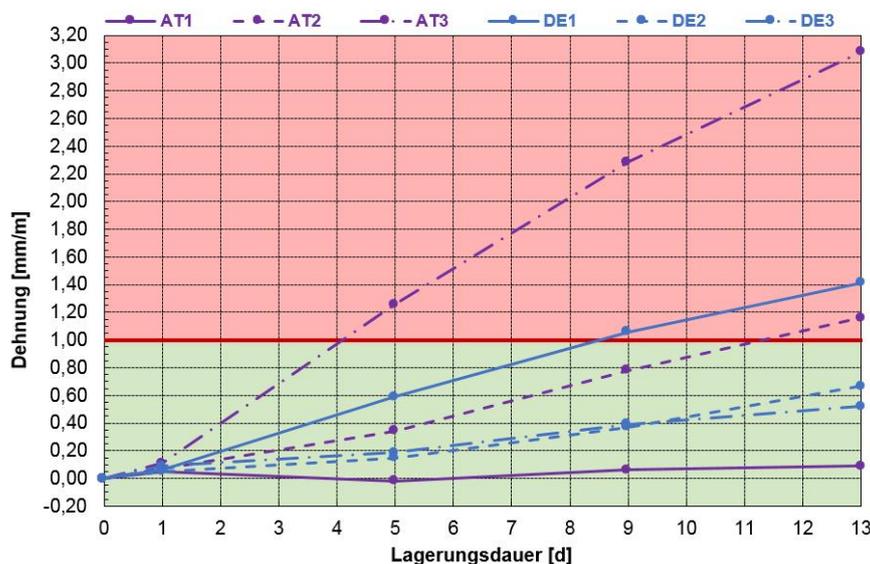


# Evaluierung der Vorgehensweisen in AT und DE zur Vermeidung einer schädigenden AKR auf Betonfahrbahnen - AKR-Evaluierung -

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
DE-AT Kooperation  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2016  
**DE-AT 2016**

Oktober 2018



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)  
Invalidenstraße 44  
10115 Berlin  
Deutschland



Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien  
Österreich



### Für den Inhalt verantwortlich:

Universität Innsbruck  
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften  
Technikerstraße 13  
6020 Innsbruck  
Österreich  
Materialforschungs- und -prüfanstalt an der BAUHAUS-Universität Weimar  
Coudraystraße 9  
99423 Weimar  
Deutschland  
Pöry Infra GmbH  
Materialversuchsanstalt Strass  
Oberdorf 103  
6261 Strass i. Z.  
Österreich



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien  
Österreich



# **Evaluierung der Vorgehensweisen in AT und DE zur Vermeidung einer schädigenden AKR auf Betonfahrbahnen - AKR-Evaluierung -**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
DE-AT Kooperation  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2016  
DE-AT 2016

**Autoren:**

**Dr.-Ing. Sandro WEISHEIT**

**MSc Tobias BADER**

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Roman LACKNER**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Österreich

**Auftragnehmer:**

Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften (AT)

Materialforschungs- und -prüfanstalt an der BAUHAUS-Universität Weimar (DE)

Pöyry Infra GmbH, Materialversuchsanstalt Strass (AT)

## Inhalt

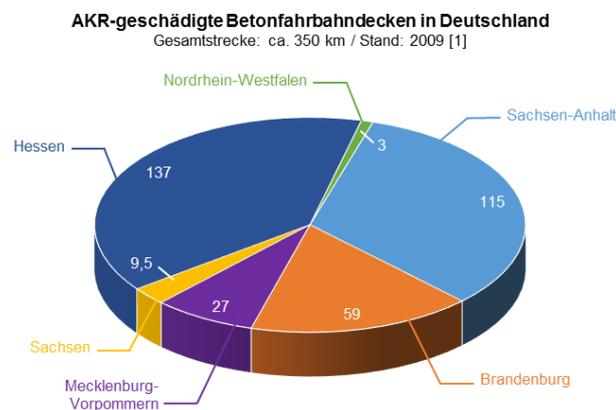
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG .....	5
1.1. Stand der Technik .....	5
1.2. Problemstellung.....	6
1.3. Ziele des Vorhabens.....	6
1.4. Geplante Arbeitspakete zum Erreichen der Ziele .....	7
2. AP2 – BEWERTUNG DES STANDES DER TECHNIK .....	8
2.1. Recherche des Standes der Technik in den jeweiligen Ländern .....	8
2.2. Bewertung der Vorgehensweisen in den jeweiligen Ländern .....	14
2.3. Entwicklung eines gemeinsamen zukünftigen Konzeptes .....	16
3. AP3 – EXPERIMENTELLE CHARAKTERISIERUNG VON GESTEINS- KÖRNUNGEN .....	17
3.1. Auswahl Gesteinskörnungen .....	17
3.2. Durchführung von bestehenden Schnelltests an Gesteinen .....	19
3.2.1. Aufbereitung.....	19
3.2.2. Testverfahren .....	19
3.2.3. Ergebnisse .....	21
3.3. Durchführung von bestehenden Langzeitversuchen an Gesteinen .....	23
3.3.1. Aufbereitung.....	23
3.3.2. Testverfahren .....	23
3.3.3. Ergebnisse .....	25
3.3.4. Untersuchungen mittels Uranylacetat-Fluoreszenz-Schnelltest .....	29
3.3.5. FIB-Klimawechsellagerung als Performance-Prüfung .....	32
3.4. Gemeinsame Bewertung der bestehenden Testmethoden .....	37
4. AP4 – ENTWICKLUNG VON ANSÄTZEN FÜR EINEN ALTERNATIVEN SCHNELLTEST .....	39
4.1. Vorstellung der IFB-Komplexprüfmethode.....	39
4.2. Bewertung der recherchierten Versuche an der MFPA Weimar .....	40
5. AP5 – BEWERTUNG VERFÜGBARER MODELLIERUNGSANSÄTZE .....	45
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	46
REFERENZEN .....	49

## 1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

### 1.1. Stand der Technik

Als Folge der steigenden Verkehrsbelastung erfolgt die Ausführung von Bundesfernstraßen zunehmend in Betonbauweise. Ein wesentlicher Vorteil dieser Bauweise gegenüber anderen liegt in der wesentlich längeren Lebensdauer bei hoher Beanspruchung. Neben der Beanspruchung aus Klima und Verkehr werden Betonfahrbahnen insbesondere durch die Zufuhr von Taumitteln im Winter beansprucht. In der nahen Vergangenheit zeigte sich allerdings, dass bei Fehlern in der Auswahl der Ausgangsstoffe und daraus resultierender Schädigung der Betonfahrbahndecken eine erhebliche Reduzierung ihrer Lebensdauer auftreten kann. Der Grund dafür liegt in vielen Fällen in einer betonschädigenden Reaktion zwischen der alkalilöslichen Kieselsäure aus den Gesteinskörnungen und den vorhandenen/eingetragenen Alkalihydroxiden der Porenlösung des Betons – die sogenannte Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR).

Die Aktualität des Themas „Schäden auf Betonstraßen infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)“ wird in Deutschland allein durch zwei Anfragen im Deutschen Bundestag aus den Jahren 2009 [Deutscher Bundestag 2009] und 2014 [Deutscher Bundestag 2014] deutlich. Hier wird explizit auf dramatische Schäden an Betonstraßen, welche erst in den 1990er Jahren gebaut oder ausgebaut wurden, eingegangen. Auf Anfrage wurde 2009 eine Übersicht erarbeitet, die aufzeigt in welchen Regionen Bundesfernstraßen von der Alkali-Kieselsäure-Reaktion betroffen sind. Aus den Daten geht hervor, dass vor allem die Mittel- und Ostdeutschen Bundesländer betroffen sind (siehe Abbildung 1). So konnten bereits 2009 Schäden an insgesamt 350 km Betonfahrbahndecken auf Bundesfernstraßen identifiziert werden. Bei moderatem Ansatz von etwa 6 Millionen €/km Straße für eine Sanierung bzw. einen Neubau kann mit Schäden von über 2 Milliarden € gerechnet werden.



**Abbildung 1: Durch Alkalikieselsäure-Reaktion geschädigte Betonfahrbahndecken in Deutschland; aufgeteilt nach Bundesländern in km [Deutscher Bundestag 2009].**

Anders als in Deutschland kam es in der Vergangenheit im österreichischen Bundesgebiet kaum zu nennenswerten Schäden an Betonstraßen in Folge einer schädigenden AKR. Das mag einerseits daran liegen, dass die Notwendigkeit der Verwendung potentiell schädigender Gesteinskörnungen nicht gegeben war, andererseits dass Schäden an Betonstrukturen womöglich nicht eindeutig einer AKR zugewiesen wurden (Treiberscheinungen in Betonstrukturen kann diverse Ursache haben).

## **1.2. Problemstellung**

In der EN 12620:2002+A1:2008 „*Gesteinskörnungen für Beton*“ ist die Vorgehensweise zur Vermeidung einer schädigenden AKR in Fahrbahndecken aus Beton derzeit nicht normiert. Entsprechende Maßnahmen können gemäß dieser Norm national geregelt werden. Eine zukünftige europäisch normativ festgelegte Charakterisierung von Gesteinskörnungen auf ihre potentielle Schädigung im Hinblick auf eine AKR ist für alle im Bauprozess involvierten Parteien von großer Bedeutung. Da zukünftig mit einer Verknappung von eindeutig als nicht schädigend klassifizierten Natursteinressourcen für die Betonherstellung zu rechnen ist, bzw. heute schon Tunnelausbruchsmaterial für die Herstellung von Frischbeton für die Anwendung im Straßen- und Infrastrukturbau verwendet wird, ist diese Charakterisierung und damit verbundene Rechtssicherheit für die genannten Bauwerke mit angestrebter langer Nutzungsdauer von großer Bedeutung.

## **1.3. Ziele des Vorhabens**

In dem gegenständigen Vorhaben sollen die Vorgehensweisen zur Vermeidung einer AKR in Österreich und Deutschland evaluiert werden. Dazu soll eine umfangreiche Recherche in beiden Ländern zur gegenwärtigen Vorgehensweise bzw. den entsprechenden Maßnahmen zur Vermeidung einer betonschädigenden AKR erfolgen. Anschließend soll aus den Ergebnissen Ansätze für ein gemeinsames Konzept zur Vermeidung einer betonschädigenden AKR ausgearbeitet werden. Dieses Konzept soll ggf. bei einer europäischen Überarbeitung der Normierung für die Verfolgung einer gemeinsamen Linie berücksichtigt werden können. Fortführend soll eine Bewertung der in den jeweiligen Ländern geregelten Prüfmethode erfolgen. Diesbezüglich sind vergleichende experimentelle Versuche an identischen Gesteinskörnungen geplant. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen ebenfalls in die Entwicklung des gemeinsamen Konzeptes einfließen. Darüber hinaus sollen weiterführende

Ansätze für ein alternatives Schnellprüfverfahren entwickelt und die gegenwärtig verfügbaren Ansätze zur modellmäßigen Erfassung einer schädigenden AKR hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Ingenieurspraxis betrachtet werden.

#### **1.4. Geplante Arbeitspakete zum Erreichen der Ziele**

Zum Erreichen der genannten Ziele werden im Rahmen von fünf Arbeitspaketen (AP) folgende Beiträge geleistet:

**AP 1 Projektmanagement**

**AP 2 Bewertung des Standes der Technik:** Zur Bewertung des Standes der Technik sind zunächst umfangreiche Recherchen - unabhängig vom jeweiligen Land - geplant. Anschließend soll eine Bewertung der Methoden auf ihre Wirtschaftlichkeit und vor allem auf ihre Wirksamkeit erfolgen. Daraus soll ein Konzept für eine möglicherweise zukünftige gemeinsame Vorgehensweise entwickelt werden.

**AP 3 Experimentelle Charakterisierung von Gesteinskörnungen:** In diesem Arbeitspaket sollen sowohl petrographische und mineralogische Untersuchungen, Schnellprüfverfahren als auch Langzeitmethoden aus Österreich und Deutschland an alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen verschiedener Zusammensetzungen vergleichend durchgeführt werden. Auch hier soll eine Evaluierung bezüglich der Aussagekraft/Objektivität erfolgen.

**AP 4 Entwicklung von Ansätzen für einen alternativen Schnelltest:** Hier sollen bestehende Schnelltests (auch international angewendete Methoden) weiterentwickelt werden. Das Ziel in diesem AP liegt in der Entwicklung von Ansätzen zur Verbesserung von Schnellprüfverfahren.

**AP 5 Bewertung verfügbarer Modellierungsansätze:** In diesem AP sollen Ansätze für die Abbildung chemischer Reaktionen in der Materialstruktur für ihre potentielle Anwendung auf die AKR untersucht werden. Zudem soll die Aufbereitung der hierfür erforderlichen Eingangsparameter, die auch im Rahmen der AP2 bis AP4 einfließen, den Weg für eine zukünftige Modellierung und sohin die Erstellung eines Prognose-Tools für das AKR-Risiko von Zuschlagstoffen ebnen.

## 2. AP2 – BEWERTUNG DES STANDES DER TECHNIK

### 2.1. Recherche des Standes der Technik in den jeweiligen Ländern

Die gegenwärtig in Österreich (AT) getroffenen Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR in Beton basieren auf der 2006 eingeführten ÖNORM B 3100 „*Beurteilung der Alkali-Kieselsäure Reaktivität im Beton*“ und variieren in Abhängigkeit der Beanspruchungsklasse. Betonfahrbahnen werden der Beanspruchungsklasse 2 (hoch) zugeordnet. Sämtliche Bauteile mit Ausnahme von jenen der Beanspruchungsklasse 2 werden in Beanspruchungsklasse 1 (gering bis mäßig) zusammengefasst. Betonbauteile der Beanspruchungsklasse 2 sind charakterisiert durch die Exposition gegenüber stark belastenden Umweltbedingungen (Alkalizufuhr von außen, mäßige bis starke Durchfeuchtung, wechselnde und hohe Oberflächenbauteiltemperatur, dynamische Belastung). Daraus resultieren die nachfolgend aufgelisteten Maßnahmen zur Vermeidung einer betonschädigenden AKR:

- Beurteilung Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von Gesteinskörnungen,
- Anforderungen an die sonstigen Betonausgangsstoffe und
- Angaben zur Ausführung der Betonbauteile [ÖNORM B 3100 2008].

Für die Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von Gesteinskörnungen werden Schnellprüfungen an Mörtelprismen (Dauer: 15 Tage) und bei negativem Ergebnis der Schnellprüfung auch Langzeitprüfungen an Betonprismen (Dauer: 12 Monate) durchgeführt. Dieses Vorgehen ist unabhängig von eventuell vorliegenden praktischen Erfahrungen. Die Prüfungen werden vor Baubeginn (Eignungsnachweis durch den Auftragsnehmer) und im Zuge der Bauabwicklung (Kontroll- / Abnahmeprüfung durch den Auftraggeber) durchgeführt. Als Zemente werden für Beanspruchungsklasse 2 nach ÖNORM B 3327-1 „*Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen - Teil 1: Zusätzliche Anforderungen*“ sogenannte Deckenzemente gefordert, die bei Anwesenheit reaktiver Kieselsäure in der Gesteinskörnungen eine verringerte Dehnung bewirken. Die jeweiligen Anforderungen an die Zusatzmittel und Zusatzstoffe sowie die Angaben zur Ausführung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

In Deutschland (DE) erfolgen die Herstellung, Verarbeitung und Prüfung von Beton für Fahrbahndecken im Bereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) nach den jeweils aktuellen Regeln der „*Zusätzlichen Technischen*

*Vertragsbedingungen*“ (ZTV Beton-StB) [ZTV 2007], den *„Technischen Lieferbedingungen*“ (TL Beton-StB) [TL 2007] und den *„Technischen Prüfvorschriften*“ (TP Beton-StB bzw. TP B-StB) [TP 2010 bzw. TP 2015]. Diese vertraglichen Bauregeln sind allgemeingültig für den bundesdeutschen Betonstraßenbau. Die Inhalte dieser Regelwerke basieren auf den bauordnungsrechtlichen Hauptnormen für Beton und dessen Verarbeitung (DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 und DIN 1045-3). Die ZTV-Beton-StB, TL Beton-StB und TP Beton-StB bzw. TP B-StB modifizieren, erweitern und präzisieren die jeweiligen Regelwerksinhalte auf die besonderen Anforderungen des Betonstraßenbaus.

Die in DE getroffenen Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR auf Betonfahrbahnen wird durch sogenannte *„Allgemeine Rundschreiben Straßenbau“* (ARS) des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS – Vorgänger vom BMVI) geregelt. Diese ARS stellen wiederum eine Erweiterung der ZTV Beton-StB dar.

Mit dem Rundschreiben Nr. 15/2005 aus dem Jahr 2005 [ARS 2005] wurde erstmals die *„Gutachterlösung“* zur Eignungsbestätigung von Grauwacke, Kies-Edelsplitt der Oberrheins, Quarzporphyr, rezyklierte Gesteinskörnungen und alle nach Deutschland importierten Gesteinskörnungen eingeführt. Zu diesem Zeitpunkt waren lediglich vier Stellen in Deutschland zur Erstellung des Gutachtens zur Eignung der Gesteine zugelassen. Des Weiteren durften alle in der Richtlinie *„Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion in Beton“* (Alkali-Richtlinie) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [DAfStb 2013] genannten alkalireaktiven Gesteinskörnungen ebenfalls nicht beim Bau von Fahrbahndecken aus Beton verwendet werden.

Die aktuell gültigen Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR auf Betonfahrbahnen ist durch das Allgemeine Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 4/2013 aus dem Jahr 2013 [ARS 2013] geregelt. Die entsprechenden Maßnahmen richten sich nach der Belastungsklasse (Bk) gemäß der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO), Ausgabe 2012. Die Betonfahrbahnen der Belastungsklassen Bk100 bis Bk1,8 (u.a. Autobahnen, Schnellstraßen) werden nach TL-Beton-StB 07 der Feuchtigkeitsklasse WS zugeordnet. Es müssen nun alle groben Gesteinskörnungen mit Korngruppen  $d \geq 2$  mm, welche im Betonstraßenbau eingesetzt werden sollen, untersucht werden. Eine Beachtung der Einstufungen von GK nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb ist nicht mehr vorgesehen. Im aktuellen ARS Nr. 4/2013 ist die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen oder der Betone für die Feuchtigkeitsklasse WS durch eines der folgenden drei Verfahren nachzuweisen:

- V1: Gutachten zum Beton i.d.R. durch eine AKR-Performance-Prüfung
- V2: WS-Grundprüfung der groben Gesteinskörnung mit  $d \geq 2 \text{ mm}$
- V3: WS-Bestätigungsprüfung der groben Gesteinskörnung bei Vorliegen einer bestandenen WS-Grundprüfung oder eine Rezepturbewertung durch Prüfung der Betonausgangsstoffe bei Vorliegen einer bestandenen AKR-Performance-Prüfung

Die WS-Grundprüfung wird nach untenstehendem Prüfablauf (siehe Abbildung 2) durchgeführt. Dabei wird zunächst an allen Kornfraktionen von drei unterschiedlichen Probenahmen ein Schnelltest nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb durchgeführt. Die Korngruppen mit den größten Dehnwerten aus dem Schnelltest werden für weitere Versuche ausgewählt. Anschließend erfolgt an den ausgewählten Korngruppen eine petrographische Charakterisierung mit der Fragestellung, ob die Ergebnisse der Korngruppe 2/8 mm auf die Korngruppen  $> 8 \text{ mm}$  übertragen werden können. Ist dies der Fall, muss lediglich ein WS-Betonversuch durchgeführt werden. Andernfalls müssen zwei WS-Betonversuche vorgenommen werden.

