

# **AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 90**

**bast**

# **AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche**

von

Christoph Müller  
Maik Seidel  
Matthias Böhm

Verein Deutscher Zementwerke gGmbH  
im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

Jochen Stark  
Horst-Michael Ludwig  
Katrin Seyfarth

Bauhaus-Universität Weimar  
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (FIB)

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 90**

**bast**

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

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

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

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

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

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

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

#### **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 89.0214/2008/AP:**  
AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche

#### **Fachbetreuung**

Sabine Huland  
Ursula Blume

#### **Herausgeber**

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

#### **Redaktion**

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

#### **Druck und Verlag**

Fachverlag NW in der  
Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-218-6

Bergisch Gladbach, November 2015

## Kurzfassung – Abstract

### AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche

Zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen sind im Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb vom Februar 2007 das Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren (SPV)) bzw. der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren (MST)) und der Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (40°C) (NK) vorgesehen. Bisher war nicht abschließend geklärt, ob die für diese Standardprüfungen festgelegten Beurteilungskriterien auch dann Verwendung finden können, wenn die Gesteinskörnungen in Fahrbahndecken aus Waschbeton (hoher Zementgehalt, besonders gestaltete Oberfläche) angewendet werden sollen.

Für die Untersuchungen wurden drei alkaliunempfindliche Splitte (Andesit I Mitteldeutschland (MD), Rhyolith Süddeutschland (SD) und Gabbro), ein alkaliempfindlicher Splitt (Rhyolith MD) und zwei „potenziell“ alkaliempfindliche Splitte (Andesit II MD, Granodiorit) verwendet.

Die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der sechs groben Gesteinskörnungen auf Basis der Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen ergab, dass drei von ihnen „geeignet für die Feuchtigkeitklasse WS im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)“ sind. Bei ausschließlicher Verwendung der Ergebnisse der Standardprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie konnte diese Aussage getroffen werden, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt war:

- Alle Gesteinskörnungsprüfungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb wurden bestanden.
- Der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren) nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wurde bestanden.
- Der 60°C-Betonversuch nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wurde bestanden.

Die Begünstigung einer schädigenden AKR durch sich von der Oberfläche abhebende Gesteinskörner (Waschbetonoberfläche) konnte bei den untersuchten Betonzusammensetzungen nicht nachgewiesen werden. Im Bereich der Waschbetonoberflächen wurden keine AKR-Reaktionsprodukte gefunden.

### ASR investigations for concrete road pavements with a washed concrete surface

For the assessment of the alkali reactivity of aggregates the accelerated test method (reference test) and/or the accelerated mortar bar test (alternative test) respectively and the concrete test with fog chamber storage (40°C) are stipulated in Part 3 of the alkali guidelines issued by the German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb), dated February 2007.

So far it has not yet been fully clarified whether (in spite of higher cement content and the specially designed surface of washed concrete) the expansion limit values defined for standard test methods can also be used for assessing washed concrete road pavements.

For the investigations three samples of crushed gravel (Andesite I from middle Germany (MG)) Rhyolite (from the South of Germany (SG) and Gabbro) being not alkali reactive, one sample of alkali reactive crushed gravel (Rhyolite from MG) and two samples of “potentially” alkali reactive crushed gravel (Andesite II from MG, Granodiorite) were used.

The assessment of the alkali reactivity of the six samples of coarse aggregates – based on the results of performance tests – led to the conclusion that three samples of aggregates are suitable for the use in concrete of the Humidity class WS regarding the avoidance of a damaging alkali-silica reaction. When exclusively applying results of standard test methods from the alkali guidelines the following assessment could be made, if the following requirements were fulfilled:

- All tests of aggregates according to part 3 of the alkali guidelines issued by the DAfStb were passed.
- The accelerated mortar bar test (alternative test) according to part 3 of the alkali guidelines was passed.
- 60°C concrete test according to part 3 of the alkali guidelines was passed.

However, it could not be proven that in the concrete compositions under investigation a washed concrete surface would intensify a damaging ASR. In the area of washed concrete surfaces no ASR reaction products could be found.



## Inhalt

<b>Teil 1 – Allgemeines</b> .....	7	2.2.4 Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung .....	19
1 Ziel und Umfang des Forschungsprojekts .....	7	2.2.5 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser .....	21
1.1 Ziel der Untersuchungen .....	7	2.3 Betonprüfungen (AKR-Performance-Prüfung) .....	21
1.2 Umfang der Untersuchungen .....	7	2.3.1 60°C-Betonversuch mit/ohne Alkalizufuhr von außen .....	21
1.3 Ausgangsstoffe .....	8		
<b>Teil 2 – Untersuchungen des FIZ</b> .....	9	<b>3 Zusammenfassung</b> .....	26
<b>1 Versuchsdurchführung</b> .....	9	3.1 Zementprüfung .....	26
1.1 Zementprüfung .....	9	3.1.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA) ...	26
1.1.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA) ...	9	3.2 Gesteinskörnungsprüfungen .....	26
1.2 Gesteinskörnungsprüfungen .....	9	3.2.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA) ...	26
1.2.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA) ...	9	3.2.2 Petrografie (Dünnschliffmikroskopie) ...	26
1.2.2 Petrografie (Dünnschliffmikroskopie) ...	9	3.2.3 80°C-Schnellprüfverfahren .....	26
1.2.3 Alkaliempfindlichkeit (80°C-Schnellprüfverfahren) .....	9	3.2.4 Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung .....	27
1.2.4 Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung .....	10	3.2.5 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser .....	28
1.2.5 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser .....	11	3.3 Betonprüfungen (AKR-Performance-Prüfung) .....	28
1.3 Betonprüfungen (AKR-Performance-Prüfung) .....	11	3.3.1 60°C-Betonversuch mit/ohne Alkalizufuhr von außen .....	28
1.3.1 60°C-Betonversuch mit/ohne Alkalizufuhr von außen .....	11	<b>Teil 3 – Untersuchungen des FIB</b> .....	30
<b>2 Ergebnisse</b> .....	13	<b>1 Eingesetzte Betonausgangsstoffe</b> ...	30
2.1 Zementprüfung .....	13	1.1 Gesteinskörnungen .....	30
2.1.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA) ...	13	1.2 Zement .....	30
2.2 Gesteinskörnungsprüfungen .....	13	1.3 Luftporenbildner, Oberflächen- verzögerer für Waschbeton- oberflächen .....	31
2.2.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA) ...	13	<b>2 Untersuchungen an den Betonausgangsstoffen</b> .....	31
2.2.2 Petrografie (Dünnschliffmikroskopie) ...	13	2.1 Untersuchungen an den Gesteinskörnungen .....	31
2.2.3 Alkaliempfindlichkeit (80°C-Schnellprüfverfahren) .....	16		

2.1.1	Petrografische und mineralogische Charakterisierung der Gesteinskörnungen. . . . .	31	<b>Teil 4 – Zusammenfassung und Schlussfolgerungen</b> . . . . .	69
2.1.2	Untersuchung der Gesteinskörnungen mit Schnelltests . . . . .	42	1 Zusammenfassung . . . . .	69
2.2	Bestimmung Na <sub>2</sub> O-Äquivalent vom Zement . . . . .	49	1.1 Ziel der Untersuchungen . . . . .	69
			1.2 Ergebnisse und Aussagen . . . . .	69
<b>3</b>	<b>AKR-Performance-Prüfung mittels FIB-Klimawechsellaagerung</b> . . . . .	49	<b>2 Schlussfolgerungen</b> . . . . .	72
3.1	Ergebnisse Vorversuche. . . . .	49	2.1 Eignung der AKR-Prüfverfahren nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb für die Prüfung von Gesteinskörnungen für Waschbeton . . . . .	72
3.2	Beschreibung der Durchführung von AKR-Performance-Prüfungen . . . . .	51	2.2 Einfluss der freiliegenden Splittkörner auf den Ablauf einer AKR . . . . .	75
3.3	Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen . . . . .	54	2.3 Abschließende Hinweise . . . . .	75
3.3.1	Herstellung der Probekörper für die AKR-Performance-Prüfungen . . . . .	54	<b>Literatur</b>	
3.3.2	Dehnungsverläufe während der AKR-Performance-Prüfungen . . . . .	58	<b>Teil 2 – Untersuchungen des FIZ</b> . . . . .	76
3.4	Mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen . . . . .	62	<b>Teil 3 – Untersuchungen des FIB</b> . . . . .	76
3.4.1	Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen an Dünnschliffen . . . . .	63	<b>Anlagen</b>	
3.4.2	Beurteilung der Eignung der untersuchten Betonzusammensetzungen . . . . .	65	Die Anlagen zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter:	
3.4.3	Beurteilung der Eignung von Gesteinskörnungen im Ergebnis aller Untersuchungen . . . . .	66	<a href="http://bast.opus.hbz-nrw.de">http://bast.opus.hbz-nrw.de</a> abrufbar	
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	66		

## Teil 1 – Allgemeines

### 1 Ziel und Umfang des Forschungsprojekts

#### 1.1 Ziel der Untersuchungen

Um die Alkaliempfindlichkeit von sogenannten slow/late-Gesteinskörnungen zu beurteilen, sind im Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb, Ausgabe Februar 2007, zum einen die beiden Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren, Alternativverfahren) und zum anderen der Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (40 °C) vorgesehen. Diesen Prüfverfahren (insbesondere dem Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung) wurde ein Zementgehalt von 400 kg/m<sup>3</sup> in der Betonprüfung zugrunde gelegt. Ob die auf Grundlage dieser Standard-Prüfungen ermittelten Ergebnisse und festgelegten Dehnungsgrenzwerte auch für Fahrbahndecken aus Waschbeton verwendet werden können, ist nicht abschließend geklärt. Die Unsicherheiten sind darauf zurückzuführen, dass Waschbetone mit einem Zementgehalt von mindestens 420 kg/m<sup>3</sup> hergestellt werden und einer Alkalizufuhr von außen ausgesetzt sind. Außerdem liegen keine gesicherten Erkenntnisse über den Einfluss der besonders gestalteten Oberfläche auf den Ablauf der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) vor.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts sollte untersucht werden, ob die in den o. g. Standard-Prüfungen festgelegten Dehnungsgrenzwerte nach Alkali-Richtlinie uneingeschränkt auch für Gesteinskörnungen gelten, die für Waschbeton verwendet werden sollen bzw. ob für diesen Fall Veränderungen bei der Prüfung von Gesteinskörnungen zum Einsatz in Waschbeton (z. B. andere Dehnungsgrenzwerte) vorzunehmen sind.

Wenn gesicherte Untersuchungsergebnisse diesbezüglich vorliegen, können bei den in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S eingestufteten Gesteinskörnungen gemäß Alkali-Richtlinie die langwierigen und kostenintensiven gutachterlichen Stellungnahmen, die für den Waschbeton bis dahin vorzusehen sind, entfallen.

Zur Abklärung dieser Fragestellung wurde ein Prüfprogramm durchgeführt, in dem sechs gebrochene grobe Gesteinskörnungen unterschiedlicher

Alkaliempfindlichkeit sowie eine feine Gesteinskörnung zum einen mit den oben aufgeführten Prüfungen nach Alkali-Richtlinie und zum anderen mit zwei verschiedenen AKR-Performance-Prüfungen hinsichtlich ihrer Alkali-Empfindlichkeit in Fahrbahndeckenbeton untersucht wurden. Im Einzelnen waren dies der 60°C-Betonversuch mit/ohne Alkalizufuhr (Forschungsinstitut der Zementindustrie – kurz FIZ) und die Prüfung mittels Klimawechsellagerung (F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde – kurz FIB). Dadurch sollte weiterhin herausgefunden werden, ob mit beiden AKR-Performance-Prüfmethoden auch für Waschbeton eine ähnlich gute Übereinstimmung der Prüfergebnisse erzielt werden kann, wie sie bei den Vergleichsprüfungen mit Standardrezeptur erreicht wurde.

Die potenzielle Alkaliempfindlichkeit bzw. die Unbedenklichkeit der ausgewählten Gesteinskörnungen ist durch Untersuchungen an früheren Lieferungen dieser Gesteinskörnungen mit Schnellprüfverfahren bekannt. Teilweise liegen Untersuchungsergebnisse aus bereits durchgeführten AKR-Performance-Prüfungen zum Verhalten von Beton für Fahrbahndecken der alten Standardbauweise (Zementgehalt ~ 340 kg/m<sup>3</sup>) mit diesen Gesteinskörnungen vor. Einige Gesteinskörnungen haben eine große Bedeutung für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, da sie seit vielen Jahren im Straßenbau eingesetzt werden und bisher keine Schäden infolge einer schädigenden AKR mit ihnen aufgetreten sind.

Untersuchungen des FIZ weisen darauf hin, dass in Laborversuchen eine schädigende AKR bei Waschbeton gegenüber dem Standardbeton verstärkt werden kann.

#### 1.2 Umfang der Untersuchungen

Ein Teil der im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführten Untersuchungen erfolgte am FIZ, der andere Teil wurde vom FIB durchgeführt. Entsprechend wurde der Bericht in mehrere Teile gegliedert. In Teil 1 befinden sich allgemeine Informationen zum Forschungsprojekt, Teil 2 enthält Angaben zu den Versuchen sowie Ergebnissen des FIZ und Teil 3 die des FIB. Teil 4 enthält eine Zusammenfassung aller Ergebnisse sowie die Schlussfolgerungen. Im Einzelnen wurden folgende Prüfverfahren durchgeführt:



Art der Prüfung	Prüfverfahren	Teil 2	Teil 3
Gesteinskörnungsprüfung nach Alkali-Richtlinie	80°C-Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren)	Kapitel 1.2.3	-
	70°C-Mörtelschnelltest (Alternativverfahren)	-	Kapitel 2.1.2
	40°C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung	Kapitel 1.2.4	-
	60°C-Betonversuch über Wasser	Kapitel 1.2.5	-
AKR-Performance-Prüfungen	60°C-Betonversuch mit/ohne Alkalizufuhr	Kapitel 1.3	-
	Klimawechsellagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung mit anschließender Dünnschliffuntersuchung	-	Kapitel 3

Tab. 1: Untersuchungsverfahren und ihre Beschreibung

### 1.3 Ausgangsstoffe

Als Zement für die Herstellung der zu prüfenden Waschbetone wurde vom Auftraggeber ein CEM I 42,5 N (sd) mit der Anforderung  $0,76 \text{ M.-%} \leq \text{Na}_2\text{O-Äquivalent} \leq 0,80 \text{ M.-%}$  vorgegeben (Ausschreibung vom 16.07.2008). Mit dieser Vorgabe nahe der Obergrenze des für einen CEM I maximal zulässigen  $\text{Na}_2\text{O-Äquivalents}$  gemäß TL Beton-StB 07 sollten pessimale Bedingungen sichergestellt werden. Weiterhin waren für die Untersuchungen folgende Gesteinskörnungen vorgesehen, die nach bisherigen Erfahrungen insgesamt ein breites Spektrum der Alkaliempfindlichkeit aufweisen.

- 1.1 Ausreichend alkaliunempfindliche feine Gesteinskörnung<sup>1</sup>  
(einheitlich für alle Betonzusammensetzungen)  
Sand 0/2 mm Thüringen (Auswahl FIB)
- 1.2 Ausreichend alkaliunempfindliche Festgesteine<sup>2</sup>
  - 1.2.1 Andesit-Splitt I 5/8 mm  
Mitteldeutschland (Auswahl FIB)
  - 1.2.2 Rhyolith-Splitt 5/8 mm  
Süddeutschland (Auswahl FIZ)
  - 1.2.3 Gabbro-Splitt 5/8 mm (Auswahl FIZ)

### 1.3 Alkaliempfindliche Festgesteine<sup>3</sup>

1.3.1 Rhyolith-Splitt 5/8 mm  
Mitteldeutschland (Auswahl FIB)

### 1.4 Potenziell alkaliempfindliche Festgesteine<sup>4</sup>

1.4.1 Andesit-Splitt II 5/8 mm  
Mitteldeutschland (Auswahl FIB)

1.4.2 Granodiorit-Splitt I 8/16 mm  
(nur FIB – siehe Bericht Teil 3)

1.4.3 Granodiorit-Splitt II 5/8 mm  
(Auswahl FIB)

In Tabelle 2 sind die Daten über die Anlieferung der Ausgangsstoffe dargestellt.

Die Probenahme wurde durch das jeweilige Werk vorgenommen. Die Anlieferung in Düsseldorf erfolgte durch Speditionen, die von den jeweiligen Werken beauftragt wurden. Der für die Untersuchungen zunächst vorgesehene potenziell alkaliempfindliche Andesit-Splitt (Andesit-Splitt II) Mitteldeutschland und der Granodiorit wurden von den Lieferwerken nach mehrmaliger Nachfrage nicht geliefert. Der vorgesehene und nicht gelieferte Andesit-Splitt wurde durch einen anderen Andesit-Splitt aus einem anderen Werk aus Mitteldeutschland ersetzt. Weiterhin wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber der nicht gelieferte Granodiorit durch einen Granodiorit eines anderen Herstellers aus einem anderen Werk ersetzt. Ein Probenahmeprotokoll über die zu untersuchenden Gesteinskörnungen liegt dem FIZ nur für den Rhyolith-Splitt aus Süddeutschland und den Gabbro-Splitt vor. Alle gelieferten Gesteinskörnungen erreichten das FIZ unverplombt.

<sup>1</sup> Bezeichnung des Auftraggebers für die verwendete feine Gesteinskörnung.

<sup>2</sup> Bezeichnung des Auftraggebers für Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S.

<sup>3</sup> Bezeichnung des Auftraggebers für Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S.

<sup>4</sup> Bezeichnung des Auftraggebers für Gesteinskörnungen mit einer Dehnung im Alternativverfahren (Mörtelschnelltest) nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie von  $1,5 \leq \epsilon \leq 2,0 \text{ mm/m}$  (Erfahrungswerte aus früheren Untersuchungen).

Nr. <sup>1</sup>	Ausgangsstoff	Lieferkörnung	Lieferdatum	Entnahmeprotokoll
-	CEM I 42,5 N (sd)	-	14.01.09	nein
1.1	Sand Thüringen	0/2 mm	13.02.09	nein
1.2.1	Andesit-Splitt I Mitteldeutschland	5/8 mm und 8/16 mm	22.12.08	nein
1.2.2	Rhyolith-Splitt Süddeutschland	5/8 mm und 8/16 mm	10.12.08	ja
1.2.3	Gabbro-Splitt	5/8 mm und 8/16 mm	16.12.08	ja
1.3.1	Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland	5/8 mm und 8/16 mm	21.01.09	nein
1.4.1	Andesit-Splitt II Mitteldeutschland	5/8 mm und 8/16 mm	06.03.09	nein
1.4.3	Granodiorit-Splitt	5/8 mm und 8/16 mm	08.05.09	nein

<sup>1</sup> Nummerierung gemäß Leistungsbeschreibung im Ausschreibungstext des Auftraggebers vom 16.07.08

Tab. 2: Daten zu den Ausgangsstoffen

## Teil 2 – Untersuchungen des FIZ

### 1 Versuchsdurchführung

#### 1.1 Zementprüfung

##### 1.1.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA)

Der Zement CEM I 42,5 R (sd) wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse chemisch charakterisiert.

#### 1.2 Gesteinskörnungsprüfungen

##### 1.2.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA)

Die folgenden Gesteinskörnungen wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse chemisch charakterisiert.

- Sand 0/2 mm Thüringen (GK 1.1),
- Andesit-Splitt I 5/8 mm Mitteldeutschland (GK 1.2.1),
- Rhyolith-Splitt 5/8 mm Süddeutschland (GK 1.2.2),
- Gabbro-Splitt 5/8 mm (GK 1.2.3),
- Rhyolith-Splitt 5/8 mm Mitteldeutschland (GK 1.3.1),
- Andesit-Splitt II 5/8 mm Mitteldeutschland (GK 1.4.1),
- Granodiorit-Splitt II 5/8 mm (GK 1.4.3).

##### 1.2.2 Petrografie (Dünnschliffmikroskopie)

Von den Gesteinskörnungen

- Rhyolith 5/8 mm Süddeutschland,
- Gabbro 5/8 mm

wurden Dünnschliffe hergestellt, die polarisationsmikroskopisch untersucht wurden. Dazu wurden Streupräparate in einem Gießharz angefertigt. Danach wurden die Streupräparate angeschliffen, auf einen Objektträger aufgeklebt und auf eine Dicke von ca. 30 µm geschliffen. Als nächstes wurden die Dünnschliffe am Mikroskop bei Durchlicht in einfach polarisiertem Licht und bei gekreuzten Polarisatoren untersucht.

##### 1.2.3 Alkaliempfindlichkeit (80°C-Schnellprüfverfahren)

Mit dem Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren) nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wurden die Alkaliempfindlichkeit des Sandes aus Thüringen und die Alkaliempfindlichkeit der groben Fraktion (5/8 mm) aller Gesteinskörnungen des Waschbetons geprüft. Zur Ermittlung der Dehnung wurde die Längenänderung von je drei Mörtelprismen nach einer 13-tägigen Lagerung in 80 °C heißer 1 molarer NaOH-Lösung bestimmt.

Die Längen der drei Prismen jeder Prüfung wurden nach 1, 5, 9 und 13 Tagen Lagerung gemessen und daraus die Dehnungen ermittelt. Die Ergebnisse und der Grenzwert sind im Kapitel 2.2.3 (Schnellprüfverfahren) dargestellt.

### 1.2.4 Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung

#### Ausgangsstoffe

Für die Untersuchungen wurde ein Prüfzement aus den Beständen des FIZ Düsseldorf eingesetzt, der die Anforderungen gemäß Alkali-Richtlinie [1] mit einem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von  $1,3 \pm 0,1$  M.-% erfüllt.

Als Gesteinskörnung wurde der Sand 0/2 mm aus einem Werk in Thüringen zusammen mit jeweils einer Körnung 5/8 mm und einer Körnung 8/16 mm gemäß Tabelle 3 eingesetzt.

#### Betonzusammensetzung

Mit den Gesteinskörnungen und dem Zement wurde nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie [1] Beton mit einem Zementgehalt von 400 kg/m<sup>3</sup> und einem w/z-Wert von 0,45 hergestellt. Das Wasser wurde dem Leitungsnetz der Stadt Düsseldorf entnommen. Das Gesteinskörnungsgemisch wurde gemäß Tabelle 3 zusammengesetzt.

#### Herstellung, Lagerung und Prüfung

Die Gesteinskörnungen und der Zement wurden trocken vorgelegt. Gleich zu Beginn wurde unter ständigem Mischen das gesamte Zugabewasser zugegeben. Die Mischdauer betrug ab dem Zeitpunkt der Wasserzugabe 120 Sekunden. Die Probekörper für die Betonprüfungen wurden in Stahlformen hergestellt. Der Beton wurde auf einem Rütteltisch verdichtet.

Folgende Probekörper je Gesteinskörnung wurden hergestellt:

- 3 Balken 100 mm x 100 mm x 500 mm,<sup>5</sup>
- 3 Würfel mit 150 mm Kantenlänge,<sup>6</sup>
- 1 Würfel mit 300 mm Kantenlänge.<sup>7</sup>

- Frischbeton

10 Minuten nach Ende der Mischzeit wurden das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 bzw. das Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4 und der Luftgehalt im Drucktopf nach DIN EN 12350-7 bestimmt.

- Festbeton

Nach der Herstellung wurden die Probekörper  $24 \pm 1$  Stunden im Klimaraum bei  $20 \pm 2$  °C und  $65 \pm 5$  % r. F., abgedeckt mit feuchten Tüchern, in ihren Formen gelagert. Anschließend wurden die Probekörper entschalt. Die Probekörper wurden wie folgt gelagert und geprüft:

#### a) Druckfestigkeit

Drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge wurden nach dem Ausschalen nach DIN EN 12390-2:2001-06, nationaler Anhang, bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser und danach bis zur Prüfung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 im Alter von 28 Tagen im Klimaraum bei  $20 \pm 2$  °C und  $65 \pm 5$  % r. F. gelagert.

#### b) 40°C-Nebelkammerlagerung

Um die Möglichkeit des Ablaufs einer schädigenden AKR bei 40 °C im Beton zu untersuchen, wurden drei Balken in der 40°C-Nebelkammerlagerung geprüft. Dazu wurden die Betonbalken für eine Dauer von  $24 \pm 2$  h nach der Herstellung mit feuchten Tüchern abgedeckt und in der Form bei  $20,0 \pm 2,0$  °C vorgelagert. Anschließend wurden die Betonbalken entformt

<sup>5</sup> Zur Ermittlung der Dehnung in der 40°C-Nebelkammerlagerung.

<sup>6</sup> Zur Prüfung der Druckfestigkeit.

<sup>7</sup> Zur Ermittlung der Rissbreiten in der 40°C-Nebelkammerlagerung.

Bezeichnung der Gesteinskörnung	Art	Korngruppe [mm]	Anteil [Vol.-%]
Sand Thüringen	Sand	0/2	30
Andesit-Splitt I Mitteldeutschland bzw. Rhyolith-Splitt Süddeutschland bzw. Gabbro-Splitt bzw. Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland bzw. Andesit-Splitt II Mitteldeutschland bzw. Granodiorit-Splitt	Splitt	5/8	40
		8/16	30

Tab. 3: Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs für die 40°C-Nebelkammerlagerung (Gesteinskörnungsprüfung)

und in der Nebelkammer bei  $40,0 \pm 2,0$  °C und mindestens 99 % relativer Feuchte gelagert. Die Nullmessung erfolgte bei  $20,0 \pm 2,0$  °C unmittelbar vor dem Einbringen in die Nebelkammer. Weitere Messungen der Längenänderung erfolgten nach 1, 7, 28 Tagen und weiterhin monatlich bis zu einem Alter von 9 Monaten Nebelkammerlagerung.

### 1.2.5 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser

Die Probekörper (3 Balken 75 mm x 75 mm x 280 mm) wurden gemeinsam mit den Probekörpern für die 40°C-Nebelkammerlagerung hergestellt. Der 60°C-Betonversuch entspricht im Wesentlichen dem RILEM Verfahren AAR-4 [2], das international auch zur Unterscheidung zwischen reaktiven und nicht reaktiven Gesteinskörnungen eingesetzt wird. Die Verfahren (Probenbearbeitung und Prüfmittel) sind bei der Prüfung nach AAR-4 und beim 60°C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie identisch. Unterschiede bestehen in der jeweils zu prüfenden Betonzusammensetzung, die sich in geringem Umfang in der Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemischs, in der Zementfestigkeitsklasse, im Zementgehalt, im Alkaligehalt des Zements und im Wasserzementwert unterscheiden. Weitere Informationen zum RILEM Verfahren AAR-4 sind in [4] enthalten.

## 1.3 Betonprüfungen (AKR-Performance-Prüfung)

### 1.3.1 60°C-Betonversuch mit/ohne Alkalizufuhr von außen

#### Zement

Für die Herstellung der Probekörper im Rahmen der Performanceprüfungen wurde ein CEM I 42,5 N (sd) verwendet, der für den Bau von Fahrbahn-

decken nach den TL Beton-StB 07 geeignet ist und der die Bedingung an das  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $\leq 0,80$  M.-% erfüllt. Der Zement wurde am 14.01.2009 per Spedition im FIZ angeliefert.

#### Gesteinskörnungen

Im Rahmen der Performance-Prüfung wurden die in Tabelle 4 genannten Gesteinskörnungen verwendet.

#### Zusatzmittel

Als Zusatzmittel wurde ein Luftporenbildner eingesetzt, der aus den Beständen des FIZ entnommen wurde.

#### Beton

- Betonzusammensetzung

Der Beton wurde gemäß den Ausschreibungsunterlagen vom 16.07.2008 zusammengesetzt. Die Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische der sechs für die Betonversuche hergestellten Betone ist in Tabelle 4 dargestellt.

Mit dem jeweiligen Gesteinskörnungsgemisch, dem Zement, Zugabewasser und dem Luftporenbildner wurde Beton entsprechend den Vorgaben des Auftraggebers mit einem Zementgehalt von  $430 \text{ kg/m}^3$  und einem w/z-Wert von 0,42 hergestellt. Der Luftporenbildner wurde je nach verwendeter Gesteinskörnung mit rd. 0,05 bis 0,1 M.-% (bezogen auf den Zementgehalt) dosiert. Zielgröße war ein Luftgehalt im Frischbeton von 5,5 Vol.-%. Das Wasser wurde dem Leitungsnetz der Stadt Düsseldorf entnommen.

- Herstellung, Lagerung und Prüfung

Die Gesteinskörnungen und 1/3 des Zugabewassers wurden 20 Sekunden in einem Zwangsmischer gemischt. Anschließend wurde 5 Minuten ge-

Bezeichnung der Gesteinskörnung	Art	Korngruppe [mm]	Anteil [Vol.-%]
Sand Thüringen	Sand	0/2	30
Andesit-Splitt I Mitteldeutschland bzw. Rhyolith-Splitt Süddeutschland bzw. Gabbro-Splitt bzw. Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland bzw. Andesit-Splitt II Mitteldeutschland bzw. Granodiorit-Splitt	Splitt	5/8	70

Tab. 4: Zusammensetzung der Gesteinskörnungsgemische für die 60°C-Betonversuche

wartet, der Zement zugegeben und der Mischvorgang mit den restlichen 2/3 Zugabewasser fortgesetzt. Nach einer Minute wurde der Luftporenbildner während des Mischens zugegeben und der Beton für eine weitere Minute gemischt. Die Probekörper für die Betonprüfungen wurden in Stahlformen hergestellt. Die Verdichtung des Betons erfolgte auf dem Rütteltisch.

Folgende Probekörper wurden je Beton hergestellt:

- 9 Balken 75 mm x 75 mm x 280 mm,
- 3 Würfel mit 150 mm Kantenlänge.

Auf die Herstellung von Betonplatten 30 x 15 [cm<sup>2</sup>] zur Beurteilung der Oberfläche (Pop-outs) und Bestimmung der Haftzugfestigkeit sowie Beaufschlagung mit Taumittel-Lösung/destilliertem Wasser bei 60 °C über Wasser wurde aufgrund vorliegender Erkenntnisse aus anderen Forschungsprojekten verzichtet (siehe Teil 4).

- Frischbeton

10 Minuten nach Ende der Mischzeit wurden das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5, alternativ das Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4 sowie der Luftgehalt im Drucktopf nach DIN EN 12350-7 bestimmt.

- Festbeton

Nach der Herstellung wurden die Probekörper 24 ± 1 Stunden im Klimaraum bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % r. F., abgedeckt mit feuchten Tüchern, in ihren Formen gelagert. Anschließend wurden die Probekörper entschalt. Die Probekörper wurden wie folgt gelagert und geprüft:

a) Druckfestigkeit

Drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge wurden nach dem Ausschalen nach DIN EN 12390-2, nationaler Anhang, bis zum Alter von 7 Tagen unter Wasser und danach bis zur Prüfung der Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 im Alter von 28 Tagen im Klimaraum bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % r. F. gelagert.

b) 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr von außen

Unmittelbar nach dem Ausschalen wurden der Abstand der Messmarken und die Masse der Betonbalken bei 20 ± 2 °C bestimmt (Nullmessung). Die Probekörper wurden danach für 30 ± 5 Minuten in 20 ± 2 °C warmes Wasser getaucht und die Masse und die Länge erneut gemessen (Kontrollmessung). Weitere Messungen erfolgten jeweils 7, 21 und 28 Tage nach Herstellung. Während der 28-tägigen Vorlagerung sowie in der anschließenden Wechsellagerung wurden die Betonbalken unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt (siehe Tabelle 5). Um eine Alkalizufuhr von außen zu simulieren, wurden jeweils drei Balken an 2 Tagen der Wechsellagerung mit einer NaCl-Prüflösung beaufschlagt. Es wurden mehrere NaCl-Konzentrationen getestet. Die verwendeten Prüflüssigkeiten enthielten jeweils 10, 3 bzw. 0 M.-% Natriumchlorid (destilliertes Wasser) (siehe Tabelle 6). Nach aktuellem Kenntnisstand liefert die Verwendung einer 10 M.-% NaCl enthaltenden Prüflüssigkeit ausreichend differenzierende Ergebnisse zur Beurteilung von Betonen für die Feuchtigkeitsklasse WS.

Lagerungsphase	Betonalter am Ende der Lagerung	Messung am Ende der Lagerung	Klima
Vorlagerung 28 Tage	1 d	X	in der Schalung
	7 d	X	20 ± 2 °C und 98 % r. F.
	21 d	X	20 ± 2 und 65 ± 5 % r. F.
	27 d	-	60 ± 2 °C und 98 % r. F.
	28 d	X (Nullmessung)	20 ± 2 °C und 98 % r. F.
Wechsellagerung ab dem 28. Tag im Turnus von 14 Tagen	33 d	-	60 ± 2 °C im Trockenschrank
	35 d	-	20 ± 2 °C in Prüflösung
	41 d	-	60 ± 2 °C und 98 % r. F.
	42 d	X	20 ± 2 °C und 98 % r. F.

Tab. 5: Lagerungsplan mit dem 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr

Bezeichnung der Prüflüssigkeit	NaCl-Konzentration
Destilliertes Wasser	-
NaCl in wässriger Lösung (NaCl-Prüflösung)	3 M.-%
NaCl in wässriger Lösung (NaCl-Prüflösung)	10 M.-%

Tab. 6: Prüflüssigkeiten im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr

Die verwendeten Prüflüssigkeiten sind in Tabelle 6 aufgeführt. Am Ende jedes Wechsellagerungszyklus (alle 14 Tage) wurden die Messwerte bei  $20 \pm 2$  °C bis zum Betonalter von 24 Wochen bestimmt.

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Zementprüfung

#### 2.1.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA)

Die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmte chemische Zusammensetzung des verwendeten Zements ist in Tabelle 7 dargestellt. Das  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des Zements betrug 0,80 M.-%.

### 2.2 Gesteinskörnungsprüfungen

#### 2.2.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA)

In Tabelle 7 sind die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmten chemischen Zusammensetzungen der Gesteinskörnungen dargestellt.

