
	≤ 350	keine		≤ 1,00
	> 350	keine	≤ 1,00	≤ 0,80

Bei einer Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S, der Feuchtigkeitsklasse WA und einem Zementgehalt > 350 kg/m³ wäre NA-Zement als Maßnahme sinnvoll, da NA-Zemente normativ geregelt sind. Durch die Festlegung würde ein Sicherheitsabstand von rd. 0,20 M.-% im Na₂O-Äquivalent zum Ergebnis der Laborprüfungen bestehen.

In folgenden Anwendungsfällen müssten bei der Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S noch praxisgerechte Maßnahmen definiert werden, da normativ keine Kategorie für Portlandzemente mit einem Na₂O-Äquivalent von 1,00 existiert:

- Feuchtigkeitsklasse WF und Zementgehalt > 350 kg/m³
- Feuchtigkeitsklasse WA und Zementgehalt ≤ 350 kg/m³

Vorläufig können für die Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S die Maßnahmen gemäß **Tabelle 12** empfohlen werden.

Tabelle 12 Empfehlungen vorbeugender Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton bei Gesteinskörnungen einer potenziellen Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S

Alkaliempfindlichkeitsklasse	Zementgehalt kg/m ³	Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse		
		WO (trocken)	WF (feucht)	WA (feucht + Alkalizufuhr)
E II-S	≤ 300	keine	keine	Keine
	≤ 350	keine		geeignete Zemente
	> 350	keine	geeignete Zemente	NA-Zement

Die Kriterien für „geeignete Zemente“ müssten zukünftig erarbeitet werden. Die Versuche lassen vermuten, dass die folgenden Kriterien möglich wären:

- Einsatz von CEM II/B- und CEM III/A-Zementen
- Einsatz von Zement (z) und Flugasche (f) bei f/z = 0,25 in Massenanteilen und einer praxisüblichen Anrechnung der Flugasche mit $k_f = 0,4$

Bei einem typischen Transportbeton, der Flugasche enthält, wäre demnach keine schädigende AKR mit Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E II-S zu erwarten.

5 Literatur

- [AFN04a] AFNOR FD P 18-456, 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
- [AFN04b] AFNOR FD P 18-456, 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
- [Bon73] Bonzel, J.; Dahms, J.: Alkalireaktion im Beton
In: beton 23 (1973) H. 11, S. 495-500 und H. 12, S. 547-554
- [Bon86] Bonzel, J.; Krell, J.; Siebel, E.: Alkalireaktion im Beton
In: Beton 36 (1986) 9, S.345-348; 10, S.385-388
- [Bor11] Borchers, I.; Müller, Ch.: Assessment of the alkali-reactivity potential of specific concrete mixtures to mitigate damaging ASR in concrete structures
In: Dehn, Frank; Beushausen, Hans: Performance-based Specifications for Concrete: Proceedings. Leipzig : MFPA, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig, 2011, S. 98-106
- [Bor12] Borchers, Ingmar; Müller, Ch.: Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA. In: Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg): 18. Internationale Baustofftagung 12.-15. September 2012, Weimar ; Tagungsbericht Bd. 2. - Weimar, 2012 (ibausil : 18), S.327-336
- [Bor14] Borchers, I.; Müller, Ch.: Praxisgerechte Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA in AKR-Performance-Prüfungen. In: beton 64 (2014) H. 10, S.403-409
- [BTB08] Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB) [Herausgeber]: Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton. Technischer Bericht TB-BTe 2135/2007 des Forschungsinstituts der Zementindustrie vom 26.11.2007
Download:
http://www.betonshop.de/p545_kobilanzielle_baustoffprofile_fuer_transportbeton_e (29.04.2015)
- [CEN07] Dokument CEN/TC 104 N 810: Executive summary of the final report of the PARTNER project and recommendations to CEN TC154 and CEN TC104, 2007
- [DAf74] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton : Vorläufige Richtlinie-Fassung Februar 1974. In: Beton 24 (1974) 5, S.179-185
- [DAf07] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton : Alkali-Richtlinie. Berlin : Beuth, 2007
- [DAf13] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton : Alkali-Richtlinie. Berlin : Beuth, 2013
- [Lin10] Lindgard, J.; Nixon, Ph. J.; Borchers, I.; Schouenborg, B.; Wigum, B. J.; Haugen, M.; Akesson, U. (2010): The EU "PARTNER" project -European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: Final results and recommendations. In: Cement and Concrete Research (40), pp. 611-635

- [Mül14] Müller, Christoph; Borchers, Ingmar: AKR-Performance-Prüfungen: Erweiterung der Datenbasis mit dem 60 °C•Betonversuch unter besonderer Berücksichtigung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen : AiF-Forschungsvorhaben Nr. 16569 N. Düsseldorf: VDZ gGmbH, 2014 (AiF-ForschungsvorhabenIGF-Forschungsvorhaben 16569 N)
- [SIA12] Merkblatt SIA 2042: Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten, 2012
- [Sie06] Siebel, E., Böhm, M., Borchers, I.; Müller, Ch., Bokern, J. und Schäfer, E.: AKR-Prüfverfahren: Vergleichbarkeit und Praxis- Relevanz; Teil 1; Teil 2. In: Beton 56; 57 (2006; 2007) 12; 1–2, S. 599–604: S. 63–71
- [VDZ14] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg): Zahlen und Daten : 2014 ; Stand: Mai 2014. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, 2014 (Zahlen und Daten 2014)
- [Lee12] Leemann, A.; Merz, Ch.: Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung. ASTRA-Bericht. AGB 2005/023 und AGB 2006/003, Bern 2012
- [Lee13] Leemann, A.; Merz, Ch.: An attempt to validate the ultra-accelerated microbar and the concrete performance test with the degree of AAR-induced damage observed in concrete structures. Cement and Concrete Research 49 (2013) No. 7, p. 29–37

6 Förderhinweis

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 17248 BG der Forschungsvereinigung VDZ gGmbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.