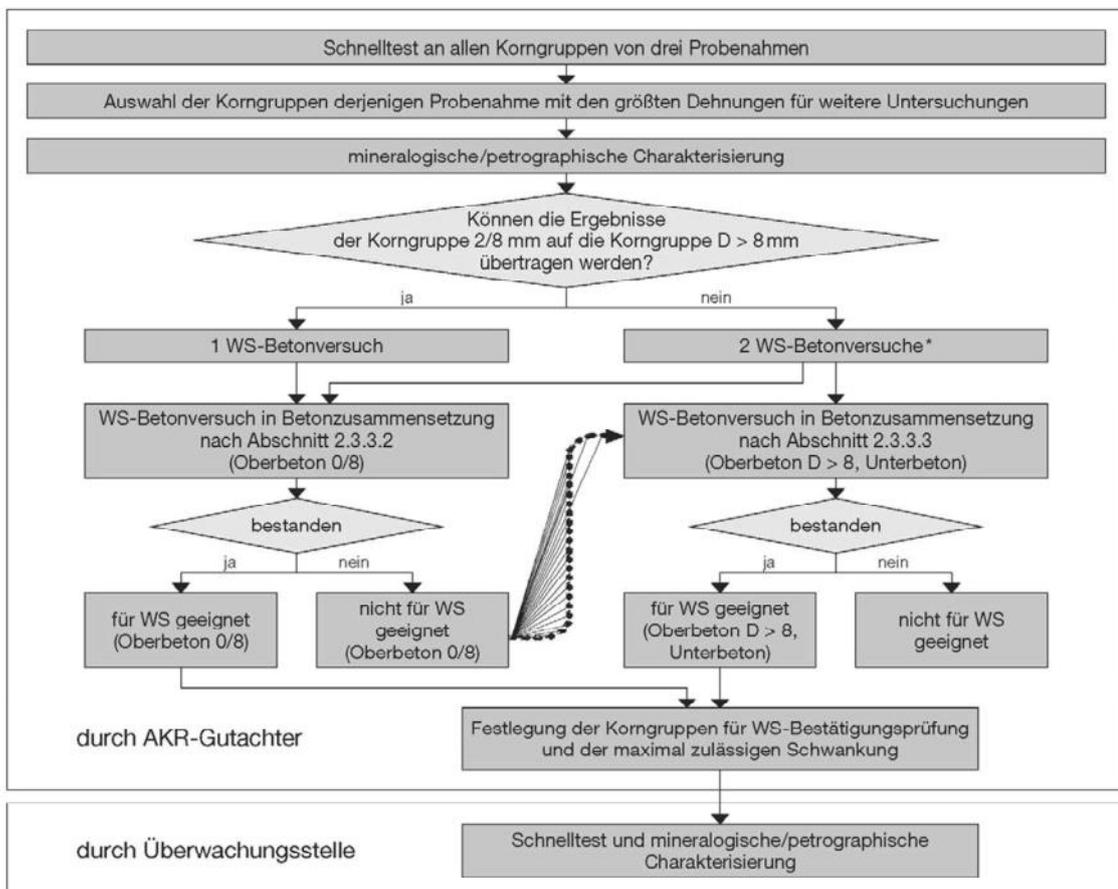


Abbildung 2: Prüfablauf der WS-Grundprüfung nach dem Allgemeinen Rundschreiben ARS-Nr. 4/2013 [ARS 2013].

Für den WS-Betonversuch sind folgende zwei Prüfverfahren zugelassen:

- WS-Betonversuch mittels FIB-Klimawechsellagerung unter Einwirkung einer NaCl-Prüflösung
- WS-Betonversuch mittels 60°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

Fahrbahndecken aus Beton der Belastungsklassen Bk1,0 bis Bk0,3 (Wohnstraßen, Wohnwege) sind der Feuchtigkeitsklasse WA zugeordnet und entsprechend gilt die Alkali-Richtlinie des DAfStb. Die entsprechenden Maßnahmen umfassen in Abhängigkeit der Feuchtigkeits- und Alkaliempfindlichkeitsklasse sowie des Zementgehaltes nachfolgend aufgelistet Punkte:

- Verwendung eines NA-Zementes ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $< 0,6 \text{ M.-%}$ )
- Austausch reaktiver Gesteinskörnungen
- Anfertigung einer gutachterlichen Stellungnahme (für die Erstellung sind besonders fachkundige Personen einzuschalten, i.d.R. Mitglieder des DAfStb Unterausschuss Alkalireaktion im Beton)

Eine Zusammenfassung der Vorgehensweise und Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR in Betonfahrbahnen in AT und DE ist in Tabelle 1 gegeben.

**Tabelle 1: Gegenüberstellung der Vorgehensweise und Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR in Betonfahrbahnen in AT und DE.**

	<b>AT ÖNORM B 3100</b>	<b>DE ARS 04/2013, ZTV Beton-StB, TL Beton-StB, TP Beton-StB</b>	<b>DE Alkali-Richtlinie des DAfStb</b>
Einordnung Betonfahrbahn	Beanspruchungsklasse 2	Bk100 bis Bk1,8 (Feuchtigkeitsklasse WS)	Bk1,0 bis Bk0,3 (Feuchtigkeitsklasse WA)
Prüfmethoden zur Einstufung der Gesteinskörnungen	Schnellprüfung (Mörtelprismen) Langzeitprüfung (Betonprismen)	Schnellprüfung (nach Alkali-Richtlinie des DAfStb) FIB-Klimawechselagerung 60°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr	Schnellprüfung 40°C-Nebelkammerlagerung 60°C-Betonversuch
Zement	„Deckenzemente“ (CEM-II/..S) [ÖNORM B 3327-1 2005]	siehe Tabelle 2	ggf. na-Zemente
Zusatzmittel	Dosierung über 1 % der Bindemittelmasse muss einen deklarierten Alkaligehalt unter 1 % aufweisen	siehe Tabelle 2	Der Gesamtalkaligehalt aller Betonzusatzmittel darf 600 g/m <sup>3</sup> Beton nicht überschreiten
Zusatzstoffe	Anforderungen an aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ) gemäß [ÖNORM B 3309 2004]	siehe Tabelle 2	Der wirksame Alkaligehalt aller Betonzusatzstoffe darf insgesamt 600 g/m <sup>3</sup> Beton nicht überschreiten (außer Flugasche und Hüttensandmehl)
Ausführung	Prävention Wassereintritt, Entwässerungsmaßnahmen (Drainage), ausreichende Nachbehandlung	Prävention Wassereintritt, ausreichende Nachbehandlung	keine Angaben

**Tabelle 2: Anforderungen an die Ausgangsstoffe für Fahrbahndeckenbeton nach TL Beton-StB [Zement-Merkblatt 2015].**

Ausgangsstoff	Vorschrift	zusätzliche Anforderungen			
Zement	DIN EN 197-1 und DIN 1164-10	CEM I, CEM II/A-S, B-S, A-T, B-T, A-LL der Festigkeitsklasse 32,5 R oder alternativ 42,5 N CEM III/A $\geq$ 42,5			
		<ul style="list-style-type: none"> <li>Erstarren bei 20 °C <math>\geq</math> 2 Stunden<sup>1)</sup></li> <li>Nur für CEM I 32,5 R oder CEM I 32,5 N: <ul style="list-style-type: none"> <li>Mahlfeinheit <math>\leq</math> 3.500 cm<sup>2</sup>/g</li> <li>Wasseranspruch <math>\leq</math> 28,0 M.-%</li> <li>2-Tage-Druckfestigkeit <math>\leq</math> 29,0 N/mm<sup>2</sup></li> </ul> </li> </ul>			
		Festigkeitsklasse 42,5 R Frühhochfester Straßenbeton mit FM			
	TL Beton-StB  Geforderter charakteristischer Wert des Alkaligehalts von Zementen für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton	Zement	Hüttensandgehalt  [M.-%]	Alkaligehalt des Zements  Na <sub>2</sub> O-Äquivalent [M.-%]	Alkaligehalt des Zements ohne Hüttensand bzw. gebrannten Schiefer Na <sub>2</sub> O-Äquivalent [M.-%]
		CEM I		$\leq$ 0,80	
		CEM II/A-S, -T, -LL		$\leq$ 0,80	
		CEM II/B-T			$\leq$ 0,90
CEM II/B-S		21 bis 29		$\leq$ 0,90	
CEM III/A		36 bis 50		$\leq$ 1,05	
Gesteinskörnungen	TL Beton-StB bzw. TL Gestein-StB [10]	Oberbeton bzw. einschichtige Betonfahrbahndecke	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoher Frost-Tausalz-Widerstand: Masseverlust <math>\leq</math> 8 M.-%<sup>2) 3) 4)</sup></li> <li>Organische Verunreinigungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>feine Gesteinskörnung: <math>\leq</math> 0,25 M.-%</li> <li>grobe Gesteinskörnung: <math>\leq</math> 0,05 M.-%</li> </ul> </li> <li>Kornform <ul style="list-style-type: none"> <li>Gesteinskörnungen &gt; 8 mm: <math>\geq</math> 50 M.-% gebrochenes Material der Kategorie C<sub>90/1</sub><sup>5)</sup></li> <li>Gesamtkornmisch: <math>\geq</math> 35 M.-% gebrochenes Material der Kategorie C<sub>90/1</sub><sup>5)</sup></li> <li>Kornmisch D <math>\leq</math> 8 mm: Korngruppe d <math>\geq</math> 2 mm der Kategorie C<sub>100/0</sub> oder C<sub>90/1</sub><sup>5)</sup></li> <li>Kornform der gebrochenen Gesteinskörnungen: FI<sub>20</sub> oder SI<sub>20</sub><sup>6)</sup></li> </ul> </li> <li>Polierwiderstand<sup>7)</sup>: <ul style="list-style-type: none"> <li>Belastungsklassen Bk1,0 bis Bk0,3 (IV bis VI): PSV<sub>angegeben</sub>(42)</li> <li>Belastungsklassen Bk100 bis Bk1,8 (SV, I bis III): (D &gt; 8): PSV<sub>angegeben</sub>(48)</li> <li>Belastungsklassen Bk100 bis Bk1,8 (SV, I bis III): (0/8): PSV<sub>angegeben</sub>(48), bei Waschbeton: PSV<sub>angegeben</sub>(53)</li> </ul> </li> <li>Bezüglich WS-Anforderungen sind die Regelungen des ARS 04/2013 zu beachten</li> </ul>		
		Unterbeton <sup>8)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoher Frost-Widerstand: F2</li> <li>Leichtgewichtige organische Verunreinigungen: siehe Oberbeton</li> <li>Bezüglich WS-Anforderungen sind die Regelungen des ARS 04/2013 zu beachten</li> </ul>		
Wasser	DIN EN 1008 [11]	Meerwasser und Brackwasser sind nur bedingt, Abwasser ist nicht als Zugabewasser geeignet. Die Verwendung von Restwasser (Recyclingwasser) ist für Straßenbeton nicht zulässig.			
Beton-zusatzmittel	DIN EN 934-2 [12] und DIN 1045-2, Zulassungen, Merkblatt Luftporenbeton ...	Bei gleichzeitiger Verwendung eines Luftporenbildners (LP) und entweder Fließmittels (FM) oder Betonverflüssigers (BV) muss mittels einer Wirksamkeitsprüfung die Einhaltung des Abstandsfaktors von maximal 0,20 mm und des Mikro-Luftporengehalts von mindestens 1,5 Vol.-% mit dieser Zusatzmittelkombination nachgewiesen werden.			
Beton-zusatzstoff	DIN 1045-2, DIN EN 450-1 [13]	Anrechnung an den Zementgehalt und Wassergehalt nicht zulässig			

<sup>1)</sup> Gilt nicht für frühhochfesten Straßenbeton der Festigkeitsklasse 42,5 R

<sup>2)</sup> Prüfverfahren: Natriumchlorid-Verfahren nach DIN EN 1367-1, Anhang B

<sup>3)</sup> Bei Frosteinwirkungszone III nach RStO 12 gilt: Masseverlust  $\leq$  5 M.-%

<sup>4)</sup> Grobe Gesteinskörnungen mit einem Masseverlust > 8 M.-% dürfen nur eingesetzt werden, wenn die Prüfung am Beton nach DIN 1045-2, Tabelle U.2 einen Masseverlust  $\leq$  500 g/m<sup>2</sup> ergibt.

<sup>5)</sup> Gilt nur für die Belastungsklassen Bk100 bis Bk1,8 (RStO 01 Bauklassen SV, I bis III)

<sup>6)</sup> Bei zweischichtiger Herstellung mit einem Oberbeton (0/8): FI<sub>15</sub> oder SI<sub>15</sub> für Kornanteil > 2 mm und  $\leq$  8 mm

<sup>7)</sup> Polierwiderstand nach TL-Gestein StB

<sup>8)</sup> Gilt bei zweischichtiger Herstellung der Fahrbahndecke

## 2.2. Bewertung der Vorgehensweisen in den jeweiligen Ländern

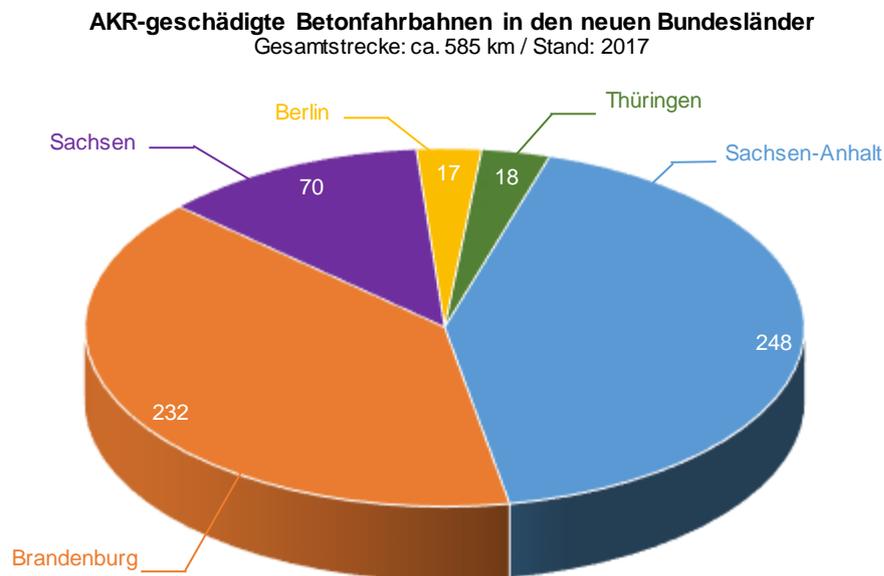
In AT wurden sämtliche Betonfahrbahnen des Autobahnnetzes älter als 10 Jahre hinsichtlich einer schädigenden AKR untersucht. Für dieses Forschungsprojekt wurden die entsprechenden Informationen (Stand November 2016) von der ASFINAG zur Verfügung gestellt. Die Beurteilung des Autobahnnetzes erfolgte an Bohrkernen mittels mikroskopischer Untersuchungen (Gefüge Analysen an Dünnschliffen) anhand eines akkreditierten Prüfverfahrens des ausführenden Ingenieurbüros. Eine AKR im fortgeschrittenen bis stark entwickelten Stadium wurden auf der A1 West Autobahn und A10 Tauern Autobahn im Großraum Salzburg an 13 von 20 Bohrkernen diagnostiziert. Das Alter der untersuchten Bohrkern wurde mit 11 – 22 Jahren angegeben. In welchem Alter erste Schäden auftraten ist nicht überliefert worden. Als potentiell reaktive Gesteinskörnungen wurden Kieselkalke, Quarze, grob- und feinkörnige Quarzite, Feldspäte und Gneise identifiziert. Der verwendete Zementtyp setzt sich aus Portlandzementklinker mit einem Schlackenanteil (CEM II/B-S?) zusammen. Der Zementgehalt wurde mit 400 – 450 kg/m<sup>3</sup> und der Wasserbindemittelwert im Bereich von 0,40 angegeben. Bei den untersuchten Proben wurde mehrheitlich eine ideale feinkugelig-isolierte Einzelporenbildung beobachtet, welche als ein Hinweis für den Einsatz eines Luftporenbildners angesehen wird. Trotz der vereinzelt deutlich ausgeprägten AKR wurden die mikroskopisch festgestellten Rissbreiten als „relativ gering“ beschrieben. Diese Beobachtung könnte nach Meinung des Gutachters aus folgenden Ursachen resultieren:

1. hohe Festigkeit der Bindemittelmatrix
2. geringe Kapillarität der Bindemittelmatrix
3. Verwendung eines Zementes mit Hüttensandanteilen (CEM II/B-S?)

Entsprechend der Bewertung der Betonfahrbahnen älter als 10 Jahre, kann nach Meinung des Gutachters durch den Einsatz eines Portlandhüttenzementes das Ausmaß des Schädigungsbildes einer AKR in Betonfahrbahndecken verringert werden. Dementsprechend scheint der Einsatz von Deckenzementen (CEMII/ .. S) einen effektiven Ansatz zur Reduktion des Restrisikos einer schädigenden AKR darzustellen.

Wie bereits in Kapitel 1.1 erläutert, sind in Deutschland bereits seit 2009 Schäden infolge einer AKR auf über 350 km Bundesfernstraßen bekannt. Eine aktuelle Recherche aus dem Jahr 2017 bei den Straßenbaubehörden der „neuen Bundesländer“ von M. Houben zu einem Beitrag für die Sendung „plusminus“ der ARD zeigte, dass die 2009 erhobenen Schäden noch

weiter gehen [Houben 2017]. So wurde festgestellt, dass in den „neuen Bundesländern“ bislang Schäden an Bundesautobahnen von über 580 km auftraten (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 3: Bis 2017 durch Alkalikieselsäure-Reaktion geschädigte Betonfahrbahndecken in den „neuen Bundesländern“ in km [Houben 2017].**

Da der Schadensumfang in DE im Vergleich zu AT erheblich höher ist, war es im Zuge dieses Projektes nicht möglich, detaillierte Informationen zu den einzelnen aufgetretenen Schäden zu recherchieren. Da die in den einzelnen Bundesländern zuständigen Landesbaubehörden stark ausgelastet sind, war es ebenfalls nicht möglich, das Datum der Fertigstellung der Teilstrecken der jeweils beschädigten Fernstraßen zu recherchieren. Laut Aussage der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) sind seit der Einführung der „Gutachterlösung“ keine Schäden infolge einer AKR an ab 2005 neu gebauten Bundesautobahnen aufgetreten [Wieland 2017]. Dementsprechend scheint diese Vorgehensweise bzgl. der Vermeidung von Schäden infolge einer AKR effektiv zu sein.