#### 2.2.2 Petrografie (Dünnschliffmikroskopie)

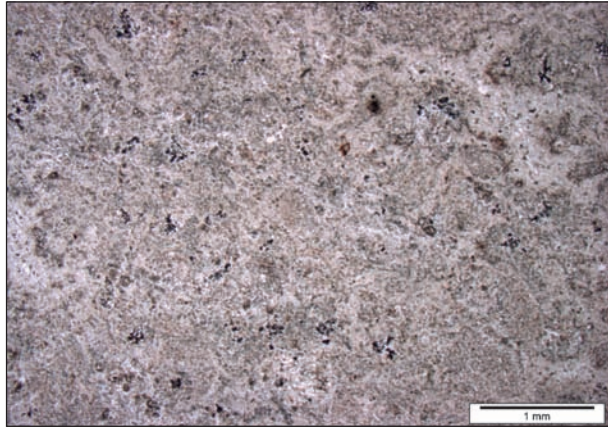
##### Rhyolith-Splitt Süddeutschland

Makroskopisch zeigt das untersuchte Gestein dunkelrote und graue bis graugrüne Eigenfarben. Mikroskopisch sind kaum systematische Unterschiede zwischen den unterschiedlich gefärbten Bereichen zu erkennen. Nur in einigen grünlichen Berei-

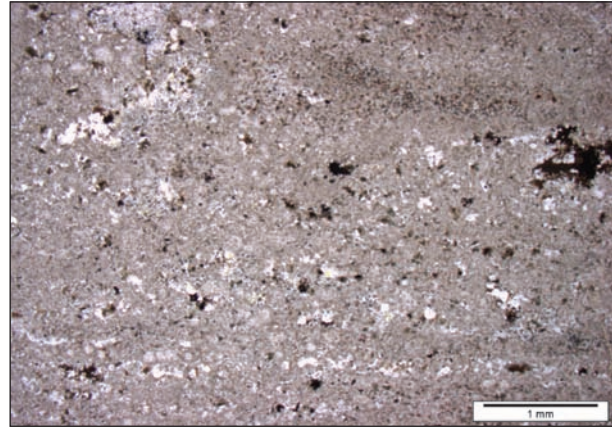
Gehalt <sup>1</sup>	in M.-%	CEM I 42,5 N (sd) vom 14.01.09	Sand Thüringen 0/2 mm vom 13.02.09	Andesit-Splitt I Mitteldeutschland 5/8 mm vom 22.12.08	Rhyolith-Splitt Süddeutschland 5/8 mm vom 10.12.08	Gabbro-Splitt Süddeutschland 5/8 mm vom 16.12.08	Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland 5/8 mm vom 21.01.09	Andesit-Splitt II Mitteldeutschland 5/8 mm vom 06.03.09	Granodiorit-Splitt II 5/8 mm vom 08.05.09
		Kohlendioxid	2,13	0,16	1,01	0,18	0,49	0,16	3,13
Wasser	0,29	0,26	3,36	0,95	3,61	0,69	2,68	2,39	
Silizium (IV)-oxid	21,0	92,5	57,3	75,7	44,9	73,2	57,4	59,4	
Aluminiumoxid	4,13	2,7	16,1	14,0	15,4	13,7	14,9	14,8	
Titanoxid	0,18	0,10	0,88	0,01	1,15	0,24	1,51	1,08	
Phosphor (V)-oxid	0,08	0,04	0,14	0,01	0,38	0,04	0,17	0,21	
Eisen (III)-oxid	2,35	0,01	6,63	1,44	10,6	2,30	6,45	6,09	
Mangan (III)-oxid	0,04	0,01	0,14	0,04	0,18	0,02	0,13	0,08	
Magnesiumoxid	1,30	0,16	5,59	0,26	13,4	0,30	1,26	4,27	
Calciumoxid	64,9	0,23	3,61	0,72	8,41	0,79	4,36	3,56	
Sulfat als $\text{SO}_3$	3,11	0,30	0,07	0,05	0,22	0,06	0,30	0,40	
Kaliumoxid	0,88	1,17	2,15	5,48	0,38	6,94	4,31	2,86	
Natriumoxid	0,22	2,09	5,35	3,18	2,50	3,03	2,82	3,10	
Natriumäquivalent	0,80	2,86	6,76	6,78	2,76	7,60	5,66	4,98	

<sup>1</sup> alle Angaben glühverlusthaltig

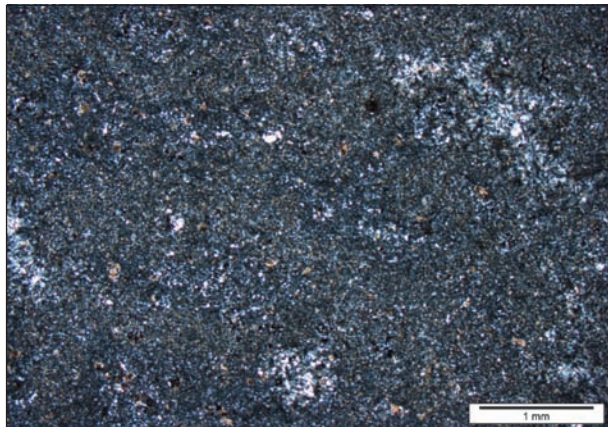
Tab. 7: Chemische Zusammensetzung des Zements und der Gesteinskörnungen



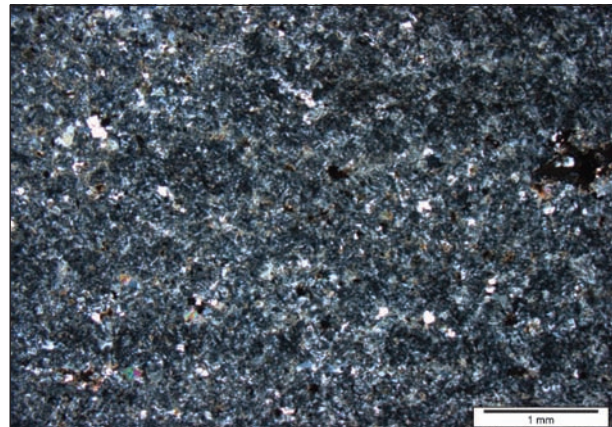
**Bild 1:** Rhyolith Süddeutschland, mikrokristalliner Bereich (Aufnahme bei einfach polarisiertem Licht)



**Bild 3:** Rhyolith Süddeutschland, feinkörniger Bereich mit erkennbaren Kristallen (Aufnahme bei einfach polarisiertem Licht)



**Bild 2:** Rhyolith Süddeutschland, mikrokristalliner Bereich; gleicher Ausschnitt wie Bild 1 (Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren)



**Bild 4:** Rhyolith Süddeutschland, feinkörniger Bereich mit erkennbaren Kristallen; gleicher Ausschnitt wie Bild 3 (Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren)

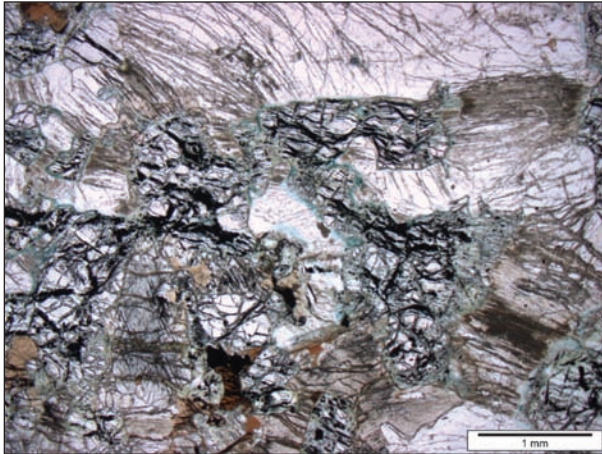
chen sind die Anteile an Alterationsprodukten, d. h. an Mineralphasen, die erst nach der eigentlichen Entstehung des Gesteins gebildet wurden, höher als im Durchschnitt.

Das Gestein ist generell feinkörnig ausgeprägt (Bild 1, Bild 2) und weist keine groben Einsprenglinge aus Quarz oder Feldspat auf, die bei Rhyolithen sonst häufig vorkommen. In manchen Bereichen liegen feinkörnige Quarz- und Feldspatkristalle mit Durchmesser von bis zu 0,2 mm in einer sehr feinkörnigen Matrix vor. In anderen Bereichen ist der Anteil dieser Kristalle recht hoch (Bild 3, Bild 4). Neben Quarz und Feldspat wurden auch plattige Biotitkristalle mit einer Länge von bis zu 0,5 mm beobachtet. Außerdem treten feinkörnige Erzphasen auf. Bei den schon genannten Alterationsprodukten handelt es sich wahrscheinlich um Schichtsilikate wie Tonminerale oder Chlorit sowie um Calcit.

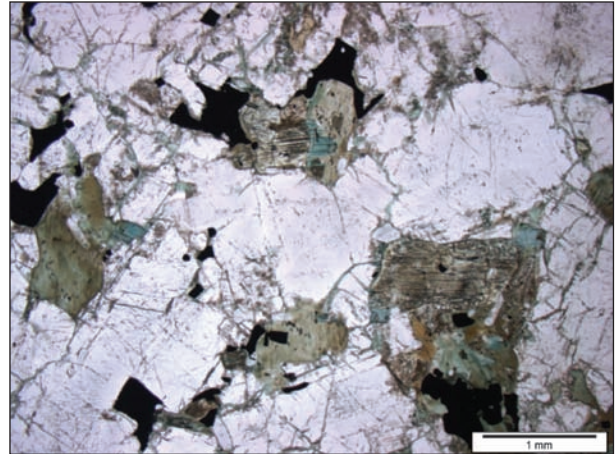
In einigen Bereichen ist das Gefüge des untersuchten Gesteins auf kleinem Raum inhomogen ausgeprägt, wobei insbesondere Unterschiede in der Korngrößenverteilung und bei den Anteilen von opaken Phasen oder von Alterationsprodukten auftreten. Teilweise ist ein Fließgefüge ausgebildet, das auf die vulkanische Entstehung des Gesteins zurückzuführen ist.

### Gabbro-Splitt

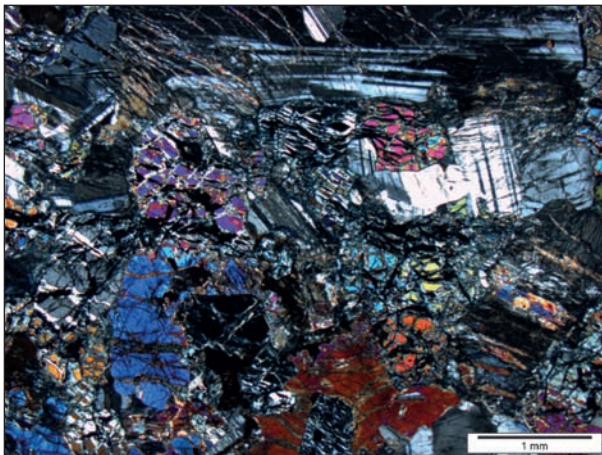
Das untersuchte Gestein erscheint makroskopisch mittel- bis dunkelgrau. Schon mit bloßem Auge sind einzelne Kristalle erkennbar. Auch mikroskopisch zeigt sich das Gestein relativ grobkörnig. Das Gefüge ist homogen ausgebildet und zeigt keine Anzeichen von Deformation.



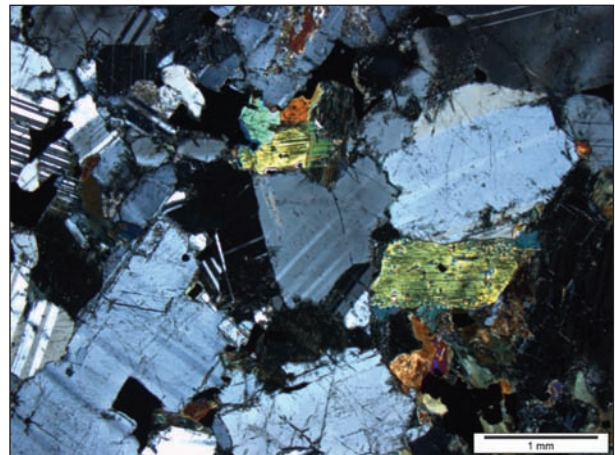
**Bild 5:** Gabbro, Variation mit Olivin, Pyroxen und Plagioklas (Aufnahme bei einfach polarisiertem Licht)



**Bild 7:** Gabbro, Variation mit Pyroxen und Plagioklas (Aufnahme bei einfach polarisiertem Licht)



**Bild 6:** Gabbro, Variation mit Olivin, Pyroxen und Plagioklas (Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren)



**Bild 8:** Gabbro, Variation mit Pyroxen und Plagioklas (Aufnahme bei gekreuzten Polarisatoren)

In der mikroskopisch untersuchten Probe lassen sich zwei Gesteinsvarianten unterscheiden. Die eine Variante besteht im Wesentlichen aus Plagioklas, Pyroxen, Olivin und Erzphasen (Bild 5, Bild 6). Die Olivinkristalle sind durch Umwandlungsprozesse stark verändert. Sie sind im Kontakt mit Plagioklas von einem Rand aus Umwandlungsprodukten umgeben. Zudem sind die Kristalle von einer Vielzahl von Rissen durchzogen, die mit den kristallinen Umwandlungsprodukten gefüllt sind. Wahrscheinlich handelt es sich hierbei vor allem um Pyroxen bzw. Amphibol sowie eine Erzphase. Benachbarte oder umschließende Kristalle von Plagioklas und Pyroxen sind ebenfalls von Rissen durchzogen, die radialstrahlig von den Olivinkörnern ausgehen. Hierbei handelt es sich um Sprengrisse, da die Umwandlung des Olivins mit einer Vo-

lumenvergrößerung verbunden war. Das beschriebene Gefüge wird als „koronares Gefüge“ bezeichnet. Die Pyroxenkristalle weisen viele Einschlüsse auf und sind mit den umgebenden Kristallen verwachsen. Olivin-, Pyroxen- und Plagioklaskristalle können Durchmesser von bis zu 3 mm erreichen.

Die zweite Variante des Gesteins besteht im Wesentlichen aus Plagioklas, Pyroxen und Erzphasen (Bild 7, Bild 8). Auch Biotit kommt in unterschiedlichen Anteilen vor. Verschiedene Körner dieser Variante sind unterschiedlich stark sekundär umgewandelt. Plagioklas zeigt häufig Anzeichen von Serizitisierung. Pyroxen ist unterschiedlich stark in Phasen wie Amphibol oder Chlorit umgewandelt. Die Plagioklaskristalle sind meist größer (bis zu 3 mm) als die anderen Phasen (0,1-1 mm).



**2.2.3 Alkaliempfindlichkeit  
(80°C-Schnellprüfverfahren)**

**Sand Thüringen 0/2 mm (GK 1.1)**

In Tabelle 8 sind die Einzelwerte und der Mittelwert der Dehnungen der einzelnen Prismen des mit Sand 0/2 mm aus Thüringen hergestellten und mit dem Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie geprüften Mörtels nach 1, 5, 9 und 13 Tagen dargestellt. Der sich aus den Mittelwerten ergebende Dehnungsverlauf wurde in Bild 9 visualisiert. Einen Grenzwert für die Einstufung von Sand gibt es nach aktuellem Stand der Alkali-Richtlinie nicht. Der Sand wurde zur qualitativen Charakterisierung seiner Alkaliempfindlichkeit mit untersucht. Eine Aussage zur Quantifizierung der Alkaliempfindlichkeit anhand eines Grenzwerts für Körnungen mit einem Größtkorn von < 2 mm ist nach Alkali-Richtlinie derzeit nicht möglich.

	Dehnung in mm/m			
	1 d	5 d	9 d	13 d
Prisma 1	0,06	0,24	0,66	1,10
Prisma 2	0,08	0,19	0,63	1,03
Prisma 3	0,08	0,21	0,64	1,05
Mittelwert	0,07	0,21	0,64	1,06

Tab. 8: Schnellprüfverfahren – Sand Thüringen 0/2 mm

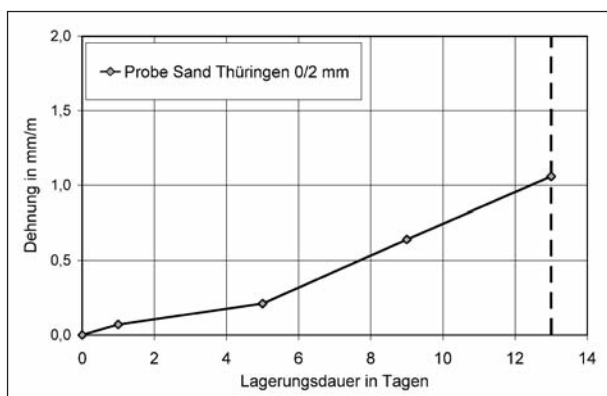


Bild 9: Mittlerer Dehnungsverlauf der drei Mörtelprismen im Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren)

**Andesit-Splitt I Mitteldeutschland 5/8 mm  
(GK 1.2.1)**

In Tabelle 9 sind die Einzelwerte und der Mittelwert der Dehnungen der einzelnen Prismen des mit Andesit-Splitt I 5/8 mm aus Mitteldeutschland hergestellten und mit dem Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie geprüften Mörtels nach 1, 5, 9 und 13 Tagen dargestellt. Der sich aus den Mittelwerten ergebende Dehnungsverlauf wurde in Bild 10 visualisiert. Die Dehnung der Prismen mit dem Andesit-Splitt I aus Mitteldeutschland lag nach 13 Tagen Lagerungsdauer mit 0,34 mm/m unter dem Grenzwert der Alkali-Richtlinie von 1,0 mm/m.

	Dehnung in mm/m			
	1 d	5 d	9 d	13 d
Prisma 1	0,05	0,15	0,20	0,34
Prisma 2	0,08	0,14	0,23	0,35
Prisma 3	0,03	0,15	0,20	0,33
Mittelwert	0,05	0,15	0,21	0,34

Tab. 9: Schnellprüfverfahren – Andesit-Splitt I Mitteldeutschland 5/8 mm

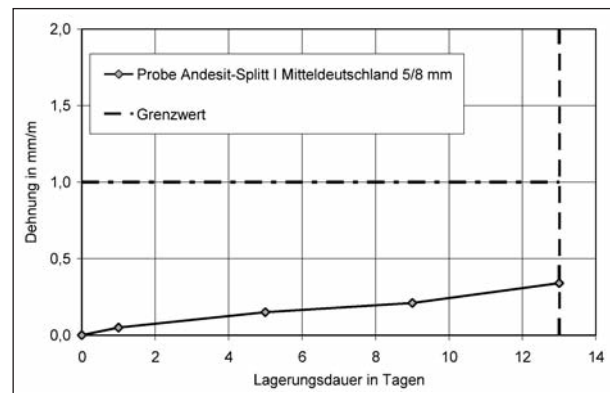


Bild 10: Mittlerer Dehnungsverlauf der drei Mörtelprismen im Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren)

### Rhyolith-Splitt Süddeutschland 5/8 mm (GK 1.2.2)

In Tabelle 10 sind die Einzelwerte und der Mittelwert der Dehnungen der einzelnen Prismen des mit Rhyolith-Splitt 5/8 mm aus Süddeutschland hergestellten und mit dem Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie geprüften Mörtels nach 1, 5, 9 und 13 Tagen dargestellt. Der sich aus den Mittelwerten ergebende Dehnungsverlauf wurde in Bild 11 visualisiert. Die Dehnung der Prismen mit dem Rhyolith-Splitt aus Süddeutschland lag nach 13 Tagen Lagerungsdauer mit 0,70 mm/m unter dem Grenzwert von 1,0 mm/m.

	Dehnung in mm/m			
	1 d	5 d	9 d	13 d
Prisma 1	0,07	0,20	0,42	0,69
Prisma 2	0,05	0,20	0,43	0,73
Prisma 3	0,04	0,20	0,43	0,68
Mittelwert	0,05	0,20	0,43	0,70

Tab. 10: Schnellprüfverfahren – Rhyolith-Splitt Süddeutschland 5/8 mm

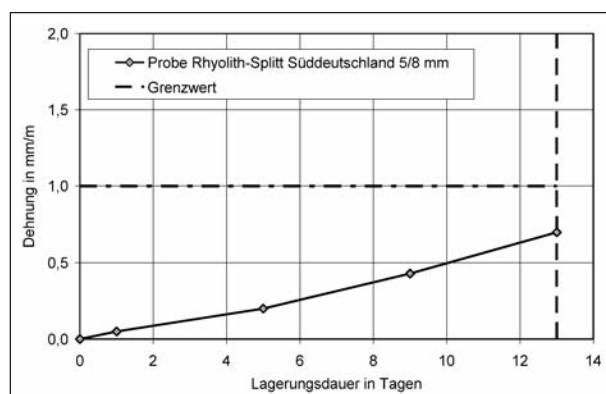


Bild 11: Mittlerer Dehnungsverlauf der drei Mörtelprismen im Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren)

### Gabbro-Splitt 5/8 mm (GK 1.2.3)

In Tabelle 11 sind die Einzelwerte und der Mittelwert der Dehnungen der einzelnen Prismen des mit Gabbro-Splitt 5/8 mm hergestellten und mit dem Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie geprüften Mörtels nach 1, 5, 9 und 13 Tagen dargestellt. Der sich aus den Mittelwerten ergebende Dehnungsverlauf wurde in Bild 12 visualisiert. Die Dehnung der Prismen mit dem Gabbro-Splitt lag nach 13 Tagen Lagerungsdauer mit 0,06 mm/m weit unter dem Grenzwert der Alkali-Richtlinie von 1,0 mm/m.

	Dehnung in mm/m			
	1 d	5 d	9 d	13 d
Prisma 1	0,04	0,09	0,07	0,06
Prisma 2	0,05	0,09	0,06	0,05
Prisma 3	0,05	0,10	0,08	0,07
Mittelwert	0,05	0,09	0,07	0,06

Tab. 11: Schnellprüfverfahren – Gabbro-Splitt Süddeutschland 5/8 mm

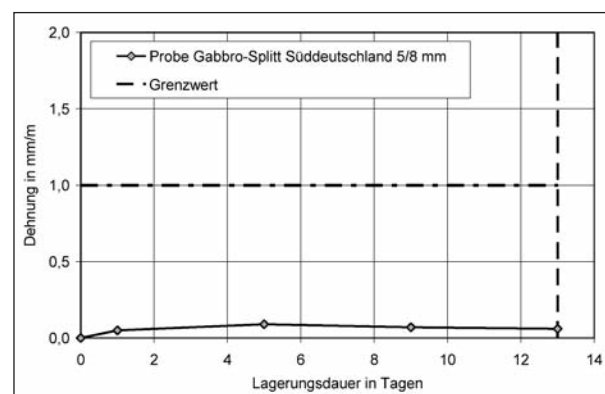


Bild 12: Mittlerer Dehnungsverlauf der drei Mörtelprismen je Prüfung im Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren)

### Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland 5/8 mm (GK 1.3.1)

In Tabelle 12 sind die Einzelwerte und der Mittelwert der Dehnungen der einzelnen Prismen des mit Rhyolith-Splitt 5/8 mm aus Mitteldeutschland hergestellten und mit dem Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie geprüften Mörtels nach 1, 5, 9 und 13 Tagen dargestellt. Der sich aus den Mittelwerten ergebende Dehnungsverlauf wurde in Bild 13 visualisiert. Die Dehnung der Prismen mit dem Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland betrug nach 13 Tagen Lagerungsdauer 1,38 mm/m und überschritt damit den Grenzwert nach Alkali-Richtlinie von 1,0 mm/m.

	Dehnung in mm/m			
	1 d	5 d	9 d	13 d
Prisma 1	0,01	0,21	0,77	1,40
Prisma 2	0,04	0,29	0,78	1,33
Prisma 3	0,07	0,29	0,81	1,40
Mittelwert	0,04	0,26	0,79	1,38

Tab. 12: Schnellprüfverfahren – Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland 5/8 mm

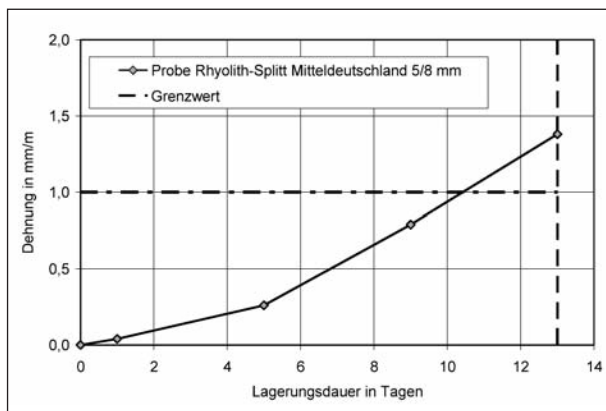


Bild 13: Mittlerer Dehnungsverlauf der drei Mörtelprismen je Prüfung im Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren)

### Andesit-Splitt II Mitteldeutschland 5/8 mm (GK 1.4.1)

In Tabelle 13 sind die Einzelwerte und der Mittelwert der Dehnungen der einzelnen Prismen des mit Andesit-Splitt II 5/8 mm aus Mitteldeutschland hergestellten und mit dem Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie geprüften Mörtels nach 1, 5, 9 und 13 Tagen dargestellt. Der sich aus den Mittelwerten ergebende Dehnungsverlauf wurde in Bild 14 visualisiert. Die Dehnung der Prismen mit dem Andesit-Splitt aus Mitteldeutschland betrug nach 13 Tagen Lagerungsdauer 1,40 mm/m und überschritt damit den Grenzwert nach Alkali-Richtlinie von 1,0 mm/m.

	Dehnung in mm/m			
	1 d	5 d	9 d	13 d
Prisma 1	0,05	0,39	0,96	1,44
Prisma 2	0,04	0,36	0,93	1,40
Prisma 3	0,05	0,39	0,92	1,37
Mittelwert	0,05	0,38	0,94	1,40

Tab. 13: Schnellprüfverfahren – Andesit-Splitt II Mitteldeutschland 5/8 mm

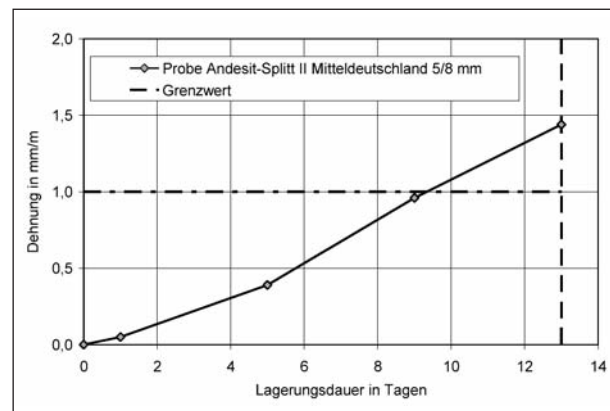


Bild 14: Mittlerer Dehnungsverlauf der drei Mörtelprismen je Prüfung im Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren)

### Granodiorit II-Splitt 5/8 mm (GK 1.4.3)

In Tabelle 14 sind die Einzelwerte und der Mittelwert der Dehnungen der einzelnen Prismen des mit Granodiorit II-Splitt 5/8 mm hergestellten und mit dem Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie geprüften Mörtels nach 1, 5, 9 und 13 Tagen dargestellt. Der sich aus den Mittelwerten ergebende Dehnungsverlauf wurde in Bild 15 visualisiert. Die Dehnung der Prismen mit dem Granodiorit II-Splitt betrug nach 13 Tagen Lagerungsdauer 0,79 mm/m und unterschritt damit den Grenzwert gemäß Alkali-Richtlinie von 1,0 mm/m.

	Dehnung in mm/m			
	1 d	5 d	9 d	13 d
Prisma 1	0,03	0,28	0,49	0,80
Prisma 2	0,05	0,28	0,49	0,79
Prisma 3	0,03	0,26	0,47	0,77
Mittelwert	0,04	0,27	0,48	0,79

Tab. 14: Schnellprüfverfahren – Granodiorit II-Splitt 5/8 mm

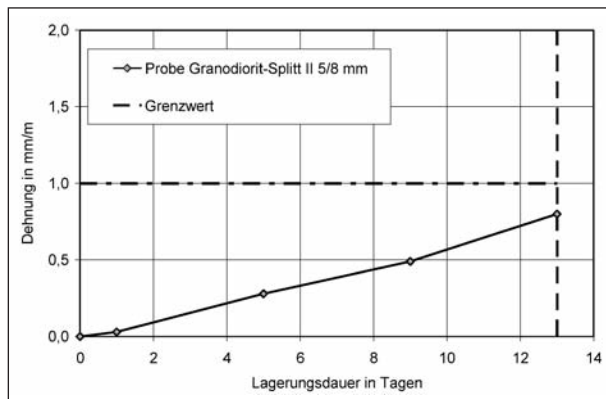


Bild 15: Mittlerer Dehnungsverlauf der drei Mörtelprismen je Prüfung im Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren)

### 2.2.4 Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung

#### Frischbeton

Der Zusammenhalt der im Labor hergestellten Betone war gut. Das Ausbreitmaß konnte nach DIN EN 12350-5 bestimmt werden. Der Betonkuchen war nahezu kreisrund und Einzelkörner lösten sich nicht von der Gesamtmasse. Das Ausbreitmaß, die Frischbetonrohichte und der Luftgehalt der für die Gesteinskörnungsprüfungen hergestellten Betone sind in Tabelle 15 aufgeführt. Die Konsistenz der Betone lag gemäß Einstufung nach DIN 1045-2 und DIN EN 206-1 im Bereich F1 bzw. F2.

#### Festbeton

Die Festbetoneigenschaften wurden nach DIN EN 12390-3 und -7 im Betonalter von 28 Tagen bestimmt. Die ermittelte Rohdichte sowie die Einzelwerte und der Mittelwert der Druckfestigkeit sind in Tabelle 16 aufgeführt.

#### Dehnungen der Betonbalken und Rissbreiten am 300-mm-Würfel

In der Nebelkammer wurden Betone mit jeweils einer der o. g. Gesteinskörnungen bei 40 °C und mindestens 99 % relativer Luftfeuchte gelagert. Die nach 1, 2, 7, 28 Tagen und weiterhin jeweils im Zyklus von rd. einem Monat erfassten Dehnungen von je drei Betonbalken je Gesteinskörnung sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Der Dehnungsverlauf aller untersuchten Betone ist in Bild 16 grafisch dargestellt.

Mit Ausnahme des Granodiorit-II-Splitts erreichten bzw. überschritten die Dehnungen der mit den untersuchten Gesteinskörnungen hergestellten Betonbalken den Grenzwert von 0,6 mm/m in der

Gesteinskörnung	Ausbreitmaß (Einzelwert 1) [mm]	Ausbreitmaß (Einzelwert 2) [mm]	Ausbreitmaß (Mittelwert) [mm]	Frischbetonrohichte [kg/m³]	Luftgehalt <sup>1</sup> [Vol.-%]
Andesit-Splitt I 5/8 u. 8/16 mm Mitteldeutschland	340	350	345	2.430	0,8
Rhyolith-Splitt 5/8 u. 8/16 mm Süddeutschland	360	370	365	2.380	0,9
Gabbro-Splitt 5/8 u. 8/16 mm	360	370	365	2.540	0,9
Rhyolith-Splitt 5/8 u. 8/16 mm Mitteldeutschland	350	360	355	2.380	1,2
Andesit-Splitt II 5/8 u. 8/16 mm Mitteldeutschland	370	380	375	2.450	1,1
Granodiorit II-Splitt 5/8 u. 8/16 mm	350	380	365	2.490	1,0

<sup>1</sup> 10 Minuten nach Mischende

Tab. 15: Frischbetoneigenschaften nach DIN EN 12350-5, -6 und -7

Gesteinskörnung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Einzelwerte und <i>Mittelwert</i> der Druckfestigkeit (28 Tage) [N/mm <sup>2</sup> ]		
Andesit-Splitt I 5/8 u. 8/16 mm Mitteldeutschland	2.410	61,8	62,0	62,9
		<b>62,2</b>		
Rhyolith-Splitt 5/8 u. 8/16 mm Süddeutschland	2.360	57,6	57,9	59,2
		<b>58,2</b>		
Gabbro-Splitt 5/8 u. 8/16 mm	2.520	56,3	55,1	56,3
		<b>55,9</b>		
Rhyolith-Splitt 5/8 u. 8/16 mm Mitteldeutschland	2.360	59,7	60,6	59,8
		<b>60,0</b>		
Andesit-Splitt II 5/8 u. 8/16 mm Mitteldeutschland	2.420	58,3	58,0	57,4
		<b>57,9</b>		
Granodiorit II-Splitt 5/8 u. 8/16 mm	2.470	52,7	53,3	54,7
		<b>53,5</b>		

Tab. 16: Festbetoneigenschaften nach DIN EN 12390-3 und -7

Prüfdauer		Andesit I	Rhyolith	Gabbro	Rhyolith	Andesit II	Granodiorit II
		Mitteldeutsch- land	Süddeutsch- land		Mitteldeutsch- land	Mitteldeutsch- land	
Tage	1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2	0,184	0,196	0,180	0,213	0,173	0,208
	7	0,208	0,228	0,215	0,235	0,210	0,223
	28	0,234	0,263	0,264	0,256	0,246	0,249
Monate	2	0,256	0,280	0,284	0,285	0,266	0,309
	3	0,279	0,298	0,314	0,314	0,319	0,378
	4	0,304	0,338	0,353	0,363	0,365	0,448
	5	0,333	0,361	0,375	0,395	0,395	0,450
	6	0,353	0,378	0,396	0,430	0,381	0,496
	7	0,316	0,374	0,396	0,405	0,415	0,555
	8	0,329	0,375	0,393	0,424	0,410	0,623
	9	0,321	0,375	0,401	0,421	0,431	0,636
	12	0,345	0,380	0,411	0,469	0,430	0,718

Tab. 17: Mittelwerte der Dehnungen von je drei Betonbalken je Gesteinskörnung in der 40°C-Nebelkammerlagerung

40°C-Nebelkammerlagerung bis zum Lagerungs-  
ende nicht.

Ergänzend zur Erfassung der Dehnung an den Betonbalken wurde jede Betonzusammensetzung anhand eines Würfels mit einer Kantenlänge von 300 mm, der auch in der 40°C-Nebelkammer gelagert wurde, geprüft und beurteilt. Als Beurteilungskriterium wurde die Entstehung und Breite von Rissen an der Würfeloberfläche herangezogen. In Tabelle 18 wurden nur die Prüfzeitpunkte

dargestellt, zu denen Risse beobachtet wurden. Nach 9monatiger Lagerung konnten am Betonwürfel mit Granodiorit-Splitt II Risse mit einer maximalen Rissbreite von < 0,05 mm beobachtet werden. An einem 300-mm-Betonwürfel mit Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland wurden bei der Messung nach 12 Monaten Risse mit einer maximalen Rissbreite von rd. 0,25 mm gefunden. Am Betonwürfel mit Andesit-Splitt II aus Mitteldeutschland wurde nach 12monatiger Lagerung eine maximale Rissbreite von rd. 0,20 mm gemessen.

Prüfdauer		Andesit I Mitteldeutsch- land	Rhyolith Süddeutsch- land	Gabbro	Rhyolith Mitteldeutsch- land	Andesit II Mitteldeutsch- land	Granodiorit II
Monate	9	-	-	-	-	-	< 0,05
	12	-	-	-	0,25*	0,20*	< 0,05

\* Ausblühungen beobachtet

Tab. 18: Rissbreiten am 300-mm-Würfel in der 40°C-Nebelkammerlagerung in mm

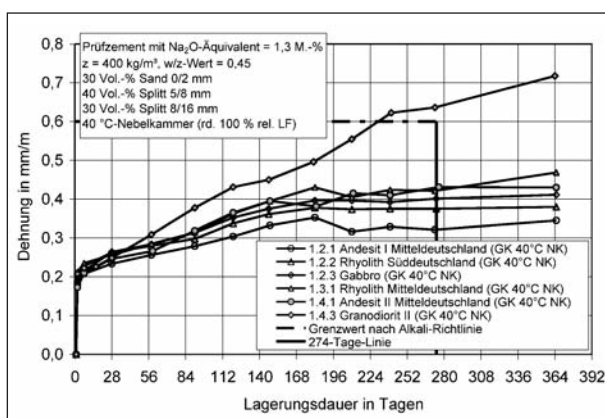


Bild 16: Dehnungsverlauf der Betonbalken in der 40°C-Nebelkammerlagerung (Mittelwert aus je drei Betonbalken – Gesteinskörnungsprüfung)

Alter	Andesit I Mitteldeutschland	Rhyolith Süddeutschland	Gabbro
	Dehnung in mm/m	Dehnung in mm/m	Dehnung in mm/m
1	0,000	0,000	0,000
29	0,045	0,108	0,142
57	0,070	0,132	0,201
85	0,084	0,148	0,230
113	0,081	0,163	0,243
<b>141</b>	<b>0,083</b>	<b>0,149</b>	<b>0,239</b>
169	0,086	0,170	0,263

Tab. 19: Dehnungen der Betonbalken im 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser

### 2.2.5 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser

Gemeinsam mit den Probekörpern für den 40°C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung wurden die Betonbalken für den 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser (Gesteinskörnungsprüfung) hergestellt (Betonzusammensetzung siehe Kapitel 1.2.4). Der Mittelwert der Dehnung der Betonbalken ist in Tabelle 19 und Tabelle 20 dargestellt. Der aus jeweils drei Betonbalken gemittelte Dehnungsverlauf ist in Bild 17 dargestellt.

Alter	Rhyolith Mittel- deutschland	Andesit II Mittel- deutschland	Granodiorit II Mittel- deutschland	
	Dehnung in mm/m	Dehnung in mm/m	Alter	Dehnung in mm/m
1	0,000	0,000	1	0,000
29	0,157	0,142	28	0,212
57	0,251	0,198	56	0,436
85	0,340	0,255	84	0,582
113	0,419	0,293	112	0,775
<b>141</b>	<b>0,447</b>	<b>0,358</b>	<b>140</b>	<b>0,891</b>
169	0,490	0,368	168	0,988

Tab. 20: Dehnungen der Betonbalken im 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser (Fortsetzung von Tabelle 19)

## 2.3 Betonprüfungen (AKR-Performance-Prüfung)

### 2.3.1 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr von außen

#### Frischbeton

In der Regel war der Zusammenhalt der im Labor hergestellten Waschbetone gut. Das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 konnte in den meisten Fällen gut bestimmt werden. In diesem Fall war der Ausbreitkuchen nahezu kreisrund und in sich konsistent. Nur beim Ausbreitversuch mit dem Beton mit Gabbro-Splitt war der Zusammenhalt des Betons

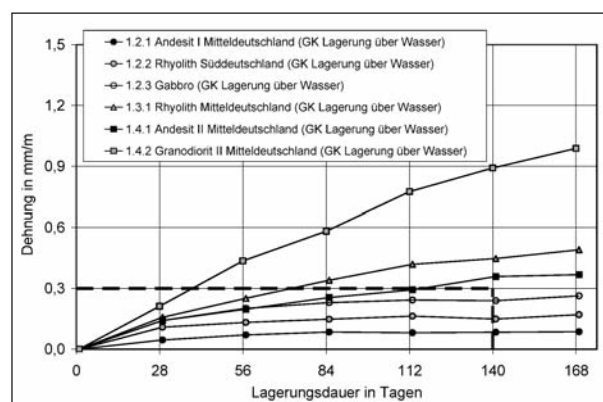


Bild 17: Dehnung der Betonbalken mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen im 60°C-Betonversuch über Wasser (Gesteinskörnungsprüfung)

für die Bestimmung des Ausbreitmaßes nicht ausreichend stark. Einzelne Betonfragmente lösten sich aus dem Gesamtgemenge heraus und ließen eine eindeutige Bestimmung des Ausbreitmaßes nicht zu. In diesem Fall wurde auf die Bestimmung des Verdichtungsmaßes nach DIN EN 12350-4 zurückgegriffen. Die am Frischbeton bestimmten Eigenschaften, Ausbreitmaß, Verdichtungsmaß (nur Gabbro), Frischbetonrohichte und Luftgehalt der für die Gesteinskörnungsprüfungen hergestellten Betone sind in Tabelle 21 aufgeführt. Die Konsistenz der Betone lag gemäß Einstufung nach DIN 1045-2 und DIN EN 206-1 im Konsistenzbereich F1 (Ausbreitmaß) bzw. C1 (Verdichtungsmaß). Der Luftgehalt aller hergestellten Betone erfüllte die Anforderung gemäß DIN 1045-2 Tabelle

F2.2 von 5,5 Vol.-% für einen Beton mit einem Größtkorn von 8 mm.

### Festbeton

Die Festbetoneigenschaften wurden nach DIN EN 12350-3 und -7 im Betonalter von 28 Tagen bestimmt. Die Rohdichte und die Druckfestigkeit sind in Tabelle 22 aufgeführt.