Der Umfang der Arbeiten bei den beiden zugelassenen WS-Betonversuchen (FIB-Klimawechsellagerung und 60°C - Betonversuch mit Alkalizufuhr) ist hoch.

### **2.3. Entwicklung eines gemeinsamen zukünftigen Konzeptes**

Für die Ausarbeitung eines gemeinsamen zukünftigen Konzeptes zur Vermeidung einer schädigenden AKR auf Betonfahrbahnen konnten die im Rahmen dieses Projektes nachfolgend vorgestellten Ergebnisse aufzeigen, dass vor allem die Langzeitprüfung der einzelnen nationalen Regelungen zu Unterschieden in der Bewertung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität der untersuchten Gesteinskörnungen führt.

Aus diesem Grund wird empfohlen ein einheitliches „Expositionsszenario“ zu entwickeln, welches im Rahmen der Langzeitprüfungen berücksichtigt wird (z.B. Simulation des externen Alkalieintrags aus Tausalzen durch Lagerung in Natriumhydroxid Lösung). Fortführend konnten die experimentellen Untersuchungen einen nicht zu verachtenden Beitrag des verwendeten Zementes ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalentes) auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktivität der untersuchten Gesteinskörnungen aufzeigen. So wird in AT per Norm die Verwendung eines Portlandhüttenzementes gefordert. In DE werden dagegen besondere Anforderungen an den charakteristischen Wert des Alkaligehaltes verschiedener Zemente gestellt (siehe Tabelle 2). Die Rolle des Zementes, respektive des  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalentes, wurde besonders bei den Ergebnissen der jeweiligen nationalen Schnellprüfungen für Gesteinskörnungen mit einer Dehnung im Bereich des Grenzwertes deutlich.

Ein weiterer zentraler Punkt bei der Ausarbeitung einer gemeinsamen Langzeitprüfung ist, wie die bereits angesprochenen Gesteinskörnungen mit einer Reaktivität im Bereich des Grenzwertes, unterschiedlich stark auf die jeweiligen Umgebungen der untersuchten Langzeitprüfverfahren ansprechen. Aus diesem Grund sind Vergleiche mit eindeutig als AKR bedingten Schäden und Langzeitprüfergebnissen entsprechend vergleichbarer Gesteinskörnungen hilfreich, um eine Definition dieser Gruppe von Gesteinskörnungen zu erstellen. Auf dieser Definition aufbauend können fortführend auch die Bedingungen bzw. Kriterien für die Langzeitprüfverfahren ausgearbeitet werden.

Aufbauend auf den im Rahmen dieses Forschungsprojektes generierten Daten der sechs bzw. sieben untersuchten Gesteinskörnungen ist die Ausarbeitung eines gemeinsamen Konzeptes noch zu verfrüht. Es kann jedoch klar aufgezeigt werden, dass in den Bereichen Langzeitprüfverfahren und Art des verwendeten Zementes ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent) zwei wesentliche Stellschrauben darstellen, die nicht nur für ein bilaterale sondern auch europäische Aufarbeitung der AKR-Problematik bei Betonfahrbahnen einen wesentlichen Beitrag leisten können.

### **3. AP3 – EXPERIMENTELLE CHARAKTERISIERUNG VON GESTEINSKÖRNUNGEN**

#### **3.1. Auswahl Gesteinskörnungen**

Zur Bewertung der Aussagekraft der zu untersuchenden Schnell- und Langzeitprüfverfahren wurden Gesteinskörnungen (GK) folgender zu erwartender Alkali-Kieselsäure-Reaktivität verwendet:

- nicht reaktiv
- schwach reaktiv
- reaktiv im Bereich des Grenzwertes
- deutlich reaktiv

Insgesamt wurden sechs GKs (jeweils drei GKs aus AT(1-3) und DE1-3)) nach den jeweiligen nationalen Prüfverfahren untersucht. Für DE wurde zusätzlich eine vierte GK (DE4) den deutschen Prüfverfahren unterzogen. Fortführend wurden die GKs DE1, DE3 und DE4 einer FIB-Klimawechsellagerung beim F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar unterzogen.

Die ausgewählten Gesteinskörnungen mit petrografischer Zuordnung und der zu erwartenden Alkali-Kieselsäure-Reaktivität sind in Tabelle 3 aufgelistet.

**Tabelle 3: Übersicht der zu untersuchenden Gesteinskörnungen mit petrografischer Zuordnung und der zu erwartenden Alkali-Kieselsäure-Reaktivität. Die Mineralparagenese der Gesteinskörnungen wurde mittels Pulverdiffraktometrie bestimmt.**

AT1 (nicht reaktiv)	AT2 (Reaktivität im Bereich des Grenzwertes)	AT3 (deutlich reaktiv)
 <p>Petrografischer Typ: dolomitischer Kalkstein Mineralparagenese: Calcit, Quarz, Muskovit, Dolomit, Feldspat Größtkorn: 22 mm Rohdichte: 2,85 g/cm<sup>3</sup></p>	 <p>Petrografischer Typ: Orthogneis Mineralparagenese: Quarz, Muskovit, Feldspat, Chlorit Größtkorn: 16 mm Rohdichte: 2,75 g/cm<sup>3</sup></p>	 <p>Petrografischer Typ: Quarzphyllit Mineralparagenese: Quarz, Feldspat, Muskovit, Chlorit Größtkorn: 22 mm Rohdichte: 2,78 g/cm<sup>3</sup></p>
DE1 (deutlich reaktiv)	DE2 (schwach reaktiv)	DE3 (Reaktivität im Bereich des Grenzwertes)
 <p>Petrografischer Typ: Grauwacke Mineralparagenese: Quarz, Feldspat, Foid, Chlorit, Muskovit Größtkorn: 22 mm Rohdichte: 2,71 g/cm<sup>3</sup></p>	 <p>Petrografischer Typ: Granit Mineralparagenese: Feldspat, Quarz, Muskovit, Biotit, Chlorit Größtkorn: 22 mm Rohdichte: 2,68 g/cm<sup>3</sup></p>	 <p>Petrografischer Typ: Granodiorit Mineralparagenese: Quarz, Feldspat, Muskovit, Biotit, Chlorit Größtkorn: 22 mm Rohdichte: 2,65 g/cm<sup>3</sup></p>
DE4 (schwach reaktiv)		
 <p>Petrografischer Typ: Quarzporphyr Mineralparagenese: Quarz, Orthoklas, Plagioklas, Biotit Größtkorn: 22 mm Rohdichte: 2,60 g/cm<sup>3</sup></p>		

## 3.2. Durchführung von bestehenden Schnelltests an Gesteinen

### 3.2.1. Aufbereitung

Die Aufbereitung der Gesteinskörnungen zur Erstellung der entsprechenden Sieblinien für die Schnellprüfungen erfolgte mittels Backenbrecher und Kreuzschlagmühle. Die Kornfraktionen mit den jeweiligen prozentualen Anteilen sind in Tabelle 4 für die Mörtelschnellprüfungen nach ÖNORM B 3100 und der Alkali-Richtlinie des DAfStb aufgelistet.

**Tabelle 4: Übersicht der Aufbereitung der Gesteinskörnungen für die Erstellung einer entsprechenden Sieblinie für die Schnellprüfungen (aufgeführten Werte entsprechen den Mengen für die Prüfung einer Gesteinskörnung) [ÖNORM B 3100 2008] [DAfStb 2013].**

		Mengen für eine Prismenserie (3 Prismen) ÖNORM B 3100		Mengen für eine Prismenserie (3 Prismen) Alkali-Richtlinie des DAfStb	
Fraktion mm	Anteil %	Fraktion 0/4 <sup>1)</sup> g	Frak. >4/GK <sup>2)</sup> g	aus gebrochener grober GK	
				g	grobe GK
0,125/0,25	15	81	121	202	<b>2/8 mm:</b> 28 M.-%
0,25/0,5	25	135	203	338	
0,5/1	25	135	203	338	<b>8/16 mm:</b> 29 M.-%
1/2	25	135	202	338	
2/4	10	54	81	135	
Summe	100	540	810	1350	<b>16/22 mm:</b> 43 M.-%

<sup>1)</sup> gesiebt <sup>2)</sup> gebrochen und anschließend gesiebt

### 3.2.2. Testverfahren

Die Untersuchung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität der Gesteinskörnung erfolgt für AT nach ÖNORM B3100 und für DE nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb. Die Bewertung der GKs erfolgt anhand der gemessenen Dehnung der Mörtelprismen. Die beiden Schnellprüfverfahren sind in Tabelle 5 gegenübergestellt.

**Tabelle 5: Vergleich der im Rahmen des Projektes untersuchten Schnellprüfverfahren in AT und DE [ÖNORM B 3100 2008] [DAfStb 2013].**

	<b>Schnellprüfverfahren ÖNORM B 3100</b>	<b>Schnellprüfverfahren Alkali-Richtlinie des DAfStb</b>
Probekörper	3 Mörtelprismen (4 x 4 x 16 cm)	3 Mörtelprismen (4 x 4 x 16 cm)
W/B	0,47	0,47
Erstellung Sieblinie	Anteil 0 – 4 mm absieben, Anteil 4 mm bis Größtkorn brechen und sieben, Korngemisch im Verhältnis 2:3 zusammensetzen	Korngruppen 2/8, 8/16 und 16/22 gemeinsam als Korngemisch im Verhältnis 28:29:43 brechen und sieben
Sieblinie	15% (0,125/0,25), 25% (0,25/0,5), 25% (0,5/1), 25% (1/2), 10% (2/4)	15% (0,125/0,25), 25% (0,25/0,5), 25% (0,5/1), 25% (1/2), 10% (2/4)
Dauer	15 Tage	14 Tage
Lagerung	1M NaOH-Lösung bei 80 °C	1M NaOH-Lösung bei 80 °C
Messintervall	2 / 7 / 9 / 14 Tage	1 / 4 (5) / 8 (9) / 13 Tage
Zement	Einheitszement CEM I 42,5 R (Na <sub>2</sub> O Äquivalent = 0,85 M.-%)	AKR Prüfzement CEM I 32,5 R (Na <sub>2</sub> O Äquivalent = 1,30 M.-%)
Grenzwert Dehnung	1,0 ‰	1,0 ‰

### 3.2.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Schnellprüfverfahren nach ÖNORM B 3100 und der Alkali-Richtlinie des DAfStb sind in Abbildung 4 dargestellt.

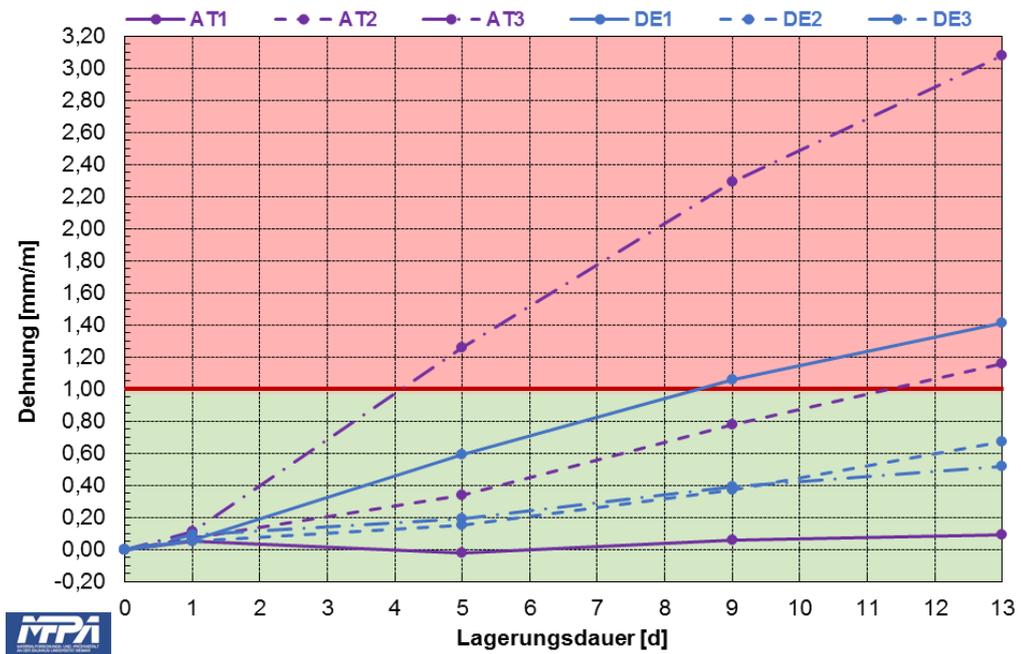
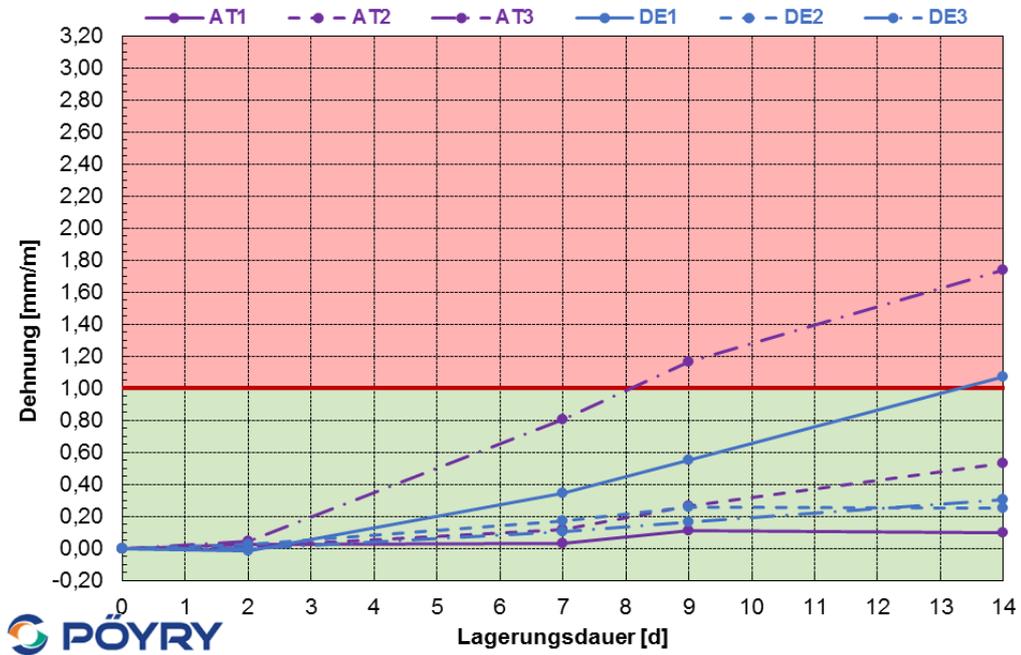


Abbildung 4: Ergebnisse der Schnellprüfungen nach ÖNORM B 3100 (oben) und nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb (unten).

Die als nicht bzw. schwach reaktiv erwarteten GKs AT1 und DE3 zeigten bei beiden Schnellprüfverfahren eine Dehnung unterhalb des Grenzwertes ( $< 1,0 \text{ ‰}$ ) und wurden entsprechend als „unbedenklich“ identifiziert. Die Ergebnisse der beiden GKs DE2 und AT2 mit einer erwarteten Reaktivität im Bereich des Grenzwertes variieren. DE2 zeigte bei beiden Schnellprüfverfahren eine Dehnung unterhalb des Grenzwertes und wurde als „unbedenklich“ eingestuft. Für AT2 übersteigt die bei der Schnellprüfung nach Alkali-Richtlinie des DAfStb gemessene Dehnung den Grenzwert, wohingegen die Dehnung beim Schnellprüfverfahren der ÖNORM B 3100 unterhalb des Grenzwertes liegt und die GK entsprechend als unbedenklich eingestuft wurde. Die deutlich reaktiven GKs AT3 und DE1 wurden bei beiden Schnellprüfverfahren mit einer Dehnung über dem Grenzwert als reaktiv identifiziert, wobei Unterschiede beim Ausmaß der Dehnung, insbesondere beim Quarzphyllit, zu beobachten waren.

### 3.3. Durchführung von bestehenden Langzeitversuchen an Gesteinen

#### 3.3.1. Aufbereitung

Die Aufbereitung der Gesteinskörnungen zur Erstellung der entsprechenden Sieblinien für die Langzeitprüfverfahren erfolgte mittels Backenbrecher und Kreuzschlagmühle. Die Kornfraktionen mit den jeweiligen prozentualen Anteilen sind in Tabelle 6 für die Langzeitprüfungen dargestellt.

**Tabelle 6: Übersicht der Aufbereitung der Gesteinskörnungen für die Erstellung einer entsprechenden Sieblinie für die Langzeitprüfungen (aufgeführten Werte entsprechen den Mengen für die Prüfung einer Gesteinskörnung) [ÖNORM B 3100 2008] [DAfStb 2013].**

Fraktion mm	Mengen für eine Prismenserie (2 Prismen) ÖNORM B 3100		Anmerkung	Mengen für eine Balkenserie (3 Balken + 1 Würfel) Alkali-Richtlinie des DAfStb		Anmerkung
	Anteil			Anteil		
	%	g		%	g	
0	1	180	<i>Prüfgut (bei Fehlen feiner Kornanteile sind grobe Kornanteile zu brechen)</i>	30	24000	<i>inertes Material</i>
0,063	2	360				
0,125	2	360				
0,25	6	1080				
0,5	7	1260				
1	11	1980				
2	11	1980		20	16550	<i>Prüfgut</i>
4	15	2700				
8	25	4500				
16	15	2700				
22	5	900		30	24820	
Summe	100	18000		100	81900	

#### 3.3.2. Testverfahren

Die Untersuchung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität der Gesteinskörnung erfolgt für AT nach ÖNORM B 3100 und für DE nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb. Die jeweiligen Langzeitprüfverfahren sind in Tabelle 7 gegenübergestellt.