### Dehnungen

- **Andesit-Splitt I Mitteldeutschland 5/8 mm (GK 1.2.1)**

In Tabelle 23 sind die Mittelwerte der Dehnungen des mit Andesit-Splitt I 5/8 mm aus Mitteldeutsch-

Gesteinskörnung	Ausbreitmaß <sup>1</sup> nach DIN EN 12350-5 bzw. Verdichtungsmaß <sup>2</sup> nach DIN EN 12350-4			Frischbetonrohichte nach DIN EN 12350-6 [kg/m <sup>3</sup> ]	Luftgehalt <sup>1</sup> nach DIN EN 12350-7 [Vol. %]
	Einzelwert 1	Einzelwert 2	Mittelwert		
Andesit-Splitt I 5/8 mm Mitteldeutschland	300 mm	330 mm	315 mm	2.330	5,5
Rhyolith-Splitt 5/8 mm Süddeutschland	330 mm	330 mm	330 mm	2.240	6,2
Gabbro-Splitt 5/8 mm	1,33 <sup>2</sup>	nicht bestimmt	1,33 <sup>2</sup>	2.390	7,2
Rhyolith-Splitt 5/8 mm Mitteldeutschland	290 mm	290 mm	290 mm	2.260	5,9
Andesit-Splitt II 5/8 mm Mitteldeutschland	320 mm	320 mm	320 mm	2.290	6,3
Granodiorit II-Splitt 5/8 mm	290 mm	290 mm	290 mm	2.360	5,5

<sup>1</sup> 10 Minuten nach Mischende  
<sup>2</sup> Verdichtungsmaß nach DIN EN 12350-4

Tab. 21: Frischbetoneigenschaften

Gesteinskörnung	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Einzelwerte und Mittelwert der Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		
Andesit-Splitt I 5/8 mm Mitteldeutschland	2.310	61,3	60,7	61,5
		<b>61,2</b>		
Rhyolith-Splitt 5/8 mm Süddeutschland	2.220	56,1	51,5	54,6
		<b>54,1</b>		
Gabbro-Splitt 5/8 mm	2.360	50,3	49,5	49,4
		<b>49,7</b>		
Rhyolith-Splitt 5/8 mm Mitteldeutschland	2.240	56,6	55,5	53,7
		<b>55,3</b>		
Andesit-Splitt II 5/8 mm Mitteldeutschland	2.430	58,3	58,0	57,4
		<b>57,9</b>		
Granodiorit II-Splitt 5/8 mm	2.350	57,2	56,2	55,5
		<b>56,3</b>		

Tab. 22: Festbetoneigenschaften nach DIN EN 12390-3 und -7

land hergestellten und im 60°C-Betonversuch geprüften Waschbetons aufgelistet. Die grafische Beschreibung des Verlaufs der Dehnungen mit Alkalizufuhr durch eine Prüfliquidität mit einem NaCl-Gehalt von 3 bzw. 10 M.-% sowie ohne Alkalizufuhr ist in Bild 18 dargestellt. Im Prüfzeitraum vor dem 28. Tag kommt es insbesondere aufgrund des Schwindens zur Dehnungsabnahme.

Lagerungs- dauer in Tagen	Dehnung in mm/m		
	ohne Alkalizufuhr	mit 3 M.-% NaCl	mit 10 M.-% NaCl
1	0,000	0,000	0,000
7	-0,030	-0,025	-0,035
21	-0,353	-0,346	-0,353
28	-0,124	-0,115	-0,126
42	-0,109	-0,092	-0,071
56	-0,100	-0,067	-0,046
70	-0,113	-0,071	-0,050
84	-0,109	-0,056	-0,042
98	-0,104	-0,042	-0,038
112	-0,094	-0,027	-0,015
126	-0,094	-0,024	-0,010
140	-0,090	-0,021	-0,002
154	-0,094	-0,018	0,005
168	-0,102	-0,017	0,004
182	-0,092	-0,006	0,017

Tab. 23: Mittelwerte der Dehnungen von jeweils drei Betonbalken im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr, Gesteinskörnung Andesit-Splitt I Mitteldeutschland 5/8 mm

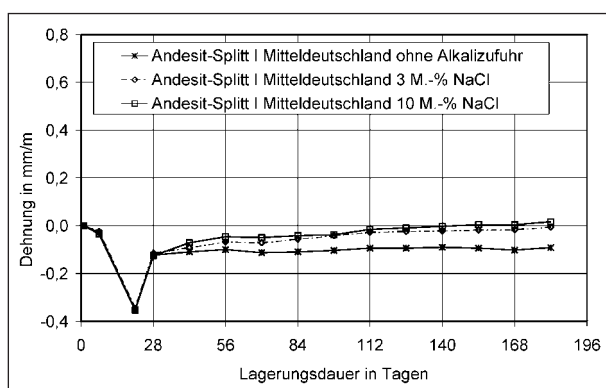


Bild 18: Mittlerer Dehnungsverlauf von drei Betonbalken mit Andesit-Splitt I aus Mitteldeutschland 5/8 mm im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr

#### • Rhyolith-Splitt Süddeutschland 5/8 mm (GK 1.2.2)

In Tabelle 24 sind die Mittelwerte der Dehnungen des mit Rhyolith-Splitt 5/8 mm aus Süddeutschland hergestellten und im 60°C-Betonversuch geprüften Waschbetons aufgelistet. Die grafische Beschreibung des Verlaufs der Dehnungen mit Alkalizufuhr durch eine Prüfliquidität mit einem NaCl-Gehalt von 3 bzw. 10 M.-% sowie ohne Alkalizufuhr ist in Bild 19 dargestellt.

Lagerungs- dauer in Tagen	Dehnung in mm/m		
	ohne Alkalizufuhr	mit 3 M.-% NaCl	mit 10 M.-% NaCl
1	0,00	0,00	0,00
7	-0,01	-0,01	-0,01
22	-0,30	-0,30	-0,30
29	-0,11	-0,10	-0,10
43	-0,07	-0,05	-0,03
57	-0,06	-0,03	-0,01
71	-0,05	-0,02	0,01
85	-0,05	0,00	0,02
99	-0,05	0,00	0,04
113	-0,05	0,01	0,06
127	-0,05	0,01	0,06
141	-0,04	0,02	0,09
155	-0,06	0,02	0,09
169	-0,06	0,03	0,12
183	-0,06	0,02	0,12
197	-0,06	0,04	0,14
211	-0,06	0,04	0,15

Tab. 24: Mittelwerte der Dehnungen von jeweils drei Betonbalken im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr, Gesteinskörnung Rhyolith-Splitt Süddeutschland 5/8 mm

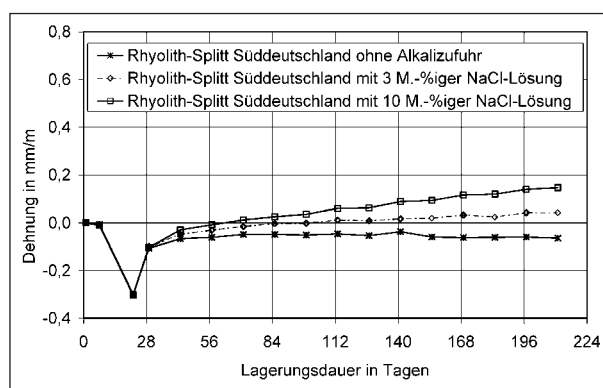


Bild 19: Mittlerer Dehnungsverlauf von drei Betonbalken mit Rhyolith-Splitt aus Süddeutschland 5/8 mm im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr

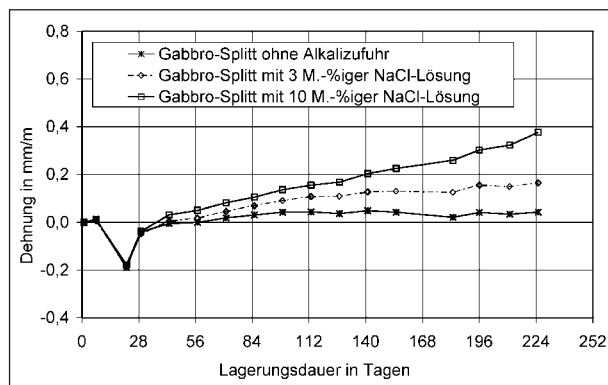


• **Gabbro-Splitt 5/8 mm (GK 1.2.3)**

In Tabelle 25 sind die Mittelwerte der Dehnungen des mit Gabbro-Splitt 5/8 mm hergestellten und im 60°C-Betonversuch geprüften Waschbetons aufgelistet. Die grafische Beschreibung des Verlaufs der Dehnungen mit Alkalizufuhr durch eine Prüflüssigkeit mit einem NaCl-Gehalt von 3 bzw. 10 M.-% sowie ohne Alkalizufuhr ist in Bild 20 dargestellt.

Lagerungs- dauer in Tagen	Dehnung in mm/m		
	ohne Alkalizufuhr	mit 3 M.-% NaCl	mit 10 M.-% NaCl
1	0,000	0,000	0,000
7	0,014	0,007	0,012
22	-0,189	-0,184	-0,179
29	-0,040	-0,048	-0,038
43	-0,005	0,005	0,032
57	0,000	0,018	0,050
71	0,019	0,045	0,081
85	0,031	0,069	0,105
99	0,043	0,089	0,136
113	0,044	0,107	0,155
127	0,037	0,107	0,168
141	0,049	0,126	0,203
155	0,043	0,129	0,225
183	0,021	0,124	0,259
196	0,042	0,155	0,302
211	0,035	0,148	0,322
225	0,043	0,164	0,376

**Tab. 25:** Mittelwerte der Dehnungen von jeweils drei Betonbalken im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr, Gesteinskörnung Gabbro-Splitt 5/8 mm



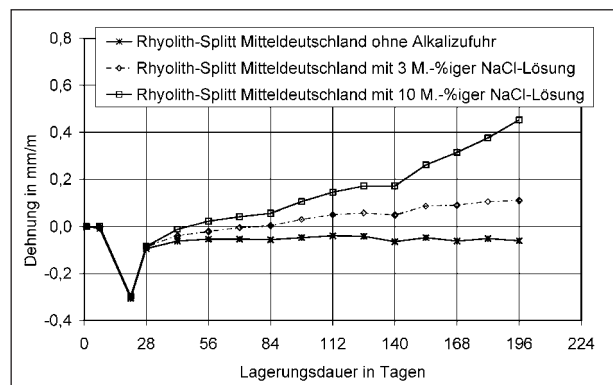
**Bild 20:** Mittlerer Dehnungsverlauf von drei Betonbalken mit Gabbro-Splitt 5/8 mm im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr

• **Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland 5/8 mm (GK 1.3.1)**

In Tabelle 26 sind die Mittelwerte der Dehnungen des mit Rhyolith-Splitt 5/8 mm aus Mitteldeutschland hergestellten und im 60°C-Betonversuch geprüften Waschbetons aufgelistet. Die grafische Beschreibung des Verlaufs der Dehnungen mit Alkalizufuhr durch eine Prüflüssigkeit mit einem NaCl-Gehalt von 3 bzw. 10 M.-% sowie ohne Alkalizufuhr ist in Bild 21 dargestellt.

Lagerungs- dauer in Tagen	Dehnung in mm/m		
	ohne Alkalizufuhr	mit 3 M.-% NaCl	mit 10 M.-% NaCl
1	0,00	0,00	0,00
7	-0,01	0,00	0,00
21	-0,31	-0,30	-0,30
28	-0,09	-0,09	-0,08
42	-0,06	-0,04	-0,01
56	-0,05	-0,02	0,02
70	-0,05	0,00	0,04
84	-0,06	0,00	0,06
98	-0,05	0,03	0,10
112	-0,04	0,05	0,15
126	-0,04	0,06	0,17
140	-0,06	0,05	0,17
154	-0,05	0,09	0,26
168	-0,06	0,09	0,31
182	-0,05	0,10	0,38
196	-0,06	0,11	0,45

**Tab. 26:** Mittelwerte der Dehnungen von jeweils drei Betonbalken im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr, Gesteinskörnung Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland 5/8 mm



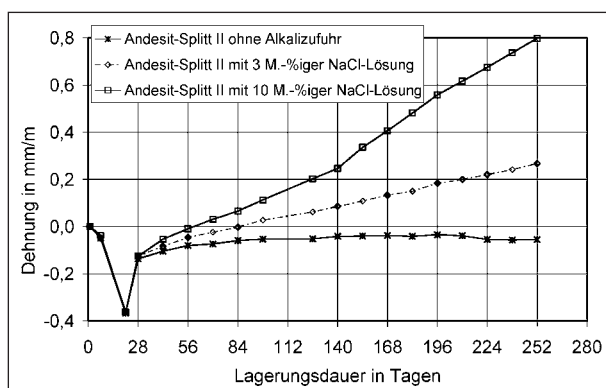
**Bild 21:** Mittlerer Dehnungsverlauf von drei Betonbalken mit Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland 5/8 mm im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr

• **Andesit-Splitt II Mitteldeutschland 5/8 mm (GK 1.4.1)**

In Tabelle 27 sind die Mittelwerte der Dehnungen des mit Andesit-Splitt II 5/8 mm aus Mitteldeutschland hergestellten und im 60°C-Betonversuch geprüften Waschbetons aufgelistet. Die grafische Beschreibung des Verlaufs der Dehnungen mit Alkalizufuhr durch eine Prüflüssigkeit mit einem NaCl-Gehalt von 3 bzw. 10 M.-% sowie ohne Alkalizufuhr ist in Bild 22 dargestellt.

Lagerungs- dauer in Tagen	Dehnung in mm/m		
	ohne Alkalizufuhr	mit 3 M.-% NaCl	mit 10 M.-% NaCl
1	0,00	0,00	0,00
7	-0,05	-0,05	-0,04
21	-0,37	-0,36	-0,36
28	-0,14	-0,13	-0,13
42	-0,10	-0,08	-0,05
56	-0,08	-0,05	-0,01
70	-0,07	-0,02	0,03
84	-0,06	0,00	0,07
98	-0,05	0,03	0,11
126	-0,05	0,06	0,20
140	-0,04	0,09	0,25
154	-0,04	0,11	0,34
168	-0,04	0,13	0,41
182	-0,04	0,15	0,48
196	-0,03	0,18	0,56
210	-0,04	0,20	0,62
224	-0,05	0,22	0,67
238	-0,06	0,24	0,74
252	-0,05	0,27	0,80

**Tab. 27:** Mittelwerte der Dehnungen von jeweils drei Betonbalken im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr, Gesteinskörnung Andesit-Splitt II Mitteldeutschland 5/8 mm



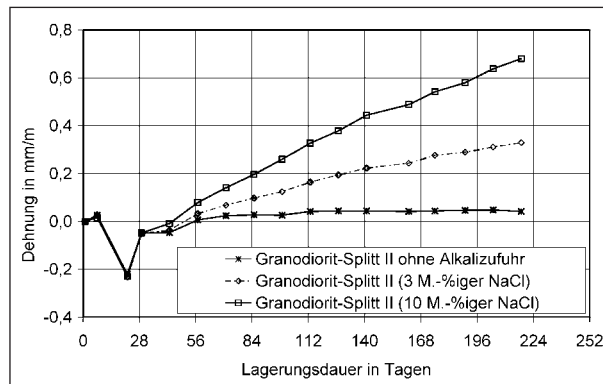
**Bild 22:** Mittlerer Dehnungsverlauf von drei Betonbalken mit Andesit-Splitt II aus Mitteldeutschland 5/8 mm im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr

• **Granodiorit-Splitt II 5/8 mm (GK 1.4.3)**

In Tabelle 28 sind die Mittelwerte der Dehnungen des mit Andesit-Splitt I 5/8 mm aus Mitteldeutschland hergestellten und im 60°C-Betonversuch geprüften Waschbetons aufgelistet. Die Beschreibung des Verlaufs der Dehnungen mit Alkalizufuhr durch eine Prüflüssigkeit mit einem NaCl-Gehalt von 3 bzw. 10 M.-% sowie ohne Alkalizufuhr ist in Bild 23 dargestellt.

Lagerungs- dauer in Tagen	Dehnung in mm/m		
	ohne Alkalizufuhr	mit 3 M.-% NaCl	mit 10 M.-% NaCl
1	0,00	0,00	0,00
7	0,03	0,03	0,02
22	-0,22	-0,23	-0,23
29	-0,05	-0,05	-0,05
43	-0,05	-0,04	-0,01
57	0,01	0,03	0,08
71	0,02	0,07	0,14
85	0,03	0,10	0,20
99	0,03	0,12	0,26
113	0,04	0,16	0,33
127	0,04	0,19	0,38
141	0,04	0,22	0,44
162	0,04	0,24	0,49
175	0,04	0,28	0,54
190	0,05	0,29	0,58
204	0,05	0,31	0,64
218	0,05	0,33	0,68

**Tab. 28:** Mittelwerte der Dehnungen von jeweils drei Betonbalken im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr, Gesteinskörnung Granodiorit II-Splitt 5/8 mm



**Bild 23:** Mittlerer Dehnungsverlauf von drei Betonbalken mit Granodiorit II-Splitt 5/8 mm im 60°C-Betonversuch mit und ohne Alkalizufuhr

### 3 Zusammenfassung

Das Ziel der Untersuchungen bestand in der Beantwortung der Frage, ob mit den Standard-Prüfverfahren nach Alkali-Richtlinie des DAfStb, Teil 3, vom Februar 2007 die Eignung von Gesteinskörnungen für Fahrbahndecken aus Waschbeton, der einer Alkalizufuhr von außen ausgesetzt ist, hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit beurteilt werden kann.

In die Untersuchungen des FIZ wurden folgende Standardprüfverfahren an unterschiedlich alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und am damit hergestellten Waschbeton einbezogen:

- 80°C-Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie),
- Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung (Gesteinskörnungsprüfung),
- 60°C-Betonversuch über Wasser (Gesteinskörnungsprüfung),
- 60°C-Betonversuch mit/ohne Alkalizufuhr.

Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind auf den folgenden Seiten zusammengefasst.

#### 3.1 Zementprüfung

##### 3.1.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA)

Die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmte chemische Zusammensetzung des verwendeten Zements ist in Tabelle 7 (Kapitel 2.2.1) dargestellt. Das  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des Zements betrug 0,80 M.-%.

#### 3.2 Gesteinskörnungsprüfungen

##### 3.2.1 Chemische Zusammensetzung (Röntgenfluoreszenzanalyse – RFA)

In Tabelle 7 (Kapitel 2.2.1) sind die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmten chemischen Zusammensetzungen der Gesteinskörnungen dargestellt.

##### 3.2.2 Petrografie (Dünnschliffmikroskopie)

Die mittels Dünnschliffmikroskopie beobachteten gesteinsbildenden Minerale des verwendeten Rhyolith-Splitts aus Süddeutschland und des

Gabbro-Splitts sind in Teil 2 des Kapitels 2.2.2 beschrieben.

##### 3.2.3 80°C-Schnellprüfverfahren

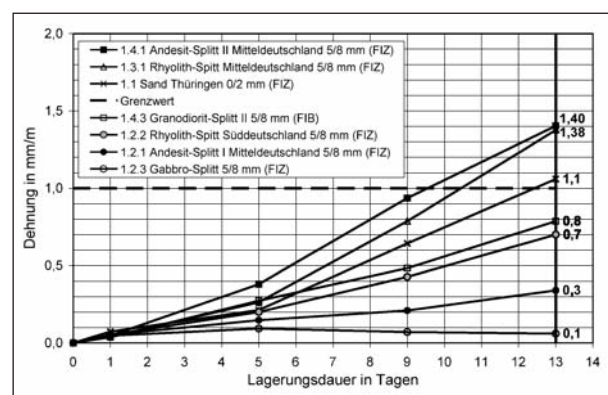
Im Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie [1] wurden alle sechs Gesteinskörnungen der Fraktion 5/8 mm und zusätzlich der Sand 0/2 mm aus Thüringen untersucht. Der Dehnungsverlauf der Mörtelprismen im 80°C-Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren) ist in Bild 24 dargestellt. (Hinweis: Der als unterbrochene horizontale Linie dargestellte Grenzwert gilt nicht für den Sand.)

Ist die Dehnung nach 13 Tagen Lagerung bei 80 °C in 1 molarer Natronlauge  $\leq 1,0$  mm/m, dann gilt die Prüfung nach Alkali-Richtlinie [1] als bestanden. Die Gesteinskörnung kann in solch einem Fall in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S eingestuft werden. Das bedeutet, dass die im Geltungsbereich der Alkali-Richtlinie liegende Gesteinskörnung unbedenklich in Hinblick auf eine mögliche Alkalireaktion im Beton ist.

Dieses Kriterium wurde von folgenden untersuchten Gesteinskörnungen erfüllt:

- Gabbro-Splitt 5/8 mm,
- Andesit-Splitt I Mitteldeutschland 5/8 mm,
- Rhyolith-Splitt Süddeutschland 5/8 mm,
- Granodiorit-Splitt II 5/8 mm.

Die Dehnung der Mörtelprismen mit Rhyolith-Splitt 5/8 mm aus Mitteldeutschland bzw. mit Andesit-Splitt II 5/8 mm aus Mitteldeutschland überschritt hingegen in der Mörtelprüfung den Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung. Daher können die



**Bild 24:** Mittlerer Dehnungsverlauf im 80°C-Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren) und (Grenzwert gilt nicht für den Sand 0/2)

beiden o. g. Gesteinskörnungen nicht in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse gemäß Alkali-Richtlinie eingestuft werden. Für diesen Fall sieht die Alkali-Richtlinie die Prüfung der Gesteinskörnung mit dem Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung vor.

Eine weitere Untersuchung mit dem Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung gemäß Alkali-Richtlinie [1] für den Gabbro-Splitt, den Andesit-Splitt I, den Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland und den Granodiorit-Splitt II ist nach [1] aufgrund des positiven Ergebnisses nicht erforderlich. Um die Anwendbarkeit des Grenzwerts auf Waschbeton zu untersuchen, wurden diese vier Gesteinskörnungen dennoch im Rahmen dieses Forschungsprojekts zusammen mit den beiden Gesteinskörnungen Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland und Andesit-Splitt II Mitteldeutschland im Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung mit einbezogen. Das heißt, alle Gesteinskörnungen wurden sowohl mit der 40°C-Nebelkammerlagerung, als auch mit der AKR-Performance-Prüfung untersucht.

Die Andesit-, Gabbro- und Granodiorit-Splitt gehören nicht zu den in Teil 3 der Alkali-Richtlinie aufgeführten und in Ihrem Geltungsbereich liegenden Gesteinskörnungen und müssten daher auch nicht untersucht werden. Bereits im Vorfeld durchgeführte Untersuchungen an anderer Stelle wiesen jedoch auf eine mögliche Bedenklichkeit in Bezug auf ihre Alkaliempfindlichkeit hin. Daher wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes diese Gesteinskörnungen mit untersucht.

Die Alkaliempfindlichkeit des Sandes Thüringen 0/2 mm kann nicht nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie [1] beurteilt werden, da der angegebene Grenzwert nur für Gesteinskörnungen mit einer Korngröße 2 mm gilt.

Im Alternativverfahren (siehe Bericht Teil 3) wurde der Grenzwert der maximalen Dehnung von 1,5 mm/m von den drei Gesteinskörnungen

- Andesit-Splitt I Mitteldeutschland 5/8 mm,
- Rhyolith-Splitt Süddeutschland 5/8 mm und
- Gabbro-Splitt 5/8 mm

nicht erreicht. Somit erwiesen sich diese Gesteinskörnungen auch mit dem Alternativverfahren als unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion im Beton. Die Dehnungen der Mörtelprismen mit den Gesteinskörnungen

- Rhyolith-Splitt 5/8 mm Mitteldeutschland,
- Andesit-Splitt II 5/8 mm Mitteldeutschland und
- Granodiorit-Splitt II 5/8 mm

überschritten den Grenzwert von 1,5 mm/m im Alternativverfahren z. T. deutlich und können auf dieser Basis nicht als unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion im Beton bezeichnet werden.

### 3.2.4 Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung

Die Dehnungsverläufe der Betonbalken mit je einer der sechs Gesteinskörnungen in der 40°C-Nebelkammerlagerung sind in Bild 25 dargestellt.

Der Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung beträgt nach einer Lagerungsdauer von 9 Monaten (entspricht 274 Tagen (9/12 x 365 Tage)) gemäß Alkali-Richtlinie 0,6 mm/m. Bei der Festlegung des Grenzwerts wurde bereits berücksichtigt, dass ein Dehnungsanteil von 0,2 bis 0,4 mm/m auf die Temperatur- und Feuchtedehnung des Betons zurückzuführen ist.

Die Dehnung des Betons mit Granodiorit-Splitt II betrug nach 273 Tagen Lagerung rd. 0,64 mm/m (Grenzwert überschritten). Die maximale Dehnung der Betonbalken mit je einer der anderen fünf Gesteinskörnungen lag nach 273 bis 276 Tagen zwischen 0,32 und 0,43 mm/m und damit unterhalb des Grenzwerts der Alkali-Richtlinie.

Als zusätzliches Beurteilungskriterium wurde im Rahmen der 40°C-Nebelkammerlagerung die Rissbreite an einem Würfel mit 300 mm Kantenlänge bestimmt. Die maximal zulässige Rissbreite für die Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S beträgt gemäß Alkali-Richtlinie < 0,2 mm.

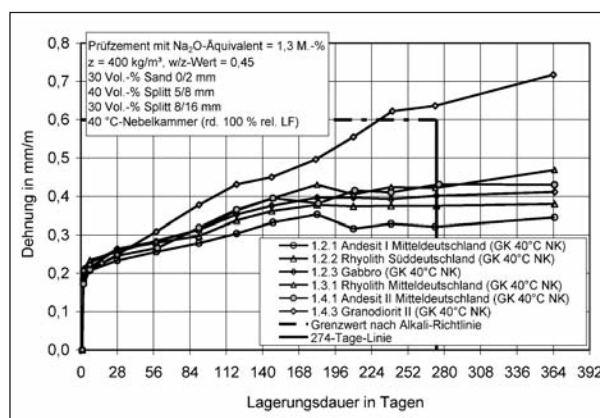


Bild 25: Dehnungsverlauf der Betonbalken in der 40°C-Nebelkammerlagerung

An dem mit Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland hergestellten Betonwürfel waren nach 281 Tagen Lagerung in der Nebelkammer erste Risse mit einer Rissbreite von rd. 0,1 mm festzustellen. Nach 365 Tagen Lagerung wurden Risse mit rd. 0,25 mm Rissbreite und Ausblühungen beobachtet.

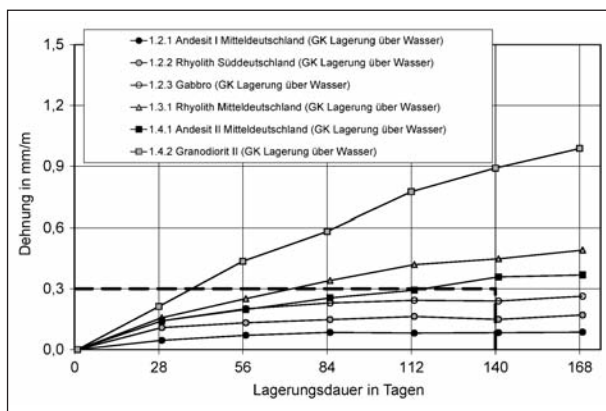
An dem mit Andesit II-Splitt aus Mitteldeutschland hergestellten Betonwürfel waren nach 365 Tagen Risse mit einer Rissbreite von rd. 0,20 mm und Ausblühungen zu beobachten.

An dem mit Granodiorit-Splitt II hergestellten Betonwürfel traten nach 273-tägiger Lagerung in der Nebelkammer feine Risse mit einer Rissbreite < 0,05 mm auf.

### 3.2.5 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser

Das Prüfverfahren „60°C-Betonversuch über Wasser“ kann gemäß Alkali-Richtlinie (Ausgabe Februar 2007) als schnellere Alternative zum rd. 9 Monate dauernden 40°C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung für die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen (Gesteinskörnungsprüfung) angewendet werden. Es basiert auf dem AAR4-Prüfverfahren, das in der französischen Norm NF-P 18-454 beschrieben ist. Danach geprüfte Gesteinskörnungen gelten als alkaliunempfindlich, wenn die Dehnung nach 20 Wochen (140 Tage) kleiner als 0,3 mm/m ist.

Mit dem 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser (nach Anhang B der Alkali-Richtlinie, Febr. 2007) zeigten der Andesit I aus Mitteldeutschland, der Rhyolith aus Süddeutschland und der Gabbro nach 140 Tagen Dehnungen von rd. 0,08, 0,15 bzw.



**Bild 26:** Dehnung der Betonbalken mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen im 60°C-Betonversuch über Wasser (Gesteinskörnungsprüfung)

0,24 mm/m. Der Grenzwert von 0,3 mm/m nach Alkali-Richtlinie wurde unterschritten.

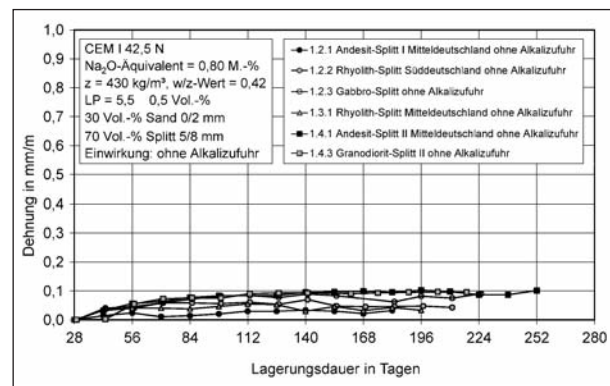
Die Betonbalken mit Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland, Andesit-Splitt II aus Mitteldeutschland bzw. Granodiorit-Splitt II wiesen eine Dehnung nach 140 Tagen von 0,45, 0,36 bzw. 0,89 mm/m auf. Damit wurde der Grenzwert der zulässigen Dehnung nach Alkali-Richtlinie überschritten.

## 3.3 Betonprüfungen (AKR-Performance-Prüfung)

### 3.3.1 60°C-Betonversuch mit/ohne Alkalizufuhr von außen

Ausgenommen die Gesteinskörnung 1.4.2 wurde im FIZ mit jeder zu untersuchenden Gesteinskörnung Waschbeton hergestellt, der sowohl mit als auch ohne Alkalizufuhr von außen gelagert wurde. Dabei wurde die Dehnung bis zum 168. Tag der Lagerung und darüber hinaus bestimmt. Als Hauptkriterium für die Beurteilung des Waschbetons hinsichtlich des Risikos einer Beton schädigenden AKR wird die Dehnungszunahme vom 28. Tag bis zum 168. Tag der Lagerungsdauer herangezogen. Dieser Zeitraum entspricht einer Wechsellagerungsdauer von 20 Wochen bzw. 140 Tagen. Die vor dem 28. Tag der Lagerung (Ende der Vorlagerung) aufgetretenen Dehnungen werden maßgeblich anderen Ursachen zugeordnet, z. B. dem Schwinden und/oder der Feuchtedehnung der Betonbalken. Man geht davon aus, dass die Dehnung bis zum 28. Tag der Lagerung nur zu einem sehr unwesentlichen Teil von einer Alkalireaktion im Beton verursacht wird.

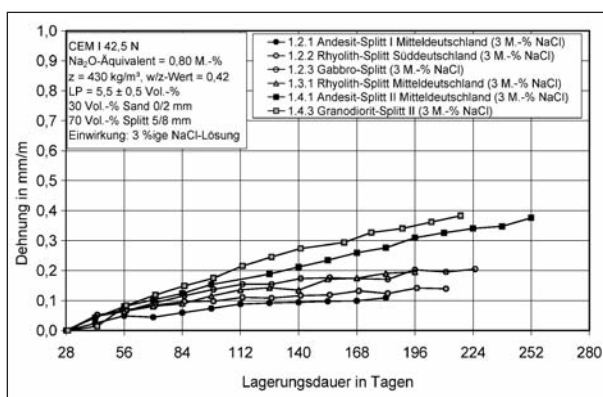
In Bild 27 ist der Dehnungsverlauf der Waschbetonbalken ohne Alkalizufuhr ab dem Start der



**Bild 27:** Dehnungsverlauf der Betonbalken bei Wechsellagerung in deionisiertem Wasser als Prüflösung nach Ende der Vorlagerungsdauer von 28 Tagen

Wechsellagerung (nach 28 Tagen) dargestellt. Die Balken aller sechs Waschbetone zeigten mit rd. 0,02 bis 0,10 mm/m nur sehr geringe Dehnungen. Diese Dehnungen lassen nicht auf das Abflauen einer schädigenden Alkalireaktion schließen. Dehnungen dieser Größe sind auf eine weitere Aufnahme von Prüfflüssigkeit mit der Folge einer geringen Feuchtedehnung zurückzuführen. Ein Grenzwert für die maximale Dehnung in der AKR-Performance-Prüfung von Beton kann derzeit nur für die Lagerung bei 10 M.-% NaCl in der Prüflösung angegeben werden. Maßgebend ist die Dehnungszunahme zwischen dem 28. Tag und dem 168. Tag der Lagerung.

Bei der Wechsellagerung mit Prüflösung mit 3 M.-% NaCl (Bild 28) zeigten alle Waschbetone in Abhängigkeit von der verwendeten Gesteinskörnung eine Dehnungszunahme nach 168 Tagen Lagerungsdauer zwischen rd. 0,10 und rd. 0,32 mm/m. Die

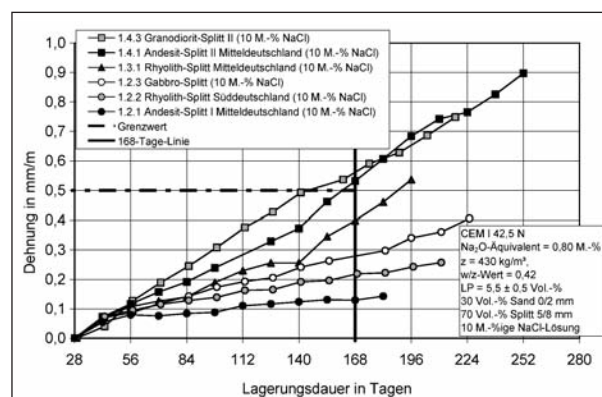


**Bild 28:** Dehnungsverlauf der Betonbalken bei Wechsellagerung in Prüflösung mit 3 M.-% NaCl nach Ende der Vorlagerungsdauer von 28 Tagen

größte Dehnung trat bei den Betonbalken auf, die unter Verwendung von Granodiorit-Splitt II als Gesteinskörnung hergestellt wurden.

Bei der Wechsellagerung der Waschbetonbalken in Prüflösung mit 10 M.-% NaCl (Bild 29) überschritt die Dehnung der Waschbetonbalken mit Granodiorit-Splitt II mit 0,57 mm/m und die Dehnung der Waschbetonbalken mit Andesit-Splitt II Mitteldeutschland mit 0,53 mm/m nach einer Lagerungsdauer von 168 Tagen den Grenzwert der maximalen Dehnung (siehe Bild 29). Die Dehnung der Waschbetone mit je einer der weiteren vier Gesteinskörnungen lag nach einer Wechsellagerung von 168 Tagen zwischen 0,13 und 0,40 mm/m.

Bei dem Beton mit Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland ist der zum Beurteilungszeitpunkt deutlich ausgeprägte Dehnungsanstieg auffällig.



**Bild 29:** Dehnungsverlauf der Betonbalken bei Wechsellagerung in Prüflösung mit 10 M.-% NaCl nach Ende der Vorlagerungsdauer von 28 Tagen

## Teil 3 – Untersuchungen des FIB

### 1 Eingesetzte Betonausgangsstoffe

Für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchzuführenden Untersuchungen wurden vereinbarungsgemäß folgende Betonausgangsstoffe eingesetzt:

#### 1.1 Gesteinskörnungen

- 1.1 Ausreichend alkaliunempfindliche feine Gesteinskörnung (einheitlich für alle Betonzusammensetzungen):
  - Sand Thüringen 0/2 mm.
- 1.2 Ausreichend alkaliunempfindliche Festgesteine:
  - 1.2.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (Auswahl FIB),
  - 1.2.2 Rhyolith-Splitt Süddeutschland (Auswahl FIZ),
  - 1.2.3 Gabbro-Splitt (Auswahl FIZ).
- 1.3 Alkaliempfindliches Festgestein:
  - 1.3.1 Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (Auswahl FIB).
- 1.4 Potenziell alkaliempfindliche Festgesteine:
  - 1.4.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (Auswahl FIB),
  - 1.4.2 Granodiorit-Splitt I (Restbestand FIB),
  - 1.4.3 Granodiorit-Splitt II (Auswahl FIB).

Durch die zum Zeitpunkt der Auftragserteilung (19.11.2008) bereits herrschenden winterlichen Witterungsbedingungen erfolgte die Anlieferung der vorgesehenen Gesteinskörnungen z. T. nicht zeitnah.

Da eine Lieferung der zunächst vorgesehenen potenziell alkaliempfindlichen Gesteinskörnung (Gesteinskörnung 1.4.1 = Andesit-Splitt Mitteldeutschland II) nicht möglich war, wurde ein anderes Lieferwerk mit einem nach bisherigen Erfahrungen ebenfalls potenziell alkaliempfindlichen Andesit aus Mitteldeutschland ausgewählt.

Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber (BAST), wurde für die noch fehlende Gesteinskörnung 1.4.2 (Granodiorit-Splitt) folgender Kompromiss getroffen: Einerseits wurde ein anderes Lieferwerk mit einem ebenfalls potenziell alkaliempfindlichen Granodiorit-Splitt (Granodiorit-Splitt II) ausgewählt. Andererseits sollte die Anbindung des Versuchsprogramms an die am FIB schon vorliegenden Erfahrungen aus verschiedenen Untersuchungen (petrografische und mineralogische Charakterisierung, Gesteinskörnungsprüfungen nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, AKR-Performance-Prüfungen von Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken nach alter Standardbauweise, Untersuchung eines AKR-Schadensfalls in einem Abschnitt der BAB A 10<sup>8</sup>) an diesem ursprünglich vorgesehenen Granodiorit (Granodiorit-Splitt I) gewährleistet werden. Zusätzlich wurde dazu am FIB eine weitere AKR-Performance-Prüfung für eine Waschbetonzusammensetzung unter Verwendung noch vorhandener Restbestände einer früheren Lieferung des ursprünglich vorgesehenen Granodiorits (Granodiorit-Splitt I, Lieferkörnung 2/8) durchgeführt.

#### 1.2 Zement

Der für das Forschungsprojekt vorgesehene CEM I 42,5 N (sd) für den Bau von Fahrbahndecken nach TL Beton-StB 07 ist Mitte Januar 2009 an beide Forschungseinrichtungen geliefert worden. Die Mehrfachbestimmung des Na<sub>2</sub>O-Äquivalents am FIB ergab einen mittleren Wert von 0,81 M.-%.

Damit wurde der angestrebte Wert von 0,7 % ≤ Na<sub>2</sub>O-Äquiv. ≤ 0,8 % geringfügig überschritten. Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber (BAST) wurde diese Liefercharge für die geplanten Untersuchungen eingesetzt.

<sup>8</sup> FE-Vorhaben 8.187/2005/LRB „Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton – Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR)“, Phase I.

### 1.3 Luftporenbildner, Oberflächenverzögerer für Waschbetonoberflächen

Als LP-Bildner wurde an beiden Forschungsstellen der Luftporenbildner LPS V von Sika-Addiment eingesetzt, um einen LP-Gehalt von 5,5 Vol.-% im Frischbeton zu erzeugen. Nach den Herstellerangaben wird Addiment Luftporenbildner LPS V zur Herstellung von Mörteln und Beton mit hohem Frost-/Frosttaumittelwiderstand verwendet. Auch unter erschwerten Bedingungen, wie z. B. im Betonstraßenbau, wird mit diesem Luftporenbildner sicher der gewünschte Luftporengehalt erreicht.

Zur Herstellung von Probekörpern mit Waschbetonoberfläche wurde am FIB das Produkt Rugasol ST eingesetzt. Nach den Herstellerangaben ist Sika Rugasol ST Oberflächenverzögerer und Nachbehandlungsmittel zugleich und wird zur Herstellung von Waschbetonoberflächen im Betonstraßenbau eingesetzt.

## 2 Untersuchungen an den Betonausgangsstoffen

### 2.1 Untersuchungen an den Gesteinskörnungen

#### 2.1.1 Petrografische und mineralogische Charakterisierung der Gesteinskörnungen

##### Petrografische Charakterisierung Festgesteine (grobe Gesteinskörnungen > 2 mm)

Für die petrografischen Untersuchungen an Festgesteins-Lieferkörnungen (nur Auswahl FIB) wurde jeweils ein Dünnschliff von einer repräsentativen Auswahl von Körnern hergestellt und im Polarisationsmikroskop (Gerät POLMI JENALB, ZEISS) untersucht. Auf dem Dünnschliff sind je nach Korngröße 3-14 Einzelkörner enthalten. Die Gesteinsproben werden vor dem Schleifvorgang mit gelbem Kunstharz vakuumgetränkt. Bei der Abbildung im parallel polarisierten Licht erscheinen daher alle Hohlräume (Poren, Risse) gelb.

### Mineralogische Charakterisierung

Im Rahmen der mineralogischen Analyse wurde eine qualitative Röntgenphasenanalyse (XRD) an Pulverpräparaten < 40 µm (Gerät Diffraktometer D 5000, SIEMENS) und anschließend eine quantitative Analyse mittels RIETVELD-Verfeinerung (Programm TOPAS, BRUKER AXS) durchgeführt.

#### Ergebnisse petrografische/mineralogische Charakterisierung der ausreichend alkalienempfindlichen Festgesteine (1.2)

##### • Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (1.2.1, Auswahl FIB)

##### Geologische Situation

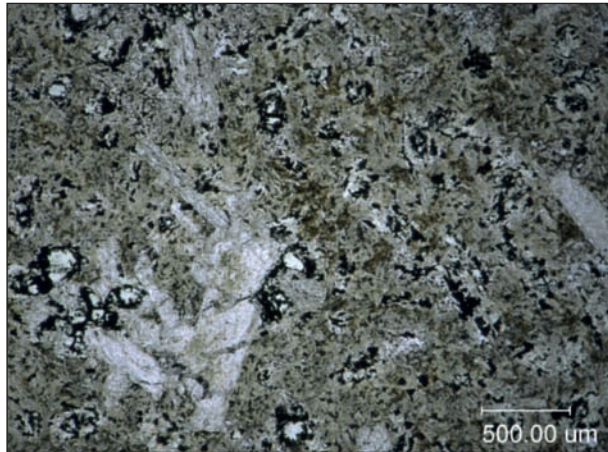
Der Steinbruch des Andesit-Splitts Mitteldeutschland I liegt ca. 8 km WNW Magdeburg. Der Tagebau liegt am Südrand des Flechtinger Höhenzuges, der wiederum Bestandteil der herzynisch streichenden Flechtinger-Rosslauer-Scholle ist. Die Formation wurde durch Vulkanite und Subvulkanite des Unterrotliegenden (Perm) von andesitischer und rhyolithischer Zusammensetzung aufgebaut.

Die Andesite lassen sich in eine ältere Phase (Andesitoide I + II) sowie in einige eng begrenzte Vorkommen einer jüngeren Phase einordnen. Zwischen beiden Phasen fand eine explosive vulkanische Tätigkeit statt, die zu rhyolithischen Gesteinen führte. Der Andesit-Splitt Mitteldeutschland I gehört zu den Andesitoiden I.

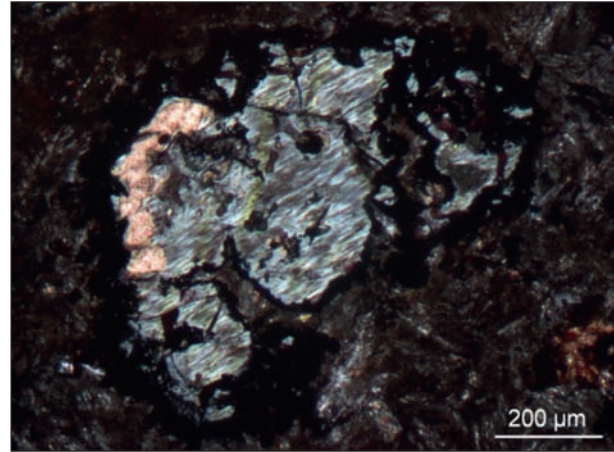
##### Modaler Mineralbestand und Mikrogefüge

Der Andesit-Splitt Mitteldeutschland I zeigt das typische Andesitgefüge mit leistenförmigen Einsprenglingen von Plagioklaskristallen in einer feinkristallinen Grundmasse aus feinkristallinen Plagioklasen, wenig Pyroxen, Oxidphasen und rekristallisiertem Glas (Bild 30). Die Plagioklase sind in der Regel getrübt bzw. zeigen Serizitisierung. Selten sind die weitgehend idiomorphen Umrisse ehemaliger Pyroxene zu erkennen, die vollständig chloritisiert sind (Bild 31), einige Splittkörner zeigen noch erhaltene Pyroxene in einer Grundmasse leistenförmiger Plagioklase (Bild 32). Quarz tritt nestartig auf, häufig zusammen mit Calcit (Bild 33), daneben ist er als Einzelkristall in die Matrix eingebettet zu finden (Bild 34) sowie als Gangfüllung (Bild 35).

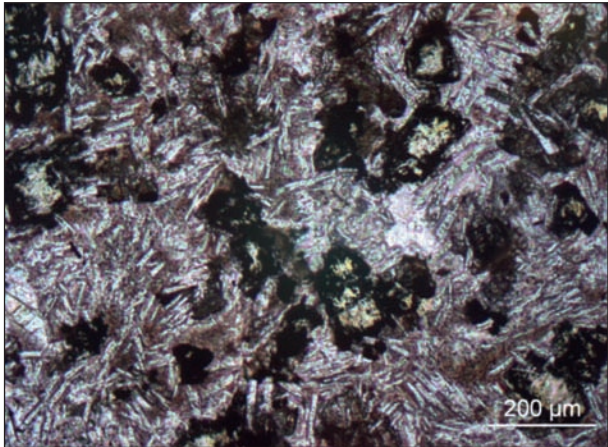




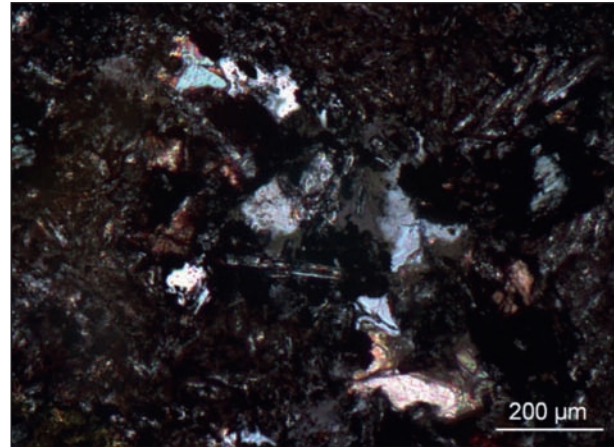
**Bild 30:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland I, Gefügeübersicht, einfach Pol.



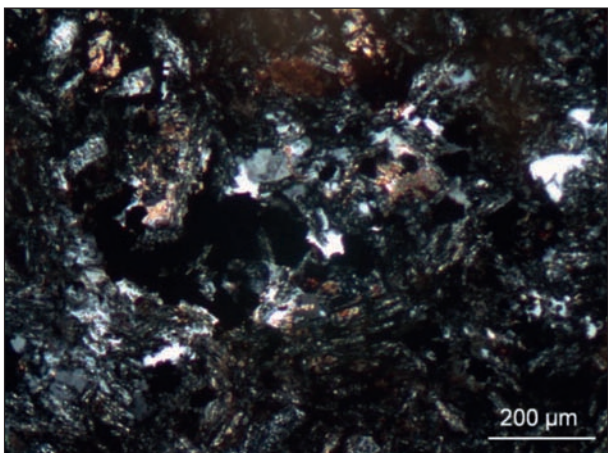
**Bild 31:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland I, ehemaliger, idiomorpher Pyroxen, vollständig chloritisiert; am linken oberen Rand hat sich Calcit gebildet, + Pol.



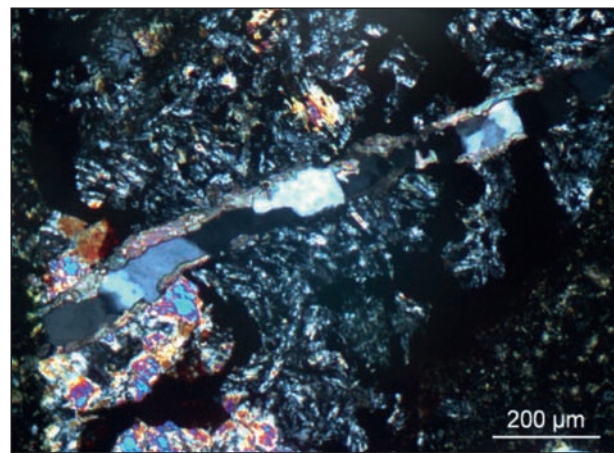
**Bild 32:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland I, Splittkorn mit erhaltenen Pyroxenen als Einsprenglinge in einer Grundmasse aus überwiegend Plagioklas (leistenförmig), einfach Pol.



**Bild 33:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland I, Quarznest mit Calcit; die Quarze (hell und hellgrau) sind leicht undulös, + Pol.



**Bild 34:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland I, einzelne Quarzkristalle (hell und hellgrau) in der Matrix eingebettet, + Pol.



**Bild 35:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland I, Quarz (hell und hellgrau) als Gangfüllung, leicht undulös, + Pol.

Mineralphasenbestand nach Röntgenbeugungsanalyse

Die Tabelle 29 enthält die Ergebnisse der quantitativen XRD – RIETVELD – Analyse für den Andesit-Splitt Mitteldeutschland I.

Die Gesamtmenge an Quarz des Andesit-Splitt Mitteldeutschland I liegt für einen Andesit am oberen Bereich der Grenze zum Dazit. Wesentliche Anteile des ermittelten Quarzgehaltes sind offenbar in den Füllungen von Mikrorissen zu finden, die in einer späten Phase der Gesteinsentstehung stattfanden. Diese Vorgänge sind bei subvulkanischen Gesteinen wie dem hier untersuchten Andesit nicht ungewöhnlich.

Aus petrografischer Sicht ist die untersuchte Gesteinskörnung Andesit-Splitt Mitteldeutschland I in ihrer Alkalireaktivität eher als unbedenklich einzustufen.

- **Rhyolith-Splitt Süddeutschland (1.2.2, Auswahl FIZ)**

Der Rhyolith-Splitt Süddeutschland wurde petrografisch bereits vom VDZ charakterisiert. Hier werden daher nur die Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalyse zur Erfassung des Mineralphasenbestandes aufgeführt. Die Ergebnisse der Diffraktometrie mit anschließender Rietveld-Verfeinerung sind in Tabelle 30 dargestellt.

Der Mineralphasenbestand der untersuchten Gesteinskörnung Rhyolith-Splitt Süddeutschland entspricht einem klassischen Rhyolith.

- **Gabbro-Splitt (1.2.3, Auswahl FIZ)**

Wie der Rhyolith Splitt Süddeutschland wurde auch der Gabbro petrografisch bereits vom VDZ charakterisiert, sodass hier nur die Ergebnisse der Diffraktometrie mit anschließender Rietveld-Verfeinerung aufgeführt werden (Tabelle 31).

Muskovit resultiert aus der Serizitisierung der Feldspäte, Talk ist in erster Linie als Alterationsprodukt des Olivins anzusehen. Die Analyse stellt eine Mischung der in der Petrografie (s. d.) bereits dargestellten zwei Varianten dar, in denen der Gabbro auftritt, da das Material für die Röntgenbeugungsanalyse jeweils der Fraktion 1/2 mm für den Mörteltest entstammt.

Mineralphase	Anteil in M.-%
Quarz	17,5
Plagioklas	53,4
Orthoklas	6,5
Muskovit	9,5
Biotit	1,3
Chlorit	4,7
Hämatit	3,6
Calcit	1,9
Epidot	1,6

Tab. 29: Quantitativer Mineralphasenbestand Andesit-Splitt Mitteldeutschland I

Mineralphase	Anteil in M.-%
Quarz	48,3
Plagioklas	22,3
Orthoklas	20,4
Biotit (Ti-reich)	2,6
Muskovit	5,3
Chlorit	0,8
Hämatit	0,4

Tab. 30: Quantitativer Mineralphasenbestand Rhyolith-Splitt Süddeutschland

Mineralphase	Anteil in M.-%
Quarz	0,6
Plagioklas	53,8
Orthoklas	1,6
Muskovit	2,5
Chlorit	4,5
Hornblende	14,8
Olivin	9,4
Diopsid	8,1
Talk	4,8

Tab. 31: Quantitativer Mineralphasenbestand Gabbro-Splitt

### Ergebnisse petrografische/mineralogische Charakterisierung des alkaliempfindlichen Festgesteins (1.3)

#### • Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (1.3.1, Auswahl FIB)

Geologische Situation Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland

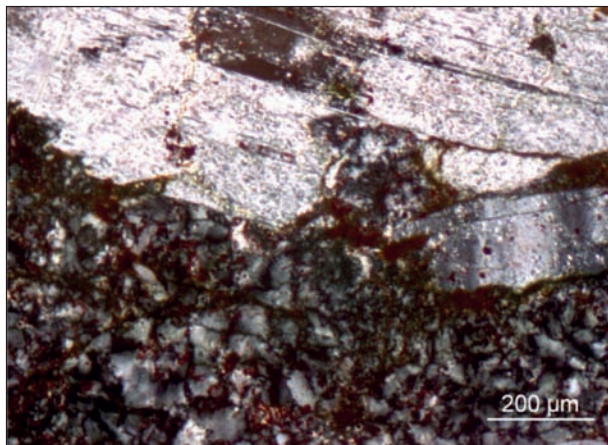
Der hier untersuchte Rhyolith Mitteldeutschland ist Teil des Halleschen Vulkanitkomplexes (Rotliegenden der Halleschen Mulde). Neben Andesiten enthält dieser Komplex zwei Rhyolithe – neben einem subvulkanischen Rhyolith ist dies der hier untersuchte effusive Rhyolith. Aufgrund ihrer Genese unterscheiden sich beide Rhyolithe in der Größe der Einsprenglinge und der Ausbildung der Grundmasse.

#### Modaler Mineralbestand und Mikrogefüge

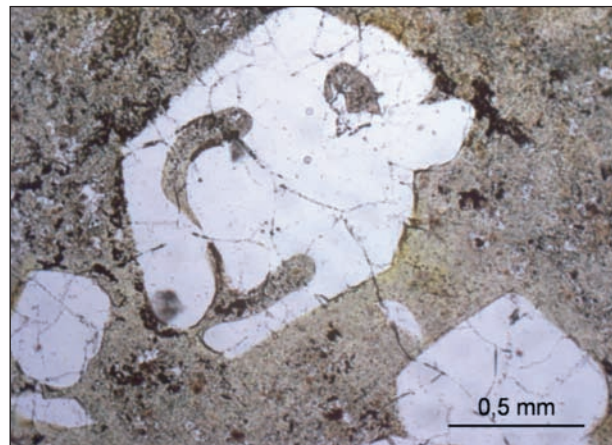
Das Gesteinsgefüge entspricht dem klassischen Bild eines Rhyoliths mit größeren Einsprenglingen aus Quarz und Feldspäten in einer vergleichsweise sehr feinkristallinen Grundmasse. Für die Beurteilung der Alkalireaktivität ist die Ausbildung der Grundmasse mit ausschlaggebend. Die Grundmasse besteht überwiegend aus sehr feinkristallinem, teilweise submikroskopisch ausgebildetem Quarz. In submikroskopischen Bereichen können keine deutlichen Korngrenzen mehr erkannt werden. Unter gekreuzten Polarisatoren sind in diesen Bereichen chalcedonartige, radialstrahlige Strukturen zu erkennen.

#### Haupt- bzw. Einsprenglingsminerale

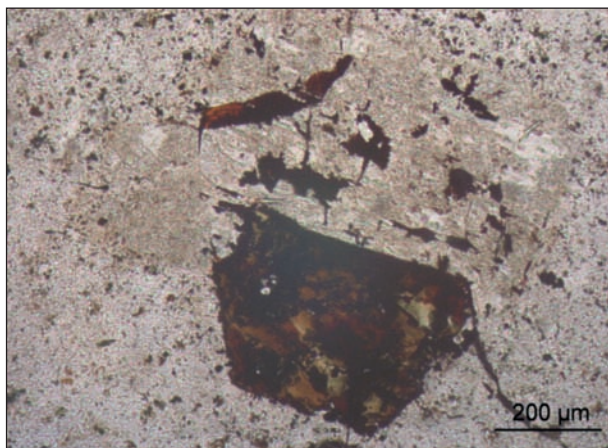
Quarz: Teils klare überwiegend hypidiomorphe Körner, die stellenweise Rücklösungs-



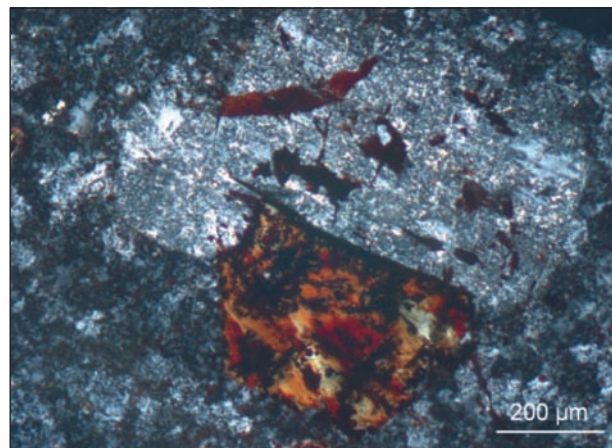
**Bild 36:** Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland, feinkristalline Grundmasse mit chalcedonartigen Strukturen, getrüübter Plagioklas (oben) und fein verteiltem Hämatit (rötliche Farben), + Pol.



**Bild 37:** Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland, idiomorphe Quarzeinsprenglinge, mit netzartigen Rissen, der größere Kristall zeigt Rücklösungserscheinungen, einfach Pol.



**Bild 38:** Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland, idiomorpher Biotit, leicht chloritisiert neben getrüübtem Kalifeldspat (oben) mit Einlagerungen von Oxiden/Hämatit, einfach Pol.



**Bild 39:** Wie Bild 38, jedoch + Pol.

erscheinungen zeigen können. Selten sind hexagonale Schnitte zu erkennen (Hochquarzmorphologie). Einige Kristalle zeigen netzartig verlaufende Mikrorisse, auf denen sich vermutlich Serizit fächerartig bildet.

**Feldspäte:** Die meist hypidiomorphen K-Feldspäte sind unterschiedlich stark, aber durchweg getrübt, enthalten aber nur wenig Serizit (= feinschuppiger Muskovit). Die Plagioklase (Ca-, Na-Feldspäte) sind ebenfalls fast immer getrübt und zeigen die typische, polysynthetische Zwillinglamellierung.

**Glimmer:** Feinschuppiger Muskovit auf Feldspatkörnern, Biotit in Form sehr weniger idio- bis hypidiomorpher Einzelkörner in der Grundmasse, teilweise chloritisiert.

Akzessorisch sind farbgebend fein verteilt Hämatit, opake Oxidminerale sowie weitgehend idiomorph Titanit und Zirkon vorhanden. Dies sind für diesen Gesteinstyp typische Begleitminerale.

Mineralphasenbestand nach Röntgenbeugungsanalyse

Tabelle 32 enthält die Ergebnisse der quantitativen XRD – RIETVELD – Analyse für den Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland.

Die Mengenverhältnisse der Hauptbestandteile Quarz, Alkalifeldspat und Plagioklas sind für einen Rhyolith typisch und entsprechen der gängigen Nomenklatur (DIN EN 12670:2001, Bild 4). Die ermittelten Anteile von > 1 M.-% Hämatit entsprechen der petrografisch festgestellten feinen Verteilung in der Matrix.

Mineralphase	Anteil in M.-%
Quarz	39,8
Plagioklas	25,9
Orthoklas	27,2
Biotit (Ti-reich)	1,4
Muskovit	3,7
Chlorit	0,7
Hämatit	1,3

**Tab. 32:** Quantitativer Mineralphasenbestand des Rhyolith-Splitts Mitteldeutschland

Der Rhyolith Mitteldeutschland ist aus petrografischer Sicht aufgrund der überwiegend sehr feinkristallinen Grundmasse aus Quarz und evtl. Chaledon als potenziell alkalireaktiv einzustufen. Es besteht außerdem die Möglichkeit, dass aus den getrühten Feldspäten zusätzlich Alkalien gelöst werden können.

### Ergebnisse petrografische/mineralogische Charakterisierung der potenziell alkalieempfindlichen Festgesteine (1.4)

#### • Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (1.4.1, Auswahl FIB)

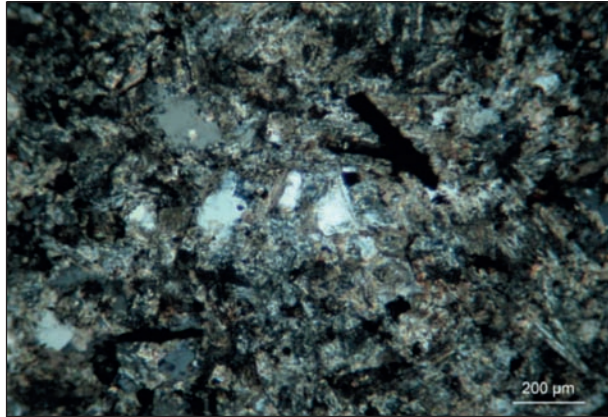
Geologische Situation

Der Tagebau des Andesit-Splitt Mitteldeutschland II gehört zum geologischen Komplex der Flechtinger Scholle (bzw. geografisch des Flechtinger Höhenzugs) nördlich von Magdeburg. In der Formation des Unterrotliegenden (Autun) hat die Förderung saurer und intermediärer Laven stattgefunden, die heute als die Hartgesteine Rhyolith (z. B. Flechtingen) und Andesit in 2 Vorkommen abgebaut werden. Nach der geologischen Vorgeschichte ist im Bereich der Lagerstätten mit bruchtektonischen Vorgängen zu rechnen, die den primären Stoffbestand der Gesteine in lokal begrenzten Partien im Bereich kleiner Störungszonen evtl. verändert haben könnten.

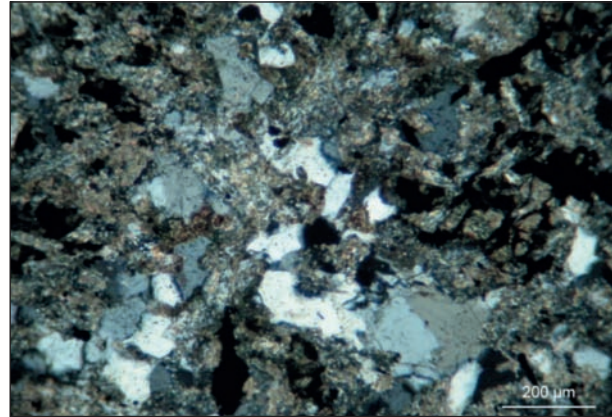
Mikrogefüge Andesit Mitteldeutschland II

Die Grundmasse des Gesteinsgefüges ist überwiegend sehr feinkörnig ausgebildet (Bild 40, unterer Bereich), nur bei höherer Vergrößerung erkennt man die gesteinstypischen leistenförmigen Feldspäte in dieser Grundmasse. Daneben treten Partien mit Einsprenglingen Feldspäten und Augiten auf, häufig stark alteriert. Die rötliche Färbung einiger Splittkörner ist auf feinst verteilten Hämatit zurückzuführen. In der vorliegenden Körnung 5/8 sind Varianten mit feinkörniger dichter Grundmasse (ohne größere leistenförmige Feldspäte) dominant.

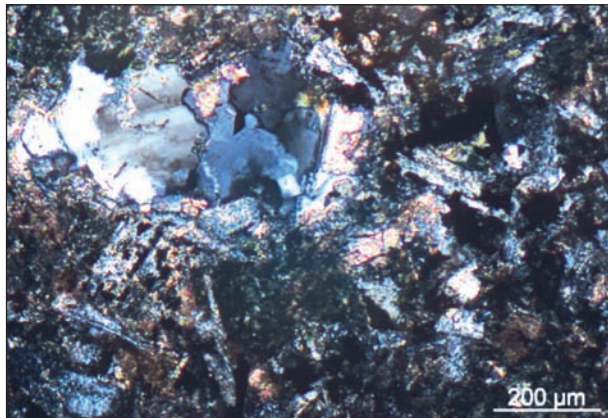
Die Quarzkörner liegen hier als Einzelkörner oder angereichert in der Grundmasse (Bild 40, Bild 41) vor, dazu kommen Kornaggregate (Bild 42) und Füllungen von Mikrokluft (Bild 43). Die in früheren Chargen im Andesit-Splitt Mitteldeutschland I beobachteten faserartig ausgebildeten bzw. chaledonähnlichen Quarzkörner fehlen im Splitt der aktuellen Körnung.



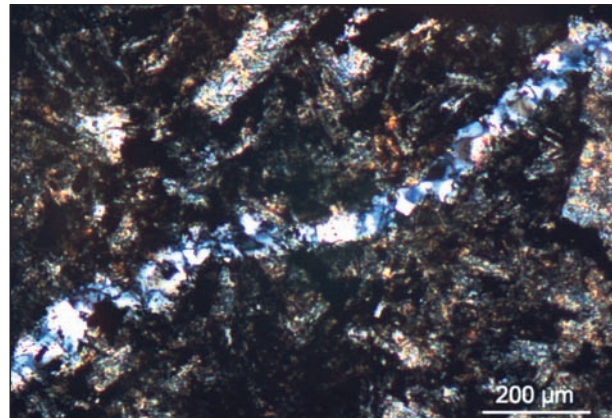
**Bild 40:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland II, Quarz-Einzelkörner (helle Körner Bildmitte), + Pol.



**Bild 41:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland II, Ansammlung von Quarz-Einzelkörnern (helle Körner), + Pol.



**Bild 42:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland II, Quarzkorn-Aggregat mit undulös auslöschenden Kristallen, + Pol.



**Bild 43:** Andesit-Splitt Mitteldeutschland II, Quarz als Mikroklufffüllung, + Pol.

#### Mineralphasenbestand nach Röntgenbeugungsanalyse

Tabelle 33 enthält die Ergebnisse der quantitativen XRD-RIETVELD-Analyse. Die mineralogische Zusammensetzung entspricht früheren Analysen vom Andesit-Splitt Mitteldeutschland II.<sup>9</sup> Die Quarzgehalte liegen mit rd. 30 % für einen Andesit relativ hoch. Dieses Gestein ist damit als Quarz-Andesit nach klassischer Nomenklatur zu bezeichnen, nach der derzeit gültigen Nomenklatur (DIN EN 12670:2001, Bild 4) ist die hier untersuchte Probe als Fazit anzusprechen. Inwieweit die erhöhten Quarz-Gehalte auf geologische Vorgänge, wie sie für die Vulkanite der Flechtinger Scholle beschrieben werden,<sup>10</sup> zurückzuführen sind, lässt sich mit dem vorliegenden Probenmaterial nicht entscheiden.

Die hier untersuchte Gesteinskörnung Andesit-Splitt Mitteldeutschland II ist aus petrografischer Sicht in Bezug auf die Alkalireaktivität zumindest als grenzwertig einzustufen, ein latentes Potenzial ist aufgrund der Quarzgehalte sowie dem Auftreten des Quarzes im Gesteinsgefüge zu erwarten.

Mineralphase	Anteil in M.-%
Quarz	29,6
Orthoklas	10,5
Andesin	18,8
Muskovit	13,3
Biotit	6,5
Klinochlor IIb-2	7,8
Hämatit	4,5
Calcit	9,1

**Tab. 33:** Quantitativer Mineralphasenbestand des Andesit-Splitts Mitteldeutschland II

<sup>9</sup> STARK, J.: Untersuchungen zur Eignung von Gesteinskörnungen ... für den Bau von Flugbetriebsflächen und Fahrbahndecken aus Beton. Gutachten i. A. der ..., Weimar 04.06.2007.

<sup>10</sup> AWDANKIEWICZ, M.; BREITKREUZ, C. & EHLING, B.-C. (2004): Emplacement textures in Late Palaeozoic andesite sills of the Flechtingen-Roßlau Block, north of Magdeburg (Germany). In: BREITKREUZ, C. & PETFORD, N. (eds.): Physical geology of high-level magmatic systems. Geol. Soc. Spec. Publ., 234, 51-66.

### • Granodiorit-Splitt I (1.4.2, Auswahl FIB)

#### Geologische Situation

Das Vorkommen des Granodiorit-Splitt I liegt in der geologischen Baueinheit des Lausitzer Granodiorit-Massivs. In der Lagerstätte des Granodiorit-Splitt I wird der Westlausitzer Granodiorit, ein Biotit-Granodiorit, abgebaut. Das Gestein ist durch Aufschmelzung älterer Sedimentserien (i. W. Grauwacken) entstanden und wird mit einem Alter zwischen 650 und 550 Mio. Jahren angegeben.<sup>11</sup> Nach dem modalen Mineralbestand und der Gesteinsstruktur ist der Granodiorit-Splitt I weitge-

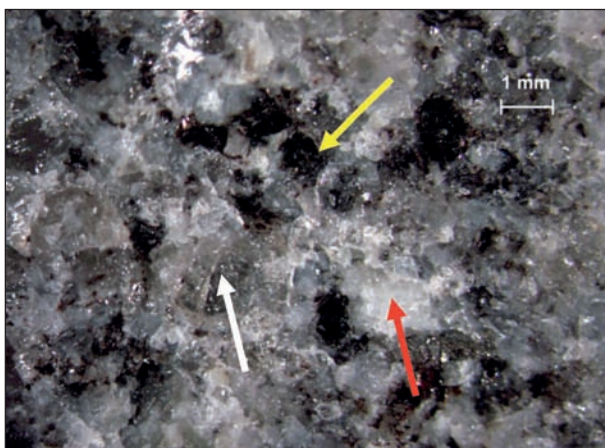
hend mit echten Granit- bzw. Granodioritintrusionen vergleichbar.

#### Gesteinsgefüge und Ausbildung der Hauptminerale

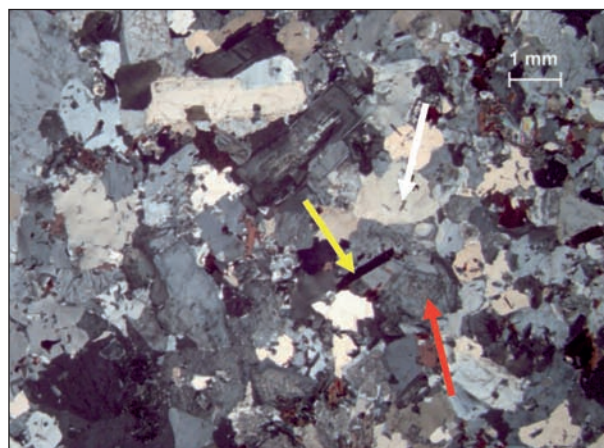
Das Gesteinsgefüge ist teilweise gleichkörnig ausgebildet, d. h. die Hauptgemengteile Quarz, Feldspäte und Glimmer (Biotit) sind in annähernd gleicher Größe und auch überwiegend gleichmäßig verteilt angeordnet (Bild 44 und Bild 45). Diese Gefügevariante entspricht einem klassischen Granitgefüge (Granodiorit gehört zur Gruppe der granitoiden Gesteine, im Unterschied zum Granit überwiegt bei den Feldspäten jedoch der Plagioklas).

Überwiegend liegt jedoch ein porphyrisches Granitgefüge vor, in dem vor allem große Feldspat- und Quarzkristalle auffallen (Bild 46 und Bild 47).

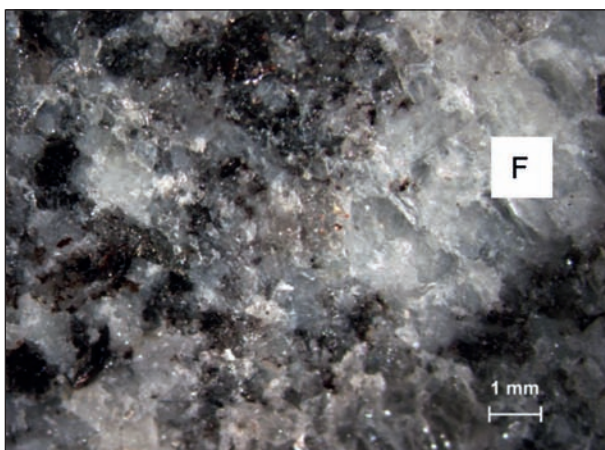
<sup>11</sup> WALTER, R. u. a.: Geologie von Mitteleuropa. Verl. Schweizerbart Stuttgart 1992, S. 561.



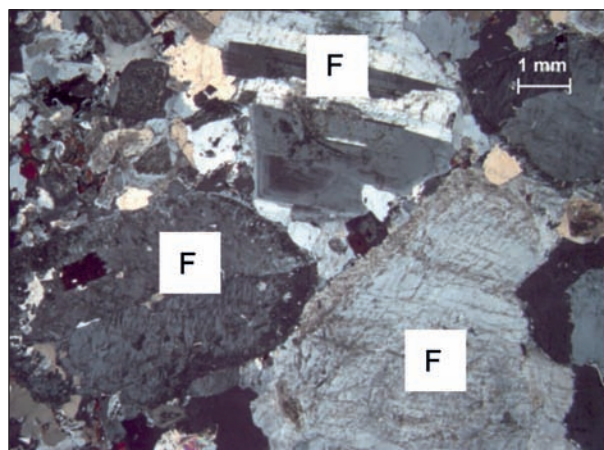
**Bild 44:** Granodiorit-Splitt I, Granodioritgefüge mit gleichkörniger Ausbildung der Hauptgemengteile Quarz (weißer Pfeil), Feldspat (roter Pfeil) und Biotit (gelber Pfeil), Handstück



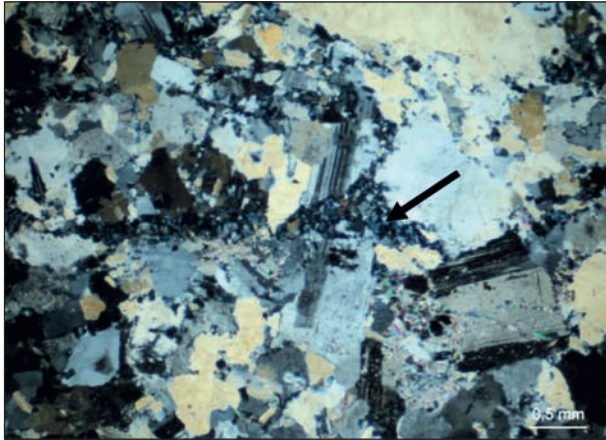
**Bild 45:** Granodiorit-Splitt I, Granodioritgefüge mit gleichkörniger Ausbildung der Hauptgemengteile Quarz (weißer Pfeil), Feldspat (roter Pfeil) und Biotit (gelber Pfeil), + Pol.



**Bild 46:** Granodiorit-Splitt I, Granodioritgefüge mit großem Feldspat-Kristall (F), Handstück



**Bild 47:** Granodiorit-Splitt I, Ansammlung großer Feldspat-kristalle (F), + Pol.



**Bild 48:** Granodiorit-Splitt I, helles Splittkorn bestehend aus Quarz und Chlorit – Lagen (Pfeil), + Pol.

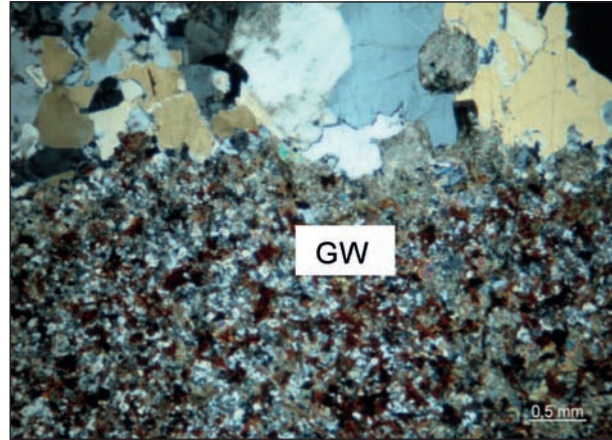
Selten sind in den Splitten helle Körner, die i. W. nur aus Quarz, wenig Feldspat und Chlorit bestehen (Bild 48) und solche mit kleinen Grauwackeeinschlüssen, wobei die Einschlüsse einer typischen präkambrischen Lausitzer Grauwacke entsprechen (Bild 49).