**Tabelle 7: Vergleich der im Rahmen des Projektes untersuchten Langzeitprüfverfahren in AT und DE.**

	<b>Langzeitprüfverfahren ÖNORM B 3100</b>	<b>40°C- Nebelkammerlagerung Alkali-Richtlinie des DAfStb</b>	<b>60°C-Betonversuch über Wasser Alkali-Richtlinie des DAfStb</b>
Probekörper	2 Betonprismen (10 x 10 x 36 cm)	3 Betonbalken (10 x 10 x 50 cm), 1 Betonwürfel (Kantenlänge 30 cm)	3 Betonprismen (7,5 x 7,5 x 28 cm)
Dauer	364 Tage	270 Tage	140 Tage
W/B-Wert	0,45	0,45	0,45
Erstellung Sieblinie	Körnungen absieben für Erstellung Sieblinie (bei fehlender feiner Kornanteile sind grobe Kornanteile entsprechend zu brechen), bei Fehlen grober Kornanteile entsprechend brechen	ggf. Körnungen absieben und Sieblinie zusammenstellen (keine Körnungen brechen)	ggf. Körnungen absieben und Sieblinie zusammenstellen (keine Körnungen brechen)
Sieblinie	22 = 5 M.-% 16 = 15 M.-% 8 = 25 M.-% 4 = 15 M.-% 2 = 11 M.-% 1 = 11 M.-% 0,5 = 7 M.-% 0,25 = 6 M.-% 0,125 = 2 M.-% 0,063 = 2 M.-% 0 = 1 M.-%	30 Vol.-% 0/2 mm (inert) 20 Vol.-% 2/8 mm zu prüfende GK 20 Vol.-% 8/16 mm zu prüfende GK 30 Vol.-% 16/22 mm zu prüfende GK	30 Vol.-% 0/2 mm (inert) 20 Vol.-% 2/8 mm zu prüfende GK 20 Vol.-% 8/16 mm zu prüfende GK 30 Vol.-% 16/22 mm zu prüfende GK
Lagerung	1M NaOH-Lösung bei 38°C	Nebelkammer 40°C und min. 99% rel. LF	über Wasser bei 60°C und min. 98% rel. LF
Messintervall	8 / 14 / 28 Tage, 13 / 25 / 52 Wochen	2 / 7 / 28Tage und jeweils 28 Tage bis 270 Tage	28 / 56 / 84 / 112 / 140 Tage
Zement	Einheitszement (Na <sub>2</sub> O Äquivalent = 0,85 M.-%)	AKR Prüfzement (Na <sub>2</sub> O Äquivalent = 1,30M.-%)	AKR Prüfzement (Na <sub>2</sub> O Äquivalent = 1,30 M.-%)
Grenzwert	Dehnung: 0,5 ‰ (Einzelwert) bzw. 0,7 ‰ (Mittelwert)	Dehnung: Grenzwert entsprechend Alkaliempfindlichkeits- klasse (E I-S <sup>1</sup> ) ≤ 0,60 ‰, E III-S <sup>2</sup> ) > 0,60 ‰), Rissbreite: E I-S < 0,20 mm, E III-S ≥ 0,20)	Dehnung: Grenzwert entsprechend Alkaliempfindlichkeits- klasse (E I-S ≤ 0,30 ‰, E III-S > 0,30 ‰),

<sup>1)</sup> Einstufung hinsichtlich AKR: unbedenklich, <sup>2)</sup> Einstufung hinsichtlich AKR: bedenklich

### 3.3.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Langzeitprüfungen sind in Abbildung 5 bis 7 dargestellt.

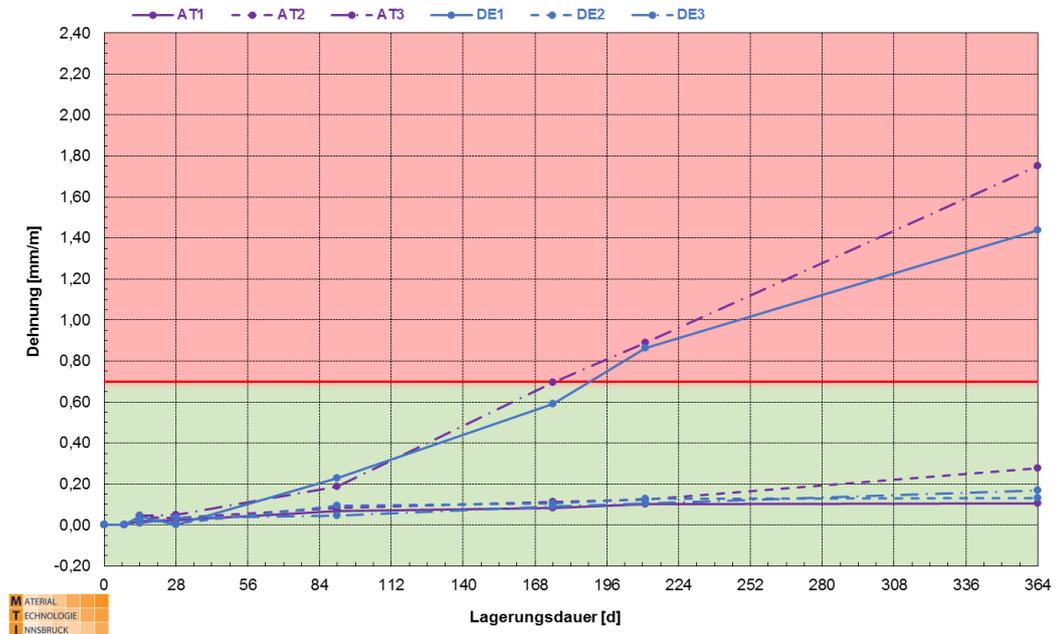


Abbildung 5: Ergebnisse der Langzeitprüfung (Lagerung in 1M NaOH-Lösung bei 38°C) nach ÖNORM B 3100.

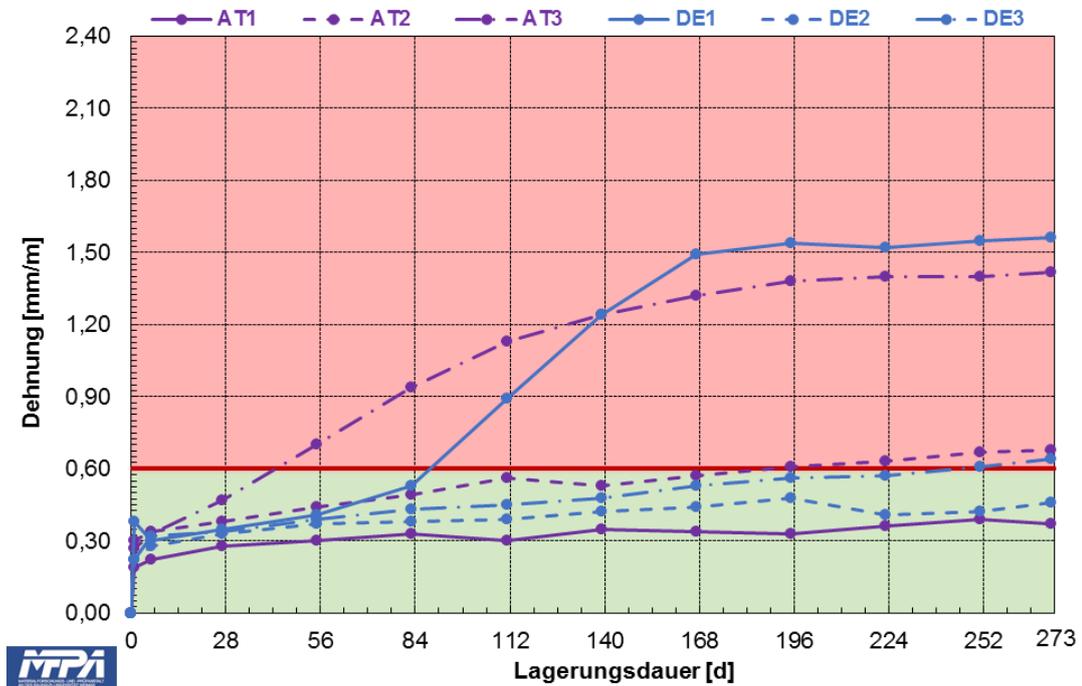


Abbildung 6: Ergebnisse der 40°C-Nebelkammerlagerung nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb.

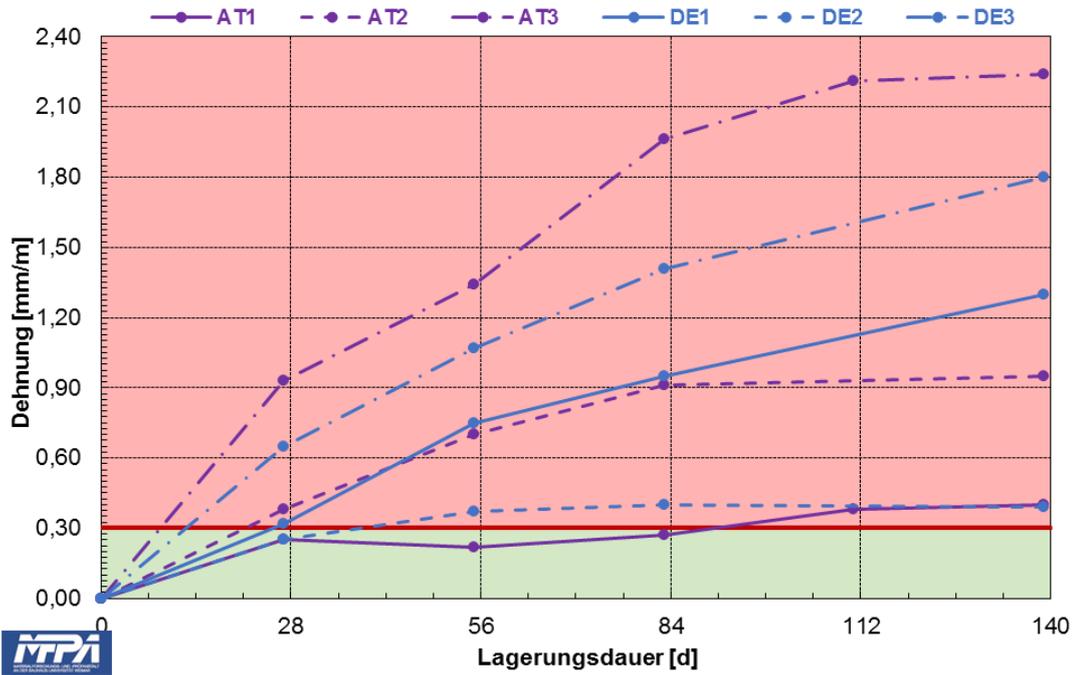


Abbildung 7: Ergebnisse des 60°C-Betonversuchs über Wasser nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb.

Die Ergebnisse der DE-Langzeitprüfungen der GKs AT3 und DE1 mit dem Vergleich Prüfzement und na-Zement sind in Abbildung 8 und 9 dargestellt.

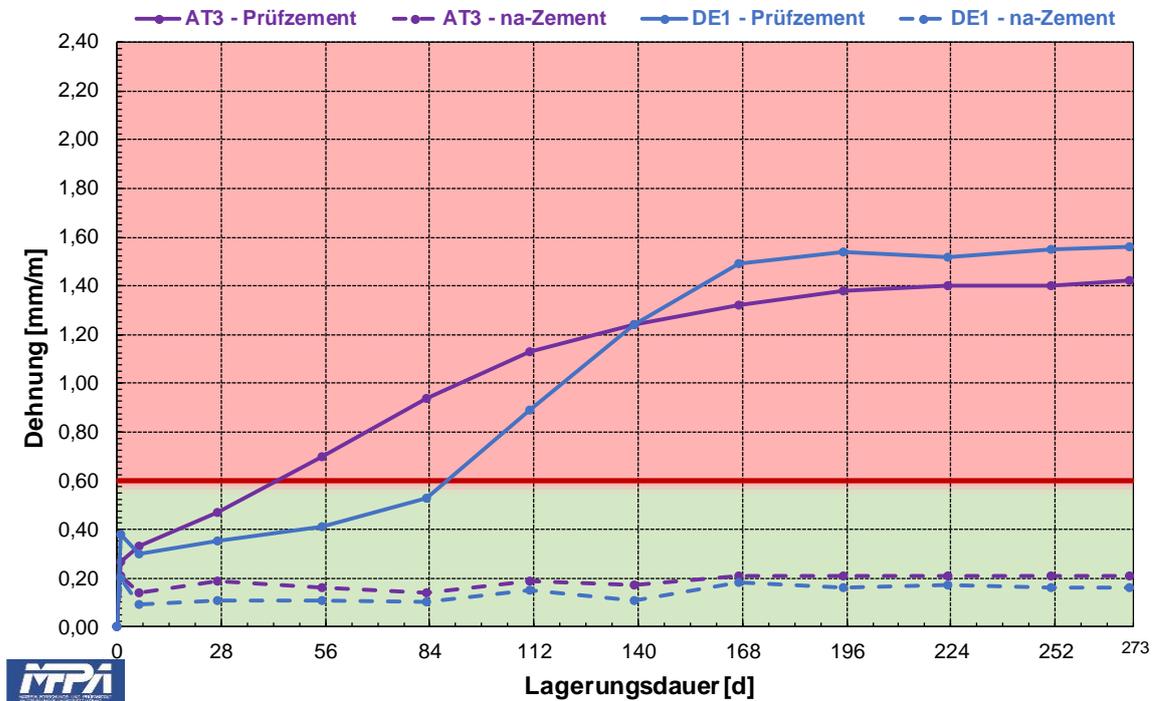


Abbildung 8: Ergebnisse der 40°C-Nebelkammerlagerung nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb für die als reaktiv eingestuftes GKs DE1 und AT3: Vergleich Prüfzement vs. na-Zement.

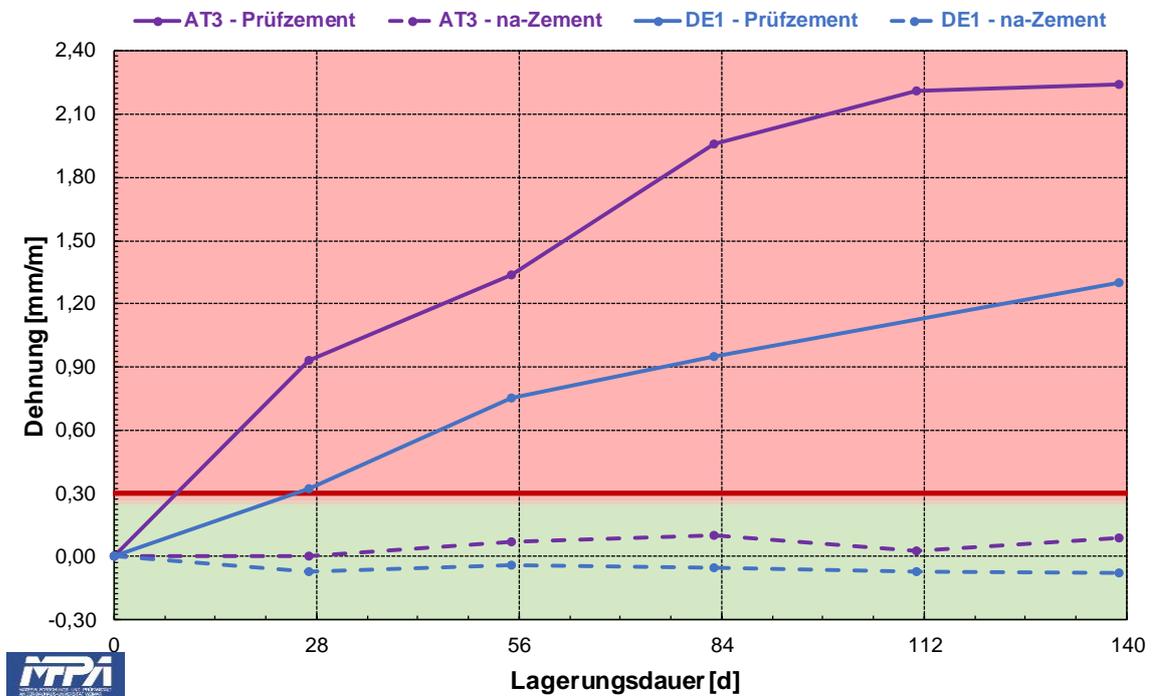


Abbildung 9: Ergebnisse des 60°C-Betonversuchs über Wasser nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb für die als reaktiv eingestuftes GKs DE1 und AT3: Vergleich Prüfzement vs. na-Zement.

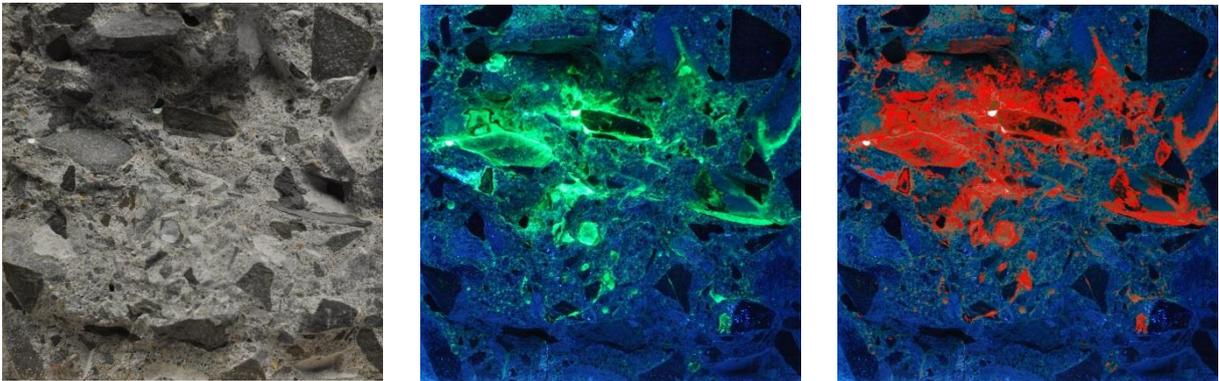
Bei allen Langzeitprüfmethoden überschreiten die Dehnwerte der als reaktiv eingestufteten GKs AT3 und DE1 die jeweiligen Grenzwerte deutlich. Während die schwach bzw. im Grenzwert reaktiven GKs bei der Prüfmethode aus AT kaum nennenswerte Dehnungen aufweisen, sind bei der 40°C-Nebelkammerlagerung deutliche Unterschiede im Dehnverhalten ersichtlich. Die Ursache für diesen Umstand ist gegenwärtig noch unklar und bedarf fortführender Untersuchungen.

Die alternative Langzeitprüfung mittels 60°C-Betonversuch über Wasser stellt sich bei den hier untersuchten GKs als wesentlich „schärfer“ gegenüber den beiden anderen Langzeitprüfmethoden dar, da alle untersuchten GKs Dehnungen oberhalb des Grenzwertes aufwiesen. Beim 60 °C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie des DAfStb ist anzumerken, dass die Abkühlung der Prüfproben einen starken Einfluss auf die Ergebnisse ausüben kann. Für die Abkühlung sind die Prüfkörper für 24 h in einem geschlossenen Behälter bei 20 °C zu lagern. Im Falle, dass in diesem Zeitraum keine vollständige Abkühlung erfolgt, wird bei der Längenmessung eine durch die Temperatur hervorgerufene Längenzunahme gemessen. Diese Längenzunahme ist dann nicht durch AKR bedingt und kann folglich die Bewertung hinsichtlich Beständigkeit verfälschen. Dazu sei angemerkt, dass bei einer Temperaturdifferenz von 10 K bereits eine temperaturbedingte Dehnung des Betons von 0,1 mm/m auftreten würde. Es wird vorgeschlagen, dass bei diesem Verfahren die Temperatur der Prüfkörper nach der Abkühlphase aufgezeichnet wird und im Falle von nach wie vor erhöhter Temperatur eine längere Abkühlphase anzuwenden ist.