#### Ausbildung der Hauptgemengteile

**Quarz:** Kleinere Quarzkörner sind klar ausgebildet, in den großen Quarzkörnern liegt meist eine schwach ausgebildete undulöse Auslöschung vor (Bild 50). Diese nur im Polarisationsmikroskop feststellbare optische Eigenschaft der Quarzkristalle äußert sich als wolkenartiges Bild und zeigt an, dass die Quarz – Kristallstruktur leicht deformiert ist. Eine solche Deformation kann dazu führen, dass die Löslichkeit dieser Quarzanteile erhöht ist. Auf Bruchflächen des Gesteins fällt auf, dass große Quarzkörner innerhalb eines Kornes oder innerhalb von aus mehreren



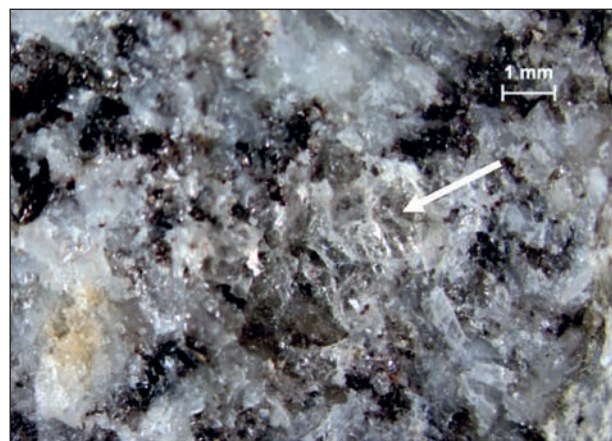
**Bild 50:** Granodiorit-Splitt I, Quarzkorn (Qz) mit undulöser Auslöschung, + Pol.



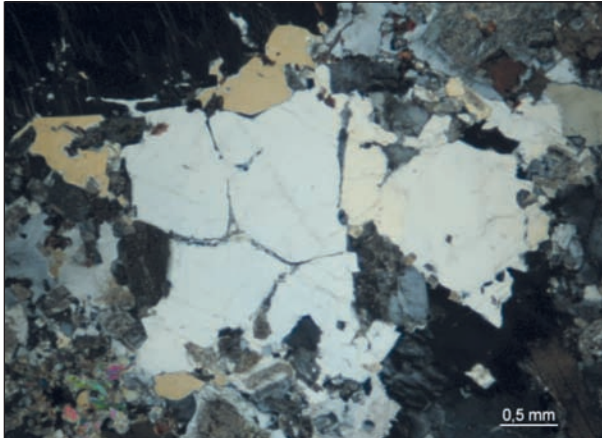
**Bild 49:** Granodiorit-Splitt I, Granitkorn mit Grauwackeeinschluss (GW) + Pol.

Subkörnern bestehenden Aggregaten im Beanspruchungsfall brechen (Bild 51). Dieser Bruch ist möglicherweise dadurch bedingt, dass in den großen Körnern bzw. Aggregaten ein System von Mikrorissen verläuft (Bild 52 und Bild 53). Diese Risse sind zwar oft durch Quarzneubildungen verheilt, stellen aber offensichtlich eine Gefügeschwachstelle dar.

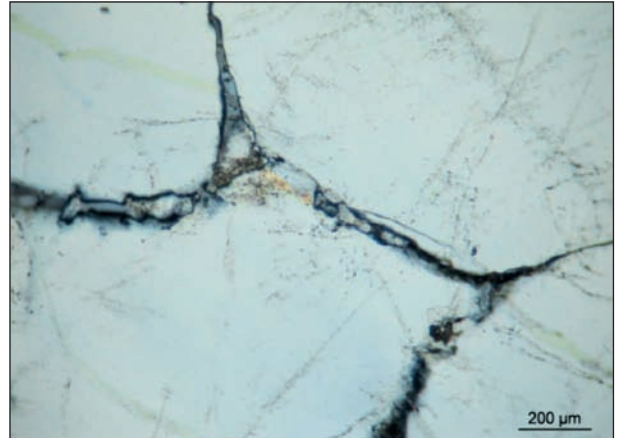
**Feldspäte:** Große, helle Orthoklaskristalle fallen im Handstück immer durch ihre ausgebildete Spaltbarkeit auf (Bild 54). Die Feldspäte insgesamt (Orthoklas und Plagioklas) sind teils klar, teils leicht getrübt (Bild 55), d. h. im Kern teilweise in feinschuppigen Muskovit (= Serizit) umgewandelt. Große Orthoklaskristalle sind meist als Zwillingindividuen ausgebildet (Bild 56), während die Plagioklase (Albit) die für die Mineralart typische Zwillingslamellierung und teilweise einen Zonarbau aufweisen (Bild 57).



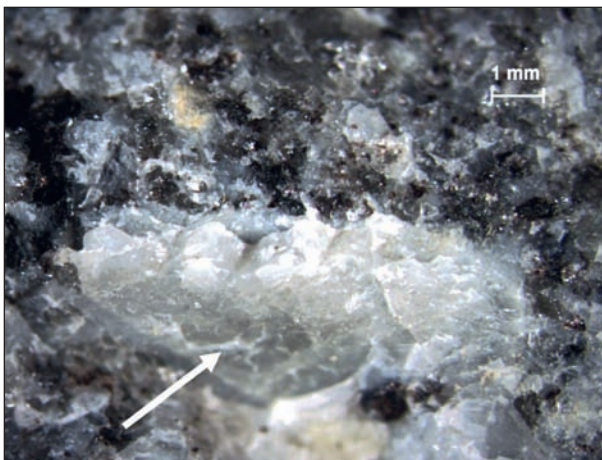
**Bild 51:** Granodiorit-Splitt I, Handstück – Bruchfläche, Pfeil = intern gebrochenes Quarzkorn, Mikrofoto



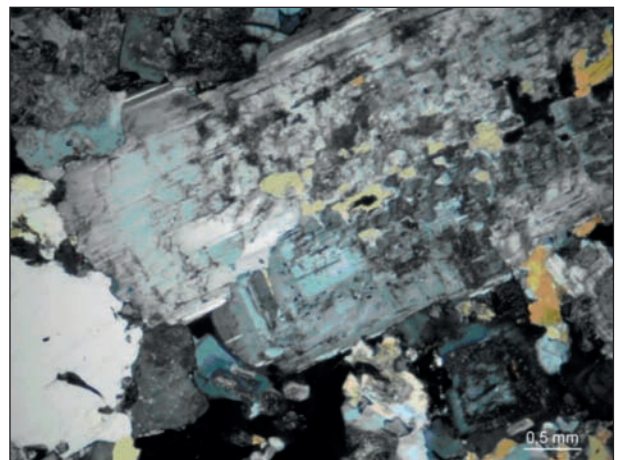
**Bild 52:** Granodiorit-Splitt I, großes Quarzkorn (Bildmitte) mit Mikrorissen, + Pol.



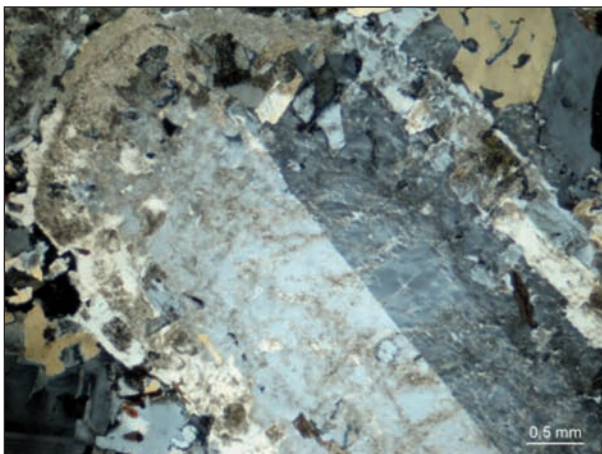
**Bild 53:** Detail aus Bild 52, Mikrorisse im Quarzkorn durch Quarz-Neubildungen verheilt, + Pol.



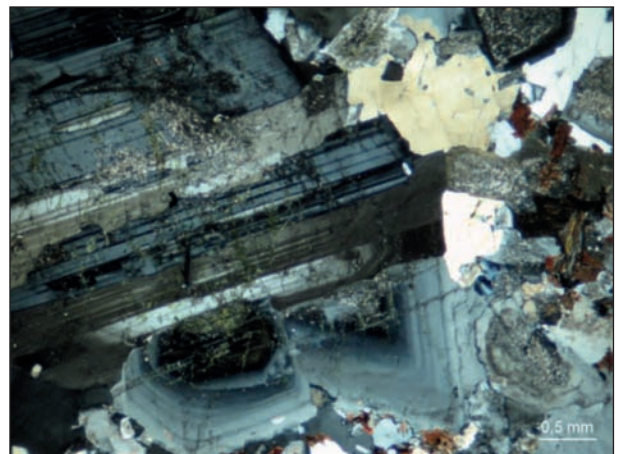
**Bild 54:** Granodiorit-Splitt I, Handstück – Bruchfläche, großer Feldspatkristall mit Bruchfläche nach der Spaltbarkeit (Pfeil), Mikrofoto



**Bild 55:** Granodiorit-Splitt I, Plagioklas-Kristall (Bildmitte) mit Trübung im Kernbereich, + Pol.

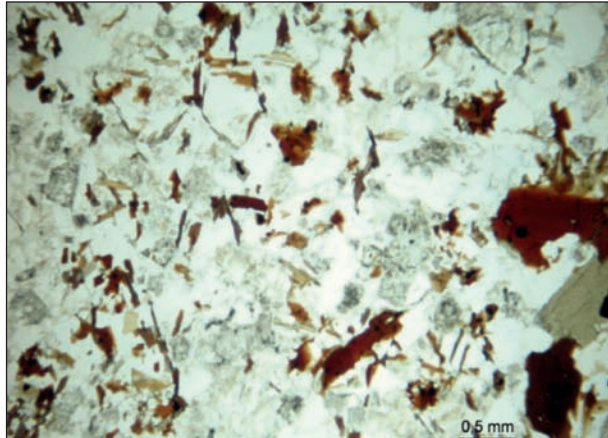


**Bild 56:** Granodiorit-Splitt I, großer Orthoklas-kristall, Zwillingsbildung mit im Bild diagonal verlaufender Zwillingsnaht, + Pol.

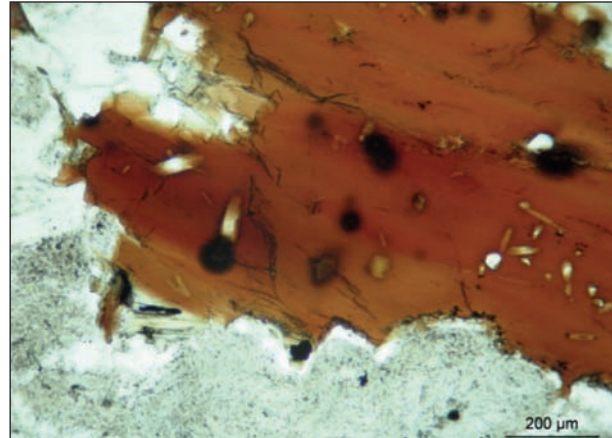


**Bild 57:** Granodiorit-Splitt I, Plagioklaskristalle mit Zwillingslamellen (Bildmitte) und Zonarbau (konzentrische Strukturen darunter), + Pol.





**Bild 58:** Granodiorit-Splitt I, Granodioritgefüge mit gleichmäßig verteilten Glimmermineralen (braune Körner = Biotit), einfach Pol.



**Bild 59:** Granodiorit-Splitt I, Biotitkristalle mit pleochroitische Höfen (dunkle Flecken) um kleine Zirkonkristalle, einfach Pol.

**Biotit:** Die Glimmer sind überwiegend unverwittert und gleichmäßig im Gesteinsgefüge verteilt (Bild 58). Als typisches (für eine anwendungstechnische Beurteilung aber unwichtiges) Merkmal sind pleochroitische Höfe um kleine Zirkonkristall-Einschlüsse ausgebildet (Bild 59).

#### Mineralphasenbestand nach Röntgenbeugung

Da das Material für die XRD – Analyse jeweils der Fraktion 1 ... 2 mm für den Mörteltest entstammt, sind in den Analysenwerten immer alle Gesteinsvarianten enthalten, also auch geringfügig vorhandene Grauwackeanteile als Einschlüsse. Die Tabelle 34 enthält die Ergebnisse der quantitativen XRD – RIETVELD – Analyse. Das Feldspatverhältnis weist für einen typischen Granodiorit etwas geringe Plagioklasanteile auf, sodass die hier untersuchte Lieferkörnung nach dem Mineralbestand zu einem Granit tendiert (DIN EN 12670:2001, Bild 1). Die Muskovitgehalte der Glimmer resultieren aus den Serizitanteilen der getrübbten Feldspäte. Das Feldspatverhältnis weist für einen typischen Granodiorit etwas geringe Plagioklasanteile auf, sodass die hier untersuchte Lieferkörnung nach dem Mineralbestand zu einem Granit tendiert (DIN EN 12670:2001, Bild 1). Die Muskovitgehalte der Glimmer resultieren aus den Serizitanteilen der getrübbten Feldspäte.

Aus petrografischer Sicht ist der Granodiorit-Splitt I im Hinblick auf die Alkalireaktivität als grenzwertig einzustufen. Schließlich sind die Feldspatgehalte zu beachten, deren Alkalien bei Einsatz der Gesteinskörnung im Beton möglicherweise gelöst werden könnten.

Mineralphase	Anteil in M.-%
Quarz	34,2
Plagioklas	35,8
K-Feldspat	22,7
Muskovit	2,8
Biotit	1,5
Chlorit	2,0

**Tab. 34:** Quantitativer Mineralphasenbestand des Granodiorit-Splitt I

#### • Granodiorit-Splitt II (1.4.3, Auswahl FIB)

##### Geologische Situation

Das Granodioritvorkommen des Granodiorit-Splitts II liegt ebenfalls in der geologischen Baueinheit des Lausitzer Granodiorit-Massivs.<sup>12</sup> In der Lagerstätte vom Granodiorit-Splitt II wird der Lausitzer Zweiglimmer-Granodiorit abgebaut. Der Granodiorit ist durch Aufschmelzung älterer Sedimentserien (i. W. Grauwacken) entstanden und wird mit einem Alter zwischen 600 und 550 Mio. Jahren (Zweiglimmer-Granodiorit) angegeben. Nach dem modalen Mineralbestand und der Gesteinsstruktur ist der Granodiorit weitgehend mit Granit- bzw. Granodioritintrusionen magmatischen Ursprungs vergleichbar.

<sup>12</sup> WALTER, R. u. a.: Geologie von Mitteleuropa. Verl. Schweizerbart Stuttgart 1992, S. 561.

### Modaler Mineralbestand und Mikrogefüge

In der Mehrzahl der Fälle ist der Zweiglimmer-Granodiorit gleichkörnig ausgebildet (Bild 61). Als weitere Gefügevariante sind feinkörnige Gesteine mit kleinen Quarzkorngrößen und Glimmernestern vorhanden (Bild 60).

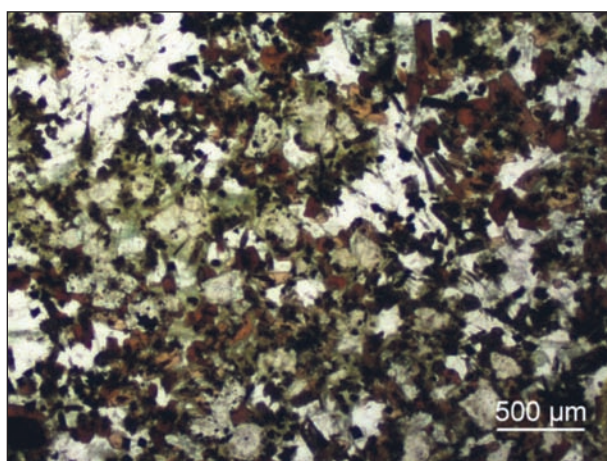
### Haupt- bzw. Einsprenglingsminerale

**Quarz:** Quarz liegt in Form großer Einzelkörner (Bild 63) oder als Anhäufung sehr kleiner Körner (Bild 62) vor. Während die kleinen Quarzkörner überwiegend klar ausgebildet sind, zeigen die großen Körner das Bild der schon erwähnten undulösen Auslöschung (Bild 62), das auf eine leichte Deformation des Kristallgitters hinweist. Die Korngrenzen der großen Quarzkörner verlaufen in der Mehrzahl

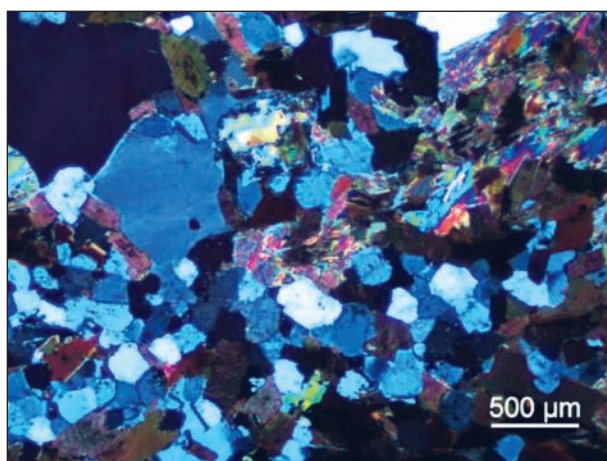
gerade und zeigen daher nur einen sehr geringen Beanspruchungsgrad an.

**Feldspäte:** Die dominierenden Plagioklase liegen z. T. als verzwillingte Kristalle mit typischen engständigen Zwillinglamellen vor. Die in geringer Konzentration vorhandenen K-Feldspäte bilden ebenfalls verzwillingte (Gitter!) Mikroklin-Kristalle (Bild 63). Die Plagioklase sind teilweise serizitisiert.

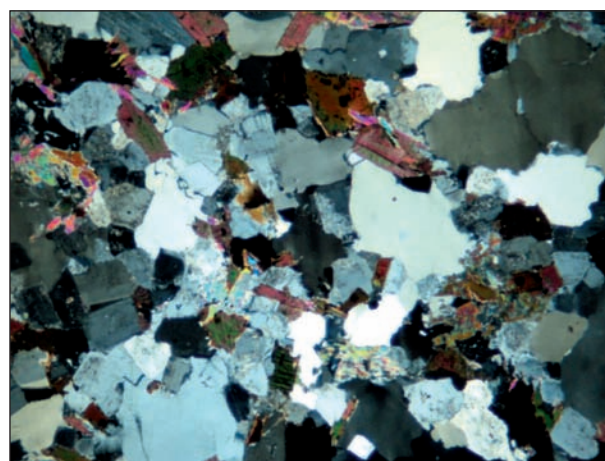
**Glimmer:** Die Glimmer sind teils gleichmäßig verteilt, teils nesterartig angehäuft. Die großen Biotitkristalle fallen durch ihre braune Eigenfarbe auf, sie enthalten feine Rutilnadeln als Einschlüsse (Bild 64). Die kleineren Muskovitkörner sind



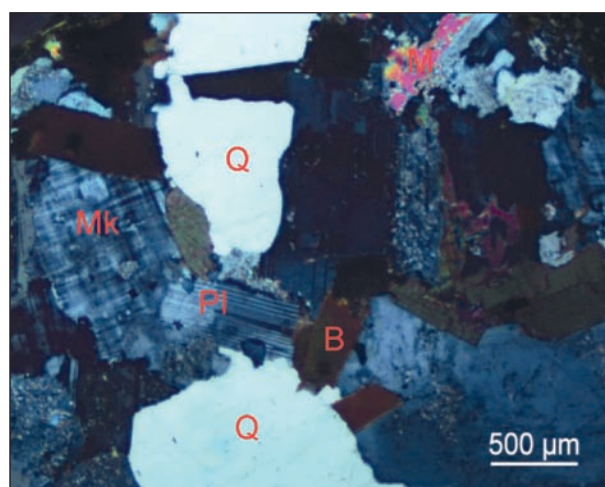
**Bild 60:** Granodiorit-Splitt II, Ausschnitt der feinkörnigen Gefügevariante, einfach Pol.



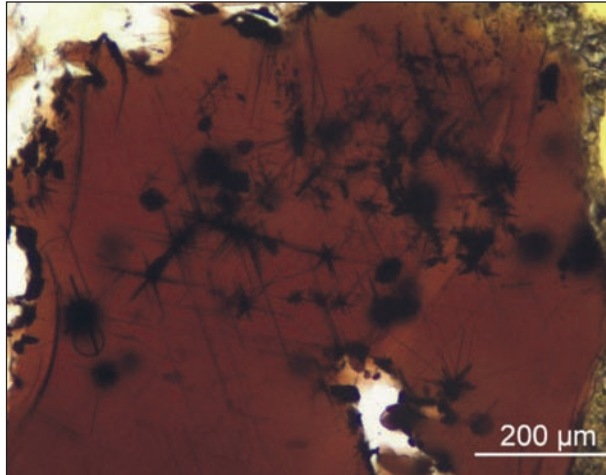
**Bild 62:** Granodiorit-Splitt II, große Quarzkörner (links oben, undulös auslöschend) sowie klar auslöschende, kleine Quarzkörner mit geraden Korngrenzen; leuchtende Interferenzfarben: Muskovit, + Pol.



**Bild 61:** Granodiorit-Splitt II, Gefügeübersicht, + Pol.



**Bild 63:** Granodiorit-Splitt II, Granodiorit-Splittkorn mit großen Quarzkörnern (Q) – unten mit Subkornbildung, Mikroklingitterung eines Kalifeldspates (Mk) neben Plagioklas (Pl – lamellar verzwillingt) sowie Biotit (Bt – dunkle Interferenzfarben) und Muskovit (Mu – bunte Interferenzfarben), + Pol.



**Bild 64:** Großer Biotitkristall mit orientiert eingelagerten Rutilnadelchen („Sagenitstruktur“), einfach Pol.

anhand ihrer typischen kräftigen Interferenzfarben deutlich vom Biotit unterscheidbar (Bild 63). Die Glimmer sind in geringem Maß chloritisiert.

Die in der RIETVELD – Analyse bestimmten Gehalte an Hornblende sind im Dünnschliff nur selten, meist in gröber kristallinen Partien zu beobachten, zeigen dann eine braune, nahezu idiomorphe Hornblende mit typischen Spaltbarkeiten (Bild 65).

Mineralphasenbestand nach Röntgenbeugungsanalyse

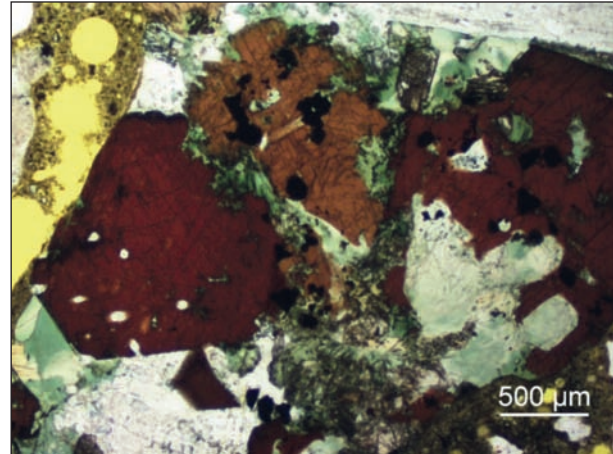
Tabelle 35 enthält die Ergebnisse der quantitativen XRD-RIETVELD-Analyse.

Der Granodiorit-Splitt II ist mit relativ hohen Quarzgehalten im oberen Bereich des Klassifikationschemas für plutonische Magmatite (DIN EN 12670:2001, Bild 2) anzuordnen -tendenziell nahe der Abgrenzung zum Tonalit (granitoides Gestein mit mind. 90 % Plagioklasanteil der Feldspäte).

Aus petrografischer Sicht ist der Granodiorit-Splitt II im Hinblick auf seine Alkalireaktivität zumindest als grenzwertig einzustufen, bedingt durch die auch für saure plutonische Magmatite leicht erhöhten Quarzgehalte sowie deren z. T. recht deutliches undulöses Auslöschen als Ausdruck einer Verzerrung der kristallinen Struktur.

### 2.1.2 Untersuchung der Gesteinskörnungen mit Schnelltests

Zur weiteren Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit der in das Forschungsprogramm einbezogenen



**Bild 65:** Idiomorphe, braune Hornblende, z. T. chloritisiert; der dunkle Kristall links Bildmitte zeigt das für Hornblenden typisches Spaltmuster, einfach Pol.

Mineralphase	Anteil in M.-%
Quarz	37,3
Plagioklas	26,1
Orthoklas	5,6
Biotit	10,5
Muskovit	12,6
Chlorit	6,2
Hornblende	1,3
Rutil	< 0,5

**Tab. 35:** Quantitativer Mineralphasenbestand des Granodiorit-Splitts II

Gesteinskörnungen war vorgesehen, am FIB das Alternativverfahren nach Alkali-Richtlinie [4], Teil 3 durchzuführen. Für beide Schnelltests nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 wird in der Alkali-Richtlinie vorgeschrieben, dass ein Zement CEM I 32,5 R nach DIN EN 197-1 mit einem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent) von  $1,3 \pm 0,1$  M.-% (sog. „Prüfzement“) zu verwenden ist. Nachdem am FIB Ende 2008 die Charge des bisher am FIB verwendeten Prüfzementes mit einem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent) von 1,3 M.-% aufgebraucht war, wurde in Vergleichsversuchen festgestellt, dass das Alternativverfahren unter Verwendung einer zwischenzeitlich gelieferten neuen Charge des Prüfzementes mit einem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent) von 1,2 M.-% keine ausreichend übereinstimmenden Werte im Vergleich zur Durchführung mit der bisher verwendeten Charge des Prüfzementes mit einem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent) von 1,3 M.-% lieferte. Die ebenfalls durchgeführten Vergleichsversuche mit dem Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 zeigten eine

deutlich geringere Abhängigkeit von der eingesetzten Charge des Prüfzements.

Da am FIB Ende 2008 keine ausreichende Menge der Prüfzementcharge mit einem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent) von 1,3 M.-% mehr zur Verfügung stand, wurde die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit der in das Forschungsprogramm einbezogenen Gesteinskörnungen auch am FIB zunächst mit dem Referenzprüfverfahren (Schnellprüfverfahren) durchgeführt.

Für das Schnellprüfverfahren liegt nach gültiger Alkali-Richtlinie, Teil 3 der Dehnungsgrenzwert bei 1,0 mm/m nach einer Lagerung von 13 Tagen bei 80 °C in 1-molarer NaOH-Lösung. Liegt der erreichte Dehnungswert nach 13 Tagen bei  $\leq 1,0$  mm/m, dann kann die geprüfte Gesteinskörnung orientierend<sup>13</sup> nach Alkali-Richtlinie in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (unbedenklich hinsichtlich Alkaliwirkung durch Gesteinskörnungen nach Teil 3) eingestuft werden. Damit ist i. d. R. auch von einer Eignung der Gesteinskörnung für den Bau von Fahrbahndecken auszugehen. Wurde das Schnellprüfverfahren nicht bestanden, ist nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 keine Bewertung und damit keine Einstufung der geprüften Gesteinskörnung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse möglich. Es kann sich nach Alkali-Richtlinie der Betonversuch nach Teil 3 anschließen, um die Gesteinskörnung hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit genauer einordnen zu können. Die Bewertung der Gesteinskörnungen mit dem Schnellprüfverfahren erfolgt 13 Tage nach der Nullmessung auf Grundlage der gemessenen Dehnungen an Mörtelprismen. Die Prismen lagern ab der Nullmessung (2 Tage nach Herstellung) in 1-molarer NaOH-Lösung bei 80 °C. Am FIB werden die Dehnungsmessungen derzeit bis zum 19. Tag weitergeführt, um Tendenzen des Dehnungsverlaufs besser einordnen und bewerten zu können. Die Prüfung von feinen Gesteinskörnungen ist nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 nicht vorgesehen.

Im März 2009 wurde eine weitere Charge Prüfzement für Untersuchungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie geliefert. Der Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent) dieses Prüfzementes liegt bei 1,0 M.-%,<sup>14</sup> weshalb eine Aufdotierung mit  $\text{K}_2\text{SO}_4$  bis zu einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 1,3 M. % – bezogen auf den Zement – vorzunehmen ist.<sup>15</sup> Die daraufhin durchgeführten Vergleichsversuche zeigten, dass das Alternativverfahren nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 unter Verwendung dieser neuen Charge des Prüfzements mit Aufdotierung jetzt ausreichend übereinstimmende Werte im Vergleich zur Durchführung

mit der früheren Charge Prüfzement mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 1,3 M.-% lieferte. Daraufhin wurde zusätzlich auch der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) für alle Gesteinskörnungen durchgeführt.

Die mit dem Mörtelschnelltest geprüften Gesteinskörnungen werden auf Grundlage der gemessenen Dehnung an den Mörtelprismen nach Lagerung bei 70 °C über Wasser bis zum 28. Tag bewertet. Nach den bisher am FIB insgesamt durchgeführten Untersuchungen (Mörtelschnelltests, AKR-Performance-Prüfungen mit FIB-Klimawechselagerung, petrografisch und mineralogische Charakterisierung) lassen sich die erreichten Dehnungen am 28. Tag für Kiese und Splitte grundsätzlich drei Bereichen zuordnen, wobei die Übergänge fließend sind (Tabelle 36). Für feine Gesteinskörnungen (Sande) gelten diese Grenzwerte nicht. Erfahrungsgemäß treten für feine Gesteinskörnungen generell höhere Dehnungen auf, sodass im Einzelfall in Kombination mit den Ergebnissen aus der mineralogischen Untersuchung und den erforderlichenfalls durchgeführten weiteren Untersuchungen (Natronlaugetest nach Alkali-Richtlinie T. 2) entschieden wird.

Die Grenzwerte nach Tabelle 36 wurden am FIB für die Bewertung von Gesteinskörnungen für den Einsatz in Fahrbahndeckenbetonen hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR definiert und gelten sinngemäß auch für alle Anwendungsfälle, bei denen der geplante Beton einer äußeren Alkalizufuhr ausgesetzt ist.

Nach Alkali-Richtlinie ist eine Einstufung der geprüften Gesteinskörnung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (unbedenklich hinsichtlich Alkaliwirkung durch Gesteinskörnungen nach Teil 3) möglich, wenn der erreichte Enddehnwert  $\leq 1,5$  mm/m ist. Damit ist die Gesteinskörnung i. d. R. auch als geeignet für den Bau von Fahrbahndecken anzusehen. Wurde der Mörtelschnelltest nicht bestanden, ist keine Einstufung der geprüften Gesteinskörnung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse (keine Bewertung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) möglich. Nach bisherigen Erfahrungen am FIB müssen diese Ge-

<sup>13</sup> Für eine zertifizierte Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse ist die Durchführung einer Produktionskontrolle nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, Abschnitt 4 erforderlich.

<sup>14</sup> Lt. Begleitschreiben des VDZ zum gelieferten Prüfzement.

<sup>15</sup> Lt. Begleitschreiben des VDZ zum gelieferten Prüfzement müssen je 1.000 g Zement 8,5 g  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (0,85 M.-%) durch Zugabe zum Anmachwasser eingesetzt werden.

Dehnung am 28. Tag nach Ende des Mörtelschnelltests*	Bewertung der untersuchten Gesteinskörnung hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR in Fahrbahndecken aus Beton
$\epsilon \leq 1,5 \text{ mm/m}$	<b>Ausreichend alkaliunempfindlich</b> Gesteinskörnung für Bauvorhaben nach ARS 12/2006 geeignet.
$1,5 < \epsilon \leq 2,0 \text{ mm/m}$	<b>Potenziell alkalireaktiv</b> Gesteinskörnung für Bauvorhaben nach ARS 12/2006 nicht geeignet ohne Betonversuch (AKR-Performance-Prüfung des projektspezifischen Betons mit der Gesteinskörnung).
$\epsilon > 2,0 \text{ mm/m}$	<b>Alkalireaktiv</b> Gesteinskörnung für Bauvorhaben nach ARS 12/2006 nicht geeignet. Betonversuch (AKR-Performance-Prüfung des projektspezifischen Betons mit der Gesteinskörnung) möglich, aber mit steigendem Mörtelschnelltest-Dehnungswert sinkende Wahrscheinlichkeit eines positiven Eignungsnachweises.
* für den Einsatz in Flugbetriebsflächen und Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise (Oberbeton) sind i. d. R. weitere Untersuchungen erforderlich	

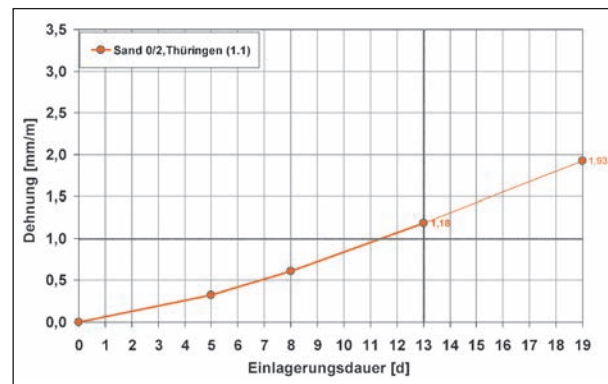
**Tab. 36:** Bewertung für grobe Gesteinskörnungen (Kiese und Splitte) anhand der Dehnungen am 28. Tag (Ende des Mörtelschnelltests)

steinskörnungen nicht grundsätzlich von einer Verwendung in Fahrbahndeckenbetonen ausgeschlossen werden. Der Mörtelschnelltest liefert kurzfristig eine Voreinschätzung hinsichtlich eines möglichen AKR-Schädigungspotenzials der untersuchten Gesteinskörnung und soll als Entscheidungshilfe bei der Auswahl von geeigneten Gesteinskörnungen für die Verwendung in Fahrbahndeckenbetonen dienen. Im Anschluss an den Mörtelschnelltest kann bei Dehnungen  $> 1,5 \text{ mm/m}$  durch einen Betonversuch nach dem Performance-Prinzip (FIB-Klimawechselagerung, Mindestdauer 18 Wochen) nachgewiesen werden, ob mit der vorgesehenen Betonzusammensetzung eine betonschädigende AKR vermieden werden kann [6-11]. Nach derzeitigem Stand haben sich Gesteinskörnungen, die im Mörtelschnelltest Dehnungen oberhalb von  $2,0 \text{ mm/m}$  nach 28 Tagen aufweisen, als überwiegend nicht geeignet für die Herstellung von Fahrbahndeckenbetonen erwiesen. Die Prüfung von feinen Gesteinskörnungen ist nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 nicht vorgesehen.

Am FIB wurde für alle Gesteinskörnungen sowohl das Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) als auch der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) durchgeführt (Bild 66 bis Bild 76).

### Ergebnisse Referenzprüfverfahren (Schnellprüfverfahren)

In Bild 66 bis Bild 71 die Dehnungsverläufe während des Referenzprüfverfahrens für die untersuchten Gesteinskörnungen dargestellt. Es wurde orientierend<sup>16</sup> die daraus folgende Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 vorgenommen.



**Bild 66:** Dehnungsverlauf während des Referenzprüfverfahrens für die ausreichend alkaliunempfindliche feine Gesteinskörnung Sand 0/2, Thüringen (1.1)

In der Alkali-Richtlinie, Teil 3 ist die Prüfung von feinen Gesteinskörnungen nicht vorgesehen. Daher kann auch keine Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse vorgenommen werden.

Erfahrungsgemäß weisen Sande höhere Dehnungen sowohl im Mörtelschnelltest als auch im Schnellprüfverfahren auf als grobe Gesteinskörnungen. Bei der hier untersuchten feinen Gesteinskörnung handelt es sich um eine (mehrfach nachgewiesen) ausreichend alkaliunempfindliche feine Gesteinskörnung, die nach den am FIB vorliegenden Erfahrungen (Alternativverfahren nach Alkali-Richtlinie, mineralogische Untersuchungen, AKR-Performance-Prüfungen von Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken nach alter Standardbauweise) hinsichtlich Vermeidung einer beton-

<sup>16</sup> Für eine zertifizierte Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse ist die Durchführung einer Produktionskontrolle nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, Abschnitt 4 erforderlich.

schädigenden AKR geeignet für den Bau von Fahrbahndecken ist (siehe Bild 66).

Im Ergebnis des Referenzprüfverfahrens (Bild 67) ist eine orientierende Einstufung der als ausreichend alkaliunempfindlich ausgewählten Gesteinskörnungen Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (1.2.1), Rhyolith-Splitt Süddeutschland (1.2.2) und Gabbro-Splitt (1.2.3) in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (unbedenklich hinsichtlich Alkali-reaktion durch Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) möglich.

Für das ausgewählte alkaliempfindliche Festgestein Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (1.3.1) ist im Ergebnis des Referenzprüfverfahrens (Bild 68) keine Einstufung der geprüften Gesteinskörnung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse (keine Bewertung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) möglich.

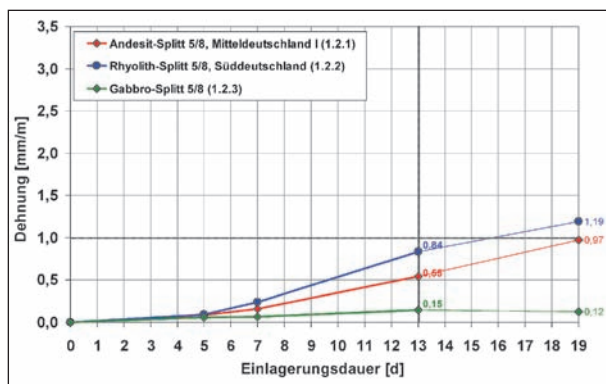
Für das aus früheren Mörtelschnelltestuntersuchungen (Alternativverfahren) als potenziell alkaliempfindlich eingestufte Festgestein Andesit-Splitt

Mitteldeutschland II (1.4.1) ist im Ergebnis des Referenzprüfverfahrens (Bild 69) keine Einstufung der geprüften Gesteinskörnung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse (keine Bewertung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) möglich.

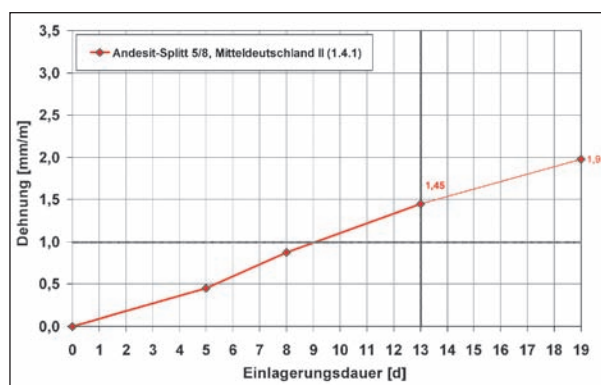
Für das aus einer früheren Liefercharge stammende potenziell alkaliempfindliche Festgestein Granodiorit-Splitt I wurden bei Anlieferung exemplarisch das Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren) an der Lieferkörnung 8/16 (Bild 70) sowie der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren) an allen 3 Lieferkörnungen (2/8, 8/16 und 16/22) durchgeführt.

Im Ergebnis des Referenzprüfverfahrens ist eine orientierende Einstufung der geprüften Gesteinskörnung Granodiorit-Splitt I (Lieferkörnung 8/16) in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (unbedenklich hinsichtlich Alkali-reaktion durch Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) möglich (Bild 70).

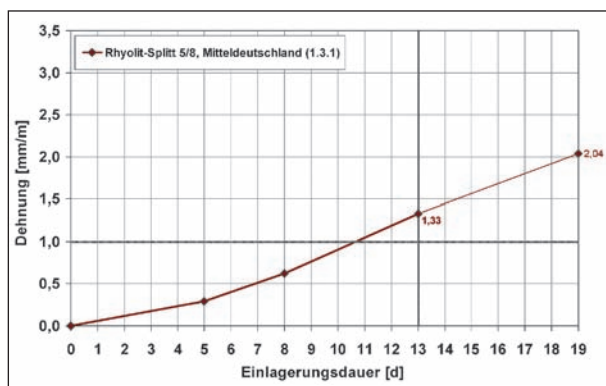
Dieses Ergebnis ist bedenklich vor dem Hintergrund bekannter Schäden an Fahrbahndecken aus Beton<sup>17</sup> (südlicher Berliner Ring, BAB A 10, Fahrtrichtung West, Abschnitt 8), an denen Gesteinskör-



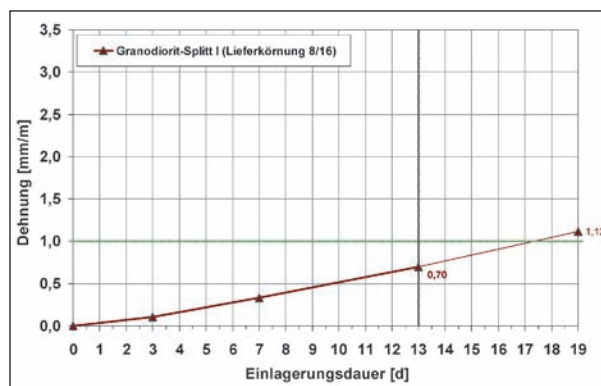
**Bild 67:** Dehnungsverläufe während des Referenzprüfverfahrens für die ausreichend alkaliunempfindlichen Festgesteine Andesit-Splitt 5/8, Mitteldeutschland I (1.2.1), Rhyolith-Splitt 5/8, Süddeutschland (1.2.2) und Gabbro-Splitt 5/8 (1.2.3)



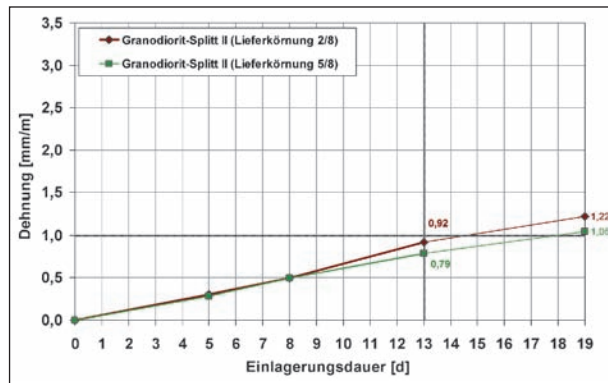
**Bild 69:** Dehnungsverlauf während des Referenzprüfverfahrens für das potenziell alkaliempfindliche Festgestein Andesit-Splitt 5/8, Mitteldeutschland II (1.4.1)



**Bild 68:** Dehnungsverlauf während des Referenzprüfverfahrens für das alkaliempfindliche Festgestein Rhyolith-Splitt 5/8, Mitteldeutschland II (1.3.1)



**Bild 70:** Dehnungsverlauf während des Referenzprüfverfahrens für das potenziell alkaliempfindliche Festgestein Granodiorit-Splitt I (Lieferkörnung 8/16)



**Bild 71:** Dehnungsverläufe während des Referenzprüfverfahrens für das potenziell alkaliempfindliche Festgestein (Granodiorit-Splitt II, Lieferkörnungen 2/8 und 5/8, 1.4.3)

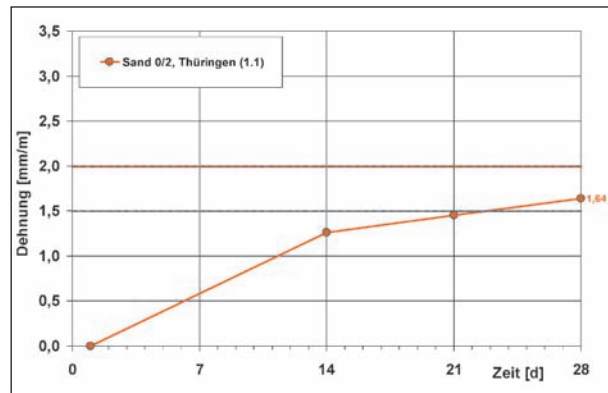
nungen aus diesem Vorkommen an einer betonschädigenden AKR beteiligt waren. Weiterhin haben Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken mit Gesteinskörnungen aus diesem Vorkommen mehrere AKR-Performance-Prüfungen nicht bestanden.

Im Ergebnis des Referenzprüfverfahrens kann ebenfalls eine orientierende Einstufung der geprüften Gesteinskörnungen Granodiorit-Splitt II (Lieferkörnungen 2/8 und 5/8) in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (unbedenklich hinsichtlich Alkali-reaktion durch Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) vorgenommen werden (Bild 71).

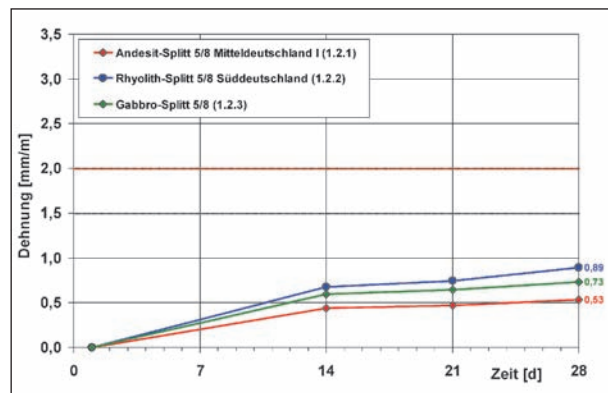
Zusammenfassend ist am Ende des Kapitels 2.1.2 in Tabelle 37 für die untersuchten Gesteinskörnungen eine Gegenüberstellung der erreichten Dehnungswerte und die daraus folgende Einstufung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 der beiden Schnelltests vorgenommen worden.

### Ergebnisse Alternativverfahren (Mörtelschnelltest)

In Bild 72 bis Bild 76 die Dehnungsverläufe während des Alternativverfahrens für die untersuchten Gesteinskörnungen dargestellt. Es wurde die daraus folgende orientierende<sup>18</sup> Einstufung in eine



**Bild 72:** Dehnungsverlauf während des Alternativverfahrens für die ausreichend alkaliunempfindliche feine Gesteinskörnung Sand 0/2, Thüringen (1.1)



**Bild 73:** Dehnungsverläufe während des Alternativverfahrens für die ausreichend alkaliunempfindlichen Festgesteine Andesit-Splitt 5/8, Mitteldeutschland I (1.2.1), Rhyolith-Splitt 5/8, Süddeutschland I (1.2.2) und Gabbro-Splitt 5/8 (1.2.3)

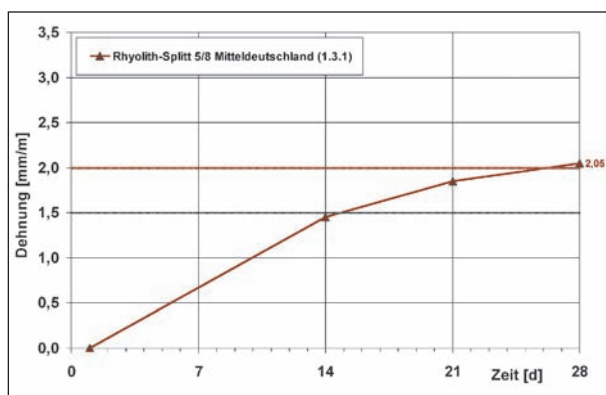
Alkaliempfindlichkeitsklasse nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 vorgenommen und auch entsprechend Tabelle 36 die Eignung für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR beurteilt.

In der Alkali-Richtlinie, Teil 3 ist die Prüfung von feinen Gesteinskörnungen nicht vorgesehen. Daher kann auch keine Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse vorgenommen werden.

Im Ergebnis des Alternativverfahrens ist eine orientierende Einstufung der als ausreichend alkaliunempfindlich ausgewählten Gesteinskörnungen Andesit-Splitt Mitteldeutschland I, Rhyolith-Splitt Süddeutschland und Gabbro-Splitt in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S (unbedenklich hinsichtlich Alkali-reaktion durch Gesteinskörnungen nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) möglich (Bild 73). Die Gesteinskörnungen sind nach Tabelle 36 hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR als geeignet für den Bau von Fahrbahndecken zu bewerten.

<sup>17</sup> FE-Vorhaben 08.182/2005/LRB „Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton – Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR), Phase I: In-situ-Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit/ohne Risse“ (Forscherguppe: Ruhr-Universität Bochum, FIZ Düsseldorf, Bauhaus-Universität Weimar, TU München).

<sup>18</sup> Für eine zertifizierte Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse ist die Durchführung einer Produktionskontrolle nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, Abschnitt 4 erforderlich.



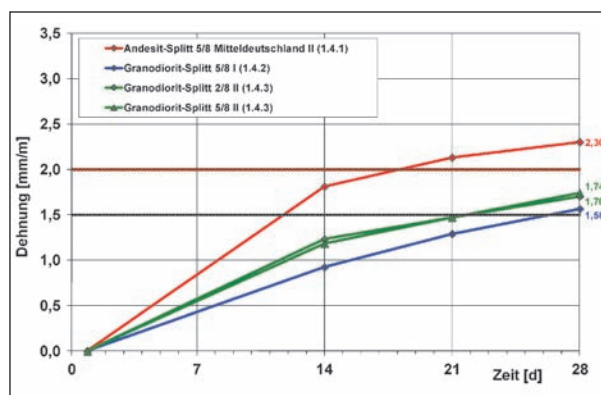
**Bild 74:** Dehnungsverlauf während des Alternativverfahrens für das alkaliempfindliche Festgestein Rhyolith-Splitt 5/8, Mitteldeutschland (1.3.1)

Für das alkaliempfindliche Festgestein Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland ist im Ergebnis des Alternativverfahrens (Bild 74) keine Einstufung der geprüften Gesteinskörnung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse (keine Bewertung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) möglich. Entsprechend Tabelle 36 ist die Gesteinskörnung hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR vorerst als nicht geeignet für den Bau von Fahrbahndecken zu bewerten.

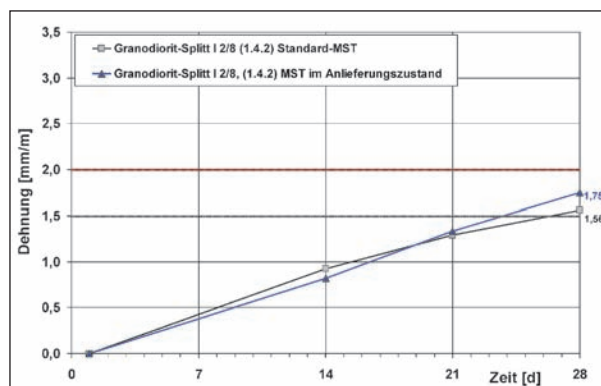
Für die potenziell alkaliempfindlichen Festgesteine Andesit-Splitt Mitteldeutschland II sowie Granodiorit-Splitt I und II (Lieferkörnung 2/8 bzw. 5/8) ist im Ergebnis des Alternativverfahrens (Bild 75) keine Einstufung der geprüften Gesteinskörnung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse (keine Bewertung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) möglich.

Nach Tabelle 36 sind die Granodiorit-Splitt I und II (Lieferkörnung 2/8 bzw. 5/8) als potenziell alkaliaktiv einzustufen und damit vorerst nicht geeignet für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR ohne AKR-Performance-Prüfung des projektspezifischen Betons mit der Gesteinskörnung.

Der Andesit-Splitt Mitteldeutschland II ist dagegen nach Tabelle 36 im Ergebnis des Alternativverfahrens als alkalireaktiv zu bewerten. Auffällig war der hohe Dehnungsendwert (28 d) für den Andesit-Splitt Mitteldeutschland II von 2,3 mm/m. In früheren Untersuchungen am FIB lagen die Dehnungsendwerte (28. Tag) für den Andesit-Splitt Mitteldeutschland II im Bereich zwischen 1,5 und 2,0 mm/m (potenziell alkalireaktiv nach Tabelle 36). Damit bestätigt sich, dass Ergebnisse aus Gesteinskörnungsuntersuchungen prinzipiell nur für die jeweils untersuchten Lieferchargen Gültigkeit haben. Gesteinskörnungen aus natürlichen Vorkommen sind inhomogene Na-



**Bild 75:** Dehnungsverläufe während des Alternativverfahrens für die potenziell alkaliempfindlichen Festgesteine (Andesit-Splitt 5/8 Mitteldeutschland II, 1.4.1; Granodiorit-Splitt I 5/8, 1.4.2; Granodiorit-Splitt II, Lieferkörnungen 2/8 und 5/8, 1.4.3)



**Bild 76:** Dehnungsverläufe während des Alternativverfahrens für das potenziell alkaliempfindliche Festgestein Granodiorit-Splitt I, Vergleich Standard-MST mit MST der Gesteinskörnung im Anlieferungszustand

turprodukte, deren Zusammensetzung sich mit dem weiter fortschreitenden Abbau ändern kann. Daher ist eine allgemeingültige und zeitlich unbegrenzte Aussage zur Alkaliempfindlichkeit der einzelnen Gesteinskörnungen bzw. der Gewinnungsgebiete nicht möglich. In regelmäßigen Zeitabständen (Qualitätskontrolle) bzw. bei Änderung der Abbausituation müssen die Untersuchungen wiederholt und eine erneute Bewertung vorgenommen werden.

Zusätzlich wurde das Alternativverfahren (Mörtelschnelltest) mit geänderter Vorgehensweise durchgeführt, in dem die Lieferkörnung 2/8 des Granodiorit-Splitts I im Anlieferungszustand, d. h. ohne weitere Aufbereitung (brechen, waschen, klassieren in die Prüfkorngruppen 0,5/1 und 1/2) geprüft wurde. Es zeigte sich, dass dabei die Dehnung am Ende des Mörtelschnelltests am 28. Tag höher war als beim regulären Mörtelschnelltest (Standard-MST) mit in Prüfkorngruppen 0,5/1 und 1/2 aufbereiteter Gesteinskörnung (Bild 76). Damit deutet



sich in diesem Fall an, dass die Alkaliaktivität des Granodiorit-Splitts I mit einem Schnelltest zu gering bewertet wird.

Aus diesem Vergleich und weiteren derartigen Untersuchungen, z. B. für verschiedene Lockergesteinskörnungen aus Mitteldeutschland [2, 10,16] ist abzuleiten, dass ein Schnelltest zur Vorbeurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen sinnvoll ist, dass aber für eine endgültige Entscheidung über die Eignung, insbesondere bei Ge-

steinskörnungen mit Dehnungswerten im Grenzbe- reich, eine AKR-Performance-Prüfung durchge- führt werden sollte, um das Verhalten in Betonzu- sammensetzungen zuverlässig beurteilen zu kö- nnen. Im Anschluss an eine bestandene AKR- Performance-Prüfung können Schnelltests dann für die kontinuierliche Überwachung und vereinfachte Beurteilung der Eignung von Gesteinskör- nungen bei weiter fortschreitendem Abbau einge- setzt werden.

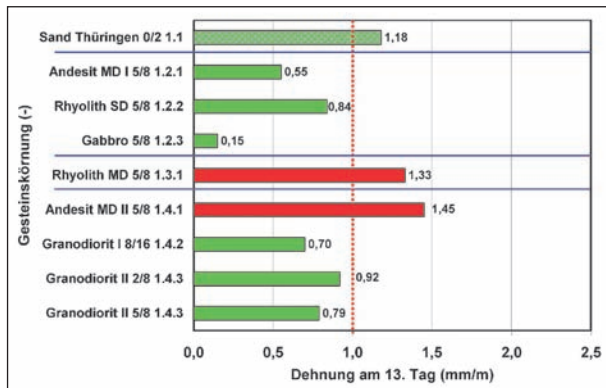


Bild 77: Dehnungswerte nach 13 Tagen Prüfdauer (Ergebnisse Referenzprüfverfahren)

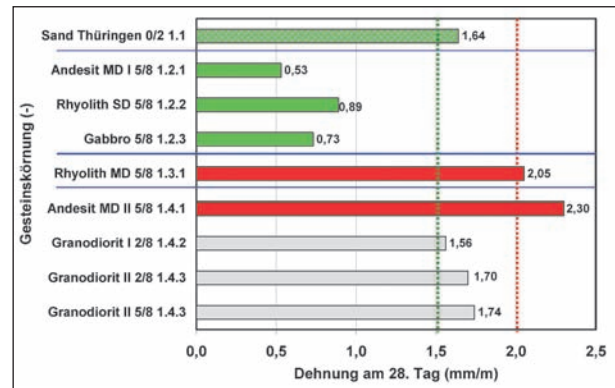
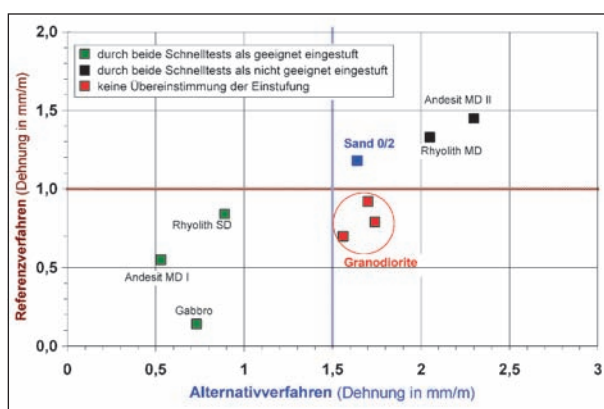


Bild 78: Dehnungswerte nach 28 Tagen Prüfdauer (Ergebnisse Alternativverfahren)

Kennwert/Einstufung Gesteinskörnung	Dehnungswert [mm/m]		orientierende Einstufung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3		Bewertung nach Tabelle 36 (Alternativverfahren)
	Referenzprüfverfahren (Grenzwert Dehnung 1,0 mm/m)	Alternativverfahren (Grenzwert Dehnung 1,5 mm/m)	Referenzprüfverfahren	Alternativverfahren	
1.1 Sand Thüringen 0/2	1,18	1,64	nicht vorgesehen	nicht vorgesehen	ausreichend alkaliunempfindlich <sup>1</sup>
1.2.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (5/8)	0,55	0,53	E I-S	E I-S	ausreichend alkaliunempfindlich
1.2.2 Rhyolith-Splitt Süddeutschland (5/8)	0,84	0,89	E I-S	E I-S	ausreichend alkaliunempfindlich
1.2.3 Gabbro-Splitt (5/8)	0,15	0,73	E I-S	E I-S	ausreichend alkaliunempfindlich
1.3.1 Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (5/8)	1,33	2,05	keine Bewertung möglich	keine Bewertung möglich	alkaliaktiv
1.4.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (5/8)	1,45	2,30	keine Bewertung möglich	keine Bewertung möglich	alkaliaktiv
1.4.2 Granodiorit-Splitt I (8/16 bzw. 2/8)m	0,70	1,56	E I-S	keine Bewertung möglich	potenziell alkaliaktiv
1.4.3 Granodiorit-Splitt II	(2/8)	0,92	E I-S	keine Bewertung möglich	potenziell alkaliaktiv
	(5/8)	0,79	E I-S	keine Bewertung möglich	potenziell alkaliaktiv

<sup>1</sup> Nach bisherigen Erfahrungen des FIB mit der Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Sanden außerhalb des Anwendungsbereiches der Alkali-Richtlinie und des angrenzenden Bereiches

Tab. 37: Zusammenstellung der Ergebnisse der Schnelltest-Untersuchungen



**Bild 79:** Gegenüberstellung der im Schnelltest erreichten Dehnungsendwerte für die 9 untersuchten Gesteinskörnungen

Eine grafische Zusammenstellung der Ergebnisse für beide Schnelltests wurde in Bild 77 und Bild 78 vorgenommen.

In Tabelle 37 werden für die untersuchten Gesteinskörnungen die erreichten Dehnungsendwerte der beiden Schnelltests und die daraus folgende Einstufung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 sowie nach Tabelle 36 gegenübergestellt.

Wie aus Bild 79 ersichtlich ist, wurde im Ergebnis der Schnelltests für 5 von 8 untersuchten groben Gesteinskörnungen eine übereinstimmende Bewertung der Alkaliempfindlichkeit vorgenommen. Für die feine Gesteinskörnung (Sand Thüringen 0/2) wird mit beiden Schnelltests eine überhöhte Alkaliempfindlichkeit angezeigt. Für 3 Gesteinskörnungen (ausschließlich Granodiorit-Splitte) konnte dagegen keine übereinstimmende Bewertung der Alkaliempfindlichkeit vorgenommen werden.

## 2.2 Bestimmung $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent vom Zement

Für das Forschungsprojekt sollte ein CEM I 42,5 N (sd), d. h. ein für den Bau von Fahrbanddecken nach TL Beton-StB 07 geeigneter Zement eingesetzt werden. Dabei wurde ein Wert für das  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von  $0,76 \text{ M.-%} \leq \text{Na}_2\text{O-Äquiv.} \leq 0,80 \text{ M.-%}$  angestrebt. Nach den Erfahrungen des FIB wurde ein Lieferwerk ausgewählt, dessen CEM I 42,5 N (sd) in mehreren, über die letzten 2 Jahre verteilten Lieferchargen diese Bedingungen erfüllt hatte.

Die Bestimmung des  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalents am FIB ergab für die neue Liefercharge des für das For-

schungsprojekt vorgesehenen CEM I 42,5 N (sd) einen Wert von  $0,81 \text{ M.-%}$ ,<sup>19</sup> d. h., der angestrebte Bereich für das  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von  $0,76 \text{ M.-%} \leq \text{Na}_2\text{O-Äquiv.} \leq 0,80 \text{ M.-%}$  wurde geringfügig überschritten. Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber wurde diese Liefercharge für die geplanten Untersuchungen eingesetzt. Somit bilden die Untersuchungen tatsächlich den „worst case“ ab, d. h. bezüglich des Alkaligehalts im Zement liegen die Untersuchungen auf der sicheren Seite.

## 3 AKR-Performance-Prüfung mittels FIB-Klimawechsel-lagerung

### 3.1 Ergebnisse Vorversuche

Am FIB wurden Vorversuche zu folgenden Problemstellungen durchgeführt:

- reproduzierbare und mengengenaue Applikation des Oberflächenverzögerers Sika Rugasol ST,
- Herstellen der Waschbetonoberfläche an den für die AKR-Performance-Prüfung mittels FIB-Klimawechsellagerung üblichen Probekörpern ( $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$ ).

Für die Applikation wurde ein schon länger am FIB angewandtes Sprühsystem aus einer Sprayflasche mit Treibgas und einem Vorratsbehälter aus Glas für den Oberflächenverzögerer Rugasol ST angewandt (Bild 81). Mit diesem System kann ein feiner Sprühnebel erzeugt werden, der eine gleichmäßige und mengengenaue Applikation erlaubt.

Ziel war die Applikation in der vom Hersteller vorgegebenen Menge von  $200 \text{ g/m}^2$  auf der Fertigungsobenseite der Probekörper, die dann auch in der AKR-Performance-Prüfung die mit Taumittel beaufschlagte Fläche ist. Auf jeden Probekörper ist auf die  $100 \times 400 \text{ mm}^2$  große Fertigungsobenseite des Probekörpers eine Menge von  $8 \text{ g}$  gleichmäßig zu applizieren.

Es wurde weiterhin eine abnehmbare Schablone verwendet, mit deren Hilfe vermieden wurde, dass Oberflächenverzögerer an die Stahlform und auf die Waage gelangt. Durch dieses Vorgehen ist über Differenzwägung die Kontrolle der auf die Fertigungsobenseite des Probekörpers aufgetragenen Menge an Oberflächenverzögerer Rugasol ST möglich.

Folgende Vorgehensweise hat sich im Ergebnis der Vorversuche als geeignet erwiesen (Bild 80 bis Bild 82):

<sup>19</sup> Mehrfachbestimmung am FIB.

1. Form mit Frischbeton nach Verdichten auf Waage stellen (Tara – Differenzwägung),
2. Schablone auflegen, Applikation Rugasol ST beginnen,
3. Schablone abnehmen, Auftragsmenge Rugasol ST mittels Waage kontrollieren,
4. bei Notwendigkeit Applikation bis zur vollständigen Auftragsmenge fortsetzen.

Da der Oberflächenverzögerer gleichzeitig als Nachbehandlungsmittel wirkt, wurden die Probekörper nach der Applikation bis zur Bearbeitung (Erzeugen einer Waschbetonoberfläche) in der Form ohne weiteren Verdunstungsschutz in einem temperierten Raum (20 °C, rel. LF ca. 50 %) gelagert.

Weiterhin wurden Vorversuche zum Erzeugen einer geeigneten Waschbetonoberfläche an der Fertigungs- oberseite der Probekörper durchgeführt. Im



**Bild 80:** Form mit verdichtetem Frischbeton auf der Waage mit aufgelegter Schablone



**Bild 81:** Beginn der Applikation von Rugasol ST mit geeignetem Sprühsystem

Ergebnis der Vorversuche stellte sich heraus, dass im Zeitfenster von 18 bis 24 h nach der Applikation unter Verwendung einer Drahtbürste eine hinsichtlich Griffigkeit und Rauftiefe augenscheinlich geeignete Waschbetonoberfläche an der Fertigungs- oberseite der Probekörper erzeugt werden kann.

Für die nachfolgenden AKR-Performance-Prüfungen mittels FIB-Klimawechsellagerung wurde mit der so erprobten Vorgehensweise die Waschbeton- oberfläche an der Fertigungs- oberseite der herge-



**Bild 82:** Fortsetzung der Applikation (vgl. Bild 81)



**Bild 83:** Probekörper (Balken 100 x 100 x 400 mm<sup>3</sup>) mit Waschbetonoberfläche in verschiedenen Stadien der Oberflächenbehandlung

stellten Probekörper erzeugt. Praxisnah erfolgt an diesen Fertigungsoberseiten mit Waschbetonoberfläche während der FIB-Klimawechsellagerung die Beaufschlagung der Probekörper mit Wasser bzw. mit Taumittel-Lösung (Bild 86).



Bild 84: Detail aus Bild 83

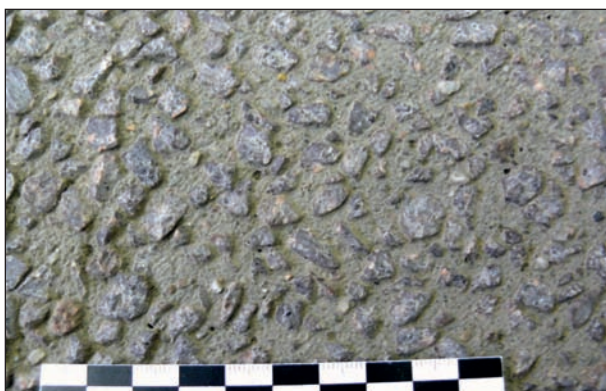


Bild 85: Fertige Waschbetonoberfläche am Probekörper (Balken 100 x 100 x 400 mm<sup>3</sup>) nach Herausbürsten des verzögerten Oberflächenmörtels



Bild 86: Probekörper (Balken 100 x 100 x 400 mm<sup>3</sup>) mit Waschbetonoberfläche, präpariert für die Beaufschlagung der Probekörper mit Wasser bzw. mit Taumittel-Lösung

### 3.2 Beschreibung der Durchführung von AKR-Performance-Prüfungen

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Beton für Außenbauteile werden am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde Klimawechsellagerungen zur zeit-raffenden Simulation mitteleuropäischer Klimabedingungen angewandt. Speziell für das Problem der AKR wurde ein Klimawechsellagerungsprogramm entwickelt, bei dem ein Zyklus aus Trocknungsphase, Nebelphase und Frost-Tau-Wechselphase besteht und 21 Tage dauert (Bild 87). Es sind nach bisherigen Erfahrungen mit Untersuchungen an Fahrbahndeckenbetonen mindestens 8 Zyklen (6 Monate) erforderlich, um die Dauerhaftigkeit eines Betons hinsichtlich einer AKR beurteilen zu können.

Nach jedem Zyklus erfolgt die Messwerterfassung für die Bestimmung von Dehnung und Masseänderung der Probekörper. Flankierend wird eine augenscheinliche Beurteilung der Probekörper hinsichtlich Rissbildung, Ausplatzungen etc. vorgenommen. Für die Messungen werden die Betonprobekörper immer auf 20 °C temperiert, um den Einfluss der Temperatur auf die Dehnungsmessung zu eliminieren. Der Dehnungsgrenzwert für die FIB-Klimawechsellagerung wurde daher auf 0,4 mm/m (anstatt 0,6 mm/m nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie)<sup>20</sup> festgelegt.

Bei der Untersuchung von Betonen, die in der Praxis einer äußeren Alkalizufuhr durch Taumittel (z. B. Betone für Fahrbahndecken) ausgesetzt sind, werden die Betonprobekörper nach einer konservierenden Vorlagerung<sup>21</sup> in Anlehnung an den schwedischen „Slab-Test“ präpariert (s. Bild 86 bis Bild 89). Am 7. Tag nach der Herstellung erfolgt die Einlagerung der präparierten Probekörper in die Klimasimulationskammer und der Beginn der zyklischen FIB-Klimawechsellagerung, bei der die Probekörper während der Nebel- und Frost-Tau-Wechselphase mit einer für den jeweiligen Anwendungsfall festgelegten Prüflösung (Taumittelösung entspre-

<sup>20</sup> Mit der Wärmedehnzahl  $\alpha_T = 0,01 \text{ mm/m} \cdot \text{K}$  und  $\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta_T$  ergibt sich eine thermisch bedingte Dehnung von  $\varepsilon_T = 0,2 \text{ mm/m}$  durch die Temperaturdifferenz  $\Delta_T = 20 \text{ K}$  zwischen 20 °C und 40 °C.

<sup>21</sup> Die Probekörper werden nach  $24 \pm 2 \text{ h}$  entformt, sofort durch Umhüllung mit einer inwendig befeuchteten Kunststoffolie vor Austrocknung geschützt und in einem geschlossenen Raum vor Zugluft und Erschütterungen geschützt bei einer Lufttemperatur von  $20 \pm 2 \text{ °C}$  gelagert.

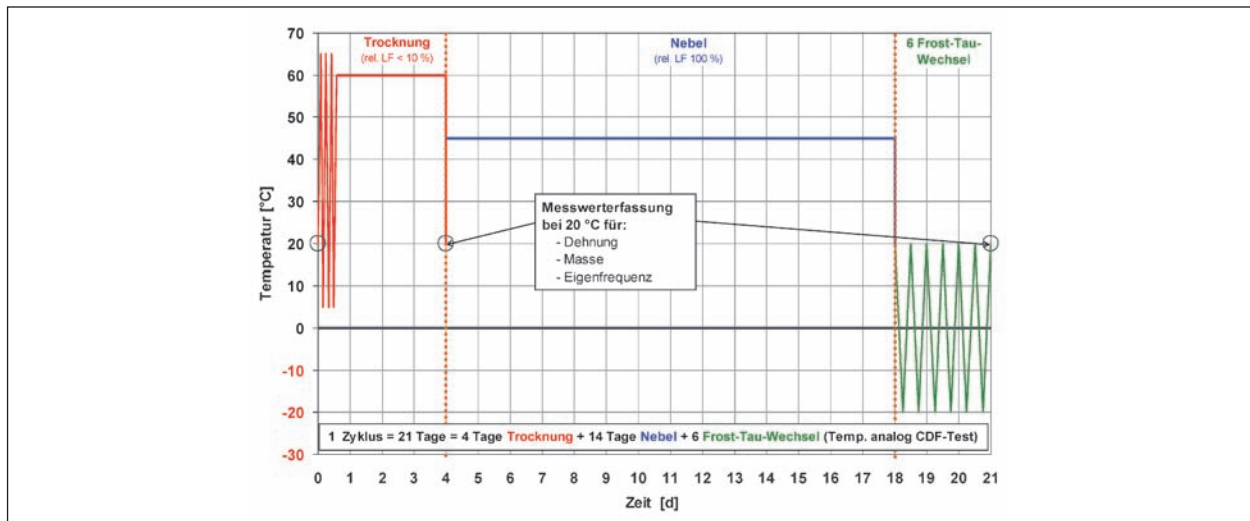


Bild 87: Temperaturverlauf in der Klimasimulationskammer während eines kompletten Zyklus der Klimawechsellagerung



Bild 88: FIB-Klimasimulationskammer (Fa. Feutron)

chend den spezifischen Nutzungsbedingungen) beaufschlagt werden (Bild 88).

Die in den Beton eingebrachten Salze sind hygroskopisch, wodurch die Probekörper auch mehr Wasser aufnehmen. Das hat eine höhere hygri sche Dehnung zur Folge, sodass der Dehnungsgrenzwert im Fall einer Taumittelleinwirkung auf 0,5 mm/m angehoben wurde. Durch den zyklischen Wechsel von Austrocknung und Befeuchtung sowie Auftrag von Taumittellösungen werden im Betongefüge wie in der Praxis Transportvorgänge begünstigt und verstärkt. Zur Feststellung möglicher Gefügeveränderungen und Phasen Neubildungen werden nach Abschluss der FIB-Klimawechsella gerung lichtmikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen mittels Polarisationsmikroskop sowie an Bruchflächen und/oder Anschliffen mittels Raster elektronenmikroskop (REM, ESEM/EDX) durchge-



Bild 89: Betonbalken mit Taumittellösung

führt. Details und Hintergründe zur FIB-Klimawechsella gerung können [2; 6-17] entnommen werden. Nachfolgend wird auf die Besonderheiten innerhalb dieser Untersuchungen eingegangen. Der Winterdienst verwendet für das Straßennetz in Deutschland Taumittel auf NaCl-Basis als Feuchtsalz. Speziell für die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde vereinbarungsgemäß Taumittel auf NaCl-Basis eingesetzt. Zur besseren Bewertung des Einflusses der äußeren Alkalizufuhr werden vergleichend Betonprobekörper mit destilliertem Wasser (Nullserie) beaufschlagt und untersucht.

Die alkalihaltigen Taumittel werden in nachvollziehbaren und mit den Auftragsmengen in der Praxis vergleichbaren Mengen aufgebracht. In der Praxis kann die jährlich aufgebrauchte Taumittelmenge je nach Anzahl der Frosttage erheblich variieren, sodass es schwierig ist, Mittelwerte festzulegen (Bild 90).

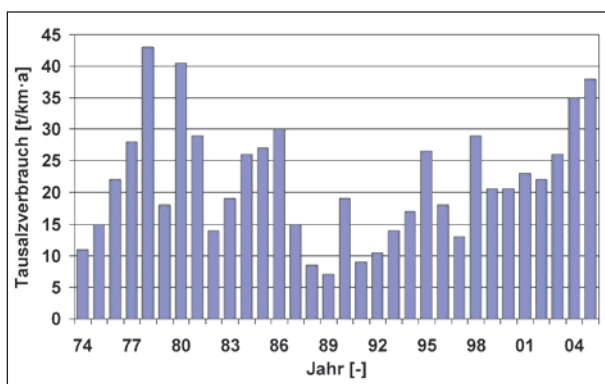


Bild 90: Tausalzverbrauch (NaCl) auf deutschen Autobahnen (BASt, 2006)

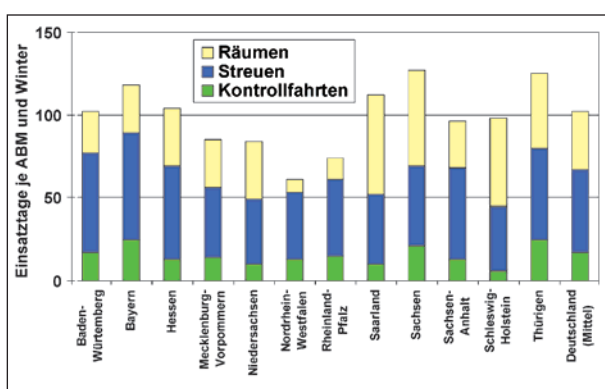


Bild 91: Anzahl der Winterdienst-Einsatztage je Autobahnmeisterei (ROSS et al., 1997)

Außerdem werden Taumittel durch Witterung und Verkehrsbeanspruchung verdünnt und wieder abgetragen und wirken nicht kontinuierlich und auch nicht mit konstanter Konzentration auf den Beton ein. Zusätzlich unterliegt ein Prüfverfahren aber auch immer der Notwendigkeit, den zeitlichen Ablauf realer Schadensabläufe zu verkürzen.