Fortführend wurden an den reaktiven GKs AT3 und DE1 die Verwendung von na-Zement untersucht. Die entsprechenden Ergebnisse der 40°C-Nebelkammerlagerung und dem 60°C-Betonversuch über Wasser erbrachten die erwarteten geringen Dehnungen. Zum einen kann dadurch bestätigt werden, dass durch die Verwendung von na-Zementen die betonschädigende AKR verhindert werden kann (wenn keine externe Alkaliquelle vorhanden ist). Zum anderen kann mit diesen Ergebnissen abgeleitet werden, dass bei diesen Versuchen einzig die AKR die Dehnungen auslöste.

### 3.3.4. Untersuchungen mittels Uranylacetat-Fluoreszenz-Schnelltest

Ziel dieser Untersuchungen war es, mit einer einfachen Methode bei Schnell- und Langzeitprüfungen zu ermitteln, ob die gemessenen Dehnungen einzig auf eine AKR zurückzuführen ist. Dazu wurden Proben aus den jeweiligen DE-Prüfungen einem Uranylacetat-Fluoreszenz-Schnelltest (UF-Schnelltest) unterzogen. Mit diesem Test ist es möglich, AKR-Gele an frischen Bruchflächen durch Besprühen mit einer Uranylacetat-Lösung unter UV-Licht nachzuweisen, da die entstandenen AKR-Gele gelb-grünlich fluoreszieren (exemplarische Aufnahmen in Abbildung 10). Der flächenmäßige Anteil der bei diesem Test visualisierten Bereiche wurde anschließend computergestützt berechnet und den jeweiligen Dehnwerten der Proben gegenübergestellt.



**Abbildung 10: Frisch gebrochener Probekörper (GK DE1) beim UF-Schnelltest. Probe unter Normallicht fotografiert (links), Probe unter UV-Licht fotografiert (mittig) und computergestützte Visualisierung der Bereiche in denen das AKR-Gel gelb-grünlich fluoresziert (rechts).**

In den Abbildungen 11 bis 13 sind die Ergebnisse dieser Versuche dargestellt. Sie zeigen, dass eine gute Korrelation zwischen den ermittelten Flächen und den dazugehörigen Dehnwerten besteht. Dementsprechend kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Dehnwerte aus allen Prüfmethoden allein aufgrund einer AKR hervorgerufen wurden.

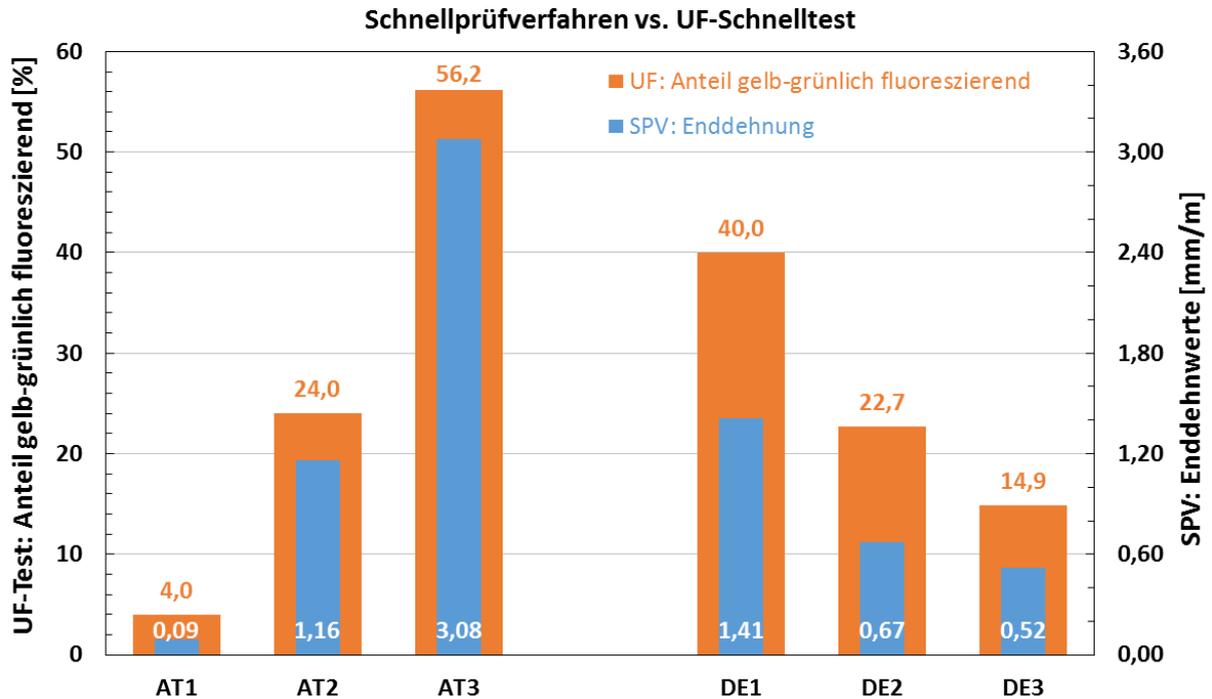


Abbildung 11: Vergleich der anteilig fluoreszierenden Flächen aus dem UF-Schnelltest mit den Enddehnwerten aus dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie des DAfStb.

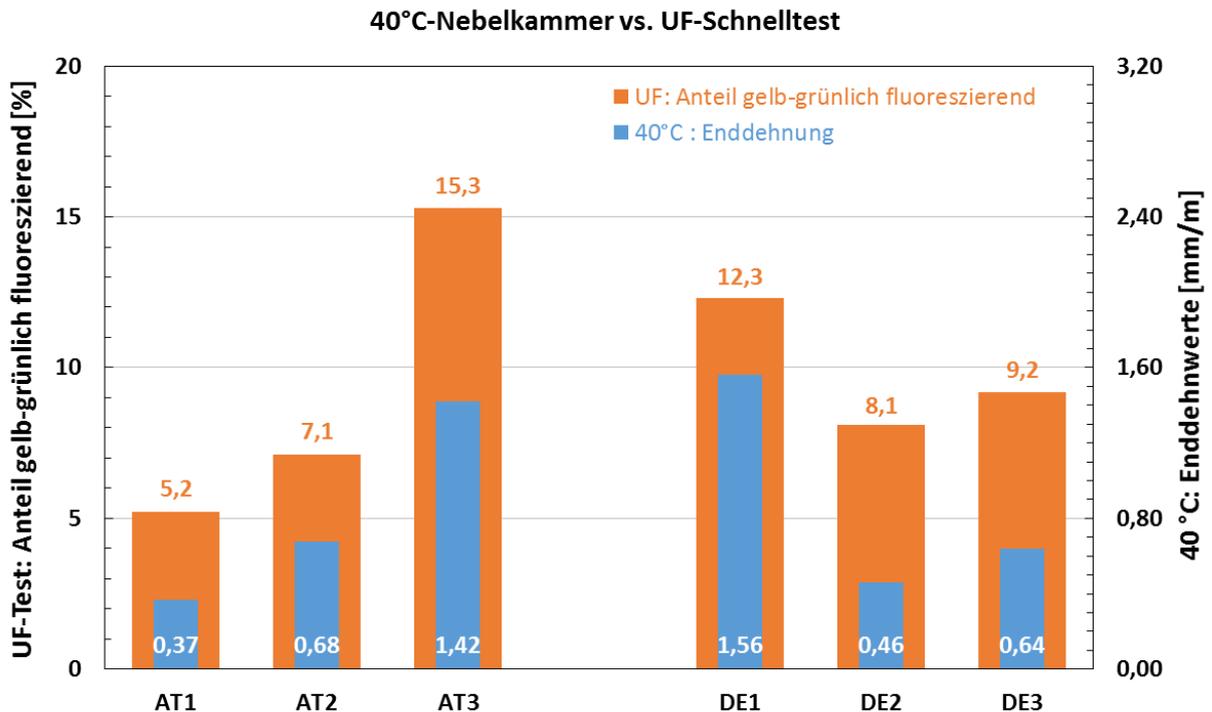


Abbildung 12: Vergleich der anteilig fluoreszierenden Flächen aus dem UF-Schnelltest mit den Enddehnwerten aus der 40°C-Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie des DAfStb.

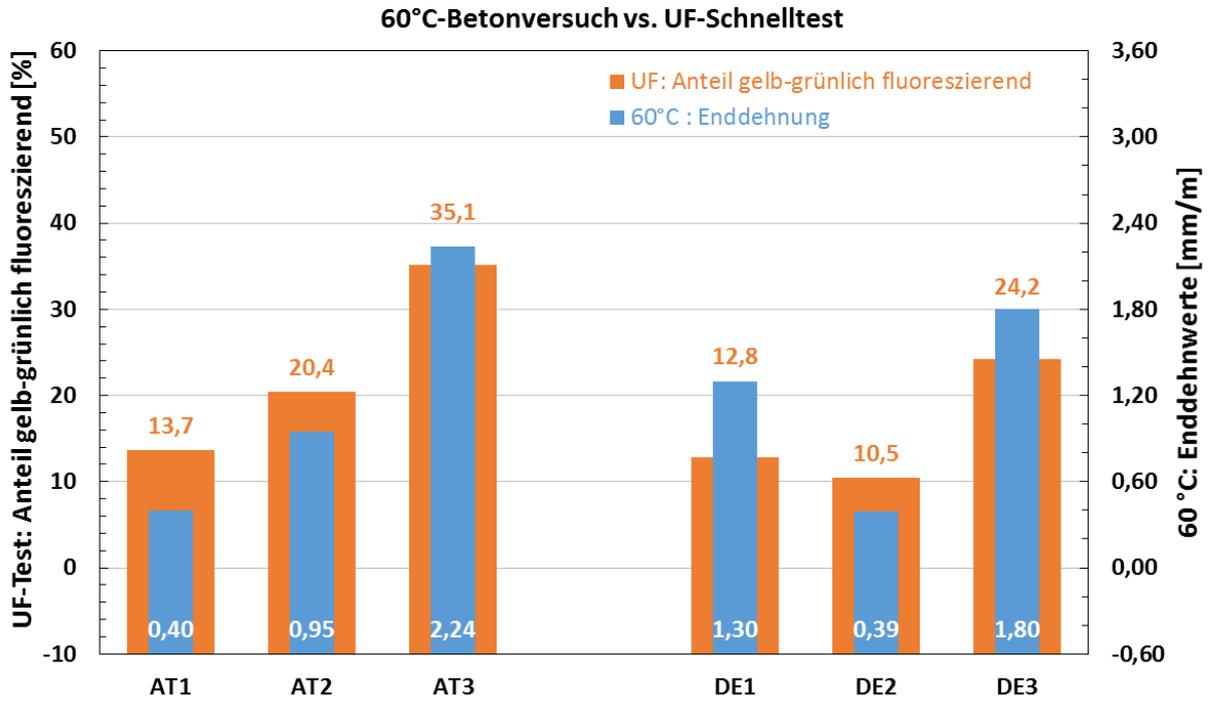


Abbildung 13: Vergleich der anteilig fluoreszierenden Flächen aus dem UF-Schnelltest mit den Enddehnwerten aus der 60°C-Betonversuchs über Wasser nach Alkali-Richtlinie des DAfStb.

### 3.3.5. FIB-Klimawechsellagerung als Performance-Prüfung

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gab im Zuge des Projektes eine zusätzliche Prüfung der GKs DE1, DE3 und DE4 mittels FIB-Klimawechsellagerung beim F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar in Auftrag. Dieses Prüfverfahren ist zur Einstufung der Gesteinskörnungen bzgl. der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität bei Betonen für den Straßenbau zugelassen. Bei der Klimawechsellagerung werden die Proben den drei Lagerungsphasen Trockenlagerung, Nebellagerung und Frost-Tauwechsellaagerung unterzogen (siehe Abbildungen 14 – 17).

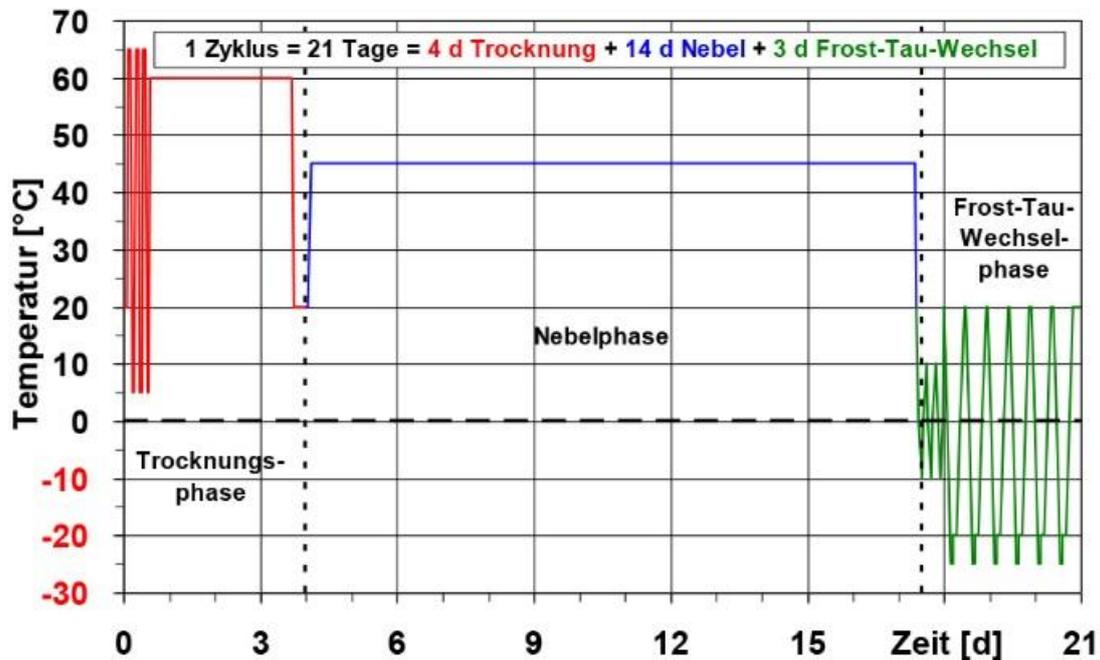


Abbildung 14: Temperaturverlauf (Schema) während eines Zyklus der FIB-Klimawechsellaagerung.

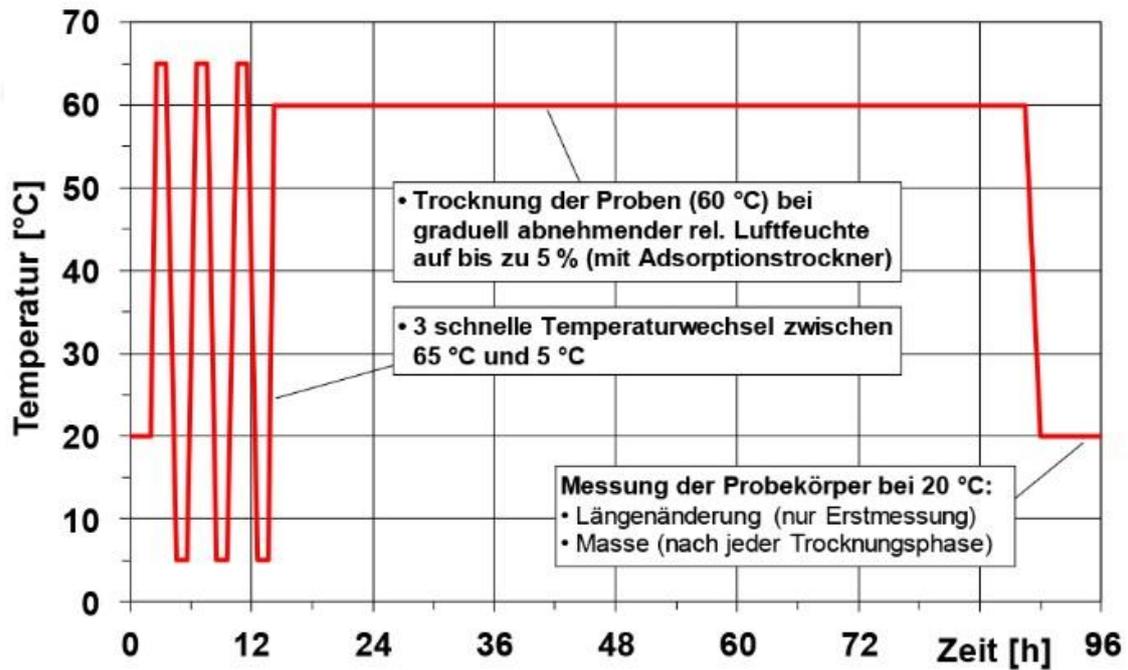


Abbildung 15: Temperaturverlauf (Schema) während der 4-tägigen Trocknungsphase.

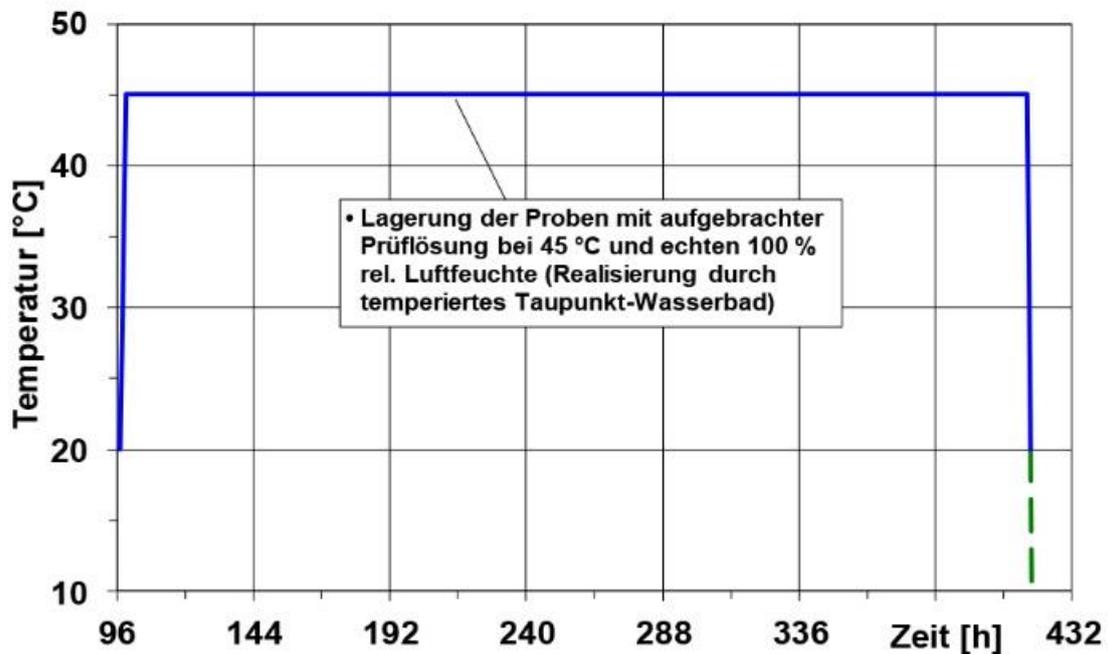


Abbildung 16: Temperaturverlauf (Schema) während der 14-tägigen Nebelphase.

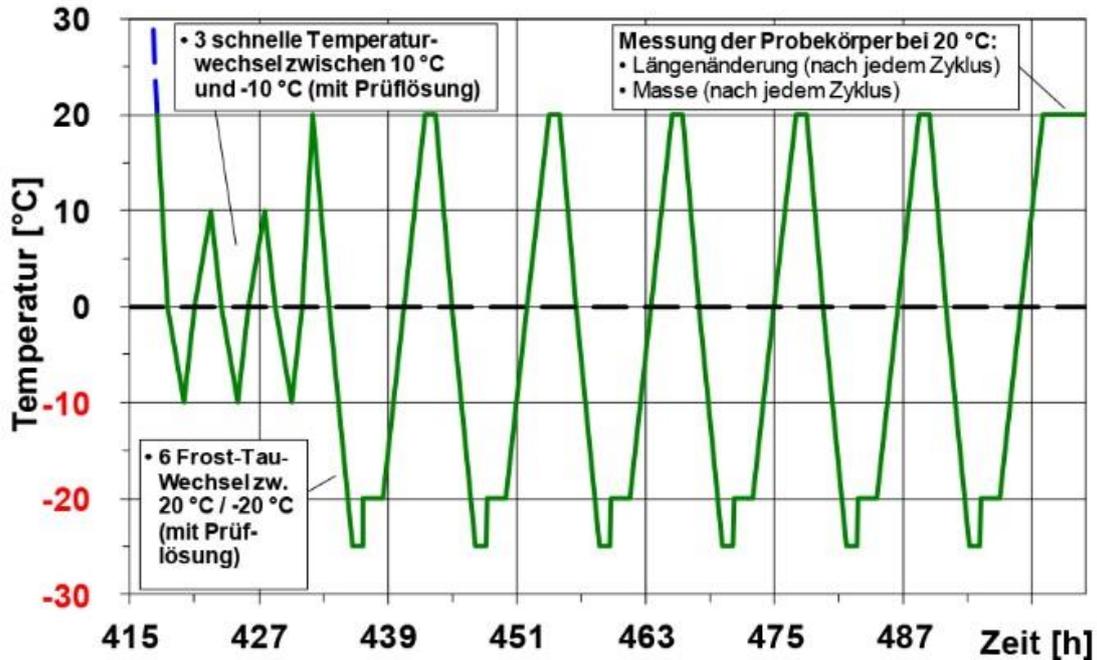


Abbildung 17: Temperaturverlauf (Schema) während der 3-tägigen Frost-Tauwechselphase.

Zum Zeitpunkt der Berichtslegung lagen lediglich Zwischenergebnisse der Untersuchungen bis zum 8. Zyklus (von insgesamt 12 Zyklen) vor (siehe Abbildungen 16-18).

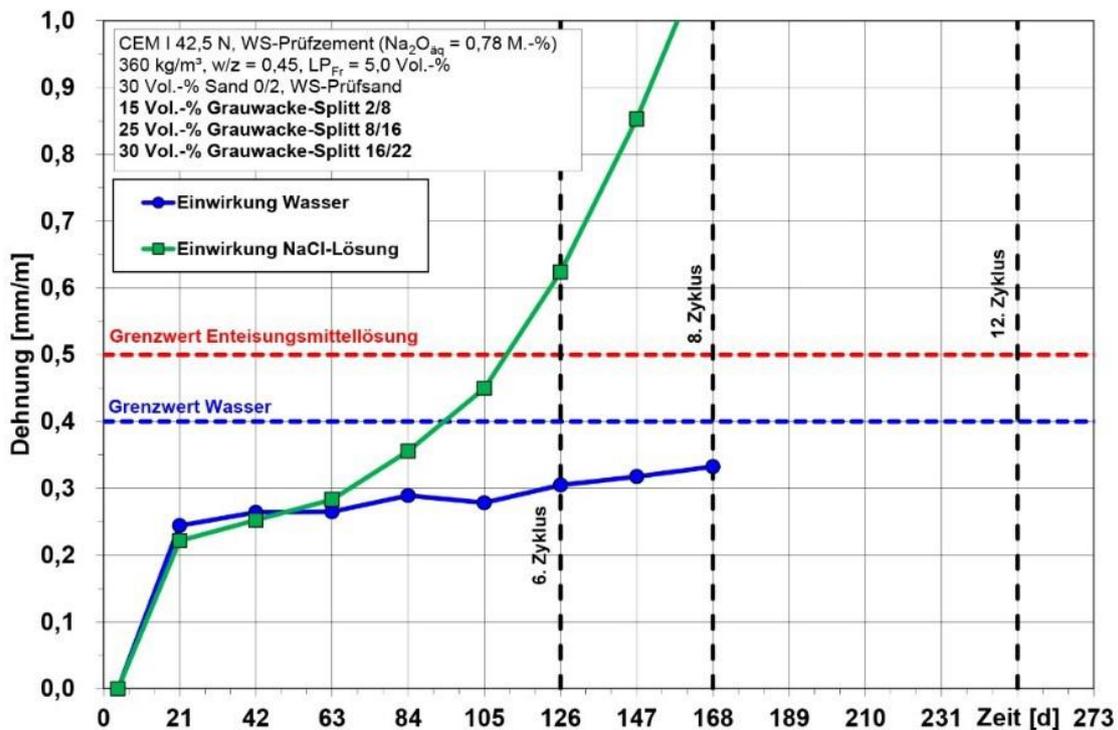


Abbildung 18: Dehnungsverlauf während der Klimawechsellaagerung (KWL) mit GK DE1.

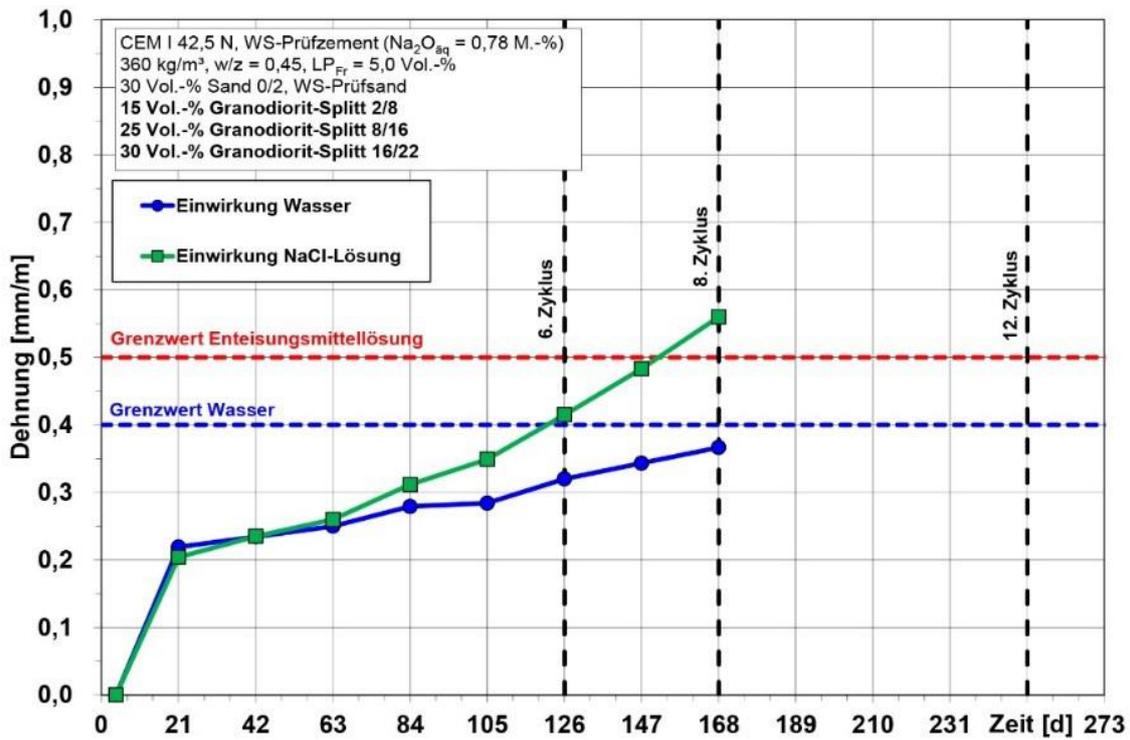


Abbildung 19: Dehnungsverlauf während der Klimawechsellagerung (KWL) mit GK DE3

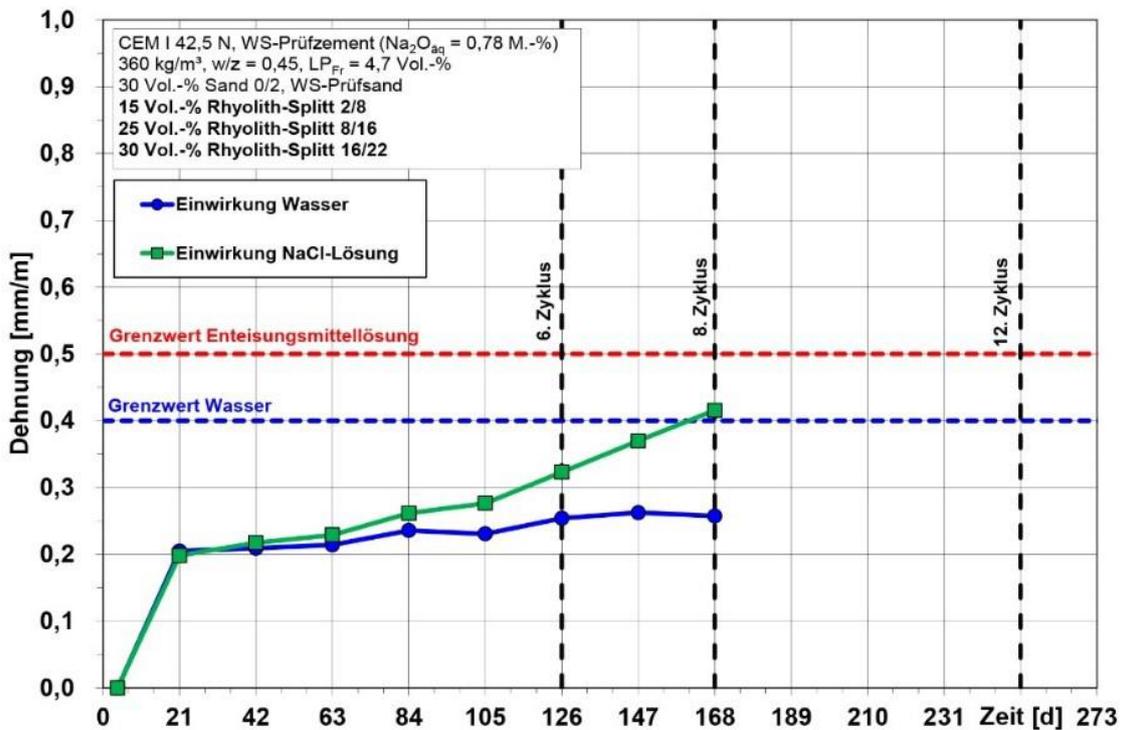


Abbildung 20: Dehnungsverlauf während der Klimawechsellagerung (KWL) mit GK DE4.

Zum Vergleich sind die Dehnungsverläufe der drei untersuchten GKs DE1, DE3 und DE4 aus der 40°C-Nebelkammerlagerung in Abbildung 21 dargestellt.

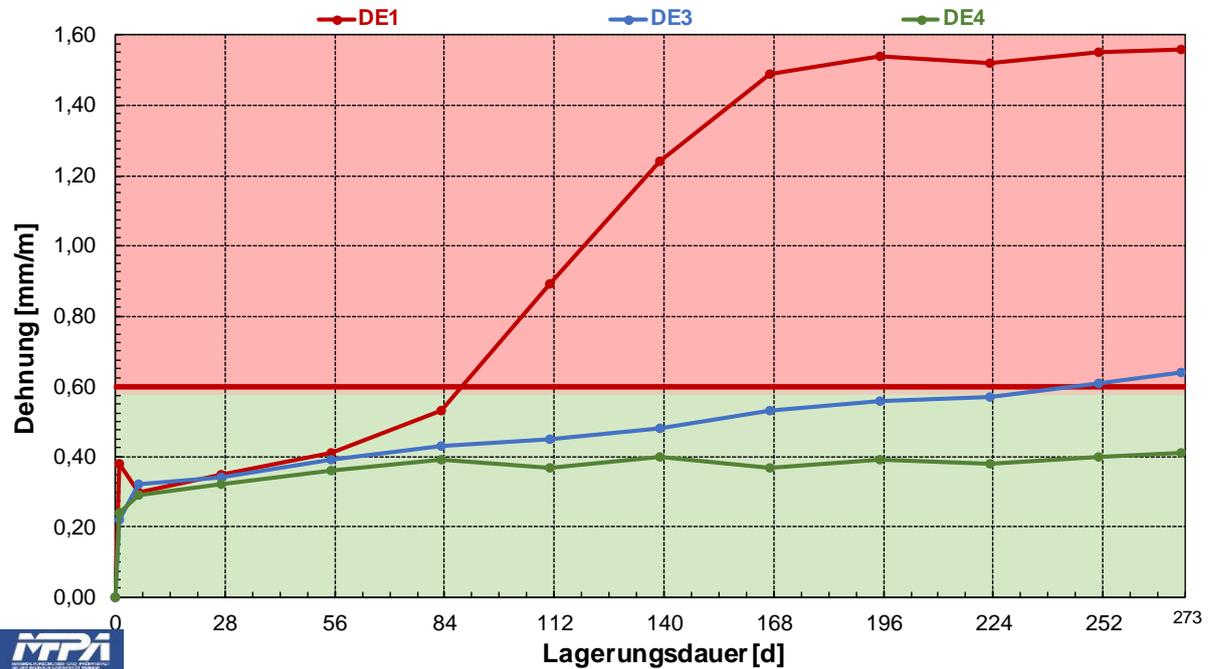


Abbildung 21: Dehnungsverlauf der GKs DE1, DE3 und DE4 während der 40°C-Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie des DAfStb.

Tendenziell zeigen die Dehnungsverläufe der drei untersuchten Gesteinskörnungen aus der FIB-Klimawechsellagerung und der 40°C-Nebelkammerlagerung ähnliche Längenänderungen. Das reaktive GK DE1 weist jeweils die höchsten Dehnwerte auf. Das grenzwertig reaktive GK DE3 zeigt mittlere Dehnungswerte und die am wenigsten reaktive GK DE4 besitzt die geringsten Dehnwerte. Bei alleiniger Betrachtung des Grenzwertes bei Einwirkung der Enteisungsmittellösung wären die GKs DE1 und DE3 durchgefallen. Lediglich das GK DE4 hatte zum Zeitpunkt der Berichtslegung bestanden. Die gleiche Einstufung der drei GKs konnte nach der 40°C-Nebelkammerlagerung erfolgen. Allerdings ist bei der FIB-Klimawechsellagerung ein weiteres Kriterium der Dehnungsanstieg unter Einwirkung der NaCl-Lösung zwischen dem 6. und 8. Zyklus. Dieser Anstieg muss  $\leq 1$  sein. Wenn dieses Kriterium allein für ein nicht Bestehen der GK steht, dann sind bereits an dieser Stelle bei der FIB-Klimawechsellagerung alle drei GKs durchgefallen (DE1 ca. 2,9 | DE3 ca. 1,8 | DE4 ca. 1,3).

### 3.4. Gemeinsame Bewertung der bestehenden Testmethoden

Der Vergleich der Ergebnisse der Schnellprüfverfahren aus AT und DE zeigt für 83% der untersuchten GKs eine übereinstimmende Einstufung hinsichtlich der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität (Dehnung der Mörtelprismen über dem Grenzwert). Lediglich 17% (GK AT2) fiel beim Schnellprüfverfahren aus DE durch, während sie beim Schnellprüfverfahren aus AT bestand (siehe Abbildung 22). Dabei ist allerdings zu beachten, dass alle GKs bei der Prüfmethode aus DE höhere Dehnwerte aufwiesen, als bei der Prüfmethode aus AT, daher ist der unterschiedliche  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent der eingesetzten Zemente bei der Bewertung der Ergebnisse zu beachten.

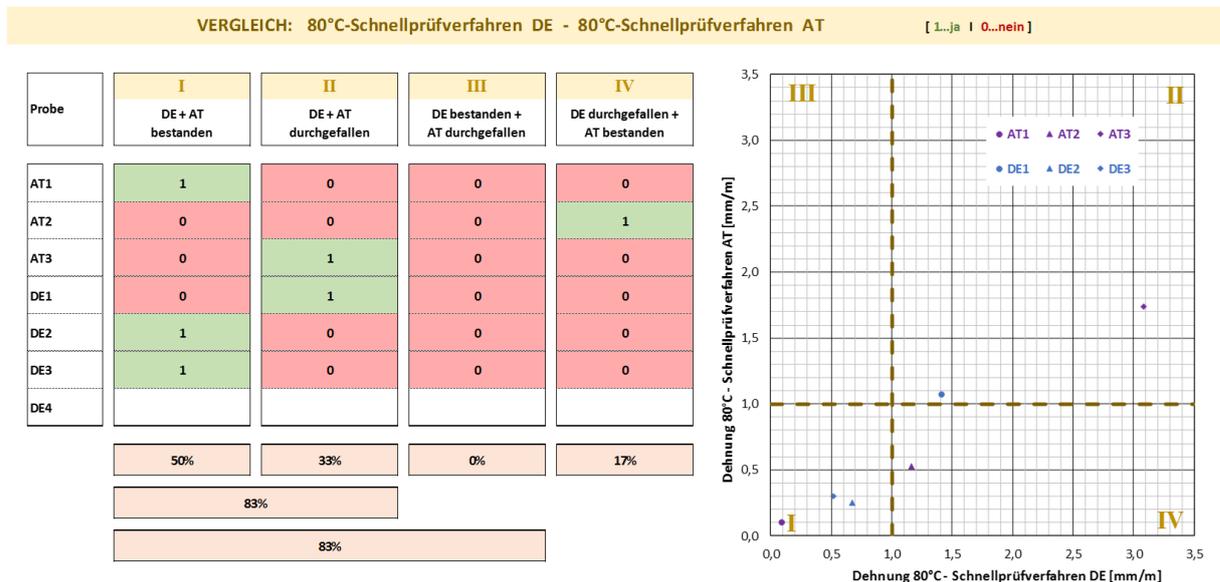


Abbildung 22: Vergleich der Ergebnisse der Schnellprüfverfahren aus AT und DE.

Der Vergleich der Ergebnisse der nationalen Langzeitprüfverfahren zeigte im Vergleich zu den Schnellprüfverfahren eine mit 67% geringe Übereinstimmung bei der Einstufung der untersuchten GKs (siehe Abbildung 23). Die GKs AT2 und DE3 haben die AT-Langzeitprüfung bestanden, sind jedoch nach dem DE-Verfahren (40°C-Nebelkammerlagerung) durchgefallen.