Der Winterdienstumfang auf deutschen Straßen hat eine generelle Größenordnung von durchschnittlich 100 Einsatztagen im Jahr. Hiervon sind über die Hälfte reine Streueinsätze (Bild 91). Pro Streueinsatz wird mit modernen Streufahrzeugen eine Tausalzmenge (Feuchtsalz auf NaCl-Basis) von ca. 10 bis 20 g/m<sup>2</sup> aufgetragen, in Sonderfällen auch mehr.

Aus den Erfahrungen des AiF-Vorhabens 13678 BG „Alkalizufuhr von außen“ werden die Taumittellösungen als 0,6 mol/l konzentrierte Lösungen aufgebracht. Die NaCl-Lösung wurde aus chemisch reinem NaCl und destilliertem Wasser hergestellt.

Bei diesem Vorgehen ergibt sich für die Betonprobekörper (100 × 100 × 400 mm<sup>3</sup>) eine Flächenbelastung mit dem Taumittel während der FIB-Klimawechsellagerung von

NaCl 14,4 g (NaCl)/ 0,04 m<sup>2</sup> = 360 g/m<sup>2</sup> je Zyklus.

Diese Betrachtungen sollen sicherstellen, dass es während der FIB-Klimawechsellagerung in Abhängigkeit vom Anwendungsfall nicht zu einer übermäßigen und praxisfremden Belastung der Betonprobekörper mit den Taumitteln kommt. Ein abschließendes Beispiel soll daher verdeutlichen, wie die gewählte Auftragsmenge im Vergleich zur Praxis zu bewerten ist. Im Winter 2002/2003 wurden für einen Autobahnabschnitt bei Weimar insgesamt 58 Streutage verzeichnet. Pro Auftragsvorgang wurde eine Tausalzmenge (im Wesentlichen NaCl) von etwa 10 bis 20 g pro m<sup>2</sup> Fahrbahn aufgetragen. Legt man die gewählte Flächenbelastung in der FIB-Klimawechsellagerung von 360 g/m<sup>2</sup> je Zyklus auf durchschnittlich 50 Einsatztage pro Winterperiode um, würde das in der Praxis einer aufgetragenen NaCl-Menge von ca. 7 g/m<sup>2</sup> pro Einsatztag entsprechen. Da der verkehrsbedingte Abtrag des aufgetragenen Taumittels auf Autobahnen und Straßen sehr viel intensiver ist als auf den Flugbetriebsflächen, wurde für Untersuchungen an Fahrbahndeckenbetonen eine Taumittelbelastung im unteren möglichen Bereich festgelegt. Unter der Annahme, dass im Durchschnitt ca. 40 g/m<sup>2</sup> je Einsatztag (z. B. zwei Einsätze mit je 20 g/m<sup>2</sup>) aufgebracht werden, ergibt sich, dass in den erforderlichen 8 Zyklen in der FIB-Klimawechsellagerung in etwa so viel Taumittel (NaCl) aufgebracht wird, wie im Mittel während einer Winterperiode auf Autobahnen.

Ein einfacher Zusammenhang zwischen der Zyklenzahl in der FIB-Klimawechsellagerung und einem äquivalenten Zeitraum in der Praxis ist nicht ohne weiteres herstellbar, da auch eine Verifizierung durch Praxiserfahrungen bisher nur eingeschränkt möglich ist. Für Fahrbahndeckenbetone (Taumittel NaCl) liegt inzwischen aber eine erste Verifizierung der Ergebnisse aus der FIB-Klimawechsellagerung mit Praxiserfahrungen vor [16-18].

Mit der FIB-Klimawechsellagerung wurde das aus der Betonzusammensetzung resultierende und damit maßgebliche AKR-Schädigungspotenzial unter möglichst realistischen Umwelteinflüssen (wechselnde klimatische Bedingungen, äußere Alkalizufuhr) untersucht. Die Betone selbst werden dabei unter idealen Bedingungen im Labor hergestellt, d. h., sie sind sachgerecht zusammengesetzt und hergestellt, ausreichend nachbehandelt und nicht durch thermische, hygri-sche oder mechanisch/dynamische Beanspruchungen vorgeschädigt.

dig. Sowohl die tatsächlichen Herstellungsbedingungen (Verarbeitung, Nachbehandlung, Witte- rung) als auch die Nutzungsbedingungen (Zeitraum zwischen Herstellung und Verkehrsfreigabe, Intensität des Winterdienstes, Vorschädigung durch Ver- kehrsbelastung, Intensität der Fugenpflege, Funk- tion der Wasserabführung etc.) spielen für einen möglichen Schadensbeginn bzw. -fortschritt eine nicht zu unterschätzende Rolle, können und sollen aber im Rahmen einer AKR-Performance-Prüfung nicht erfasst werden.

### 3.3 Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen

#### 3.3.1 Herstellung der Probekörper für die AKR-Performance-Prüfungen

Alle notwendigen Vorarbeiten (Bestimmung Was- seraufnahme und Kornrohdichte der Gesteinskör- nungen, Reindichte Zement) für die Durchführung der AKR-Performance-Prüfung wurden nach Anlie- ferung der Gesteinskörnungen durchgeführt. Für alle Betonzusammensetzungen mit den ausge- wählten Gesteinskörnungen wurden die AKR-Per- formance-Prüfungen nach dem 12. Zyklus der FIB- Klimawechselagerung beendet.

Auf Wunsch des Auftraggebers (BAST) wurde eine zusätzliche AKR-Performance-Prüfung einer Be- tonzusammensetzung mit der Gesteinskörnung

Granodiorit-Splitt II (1.4.3, Lieferkörnung 2/8) in den Versuchsplan aufgenommen, um zu klären, ob der in der Baupraxis häufig vorgenommene Einsatz der Splittkörnung 2/8 statt 5/8 einen Einfluss hinsicht- lich AKR auf die Dauerhaftigkeit hat.

Zur Herstellung der Betonprobekörper wurden je Betonzusammensetzung 50 l Frischbeton in einem Labormischer (ZZ 75 HE, Zyklus) angemischt.<sup>22</sup> Die Frischbetonkennwerte (Tabelle 46) wurden ca. 10-15 min nach Mischende ermittelt. Die nach Vor- versuchen zur Einstellung des erforderlichen LP- Gehaltes ermittelten 8 Betonzusammensetzungen sind in Tabelle 38 bis Tabelle 46 zusammengestellt.

Die Oberfläche der Betonprobekörper für den Ober- beton wurde als Waschbetonoberfläche ausgeführt. Dazu wurde entsprechend der Vorversuche etwa 30 Minuten nach Mischende ein praxisüblicher Oberflächenverzögerer mit Nachbehandlungsmittel (Rugasol® ST, Sika) auf die Betonoberflächen auf- gesprüht. Nach der empfohlenen Applikation von 200 g/m<sup>2</sup> des Produktes verblieb der Beton ohne weiteren Verdunstungsschutz für ca. 24 Stunden bei 20 °C in den Formen. Anschließend wurde der

<sup>22</sup> (1) Trockene Gesteinskörnungen in den Mischer, (2) Start Mischvorgang und Zugabe 1/3 Zugabewasser + spezifischer Saugwasseranteil bei Mischdauer von 20 s, (3) 8 min War- tezeit, (4) Zugabe Zement, (5) Start Mischvorgang und Zu- gabe des restlichen Wassers + LP-Bildner bei Mischdauer von 60 s.

Ausgangsstoffe	Art/Herkunft	Fraktion	Anteil	Dichte	Rezeptur für 1 m <sup>3</sup>		Rezeptur für 50 l	
				ρ	m	V	m	V
[-]	[-]	[-]	[Vol.-%]	kg/dm <sup>3</sup>	[kg]	[l]	[g]	[l]
Gesteinskörnung	Sand, Thüringen	0/2	30,0	2,72	511	188	<b>25.530</b>	9,386
	Andesit-Splitt Mitteldeutschland I	5/8	70,0	2,64	1.156	438	<b>57.819</b>	21,901
	Gesamt	0/8	100,0	2,66	1.667	626	83.349	31,287
Zement	<b>CEM I 42,5 N (sd)</b> , Na <sub>2</sub> O-Äquivalent: 0,81 M.-%			3,125	430	138	<b>21.500</b>	6,880
Zugabewasser	Leitungswasser			1,00	181	181	<b>9.030</b>	9,030
LP (LPS-V, Sika)	Dosierung [% v. Zement]:		<b>0,250</b>	1,02	1	1	<b>53,750</b>	0,053
NB/VZ (Rugasol ST)	Dosierung [g/m <sup>2</sup> ):		<b>200</b>	1,01	---	---	8,00	je Balken
Luftporen	Ansatz Luftgehalt im Frischbeton			0	0	55	0	2,750
<b>Summe</b>					<b>2.279</b>	<b>1.000</b>	<b>113.933</b>	<b>50,000</b>
w/z-Wert	[-]			<b>0,42</b>				
Frischbetonrohdichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]			<b>2,28</b>				

Tab. 38: Betonzusammensetzung mit Andesit-Splitt 5/8 Mitteldeutschland I (1.2.1)

nicht erhärtete Oberflächenmörtel unter Verwendung einer Drahtbürste entfernt (Bild 85). Die weitere Handhabung und Präparation der Probekörper erfolgte analog der üblichen Vorgehensweise (Bild 89). Die erhärteten Probekörper wurden entformt und für 6 Tage luftdicht in Folie verpackt bei 20 °C vorgelagert und für die FIB-Klimawechselagerung präpariert. Die FIB-Klimawechselagerung unter

Einwirkung der NaCl-Prüflösung und Wasser begann im Betonalter von 7 Tagen und wurde nach insgesamt 12 Zyklen beendet. Die Beurteilung des AKR-Schädigungspotenzials erfolgt auf Grundlage der Dehnungen nach 8 Zyklen, anhand der Dehnungsanstiege zwischen 6. und 8. Zyklus und in Kombination mit den mikroskopischen Untersuchungen nach dem 12. Zyklus.

Ausgangsstoffe	Art/Herkunft	Fraktion	Anteil	Dichte	Rezeptur für 1 m <sup>3</sup>		Rezeptur für 50 l	
				$\rho$	m	V	m	V
[-]	[-]	[-]	[Vol.-%]	kg/dm <sup>3</sup>	[kg]	[l]	[g]	[l]
Gesteinskörnung	Sand, Thüringen	0/2	30,0	2,72	511	188	<b>25.530</b>	9,386
	Rhyolith-Splitt Süddeutschland	5/8	70,0	2,55	1.117	438	<b>55.848</b>	21,901
	Gesamt	0/8	100,0	2,60	1.628	626	81.378	31,287
Zement	<b>CEM I 42,5 N (sd)</b> , Na <sub>2</sub> O-Äquivalent: 0,81 M.-%			3,125	430	138	<b>21.500</b>	6,880
Zugabewasser	Leitungswasser			1,00	181	181	<b>9.030</b>	9,030
LP (LPS-V, Sika)	Dosierung [% v. Zement]:	<b>0,250</b>		1,02	1	1	<b>53.750</b>	0,053
NB/VZ (Rugasol ST)	Dosierung [g/m <sup>2</sup> ]:	<b>200</b>		1,01	---	---	8,00	je Balken
Luftporen	Ansatz Luftgehalt im Frischbeton			0	0	55	0	2,750
<b>Summe</b>					<b>2.239</b>	<b>1.000</b>	<b>111.962</b>	<b>50,000</b>
w/z-Wert	[-]			<b>0,42</b>				
Frischbetonrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]			<b>2,24</b>				

Tab. 39: Betonzusammensetzung mit Rhyolith-Splitt 5/8 Süddeutschland (1.2.2)

Ausgangsstoffe	Art/Herkunft	Fraktion	Anteil	Dichte	Rezeptur für 1 m <sup>3</sup>		Rezeptur für 50 l	
				$\rho$	m	V	m	V
[-]	[-]	[-]	[Vol.-%]	kg/dm <sup>3</sup>	[kg]	[l]	[g]	[l]
Gesteinskörnung	Sand, Thüringen	0/2	30,0	2,72	511	188	<b>25.525</b>	9,384
	Gabbro-Splitt	5/8	70,0	2,90	1.270	438	<b>63.500</b>	21,897
	Gesamt	0/8	100,0	2,85	1.781	626	89.026	31,281
Zement	<b>CEM I 42,5 N (sd)</b> , Na <sub>2</sub> O-Äquivalent: 0,81 M.-%			3,125	430	138	<b>21.500</b>	6,880
Zugabewasser	Leitungswasser			1,00	181	181	<b>9.030</b>	9,030
LP (LPS-V, Sika)	Dosierung [% v. Zement]:	<b>0,280</b>		1,02	1	1	<b>60.200</b>	0,059
NB/VZ (Rugasol ST)	Dosierung [g/m <sup>2</sup> ]:	<b>200</b>		1,01	---	---	8,00	je Balken
Luftporen	Ansatz Luftgehalt im Frischbeton			0	0	55	0	2,750
<b>Summe</b>					<b>2.392</b>	<b>1.000</b>	<b>119.616</b>	<b>50,000</b>
w/z-Wert	[-]			<b>0,42</b>				
Frischbetonrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]			<b>2,39</b>				

Tab. 40: Betonzusammensetzung mit Gabbro-Splitt 5/8 (1.2.3)



Ausgangsstoffe	Art/Herkunft	Fraktion	Anteil	Dichte	Rezeptur für 1 m <sup>3</sup>		Rezeptur für 50 l	
				$\rho$	m	V	m	V
[-]	[-]	[-]	[Vol.-%]	kg/dm <sup>3</sup>	[kg]	[l]	[g]	[l]
Gesteinskörnung	Sand, Thüringen	0/2	30,0	2,72	511	188	<b>25.539</b>	9,389
	Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland	5/8	70,0	2,57	1.126	438	<b>56.305</b>	21,908
	Gesamt	0/8	100,0	2,62	1.637	626	81.844	31,298
Zement	<b>CEM I 42,5 N (sd)</b> , Na <sub>2</sub> O-Äquivalent: 0,81 M.-%			3,125	430	138	<b>21.500</b>	6,880
Zugabewasser	Leitungswasser			1,00	181	181	<b>9.030</b>	9,030
LP (LPS-V, Sika)	Dosierung [% v. Zement]:	<b>0,200</b>		1,02	1	1	<b>43.000</b>	0,042
NB/VZ (Rugasol ST)	Dosierung [g/m <sup>2</sup> ):	<b>200</b>		1,01	---	---	8,00	je Balken
Luftporen	Ansatz Luftgehalt im Frischbeton			0	0	55	0	2,750
<b>Summe</b>					<b>2.248</b>	<b>1.000</b>	<b>112.417</b>	<b>50,000</b>
w/z-Wert	[-]			<b>0,42</b>				
Frischbetonrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]			<b>2,25</b>				

Tab. 41: Betonzusammensetzung mit Rhyolith-Splitt 5/8 Mitteldeutschland (1.3.1)

Ausgangsstoffe	Art/Herkunft	Fraktion	Anteil	Dichte	Rezeptur für 1 m <sup>3</sup>		Rezeptur für 50 l	
				$\rho$	m	V	m	V
[-]	[-]	[-]	[Vol.-%]	kg/dm <sup>3</sup>	[kg]	[l]	[g]	[l]
Gesteinskörnung	Sand, Thüringen	0/2	30,0	2,72	511	188	<b>25.534</b>	9,387
	Andesit-Splitt Mitteldeutschland II	5/8	70,0	2,69	1.178	438	<b>58.922</b>	21,904
	Gesamt	0/8	100,0	2,70	1.689	626	84.456	31,292
Zement	<b>CEM I 42,5 N (sd)</b> , Na <sub>2</sub> O-Äquivalent: 0,81 M.-%			3,125	430	138	<b>21.500</b>	6,880
Zugabewasser	Leitungswasser			1,00	181	181	<b>9.030</b>	9,030
LP (LPS-V, Sika)	Dosierung [% v. Zement]:	<b>0,230</b>		1,02	1	1	<b>49.450</b>	0,048
NB/VZ (Rugasol ST)	Dosierung [g/m <sup>2</sup> ):	<b>200</b>		1,01	---	---	8,00	je Balken
Luftporen	Ansatz Luftgehalt im Frischbeton			0	0	55	0	2,750
<b>Summe</b>					<b>2.301</b>	<b>1.000</b>	<b>115.035</b>	<b>50,000</b>
w/z-Wert	[-]			<b>0,42</b>				
Frischbetonrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]			<b>2,30</b>				

Tab. 42: Betonzusammensetzung mit Andesit-Splitt 5/8 Mitteldeutschland II (1.4.1)

Ausgangsstoffe	Art/Herkunft	Fraktion	Anteil	Dichte	Rezeptur für 1 m <sup>3</sup>		Rezeptur für 50 l	
				ρ	m	V	m	V
[-]	[-]	[-]	[Vol.-%]	kg/dm <sup>3</sup>	[kg]	[l]	[g]	[l]
Gesteinskörnung	Sand, Thüringen	0/2	30,0	2,72	511	188	<b>25.536</b>	9,388
	Granodiorit-Splitt I	5/8	70,0	2,58	1.130	438	<b>56.516</b>	21,906
	Gesamt	0/8	100,0	2,62	1.641	626	82.052	31,294
Zement	<b>CEM I 42,5 N (sd)</b> , Na <sub>2</sub> O-Äquivalent: 0,81 M.-%			3,125	430	138	<b>21.500</b>	6,880
Zugabewasser	Leitungswasser			1,00	181	181	<b>9.030</b>	9,030
LP (LPS-V, Sika)	Dosierung [% v. Zement]:	<b>0,220</b>		1,02	1	1	<b>47,300</b>	0,046
NB/VZ (Rugasol ST)	Dosierung [g/m <sup>2</sup> ):	<b>200</b>		1,01	---	---	8,00	je Balken
Luftporen	Ansatz Luftgehalt im Frischbeton			0	0	55	0	2,750
<b>Summe</b>					<b>2.253</b>	<b>1.000</b>	<b>112.629</b>	<b>50,000</b>
w/z-Wert	[-]			<b>0,42</b>				
Frischbetonrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]			<b>2,25</b>				

Tab. 43: Betonzusammensetzung mit Granodiorit-Splitt I 5/8 (1.4.2)

Ausgangsstoffe	Art/Herkunft	Fraktion	Anteil	Dichte	Rezeptur für 1 m <sup>3</sup>		Rezeptur für 50 l	
				ρ	m	V	m	V
[-]	[-]	[-]	[Vol.-%]	kg/dm <sup>3</sup>	[kg]	[l]	[g]	[l]
Gesteinskörnung	Sand, Thüringen	0/2	30,0	2,72	511	188	<b>25.530</b>	9,386
	Granodiorit-Splitt II	5/8	70,0	2,73	1.196	438	<b>59.790</b>	21,901
	Gesamt	0/8	100,0	2,73	1.706	626	85.320	31,287
Zement	<b>CEM I 42,5 N (sd)</b> , Na <sub>2</sub> O-Äquivalent: 0,81 M.-%			3,125	430	138	<b>21.500</b>	6,880
Zugabewasser	Leitungswasser			1,00	181	181	<b>9.030</b>	9,030
LP (LPS-V, Sika)	Dosierung [% v. Zement]:	<b>0,250</b>		1,02	1	1	<b>53,750</b>	0,053
NB/VZ (Rugasol ST)	Dosierung [g/m <sup>2</sup> ):	<b>200</b>		1,01	---	---	8,00	je Balken
Luftporen	Ansatz Luftgehalt im Frischbeton			0	0	55	0	2,750
<b>Summe</b>					<b>2.318</b>	<b>1.000</b>	<b>115.904</b>	<b>50,000</b>
w/z-Wert	[-]			<b>0,42</b>				
Frischbetonrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]			<b>2,32</b>				

Tab. 44: Betonzusammensetzung mit Granodiorit-Splitt II 2/8 (1.4.3-a)

Ausgangsstoffe	Art/Herkunft	Fraktion	Anteil	Dichte	Rezeptur für 1 m <sup>3</sup>		Rezeptur für 50 l	
				$\rho$	m	V	m	V
[-]	[-]	[-]	[Vol.-%]	kg/dm <sup>3</sup>	[kg]	[l]	[g]	[l]
Gesteinskörnung	Sand, Thüringen	0/2	30,0	2,72	511	188	<b>25.531</b>	9,387
	Granodiorit-Splitt II	5/8	70,0	2,73	1.196	438	<b>59.792</b>	21,902
	Gesamt	0/8	100,0	2,73	1.706	626	85.323	31,288
Zement	<b>CEM I 42,5 N (sd)</b> , Na <sub>2</sub> O-Äquivalent: 0,81 M.-%			3,125	430	138	<b>21.500</b>	6,880
Zugabewasser	Leitungswasser			1,00	181	181	<b>9.030</b>	9,030
LP (LPS-V, Sika)	Dosierung [% v. Zement]:	<b>0,245</b>		1,02	1	1	<b>52,675</b>	0,052
NB/VZ (Rugasol ST)	Dosierung [g/m <sup>2</sup> ):	<b>200</b>		1,01	---	---	8,00	je Balken
Luftporen	Ansatz Luftgehalt im Frischbeton			0	0	55	0	2,750
<b>Summe</b>					<b>2.318</b>	<b>1.000</b>	<b>115.906</b>	<b>50,000</b>
w/z-Wert	[-]			<b>0,42</b>				
Frischbetonrohddichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]			<b>2,32</b>				

Tab. 45: Betonzusammensetzung mit Granodiorit-Splitt II 5/8 (1.4.3-b)

Betonzusammensetzung mit ...	Kennwert	Frischbetonluftgehalt [Vol.-%]	Frischbetonrohddichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Konsistenz [-]
	1.2.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (5/8)		5,5	2,29
1.2.2 Rhyolith-Splitt Süddeutschland (5/8)		6,0	2,23	C1 (1,26)
1.2.3 Gabbro-Splitt (5/8)		6,1	2,37	C1 (1,31)
1.3.1 Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (5/8)		5,8	2,24	C1 (1,32)
1.4.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (5/8)		5,7	2,30	C1 (1,29)
1.4.2 Granodiorit-Splitt I (5/8)		5,6	2,27	C1 (1,33)
1.4.3 Granodiorit-Splitt II	(2/8)	5,5	2,30	C1 (1,36)
	(5/8)	6,1	2,29	C1 (1,34)

Tab. 46: Frischbetonkennwerte der 8 Betonzusammensetzungen

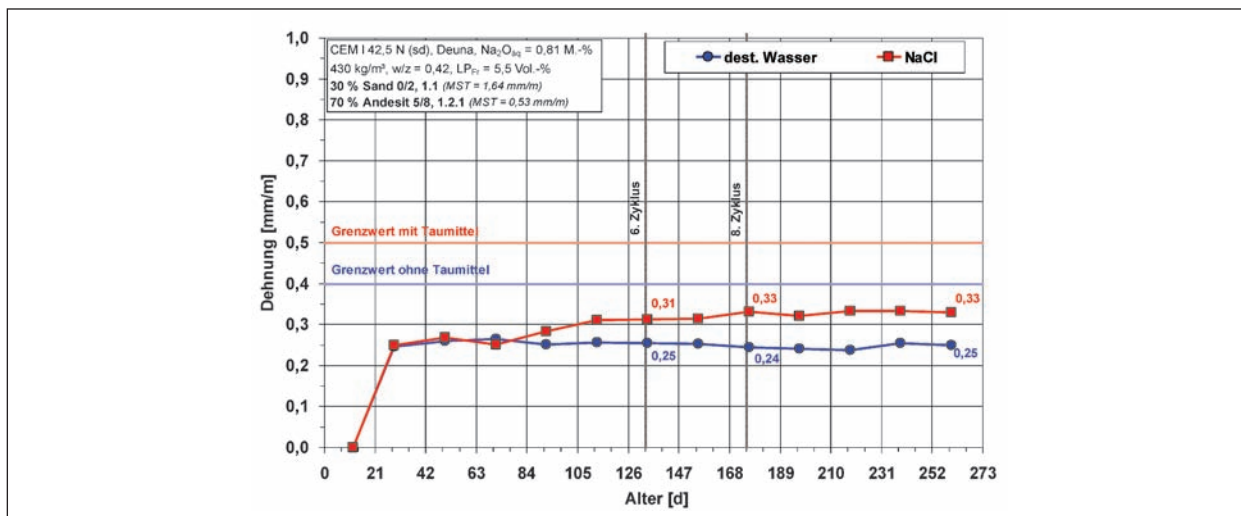
### 3.3.2 Dehnungsverläufe während der AKR-Performance-Prüfungen

In Bild 92 bis Bild 99 der jeweilige Dehnungsverlauf während der AKR-Performance-Prüfungen mittels FIB-Klimawechsellagerung dargestellt.

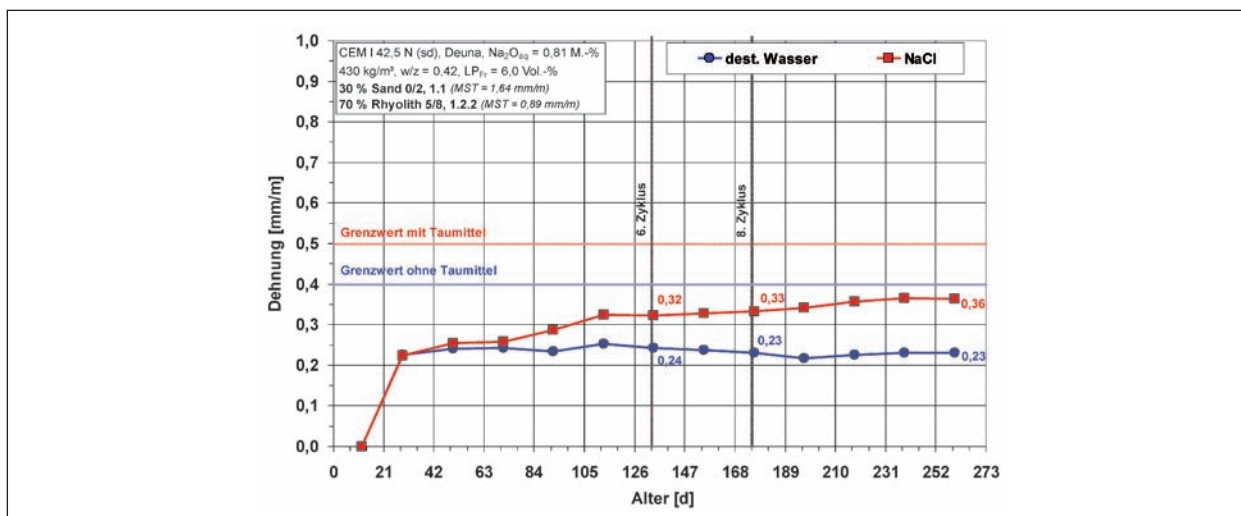
Die Dehnungskurven der 3 Betonzusammensetzungen, die nach Kapitel 2.1 ausschließlich ausreichend alkaliunempfindliche Gesteinskörnungen enthalten (Bild 92 bis Bild 94), liegen bis zum 12. Zyklus der FIB-Klimawechsellagerung deutlich unterhalb der Dehnungsgrenzwerte.<sup>23</sup>

Dabei verlaufen für alle 3 Betonzusammensetzungen die Dehnungskurven der mit Taumittel beaufschlagten Probekörper nahezu parallel zu den Dehnungskurven der mit Wasser beaufschlagten Probekörper (Referenzserie). Die jeweilige Differenz zwischen beiden Dehnungskurven entspricht von der Größenordnung her der etwas erhöhten Feuchtedehnung durch die Einwirkung des hygroskopischen

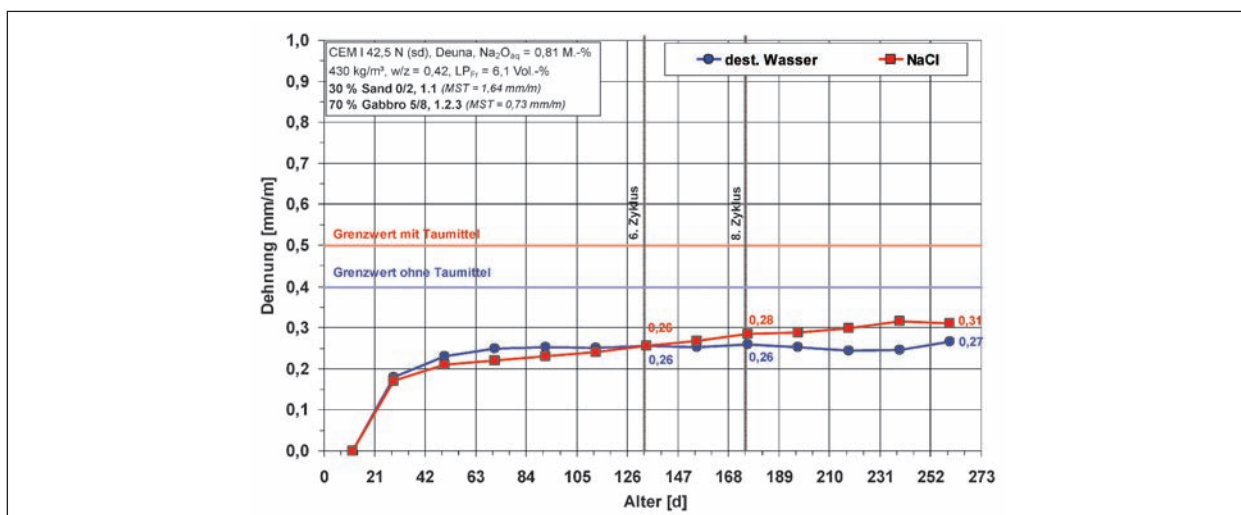
<sup>23</sup> Dehnungsgrenzwert bei Wasserbeaufschlagung: 0,4 mm/m; Dehnungsgrenzwert bei Taumittelbeaufschlagung: 0,5 mm/m.



**Bild 92:** Dehnungsverläufe während FIB-Klimawechsellagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung für die Betonzusammensetzung mit Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (1.2.1)



**Bild 93:** Dehnungsverläufe während FIB-Klimawechsellagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung für die Betonzusammensetzung mit Rhyolith-Splitt Süddeutschland (1.2.2)



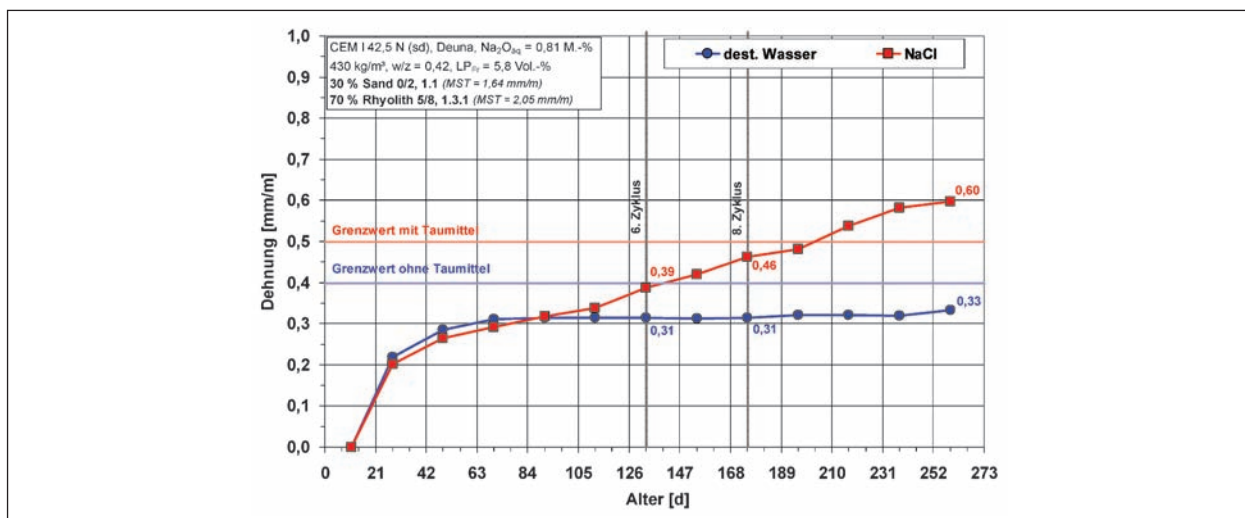
**Bild 94:** Dehnungsverläufe während FIB-Klimawechsellagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung für die Betonzusammensetzung mit Gabbro-Splitt (1.2.3)

schen Tausalzes. Ein weiterer Einfluss der Taumittelwirkung ist nicht zu erkennen. Das zeigt, dass für diese Betonzusammensetzungen auch bei einer Alkalizufuhr von außen keine betonschädigende AKR ausgelöst wird. Die Dehnungskurven dieser 3 Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise liegen dabei auf vergleichbarem Niveau wie die von geeigneten Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken der alten Standardbauweise, auch wenn ein direkter Vergleich nicht möglich ist.<sup>24</sup> Dagegen zeigte sich ein tenden-

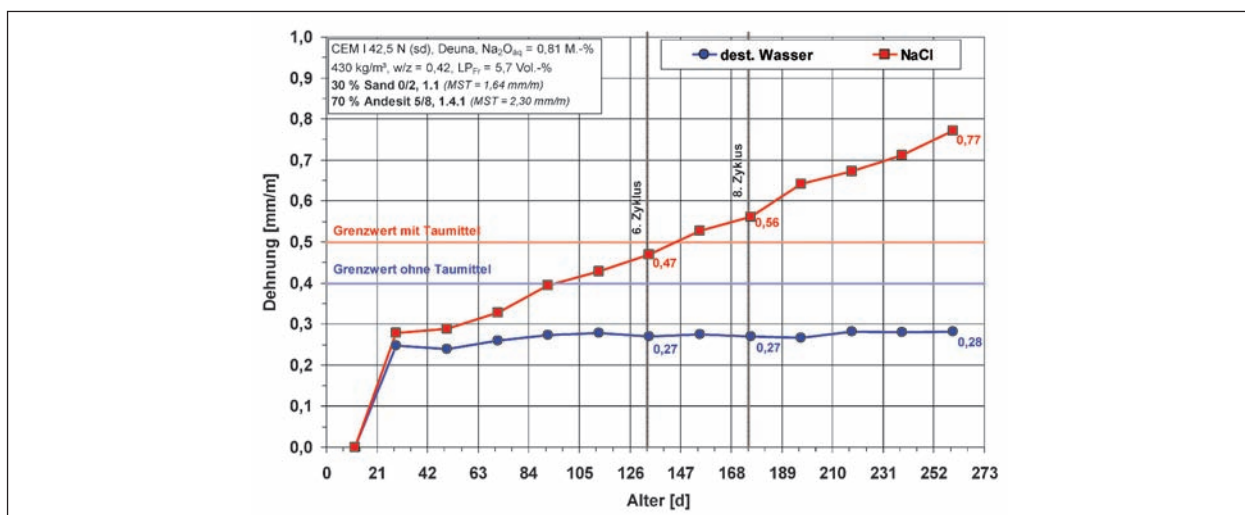
ziell höheres Dehnungsniveau für alle Fälle, bei denen nach Kapitel 2.1 potenziell alkalireaktiv bzw. alkalireaktiv bewertete grobe Gesteinskörnungen zum Einsatz kamen (Bild 95 bis Bild 99). Eine Ursache ist sicher im bereits anfänglich höheren Alkaliangebot des Betons zu suchen, bedingt durch die um  $\geq 60 \text{ kg/m}^3$  höhere Zementmenge in Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise im Vergleich zur alten Standardbauweise. Es ist bekannt und auch zweifelsfrei in vielen Untersuchungen nachgewiesen, dass das bereits im Beton vorhandene Alkaliangebot sowohl den Zeitpunkt des Beginns als auch den Verlauf einer AKR bedingten Dehnung bzw. Schädigung beeinflusst.

<sup>24</sup> Für Fahrbahndecken der alten Standardbauweise wurden Betonzusammensetzungen mit anderen Lieferchargen der Ausgangsstoffe bzw. Betonzusammensetzungen mit feinen Gesteinskörnungen aus anderen Lieferwerken untersucht.