VERGLEICH: 40°C-Nebelkammerlagerung DE - 38°C-Langzeitprüfverfahren AT

[ 1...ja | 0...nein ]

Probe	I DE + AT bestanden	II DE + AT durchgefallen	III DE bestanden + AT durchgefallen	IV DE durchgefallen + AT bestanden
AT1	1	0	0	0
AT2	0	0	0	1
AT3	0	1	0	0
DE1	0	1	0	0
DE2	1	0	0	0
DE3	0	0	0	1
DE4				
	33%	33%	0%	33%
	67%			
	67%			

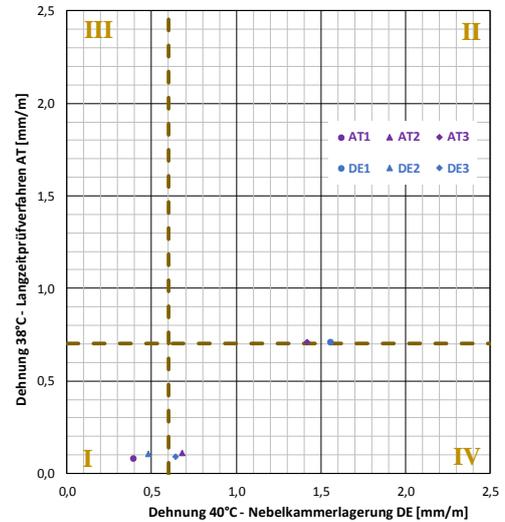


Abbildung 23: Vergleich der Ergebnisse der Langzeitprüfverfahren aus AT und DE.

Der Vergleich der DE-Langzeitprüfverfahren 40°C-Nebelkammerlagerung und 60°C-Betonversuch über Wasser zeigt deutlich, dass letztere Prüfmethode wesentlich „schärfer“ ist, als das deutsche Referenzverfahren. So haben immerhin 43 % der untersuchten GKs (AT1, DE2 und DE4), die den 60°C-Betonversuch über Wasser nicht bestanden, bei der 40°C-Nebelkammerlagerung ein positives Ergebnis erzielen können (siehe Abbildung 24).

VERGLEICH: 40°C-Nebelkammerlagerung - 60°C-Lagerung über Wasser

[ 1...ja | 0...nein ]

Probe	I 40°C + 60°C bestanden	II 40°C + 60°C durchgefallen	III 40°C bestanden + 60°C durchgefallen	IV 40°C durchgefallen + 60°C bestanden
AT1	0	0	1	0
AT2	0	1	0	0
AT3	0	1	0	0
DE1	0	1	0	0
DE2	0	0	1	0
DE3	0	1	0	0
DE4	0	0	1	0
	0%	57%	43%	0%
	57%			
	100%			

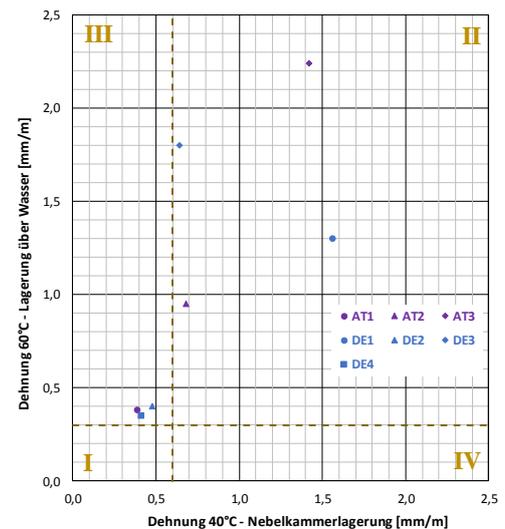


Abbildung 24: Vergleich der Ergebnisse der 40°C-Nebelkammerlagerung und dem 60 °C-Betonversuch über Wasser nach Alkali-Richtlinie des DAfStb.

## 4. AP4 – ENTWICKLUNG VON ANSÄTZEN FÜR EINEN ALTERNATIVEN SCHNELLTEST

### 4.1. Vorstellung der IFB-Komplexprüfmethode

Mitte der 80-iger Jahre war bereits bekannt, dass die Gesteinskörnungen aus dem mitteldeutschen Raum ebenfalls ein Gefährdungspotential bzgl. einer schädigenden AKR besitzen. Die damals gängigen Prüfmethode waren allerdings für diese Art der Gesteinskörnungen nicht aussagekräftig. Mehrere, weltweit recherchierte, Messmethoden wurden bzgl. der Aussagekraft bei der Bewertung von Gesteinskörnungen aus dem mitteldeutschen Raum getestet. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde die IFB-Komplexprüfmethode entwickelt.

Die IFB-Komplexprüfmethode besteht aus einer Kombination folgender Prüfungen:

#### I: Chemische Kurzzeitprüfung: (in Anlehnung an ASTM C-289)

- |     |   |           |
|-----|---|-----------|
| (1) | Bestimmung des löslichen Siliziumdioxids ( $\text{SiO}_2$ ) | → Sc-Wert |
| (2) | Bestimmung der Verringerung der Alkalität                   | → Rc-Wert |

#### II: Mörtelschnellprüfung:

- |     |  |                    |
|-----|--|--------------------|
| (3) | Bestimmung der Längenänderung am Kleinstprisma | → $\epsilon$ -Wert |
|-----|--|--------------------|

#### Chemische Kurzzeitprüfung:

Bei der chemischen Kurzzeitprüfung werden die vorbereiteten Proben (brechen, mahlen, sieben, waschen) in einer 1M NaOH-Lösung für 24 h bei 80°C im Kleinautoklaven gekocht. Anschließend wird am Filtrat das gelöste Siliziumdioxid (Sc-Wert) und die Verringerung der Alkalität (Rc-Wert) bestimmt.

#### Mörtelschnellprüfung:

Bei der Mörtelschnellprüfung werden zunächst vier Kleinstprismen (10 x 10 x 40 mm) hergestellt (Zement : Probe = 10 : 1 | w/z = 0,30 |  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq.}}$  = 1,5 M.-%). Anschließend werden die Kleinstprismen in einer 10%igen KOH-Lösung für 6 h bei 150°C im Kleinautoklaven gekocht. Aus den Längen der Kleinstprismen vor und nach dem „Kochen“ wird die Dehnung berechnet.

#### Beurteilungskriterien:

Für die drei Kennwerte wurden damals folgende Grenzwerte festgelegt:

- |     |  |                                      |
|-----|--|--------------------------------------|
| (1) | gelöstes Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) | → $\text{Sc} \leq 50 \text{ mmol/l}$ |
| (2) | Verringerung der Alkalität                 | → $\text{Rc} \leq 80 \text{ mmol/l}$ |
| (3) | Längenänderung am Kleinstprisma            | → $\epsilon \leq 0,60 \text{ mm/m}$  |

Sind alle drei Kriterien erfüllt, kann das Material als alkalibeständig eingestuft werden. Bei Überschreitung eines oder mehrerer Grenzwerte muss das Probematerial nach dem Referenzverfahren geprüft werden.

#### 4.2. Bewertung der recherchierten Versuche an der MFPA Weimar

Aufbauend auf einer umfangreichen Recherche wurden die Ergebnisse der IFB-Komplexprüfmethode an der MFPA Weimar aus den 1990er Jahren aufbereitet. In dieser Zeit wurden 384 Proben aus 174 Vorkommen aus dem mitteldeutschen Raum (Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg) untersucht. Anhand von Vergleichsversuchen (Langzeitprüfung in der Nebelkammer) an 99 Proben (32 Splitte und 67 Kiese) wurden die Grenzwerte für dieses Verfahren festgelegt. Im Zuge des Projektes wurden die damals festgelegten Grenzwerte noch einmal optimiert (siehe Abbildung 25). Es zeigte sich, dass die Ergebnisse von 63 % der untersuchten Proben mit den Einstufungen mittels Langzeitversuch übereinstimmen. Lediglich 37 % der Proben fielen bei der IFB-Komplexprüfmethode durch, bestanden aber die Langzeitprüfung.

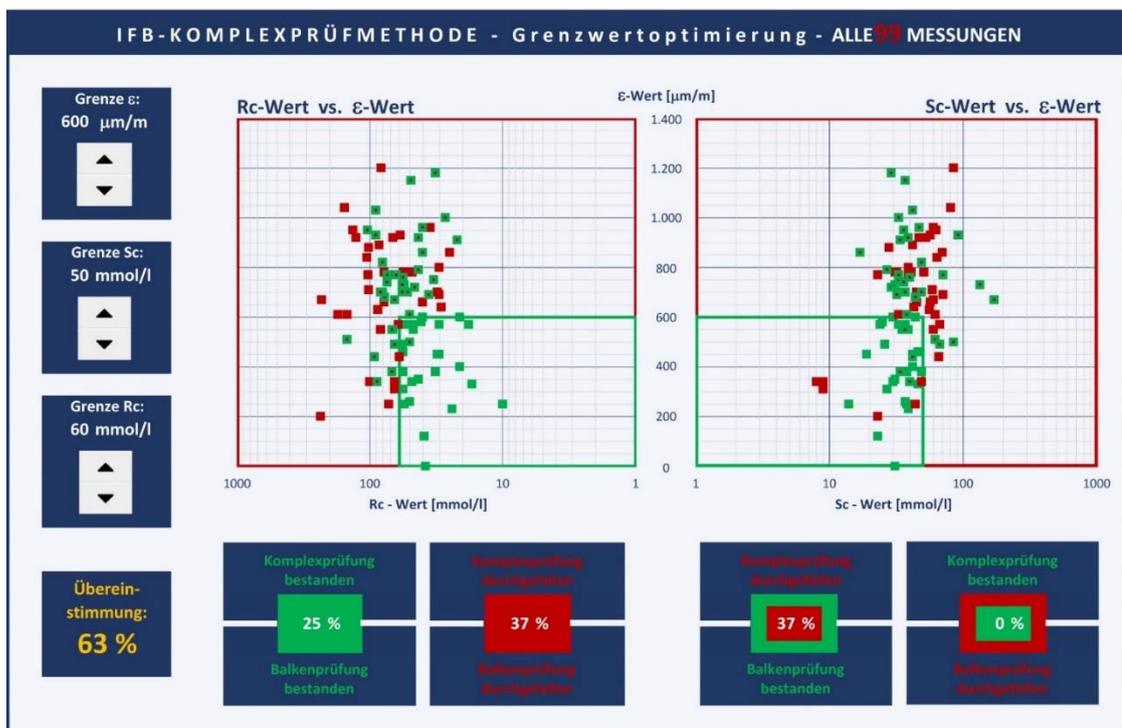
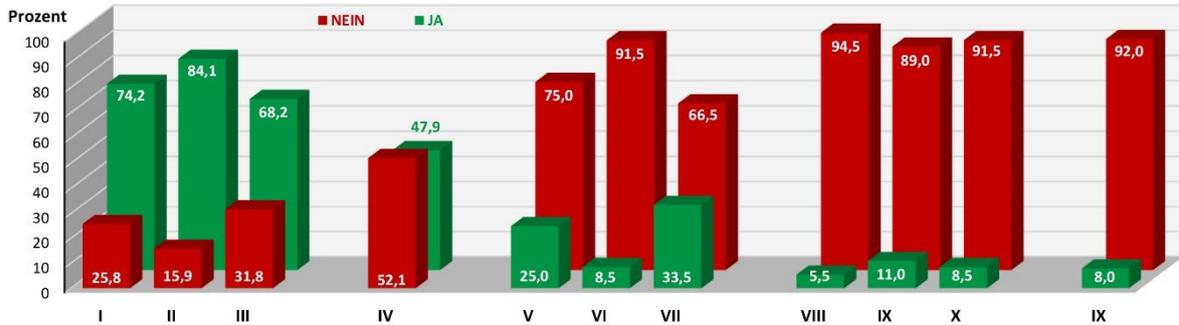


Abbildung 25: Ergebnis der erneuten Grenzwertoptimierung der 99 Vergleichsversuche (IFB-Komplexprüfmethode vs. Nebelkammerlagerung) aus den 1990er Jahren.

Eine statistische Auswertung aller 384 Untersuchungen zeigte, dass vor allem der Sc-Wert (gelöstes SiO<sub>2</sub>) und der ε-Wert (Dehnung an Kleinstprismen) entscheidend für ein negatives Testergebnis der untersuchten Gesteinskörnungen sind (siehe Abbildung 26).



Kürzel	Fragestellung	ABSOLUT [Probenanzahl]		PROZENTUAL [%]		Bezugsbasis
		JA	NEIN	JA	NEIN	
I	Kennwert ΔI bestanden?	285	99	74,2	25,8	auf gesamte Probenmenge bezogen [384 Messungen]
II	Kennwert Rc bestanden?	323	61	84,1	15,9	
III	Kennwert Sc bestanden?	262	122	68,2	31,8	
IV	Komplexprüfung bestanden?	184	200	47,9	52,1	
V	Allein Kennwert ΔI überschritten?	50	150	25,0	75,0	auf durchgefallene Probenmenge bezogen [200 durchgefallene Proben]
VI	Allein Kennwert Rc überschritten?	17	183	8,5	91,5	
VII	Allein Kennwert Sc überschritten?	67	133	33,5	66,5	
VIII	Kennwerte ΔI und Rc in Kombination überschritten?	11	189	5,5	94,5	
IX	Kennwerte ΔI und Sc in Kombination überschritten?	22	178	11,0	89,0	
X	Kennwerte Rc und Sc in Kombination überschritten?	17	183	8,5	91,5	
XI	Kennwerte ΔI, Rc und Sc in Kombination überschritten?	16	184	8,0	92,0	

Abbildung 26: Gesamtbewertung der einzelnen Kennwerte der IFB-Komplexprüfmethode aller 384 Messungen.

Fortführend erfolgte eine Bewertung der geographischen Herkunft der untersuchten Proben. Hierfür wurden die in der Alkali-Richtlinie des DAfStb festgelegten Flussläufe in den Gebieten der Saale, Elbe, Mulde und Elster aus dem angrenzenden Bereich herangezogen. Dabei konnten keine relevanten Einflüsse dieser Gebiete auf ein Bestehen oder nicht Bestehen der Gesteinskörnungen gefunden werden (siehe Abbildung 27).

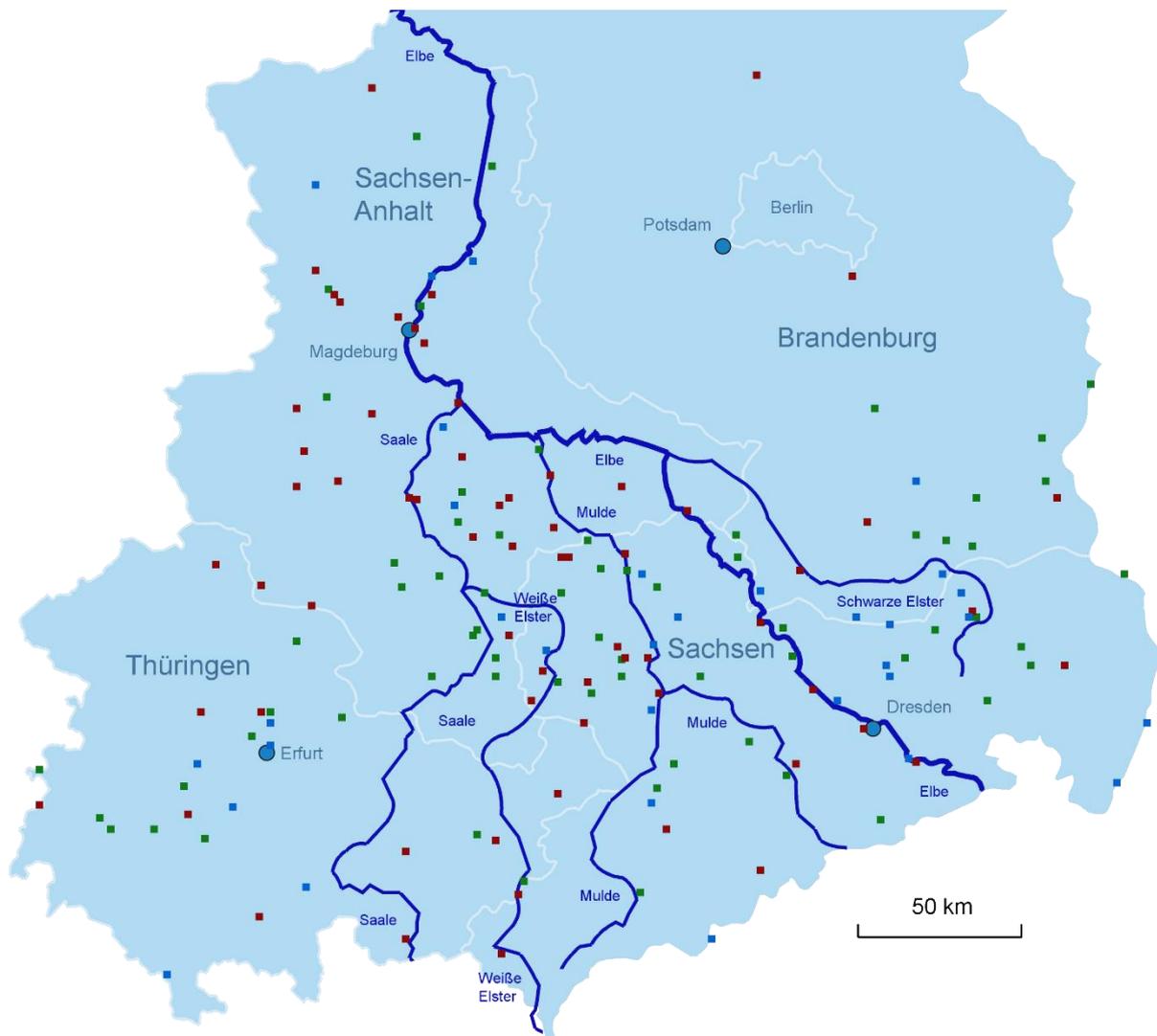


Abbildung 27: Geographische Auswertung der in den 1990er Jahren untersuchten Vorkommen (rote Punkte – GK nicht bestanden, grüne Punkte – GK bestanden, blaue Punkte – Vorkommen wurde zeitlich mehrfach untersucht und die GK hat sowohl bestanden als auch nicht bestanden).

### 4.3. Untersuchungen mittels IFB-Komplexprüfmethode an den sieben ausgewählten Gesteinskörnungen

Im Zuge des Projektes wurde an den sieben ausgewählten Gesteinskörnungen (siehe Kapitel 3.1) ebenfalls die IFB-Komplexprüfmethode durchgeführt. In Abbildung 28 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammengestellt. Analog der Grenzwertoptimierung wurden die Einstufungen der GKs jeweils mit den Ergebnissen aus der Nebelkammerlagerung verglichen.

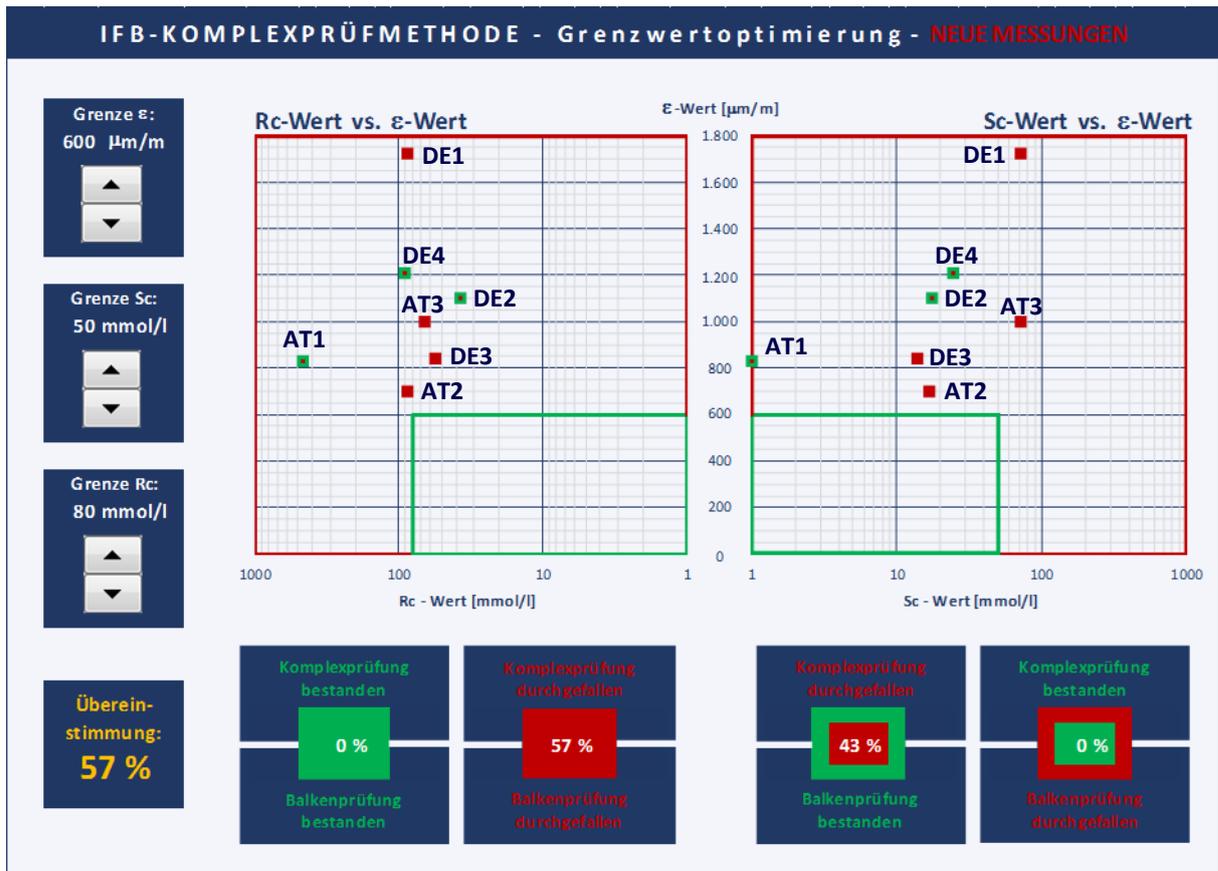


Abbildung 28: Ergebnisse der Untersuchungen der sieben GKs mittels IFB-Komplexprüfmethode und Vergleich mit den jeweiligen Einstufungen aus der 40°C-Nebelkammerlagerung.

Die Ergebnisse der Messungen mittels IFB-Komplexprüfmethode zeigten, dass die Dehnungen ( $\epsilon$ -Wert) aller untersuchten GKs weit über den damals festgelegten Grenzwert von 0,60 mm/m liegen. Des Weiteren liegt der Rc-Wert des nicht alkalireaktiven Kalksteins (AT1) mit 830 mmol/l weit über dem Grenzwert von 80 mmol/l, dies kann eventuell durch eine Dedolomitisierung hervorgerufen worden sein.

#### 4.4. Weitere mögliche Vorgehensweise

Der Vorteil der IFB-Komplexprüfmethode liegt in der sehr geringen Bearbeitungszeit von etwa 4-5 Tagen vom Probeneingang bis zum Ergebnis der Einstufung der untersuchten Gesteinskörnung. Die aktuellen Untersuchungen und die Bewertung der in den 1990er Jahren durchgeführten Messungen zeigten jedoch, dass eine Neuevaluierung der damals festgelegten Grenzwerte nötig ist. Aus folgenden Gründen sind diesbezüglich Versuche in einem erweiterten Umfang nötig:

1. Die Dehnwerte an den aktuell untersuchten Gesteinsproben lagen wesentlich höher als bei den Messungen aus den 1990er Jahren. Vergleichsmessungen zwischen dem alten (eine Rückstellprobe war noch an der MFPA Weimar vorhanden) und dem neuen Prüfzement (Prüfzement nach Alkali-Richtlinie mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 1,30 M.-%) an einer Gesteinskörnung aus einem Vorkommen, welches bereits vor 20 Jahren untersucht wurde (DE4), bestätigte die damals gemessenen Dehnwerte. Während die damaligen Dehnwerte dieser GK bei 0,26 mm/m (0,28 mm/m bei der aktuellen Messung mit dem alten Prüfzement) lag, erreichten die mit dem neuen Prüfzement hergestellten Kleinstprismen eine Dehnung von 0,93 mm/m. Dementsprechend kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die modernen Zemente andere Dehnwerte bei den Messungen an den Kleinstprismen hervorrufen.
2. 37 % der Gesteinskörnungen, welche in den 1990er Jahren untersucht wurden, fielen beim IFB-Komplexprüfverfahren durch, während sie beim Referenzverfahren (Nebelkammerlagerung) bestanden. Das damalige Referenzverfahren wurde allerdings bei 20 °C und 95 % rel. LF durchgeführt. Des Weiteren wurde lediglich die Dehnung an drei Betonbalken gemessen. Beim heutigen Referenzverfahren erfolgt eine Lagerung bei 40°C und bei 99 % rel. LF. Neben den Dehnungsmessungen an drei Betonbalken wird zusätzlich ein Betonwürfel mit 30 cm Kantenlänge auf Rissbildung untersucht. Sind die Rissweiten größer als 0,2 mm, gilt die entsprechende Gesteinskörnung ebenfalls als nicht alkalibeständig. Es ist bei erneuten Vergleichsversuchen durchaus möglich, dass die Übereinstimmung der nicht bestandenen GKs steigt, was eine Verbesserung der Gesamtprognose bewirken kann (> 63 % Übereinstimmung).

## 5. AP5 – BEWERTUNG VERFÜGBARER MODELLIERUNGSANSÄTZE

Anhand einer Literaturrecherche konnten die gegenwärtig vorhandenen Ansätze zur modellmäßigen Abbildung einer schädigenden AKR identifiziert werden, die nachfolgend aufgelistet sind:

- kinetisch (aufbauend auf dem Prozess der Diffusion der Alkalien) [Ichikawa 2007, 2009] [Bažant et al. 2000]
- thermodynamisch (aufbauend auf der zu grundlegenden chemischen Reaktion einer AKR) [Ichikawa & Miura 2007]
- mehrskalenorientiert vom Gesteinskorn über den Zementstein zum Prüfkörper (Beschreibung der Ausdehnung mittels Alkalitransport und Alkaliauslaugung, Extrapolation der Gel-Druckspannung innerhalb der Gesteinskörnung zur Gesteinskörnungs-Druckspannung innerhalb der umgebenden Zementmatrix) [Multon & Sellier 2009]

Die Ergebnisse der Recherche zur Anwendbarkeit in der Ingenieurspraxis ergaben, dass eine verlässliche Vorhersage der Ausdehnung mittels des kinetischen Modellierungsansatzes von der Anzahl der Kenngrößen abhängt und die Prognose daher Schwankungen unterliegt [Rajabipour 2015]. Für den thermodynamischen und mehrskalenorientierten Ansatz sind nach aktuellem Stand keine Erfahrungen aus der Ingenieurspraxis bekannt.

Anhand der in AP3 und AP4 erarbeiteten Ergebnisse könnten die Diffusion der Alkalien und der Fortschritt der chemischen Reaktion einer AKR für die Modellbildung relevante Eingangsparameter darstellen.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dem gegenständigen DE-AT Kooperationsprojekt „AKR-Evaluierung“ konnten im Hinblick auf die Vorgehensweisen zur Vermeidung einer schädigenden AKR in Betonfahrbahndecken folgende Ergebnisse erarbeitet werden:

- Vorgehensweise:

Die Bewertung des Standes der Technik ergab für AT, dass die Verwendung von sogenannten Deckenzementen (Portlandhüttenzement (CEM II/..-S)) das Ausmaß einer schädigenden Reaktion verringern kann und entsprechend in Kombination mit einer als alkaliunempfindlich eingestuften GK eine vielversprechende Maßnahme zur Vermeidung einer schädigenden AKR in Betonfahrbahndecken darstellen kann. In DE sind nach Aussage der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) seit der Einführung der „Gutachterlösung“ keine Schäden infolge einer AKR an ab 2005 neu gebauten Betonfahrbahndecken bei Bundesfernstraßen aufgetreten. Dementsprechend scheint diese Vorgehensweise bzgl. der Vermeidung von Schäden infolge einer AKR effektiv zu sein.

- Schnellprüfverfahren:

Die Schnellprüfverfahren in AT (nach ÖNORM B 3100) und DE (nach Alkali-Richtlinie des DAfStb) bewerten die GKs anhand der gemessenen Dehnung der Mörtelprismen nach Lagerung in 1M NaOH-Lösung bei 80 °C. Bei den Eckdaten der Prüfungsdurchführung stimmen die beiden Vorgehensweisen weitgehend überein. Ein essentieller Unterschied zwischen den beiden Verfahren stellt der verwendete Zement dar. In AT wird der sogenannte Einheitszement (CEM I 42,5 R, Na<sub>2</sub>O Äquivalent der verwendeten Charge 0,85 M.-%) eingesetzt, wohingegen in DE die Prüfkörper mit einem AKR Prüfzement (CEM I 32,5 R, Na<sub>2</sub>O Äquivalent = 1,30 M.-%) hergestellt werden. Bei beiden Schnellprüfungen konnten die als deutlich reaktiv erwarteten GKs (DE1 und AT3) als solche identifiziert werden. Die Dehnung der Mörtelprismen mit der „spät reagierenden“ Grauwacke (DE1) lag bei dem österreichischen Prüfverfahren jedoch nur knapp über den Grenzwert, weswegen das Risiko besteht, die Alkaliempfindlichkeit entsprechender Gesteinstypen zu unterschätzen. Die Dehnungen der Mörtelprismen mit den als schwach bzw. als nicht reaktiv eingestuften GKs (DE3 und AT1) lag bei beiden Prüfungen unterhalb des Grenzwertes. Unterschiede in der Einstufung wurden für die als reaktiv im Bereich des Grenzwertes eingestuften GKs

(DE2 und AT2) beobachtet. DE2 wurde bei beiden Schnellprüfverfahren mit einer Dehnung der Probekörper unterhalb des Grenzwertes als „unbedenklich“ eingestuft. Für AT2 übersteigt die bei der Schnellprüfung nach Alkali-Richtlinie des DAfStb gemessene Dehnung den Grenzwert, wohingegen die Dehnung beim Schnellprüfverfahren der ÖNORM B 3100 unterhalb des Grenzwertes liegt und die GK entsprechend als unbedenklich eingestuft wurde. Allgemein zeigten alle Prüfkörper bei der DE-Schnellprüfung im Vergleich zum AT-Pendant höhere Dehnwerte, die vermutlich auf die unterschiedlichen  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalente der verwendeten Zemente zurückzuführen sind.

- Langzeitprüfverfahren:

Der 60°C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie des DAfStb wird auf Grundlage der in diesem Projekt generierten Ergebnisse als zu „scharf“ angesehen. Die Lagerung nach ÖNORM B 3100 in 1M NaOH-Lösung (Simulation Alkalieintrag) bei 38°C konnte die alkaliempfindlich eingestuften GKs DE1 und AT3 eindeutig identifizieren. Ein wichtiger, noch zu klärender Punkt, ist der allgemeine Umgang mit GKs mit einer Reaktivität im Bereich des Grenzwertes (z.B. DE3 und AT2). Nach dem AT Langzeitprüfverfahren werden diese als „unbedenklich“ eingestuft, wohingegen AT2 die 40°C-Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie des DAfStb nicht bestand.

Bei der FIB-Klimawechsellaagerung (Performance-Prüfung) treten tendenziell ähnliche Dehnungsverläufe wie bei der 40°C-Nebelkammerlagerung auf. Ist allerdings der Anstieg der Dehnungswerte zwischen dem 6. und 8. Zyklus ( $\leq 1,0$ ) ein Ausschlusskriterium, dann haben alle untersuchten GKs nicht bestanden. Eine abschließende Bewertung der FIB-Klimawechsellaagerung ist erst nach Beendigung der Versuche und dem Vorliegen des Prüfberichtes möglich.

- Gemeinsames Vorgehen:

Aufbauend auf den im Rahmen dieses Forschungsprojektes generierten Daten der sechs bzw. sieben untersuchten Gesteinskörnungen konnten zwei wesentliche Stellschrauben für die Entwicklung eines gemeinsamen Konzeptes identifiziert werden. Eine Stellschraube ist der  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des verwendeten Prüfzementes, der sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das Ausmaß der Dehnung der Prüfkörper auswirkt und bei beispielsweise „spät reagierenden“ GKs (z.B. Grauwacke, DE1) zu einer möglichen Unterschätzung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität führen kann. Die

„Lagerungsbedingungen“ der Langzeitprüfverfahren stellt nach Auswertung der Versuchsergebnisse eine zweite Stellschraube dar. Betonfahrbahndecken werden neben Klima und Verkehr insbesondere durch die Zufuhr von Taumitteln im Winter beansprucht und entsprechend sollte sich diese stärkere Beanspruchung auch in der Wahl der Lagerungsbedingung widerfinden. In der AT-Langzeitprüfung wird durch Lagerung in 1M NaOH-Lösung der Alkalieintrag simuliert. Allerdings konnten mit diesem Prüfverfahren nur die als deutlich reaktiv erwarteten GKs (DE1 und AT3) als solche identifiziert werden.

- alternatives Schnellprüfverfahren:

Die IFB-Komplexprüfmethode besteht aus einer Kombination aus chemischer Kurzzeitprüfung und Mörtelschnellprüfung, die innerhalb kurzer Zeit (4 – 5 Tage) eine Einstufung der Alkaliempfindlichkeit der untersuchten Gesteinskörnung ermöglicht. Für diese Methoden liegen Ergebnisse aus den 1990er Jahren zu 384 Proben aus 174 Vorkommen aus dem mitteldeutschen Raum (Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg) vor. Anhand von Vergleichsversuchen (Langzeitprüfung in der Nebelkammer) an 99 Proben (32 Splitte und 67 Kiese) wurden damals die Grenzwerte für dieses Verfahren festgelegt. Die aktuellen Untersuchungen und die Bewertung der in den 1990er Jahren durchgeführten Messungen zeigten jedoch, dass eine Neuevaluierung der damals festgelegten Grenzwerte nötig ist.

Neben den genannten Stellschrauben Prüfzement und Lagerungsbedingung der Langzeitprüfverfahren sollte auch der Einfluss der dynamischen Belastung durch den Verkehr als möglichen Einwirkungsfaktor für Prüfverfahren näher betrachtet werden. Fortführend sollte ebenfalls die Rolle von na-Zementen beim Bau von Betonfahrbahndecken mittels der Lagerung nach ÖNORM B 3100 in 1M NaOH-Lösung (Simulation Alkalieintrag) bei 38°C über die Dauer von 365d hinsichtlich ihres möglichen Einflusses auf die Verringerung des AKR-Risikos bei Betonfahrbahndecken untersucht werden. Ein alternatives Schnellprüfverfahren, wie beispielsweise die IFB-Komplexprüfmethode, welche aus einer Kombination aus chemischer Kurzzeitprüfung und Mörtelschnellprüfung besteht, könnte in Kombination mit den gegenwärtig verfügbaren Ansätzen zur modellmäßigen Erfassung einer schädigenden AKR ein vielversprechendes Werkzeug für die Ingenieurspraxis darstellen.

## REFERENZEN

- [ARS 2005]: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 15/2005 „Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 06/2005.
- [ARS 2006]: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 12/2005 „Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 05/2006.
- [ARS 2013]: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013 „Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 01/2013.
- [DAfStb 2013] DAfStb: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Richtlinie), Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V., Berlin, 2013.
- [Deutscher Bundestag 2009] Deutscher Bundestag: Zerstörung des Fahrbahnbelages durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (Drucksache 16/12024) vom 10.03.2009, Download vom 13.04.2016 unter: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/122/1612210.pdf>
- [Deutscher Bundestag 2014] Deutscher Bundestag: Ausmaß der Schäden durch Alkali-Kieselsäure-Reaktionen an Betonfahrbahndecken und Ingenieurbauwerken im Bundesfernstraßennetz, Antwort auf die kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (Drucksache 18/2688) vom 29.09.2014, Download vom 13.04.2016 unter folgender Adresse: <http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/18/026/1802688.pdf>
- [Houben 2017]: Milliardengrab Autobahn: Warum neue Autobahnen saniert werden müssen, Sendung plusminus der ARD vom 19.07.2017.
- [Ichikawa & Miura 2007] T. Ichikawa, M. Miura, Modified model of alkali-silica reaction, Cement and Concrete research 37 (2007), 1291-1297.
- [Multon et al. 2009] S. Multon, A. Sellier, M. Cyr, Chemo-mechanical modeling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion, Cement and Concrete Research 39 (2009) 490–500.
- [ÖNORM B 3100 2008] ÖNORM B 3100: Beurteilung der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität im Beton, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2008.
- [ÖNORM B 3309 2004] ÖNORM B 3309: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ), Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2004.

- [ÖNORM B 3327-1 2005] ÖNORM B 3327-1: Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen Teil 1: Zusätzliche Anforderungen, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, 2005.
- [Rajabipour 2015] F. Rajabipour, E. Giannini, C. Dunant, J. H. Ideker, M. D. Thomas. Alkali-silica reaction: current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. *Cement and Concrete Research* 76 (2015) 130-146.
- [TL 2007]: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Betonbauweisen“, Köln, 06/2008.
- [TP 2010]: Technische Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Betonbauweisen“, Köln, 2010.
- [TP 2015]: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Betonbauweisen“, Köln, 2015.
- [Wieland 2017]: Vermeidung von AKR in Betonfahrbahndecken – Aktueller Stand hinsichtlich der Bewertung geeigneter Betone, Workshop DFG-Forschergruppe „AKR“, Karlsruhe, 2017.
- [Zement-Merkblatt 2015]: Fahrbahndeckenbeton für Straßen, Zement-Merkblatt Straßenbau S1, InformationsZentrum Beton GmbH, Erkrath, 11/2015.
- [ZTV 2007]: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Betonbauweisen“, Köln, 06/2008.