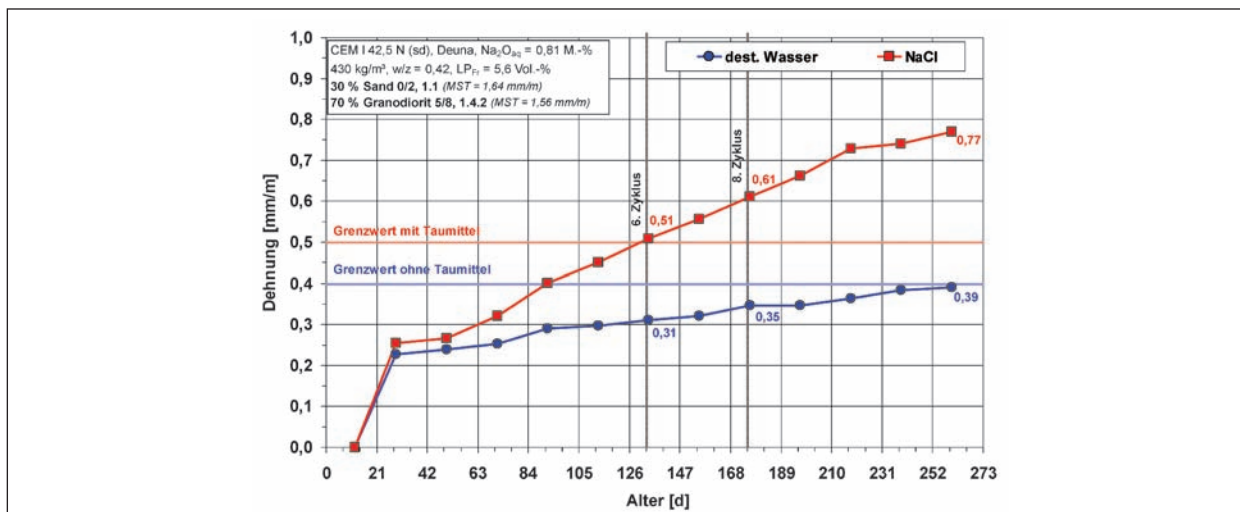
Für die Betonzusammensetzung mit dem Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (1.3.1) separiert sich die



**Bild 95:** Dehnungsverläufe während FIB-Klimawechsellagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung für die Betonzusammensetzung mit Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (1.3.1)



**Bild 96:** Dehnungsverläufe während FIB-Klimawechsellagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung für die Betonzusammensetzung mit Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (1.4.1)



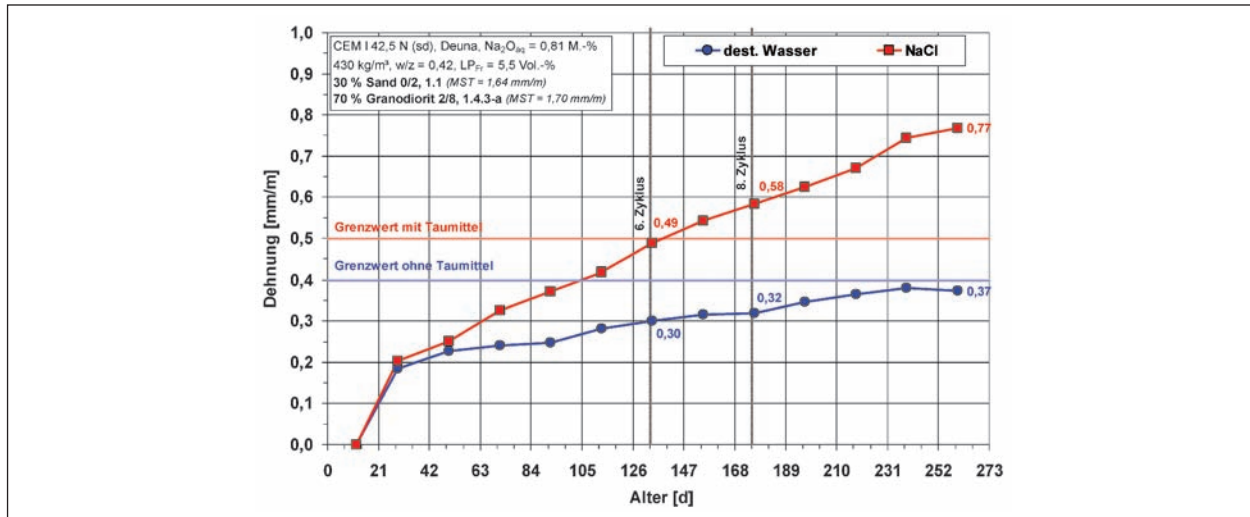
**Bild 97:** Dehnungsverläufe während FIB-Klimawechselagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung für die Betonzusammensetzung mit Granodiorit-Splitt I (1.4.2)

Dehnungskurve der mit Taumittel beaufschlagten Probekörper erst ab dem 5. Zyklus der FIB-Klimawechselagerung von der Dehnungskurve der mit Wasser beaufschlagten Probekörper (Referenzserie), was typisch für langsam und spät reagierende Gesteinskörnungen ist (Bild 95). Die Dehnungskurve der mit Taumittel beaufschlagten Probekörper überschreitet den Dehnungsgrenzwert von 0,5 mm/m erst nach dem 8. Zyklus, jedoch ist der Anstieg zwischen dem 6. und 8. Zyklus ein deutlicher Hinweis auf ein vorhandenes AKR-Schädigungspotenzial der Betonzusammensetzung bei einer äußeren Alkalizufuhr. Die Dehnungskurve der mit Wasser beaufschlagten Probekörper (Referenzserie) verläuft bis zum 4. Zyklus fast deckungsgleich mit der Dehnungskurve der mit Taumittel beaufschlagten Probekörper. Sie bleibt dann bis zum 12. Zyklus der FIB-Klimawechselagerung auf gleich bleibendem Niveau, liegt dabei aber über dem Niveau einer reinen Feuchtedehnung. Das zeigt, dass der im Beton bereits vorhandene Alkaligehalt allein nicht ausreicht, um eine betonschädigende AKR auszulösen.

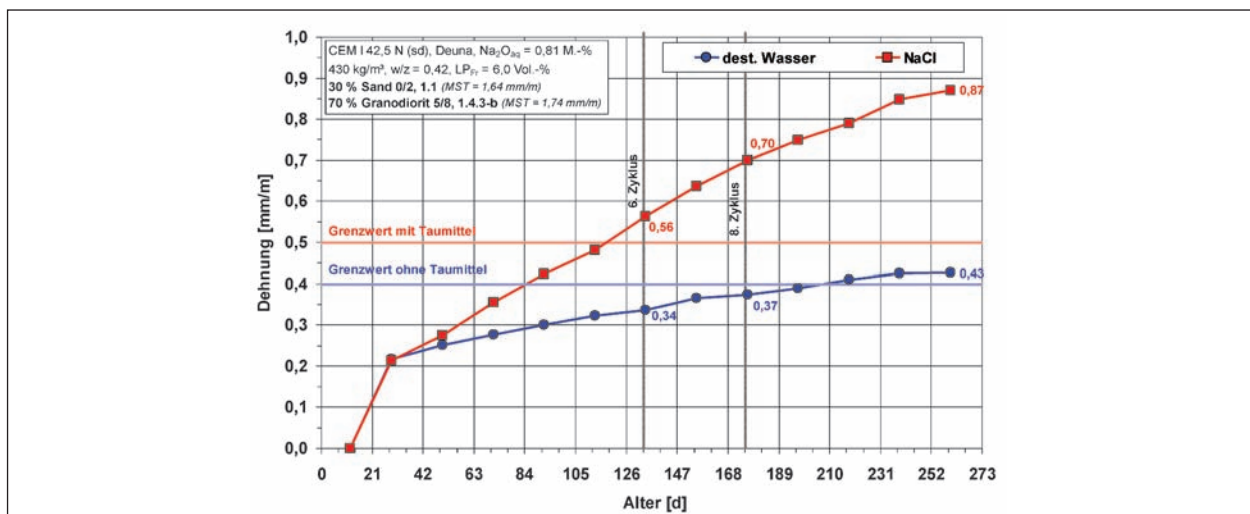
Für die Betonzusammensetzung mit dem Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (1.4.1) weist die Dehnungskurve der mit Taumittel beaufschlagten Probekörper bereits ab dem 3. Zyklus der FIB-Klimawechselagerung einen stetigen Anstieg auf, während die Dehnungskurve der mit Wasser beaufschlagten Probekörper (Referenzserie) bis zum 12. Zyklus der FIB-Klimawechselagerung auf gleichbleibendem Niveau etwas über dem Bereich der Feuchtedehnung verläuft (Bild 96). Die Dehnungskurve der mit Taumittel beaufschlagten Pro-

bekörper überschreitet den Dehnungsgrenzwert von 0,5 mm/m bereits nach dem 6. Zyklus, sodass hier von einem erheblichen AKR-Schädigungspotenzial der Betonzusammensetzung bei einer äußeren Alkalizufuhr auszugehen ist. Der im Beton bereits vorhandene Alkaligehalt allein reicht jedoch auch hier nicht aus, um eine betonschädigende AKR auszulösen, wie die Dehnungskurve der mit Wasser beaufschlagten Probekörper (Referenzserie) zeigt.

Die Dehnungsverläufe während der FIB-Klimawechselagerung für die Betonzusammensetzungen mit dem Granodiorit-Splitt I (1.4.2), dem Granodiorit-Splitt II (1.4.3-a), Lieferkörnung 2/8 und dem Granodiorit-Splitt II (1.4.3-b), Lieferkörnung 5/8 zeigen gleichartige Tendenzen (Bild 97 bis Bild 99). In jedem Fall weisen die Dehnungskurven der mit Taumittel beaufschlagten Probekörper bereits nach dem 1. Zyklus (Bild 98, Bild 99) bzw. ab dem 2. Zyklus (Bild 97) der FIB-Klimawechselagerung einen stetigen Anstieg auf und erreichen bzw. überschreiten den Dehnungsgrenzwert von 0,5 mm/m mit dem 6. Zyklus, sodass hier immer von einem erheblichen AKR-Schädigungspotenzial der 3 Betonzusammensetzungen bei einer äußeren Alkalizufuhr auszugehen ist. Es ist ein tendenzieller Einfluss der Lieferkörnung 2/8 bzw. 5/8 festzustellen – die Dehnungskurven für die Betonzusammensetzung mit dem Granodiorit-Splitt II (1.4.3-b), Lieferkörnung 5/8 (Bild 99) liegen auf einem höheren Niveau als die der Betonzusammensetzung mit dem Granodiorit-Splitt II, (1.4.3-a), Lieferkörnung 2/8 (Bild 98). Auch die Dehnungskurven der mit Wasser beaufschlagten Probekörper (Referenz-



**Bild 98:** Dehnungsverläufe während FIB-Klimawechsellagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung für die Betonzusammensetzung mit Granodiorit-Splitt II (1.4.3-a), Lieferkörnung 2/8



**Bild 99:** Dehnungsverläufe während FIB-Klimawechsellagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung für die Betonzusammensetzung mit Granodiorit-Splitt II (1.4.3-b), Lieferkörnung 5/8

serien) steigen für alle 3 Betonzusammensetzungen bis zum 12. Zyklus der FIB-Klimawechsellagerung an und erreichen den Dehnungsgrenzwert von 0,4 mm/m vor Ende der 12 Zyklen der FIB-Klimawechsellagerung bzw. überschreiten den Dehnungsgrenzwert nach dem 9. Zyklus (Bild 99). Der im Beton bereits vorhandene Alkaligehalt ist damit bei diesen 3 Betonzusammensetzungen schon zu hoch, um eine betonschädigende AKR langfristig zu vermeiden.

### 3.4 Mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen

Nach Abschluss der 12 Zyklen der FIB-Klimawechsellagerung erfolgt der Nachweis bzw. der Aus-

schluss von AKR-Merkmalen sowie der Nachweis bzw. der Ausschluss anderer Ursachen für die ermittelten Dehnungen wie andere Phasen Neubildungen, zu geringer Frost- bzw. Frost-Tausalz widerstand etc. durch mikroskopische Nachfolgeuntersuchungen unter Verwendung der Polarisationsmikroskopie (Gerät POLMI JENALAB, ZEISS). Dieses Verfahren erfordert die Anfertigung von Dünnschliffpräparaten. Für analytische mikroskopische Untersuchungen am inhomogenen Baustoff Beton haben sich großformatige Dünnschliffe (60 x 100 mm, ca. 25 µm dick) bewährt.

Mit petrografischen Untersuchungen am Dünnschliff sollte bei diesen Untersuchungen geklärt werden, welche der im Rahmen des Projektes untersuchten Gesteinskörnungen im Beton AKR-

Merkmale aufweisen. Dazu werden die Dünnschliffe jeweils im Durchlicht mit einfach polarisiertem Licht, d. h. mit einem Polarisator (einfach Pol.) und mit gekreuzten Polarisatoren (+ Pol.) untersucht.

AKR-Merkmale wie Reaktionsränder an reaktiven Gesteinskörnern, Gelbildung in Rissen und Poren sowie Rissausbildungen, ausgehend von reaktiven Gesteinskörnern, werden im einfach polarisierten Licht identifiziert, während die verursachende Gesteinsart (Rhyolith, Granodiorit, gestresster Quarz etc.) hauptsächlich bei gekreuzten Polarisatoren identifiziert und analysiert wird.

Die polarisationsmikroskopischen Untersuchungen sind detailliert in den Anlagen 1 bis 7 dokumentiert. Die jeweiligen Übersichtsaufnahmen der präparierten Dünnschliffe enthalten die Lage der Bildaufnahmen, die Markierungen der gefundenen AKR-Merkmale sowie die Tiefe der Karbonatisierungsfront. Festgestellte Mikrorissbildungen in der Zementsteinmatrix wurden extra gekennzeichnet.

Insgesamt wurden im Rahmen des Projektes nach Abschluss der AKR-Performance-Prüfung 16 Betondünnschliffe aus den Betonprobekörpern mit Waschbetonoberfläche angefertigt. Für jede Betonzusammensetzung wurde zwei Dünnschliffe angefertigt: ein Dünnschliff aus einem der mit Taumittel beaufschlagten Probekörper und ein Dünnschliff aus einem mit Wasser beaufschlagten Probekörper (Referenz). Für die Betone mit Granodiorit-Splitt II, die sich außer in der Prüflösung noch in der verwendeten Korngruppe des Granodiorit-Splitt II (2/8 und 5/8) unterscheiden, wurden 4 Dünnschliffe angefertigt.

### 3.4.1 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen an Dünnschliffen

Die mittels AKR-Performance-Prüfung untersuchten Betone enthalten neben einer der 7 ausgewählten Festgesteinskörnungen alle den gleichen, ausreichend alkaliunempfindlichen Sand (Rundkorn 0/2 mm). Diese Beurteilung beruht auf zahlreichen bestandenen AKR-Performance-Prüfungen von Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken unter Verwendung von diesem Sand und ebenfalls ausreichend alkaliunempfindlichen groben Gesteinskörnungen. Nach der Beurteilung im Dünnschliff enthält diese feine Gesteinskörnung überwiegend Quarzkörner die z. T. stark gestresst<sup>25</sup> sind sowie einige reaktive Flintkörner.

### Betonzusammensetzungen mit ausreichend alkaliunempfindlichen Festgesteinen

#### • Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (1.2.1, Auswahl FIB)

Die Waschbetonoberfläche ist wenig karbonatisiert. Möglicherweise ist ein Teil der Waschbetonoberfläche abgewittert. Oberflächenparallele Risse an zwei Andesit-Splittkörnern in der mit NaCl-Lösung überschichteten Probe unterstützen diese Vermutung.

Im Dünnschliff der mit NaCl-Lösung beaufschlagten Betonprobe liegen an 2 Stellen AKR-Gelbildungen in Poren vor. Als verursachende Gesteinskörnung wurden reaktive Flinte der Sandkörnung identifiziert. An einer Stelle weisen Poren AKR-Gelbildungen neben einem Andesit-Splittkorn auf. Eine eindeutige Zuordnung zu einem Gesteinskorn ist aber nicht möglich.

Auch in der mit Wasser beaufschlagten Probe konnten keine Hinweise zum Ablauf einer schädigenden AKR festgestellt werden. Es liegen vereinzelt AKR-Merkmale nur im Zusammenhang mit einigen reaktiven Flinten aus der Sandkörnung vor. Die Splittkörnung hat offensichtlich kein AKR-Schädigungspotenzial.

In den Randbereichen der Probekörper (mit Prüflösung beaufschlagte Probekörperoberfläche, Probekörperunterseite) sind Poren mit Ettringitsäumen ohne betonschädigenden Charakter zu finden.

#### • Rhyolith-Splitt Süddeutschland (1.2.2, Auswahl FIZ)

Die mit Taumittel beaufschlagten Probekörperoberflächen zeigen eine intakte Waschbetonoberfläche, die frei von Rissen ist und geringe Karbonatisierungstiefen aufweist.

Bei der Splittkörnung handelt es sich um einen einsprenglingsfreien Rhyolith z. T. mit deutlich ausgeprägter Fluidalstruktur. Der Rhyolith zeigt ein vermehrtes Auftreten von Mikro-Rissen, vermutlich

<sup>25</sup> Gestresster Quarz zeigt bei gekreuzten Polarisatoren im Dünnschliff eine mehr oder weniger starke undulöse Auslöschung. Die undulöse Auslöschung ist ein Indiz für stattgefundene Deformationsprozesse im Kristallbau des Quarzes infolge tektonischer Beanspruchung. Daraus resultiert ein erhöhtes Lösevermögen bzw. Reaktionsvermögen gegenüber angreifenden Medien, hier die in der Porenlösung des Betons enthaltenen Alkalihydroxide.



aus Abbau- oder Aufbereitungsprozessen, jedoch keine AKR-Merkmale.

Im Zusammenhang mit einem Gesteinskorn der Sandfraktion liegt eine AKR-Gelbildung in angrenzenden Poren in der mit NaCl-beaufschlagten Probe vor. Eine weitere Pore enthält AKR-Gel, wobei eine Zuordnung zu einem verursachenden Gesteinskorn nicht möglich ist.<sup>26</sup>

AKR-Merkmale treten nur an Gesteinskörnern der Sandfraktion auf. Die Rhyolith-Splittkörnung hat offensichtlich kein AKR-Schädigungspotenzial. An den Porenwänden sind z. T. dichte Ettringitsäume, jedoch ohne betonschädigenden Charakter vorhanden. Die betreffenden Poren sind ebenfalls nur in den Randbereichen der Probekörper (mit Prüflösung beaufschlagte Probekörperoberfläche, Probekörperunterseite) anzutreffen.

- **Gabbro-Splitt (1.2.3, Auswahl FIZ)**

In beiden Dünnschliffen sind AKR-Gelbildungen in Poren zu finden, wobei keine eindeutige Zuordnung zum verursachenden Gesteinskorn möglich ist. Vermutlich resultieren diese AKR-Gelbildungen aus reaktiven Gesteinskörnern (meist Flint) der Sandfraktion. Die vorliegenden AKR-Gelbildungen haben keinen betonschädigenden Charakter. Es wurden keine Rissbildungen in der Splittkörnung gefunden, die auf den Ablauf einer AKR hindeuten könnten. Die Splittkörnung hat ganz offensichtlich kein AKR-Schädigungspotenzial.

In den Randbereichen der Probekörper befinden sich wiederholt partiell Ettringitsäume ohne betonschädigenden Charakter an Porenwänden. Die Waschbetonoberfläche ist wenig karbonatisiert.

### **Betonzusammensetzung mit alkaliempfindlichem Festgestein**

- **Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (1.3.1, Auswahl FIB)**

In beiden Dünnschliffen treten die AKR-Merkmale sowohl im Zusammenhang mit der Splittkörnung als auch mit der Sandkörnung auf. AKR-Merkmale treten bei der mit NaCl-Lösung beaufschlagten

Probe verstärkt auf. Die AKR beschränkt sich auf AKR-Gelbildungen in angrenzenden Poren alkali-reaktiver Rhyolith-Splittkörner sowie auf Flinte und gestresste Quarzkörner der Sandfraktion. Aufgrund der AKR-Gelbildungen im Zusammenhang mit der enthaltenen Festgesteinskörnung Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland ist diese als alkalireaktiv einzustufen. Für die aufgetretenen Dehnungen wurden keine anderen Ursachen als die nachgewiesene AKR gefunden.

Bereichsweise sind geringfügige Ettringitbildungen ohne betonschädigenden Charakter an Porenwänden in Randbereichen der Probekörper (mit Prüflösung beaufschlagte Probekörperoberfläche, Probekörperunterseite) zu finden. Die Waschbetonoberfläche ist wenig karbonatisiert.

### **Betonzusammensetzungen mit potenziell alkaliempfindlichen Festgesteinen**

- **Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (1.4.1, Auswahl FIB)**

Die in beiden Dünnschliffen festzustellenden AKR-Gelbildungen resultieren sowohl aus reaktiven Anteilen der Sandkörnung als auch aus der Splittkörnung. Die mit Wasser beaufschlagte Referenzprobe enthält vereinzelt gerissene Splittkörner, die bislang überwiegend frei von Phasen Neubildungen sind. In einem der vorgefundenen Risse ist eine geringe AKR-Gelbildung an den Rissflanken zu verzeichnen.

Der mit NaCl-Lösung beaufschlagte Beton zeigt im Dünnschliff eine deutliche Rissbildung im Gestein- und auch im Zementsteingefüge als Folge einer ablaufenden AKR mit AKR-Gelbildungen an den Rissflanken der gerissenen Andesitkörner und in deren angrenzenden Poren. Aufgrund der Rissbildung in der Zementsteinmatrix ist die Intensität der AKR als betonschädigend zu werten. Der Andesit-Splitt Mitteldeutschland II ist als alkalireaktiv einzustufen. Für die aufgetretenen Dehnungen wurden keine anderen Ursachen als die nachgewiesene AKR gefunden.

Die Waschbetonoberfläche ist wenig karbonatisiert. Es wurden keine vertikalen Risse an der Oberfläche, die das Eindringverhalten der aufstehenden Lösungen beschleunigen würden, gefunden.

Auffällig ist wieder das Auftreten von Ettringit- säumen in Poren (Probekörperoberfläche, Probekörperunterseite). Die betroffenen Bereiche be-

<sup>26</sup> Der Dünnschliff ermöglicht prinzipiell immer nur eine zwei-dimensionale Betrachtung des Betongefüges, d. h. dass hier das verursachende reaktive Gesteinskorn offensichtlich nicht in der Dünnschliffebene liegt.

schränken sich auf ca. den ersten Zentimeter der Probekörperrandbereiche. Danach treten keine kristallinen Phasenneubildungen in Poren auf. Die festgestellte Ettringitbildung hat keinen betonschädigenden Charakter.

- **Granodiorit-Splitt I (1.4.2, Auswahl FIB)**

Die in den Dünnschliffen als AKR-verursachend erkannten Gesteinskörner sind überwiegend im Sand, aber auch in der eingesetzten Granodiorit-Splittkörnung zu finden.

Die Granodiorit-Splittkörner enthalten häufig kleine Mikrorisse, die vermutlich auf Abbau- bzw. Aufbereitungsprozesse, aber auch auf eine AKR zurückzuführen sind. AKR-Gelbildungen im Zusammenhang mit der Splittkörnung treten nur im Dünnschliff aus der mit Taumittel beaufschlagten Betonprobe auf. In den mit Wasser beaufschlagten Proben steht der Ablauf der AKR nur in Verbindung mit reaktiven Flinten der Sandfraktion.

Der Festgesteinskörnung Granodiorit-Splitt I ist anhand der Dünnschliffuntersuchungen ein mittleres AKR-Potenzial zuzuordnen.

Die Waschbetonoberflächen sind geringfügig karbonatisiert und sonst in einem intakten Zustand.

Für die aufgetretenen Dehnungen wurden keine anderen Ursachen als die nachgewiesene AKR gefunden.

- **Granodiorit-Splitt II (1.4.3, Auswahl FIB)**

Hier sind die in allen vier Dünnschliffen<sup>27</sup> als AKR-verursachend erkannten Gesteinskörner im Sand, aber auch in der eingesetzten Granodiorit-Splittkörnung zu finden.

Das Gefüge der mit Wasser beaufschlagten Betone zeigt eindeutige AKR-Merkmale in Form von AKR-Gelbildungen im Zusammenhang mit Flinten aus der Sandkörnung. Im Dünnschliff liegen zudem AKR-Gelbildungen in angrenzenden Poren gerissener Granodioritkörner vor. Eine eindeutige Zuordnung in der untersuchten Dünnschliffebene zu der

Granit- bzw. Granodiorit-Splittkörnung ist jedoch nicht immer möglich.

In den Dünnschliffen aus den mit NaCl-Lösung beaufschlagten Betonproben liegen deutlich mehr AKR-Gelbildungen vor als in den mit Wasser beaufschlagten Betonproben. Die AKR-Gelbildungen sind an Rissflanken gerissener Splittkörner und in angrenzenden Poren von Splittkörnern sowie wiederholt in Verbindung mit angelösten Flinten der Sandkörnung zu finden.

Im Ergebnis der AKR-Performance-Prüfung und aufgrund der AKR-Gelbildungen im Zusammenhang mit den enthaltenen groben Gesteinskörnungen ist der Granodiorit-Splitt II als alkalireaktiv einzustufen.

Das Granodiorit-Splittgefüge sowie die Zusammensetzung und Verteilung der enthaltenen Minerale lassen bei einigen Körnern eher auf einen Granit als auf einen Granodiorit schließen.

In den oberflächennahen Bereichen bis etwa 1 cm Tiefe sind Poren mit z. T. sehr dichten Ettringitsäumen an Porenwandungen zu finden. Im Inneren des Betons liegen derartige kristalline Neubildungen nicht vor. Die festgestellte Ettringitbildung hat keinen betonschädigenden Charakter. Für die aufgetretenen Dehnungen wurden keine anderen Ursachen als die nachgewiesene AKR gefunden.

### 3.4.2 Beurteilung der Eignung der untersuchten Betonzusammensetzungen

Die Beurteilung der Eignung der untersuchten Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise erfolgt nach Abschluss der AKR-Performance-Prüfungen.

Eine Betonzusammensetzung ist als geeignet für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton (WS) hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR zu beurteilen, wenn sowohl die Dehnung nach 8 Zyklen der FIB-Klimawechselagerung den jeweiligen Grenzwert<sup>28</sup> nicht überschreitet und zwischen dem 6. und dem 8. Zyklus kein kritischer Dehnungsanstieg aufgetreten ist. Wenn eines oder beide der genannten Kriterien nicht erfüllt sind, ist die Betonzusammensetzung als nicht geeignet für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton (WS) zu beurteilen.

Durch mikroskopische Nachfolgeuntersuchungen an Betondünnschliffen erfolgt abschließend der

<sup>27</sup> Es wurden 2 Betonzusammensetzungen untersucht, die sich nur in der Lieferkörnung der eingesetzten Splittkörnung (Lieferkörnung 2/8 bzw. 5/8) unterschieden.

<sup>28</sup> Dehnungsgrenzwert bei Wasserbeaufschlagung: 0,4 mm/m; Dehnungsgrenzwert bei Taumittelbeaufschlagung: 0,5 mm/m.

Betonzusammensetzung mit ...	Ergebnis AKR-Performance-Prüfung	
<b>1.2 ausreichend alkaliunempfindliche Festgesteine</b>		
1.2.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (Auswahl FIB)	geeignet	
1.2.2 Rhyolith-Splitt Süddeutschland (Auswahl FIZ)	geeignet	
1.2.3 Gabbro-Splitt (Auswahl FIZ)	geeignet	
<b>1.3 alkaliempfindliche Festgesteine</b>		
1.3.1 Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (Auswahl FIB)	nicht geeignet	
<b>1.4 potenziell alkaliempfindliche Festgesteine</b>		
1.4.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (Auswahl FIB)	nicht geeignet	
1.4.2 Granodiorit-Splitt I (Auswahl FIB)	nicht geeignet	
1.4.3 Granodiorit-Splitt II (Auswahl FIB)	(2/8)	nicht geeignet
	(5/8)	nicht geeignet

**Tab. 47:** Eignung der untersuchten Betonzusammensetzungen im Ergebnis der AKR-Performance-Prüfungen mittels FIB-Klimawechselagerung

Nachweis bzw. der Ausschluss von AKR-Merkmalen sowie der Nachweis bzw. der Ausschluss anderer Ursachen für die ermittelten Dehnungen.

Tabelle 47 enthält eine Zusammenstellung der Beurteilung der Eignung der untersuchten Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken mit Waschbetonoberfläche anhand der Abnahmekriterien der AKR-Performance-Prüfung mittels FIB-Klimawechselagerung. Die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen (s. Kapitel 3.4) bestätigten in allen Fällen die im Ergebnis der AKR-Performance-Prüfungen mittels FIB-Klimawechselagerung getroffenen Bewertungen bzw. stehen nicht im Widerspruch dazu.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich für den Bau von Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise nur die 3 Betonzusammensetzungen hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR als geeignet erwiesen haben, die alkaliunempfindliche bzw. ausreichend alkaliunempfindliche Gesteinskörnungen enthalten.

### 3.4.3 Beurteilung der Eignung von Gesteinskörnungen im Ergebnis aller Untersuchungen

Es war festzustellen, dass die aus den Gesteinskörnungsuntersuchungen (s. Kapitel 2.1) vorgenommene orientierende Einstufung der Eignung von Gesteinskörnungen für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR durch die Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen nicht in allen Fällen bestätigt werden konnte (Tabelle 48).

Es zeigt sich, dass der festgelegte Grenzwert für das Referenzprüfverfahren nicht in jedem Fall auch Gültigkeit für die Waschbetonbauweise hat. Aufgrund der Ergebnisse aus dem Referenzprüfverfahren allein wären bei den hier untersuchten Gesteinskörnungen für die Granodiorite falsche Entscheidungen zur Eignung der Gesteinskörnungen für den Bau von Fahrbahndecken mit Waschbetonoberfläche hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR getroffen worden (s. Kapitel 2.1.2, Bild 79).

Anhand der Ergebnisse des Alternativverfahrens wurden die Granodiorite korrekterweise nicht in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S eingestuft. Aus dem Dehnungsverlauf und dem erreichten Endwert im Alternativverfahren sind allerdings keine weiteren Rückschlüsse auf das Verhalten in Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken sowohl der alten Standardbauweise als auch für Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise möglich.

Die petrografische und mineralogische Charakterisierung der Gesteinskörnungen lieferte unterstützend Hinweise auf eine evtl. vorhandene Alkaliempfindlichkeit, ist jedoch zur Beurteilung der Eignung von Gesteinskörnungen für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR allein nicht geeignet.

## 4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden unterschiedlich alkaliempfindliche grobe Gesteinskörnungen sowie Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise mit die-

Gesteinskörnung bzw. Beton mit ...	Einstufung	Einstufung der Gesteinskörnung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3		Bewertung der Gesteinskörnung nach Tabelle 36	Bewertung der Gesteinskörnung
		Referenzprüf- verfahren	Alternativ- verfahren	Alternativ- verfahren	AKR-Perfor- mance-Prüfung
1.1 Sand Thüringen 0/2		nicht vorgesehen	nicht vorgesehen	ausreichend alkaliunempfindlich <sup>1</sup>	geeignet
1.2.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland I (5/8)		E I-S	E I-S	ausreichend alkaliunempfindlich	geeignet
1.2.2 Rhyolith-Splitt Süddeutschland (5/8)		E I-S	E I-S	ausreichend alkaliunempfindlich	geeignet
1.2.3 Gabbro-Splitt (5/8)		E I-S	E I-S	ausreichend alkaliunempfindlich	geeignet
1.3.1 Rhyolith-Splitt Mitteldeutschland (5/8)		keine Bewertung möglich	keine Bewertung möglich	alkalireaktiv	nicht geeignet
1.4.1 Andesit-Splitt Mitteldeutschland II (5/8)		keine Bewertung möglich	keine Bewertung möglich	alkalireaktiv	nicht geeignet
1.4.2 Granodiorit-Splitt I (8/16 bzw. 2/8)m		<b>E I-S</b>	keine Bewertung möglich	potenziell alkalireaktiv	nicht geeignet
1.4.3 Granodiorit-Splitt II	(2/8)	<b>E I-S</b>	keine Bewertung möglich	potenziell alkalireaktiv	nicht geeignet
	(5/8)	<b>E I-S</b>	keine Bewertung möglich	potenziell alkalireaktiv	nicht geeignet

<sup>1</sup> Nach bisherigen Erfahrungen des FIB mit der Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Sanden außerhalb des Anwendungsbereiches der Alkali-Richtlinie und des angrenzenden Bereiches

Tab. 48: Zusammenstellung der Ergebnisse der insgesamt durchgeführten Untersuchungen

sen Gesteinskörnungen untersucht. Es sollte u. a. geklärt werden, ob die Schnelltests nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 (Referenzprüf- und Alternativverfahren) uneingeschränkt auch zur Beurteilung der Eignung bzw. der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen vom Typ slow late für die Waschbetonbauweise geeignet sind.

Hintergründe dieser Fragestellung sind der geforderte, um  $\geq 60 \text{ kg/m}^3$  höhere Zementgehalt von mindestens  $420 \text{ kg/m}^3$  für die Waschbetonbauweise sowie die Auswirkungen der erhöhten spezifischen Oberfläche der groben gebrochenen Gesteinskörnungen (2-8 mm statt 2-22 mm).

Dazu wurden von beiden Forschungseinrichtungen (FIB Weimar, FIZ Düsseldorf) Vergleichsversuche unter Verwendung von nach bisherigen Erfahrungen unterschiedlich alkaliempfindlichen groben gebrochenen Gesteinskörnungen durchgeführt, immer in Kombination mit einer noch als ausreichend alkaliunempfindlich eingestuft feinen natürlichen Gesteinskörnung (Sand 0/2 mm). Als Zement kam ein CEMI 42,5 N (sd) mit einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 0,81 M.-% zum Einsatz. Im Ergebnis der Untersuchungen sind folgende Schlussfolgerungen zu ziehen:

- Von den 8 mit AKR-Performance-Prüfungen untersuchten Betonzusammensetzungen erwiesen sich nur die 3 Betonzusammensetzungen für den Bau von Fahrbahndecken mit Waschbetonoberfläche als geeignet, die ausreichend alkali-unempfindliche Gesteinskörnungen enthielten.
- Die Dehnungskurven der 3 als geeignet einzustufenden Betonzusammensetzungen für die neue Standardbauweise (Waschbetonoberfläche) in den AKR-Performance-Prüfungen liegen auf vergleichbarem Niveau wie bei geeigneten Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken der alten Standardbauweise.
- Dagegen war ein tendenziell höheres Dehnungsniveau für alle Betonzusammensetzungen mit potenziell alkaliempfindlichen bzw. alkalireaktiven groben Gesteinskörnungen festzustellen, was auf ein erhöhtes AKR-Schädigungspotenzial von Betonzusammensetzungen für die Waschbetonbauweise schließen lässt.
- Als eine Ursache dafür ist der bereits anfänglich höhere (absolute) Alkaligehalt des Betons (bedingt durch die um  $60 \text{ kg/m}^3$  höhere Zementmenge in Betonzusammensetzungen für Fahr-

bahndecken in Waschbetonbauweise im Vergleich zur alten Standardbauweise) anzusehen. Es ist bekannt und vielfach nachgewiesen worden, dass das bereits im Beton vorhandene Alkaliangebot sowohl den Zeitpunkt des Beginns als auch den Verlauf einer AKR-bedingten Dehnung/Schädigung beeinflusst.

- Ebenso wird die ausschließliche Verwendung der Ausfallkörnung 5/8 mit einer höheren spezifischen Oberfläche der enthaltenen Gesteinskörnungen im Vergleich zur alten Standardbauweise mit grober Gesteinskörnung bis 22 mm Größtkorn den Ablauf einer betonschädigenden AKR begünstigen.

Die untersuchten Granodiorit-Splitte erwiesen sich im Ergebnis der Untersuchungen als Sonderfall. Mit den Schnelltests nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 wurde für die Granodiorit-Splitte kein<sup>29</sup> bzw. ein nur geringes AKR-Schädigungspotenzial<sup>30</sup> ausgewiesen. Dem stehen einerseits für den Granodiorit-Splitt I negative baupraktische Erfahrungen (Beteiligung an einem AKR-Schadensfall auf der BAB A 10) entgegen. Andererseits zeigten sowohl die hier durchgeführten AKR-Performance-Prüfungen an Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise als auch im Rahmen von anderen Untersuchungen durchgeführten AKR-Performance-Prüfungen an Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken, die nicht bestanden wurden, dass alle bisher am FIB untersuchten Granodiorit-Splitte eindeutig ein AKR-Schädigungspotenzial im Beton aufweisen.

Bezüglich der beiden angewandten Schnelltests nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 zur Beurteilung der Eignung von Gesteinskörnungen war festzustellen, dass

- der in der Alkali-Richtlinie, Teil 3 festgelegte Dehnungsgrenzwert für das Referenzprüfverfahren nicht unbedingt auch Gültigkeit für die Waschbetonbauweise hat

und

- dass die Einstufung mittels Alternativverfahren für die hier untersuchten Fälle zwar zutreffend

war, was jedoch keine Gewähr für andere Gesteinsarten/Lieferwerke ist.

Aufgrund der Ergebnisse aus dem Referenzprüfverfahren allein wären bei den hier untersuchten Gesteinskörnungen für die Granodiorite falsche Entscheidungen zur Eignung der Gesteinskörnungen für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR getroffen worden.

Bis eine ausreichende Datenbasis vorliegt, sollten – auf der sicheren Seite liegend – vor Baubeginn für Fahrbahndecken aus Beton AKR-Performance-Prüfungen zur zuverlässigen Beurteilung der Eignung hinsichtlich Vermeidung einer betonschädigenden AKR durchgeführt werden.

Das gilt auch für potenziell alkaliempfindliche Festgesteinsarten vom Typ slow late, die bereits für Fahrbahndecken aus Beton eingesetzt wurden und/oder werden, aber bisher weder nach Alkali-Richtlinie, Teil 3 noch nach ARS 12/2006 untersucht werden müssen (z. B. Granite, Granulite, Quarzite, Gneise etc.) und auch für Lockergesteine, um zukünftig AKR-Schäden sicher zu vermeiden.

<sup>29</sup> Bei Anwendung des Referenzprüfverfahrens Einstufung in E I-S, d. h. unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion.

<sup>30</sup> Bei Anwendung des Alternativverfahrens Beurteilung als potenziell alkaliempfindlich.

## Teil 4 – Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

### 1 Zusammenfassung

#### 1.1 Ziel der Untersuchungen

Das Ziel der Untersuchungen bestand in der Beantwortung der Frage, ob Gesteinskörnungen, die in Fahrbahndecken aus Waschbeton zum Einsatz kommen sollen, hinsichtlich ihrer Alkali-Reaktivität mit den Verfahren nach Alkali-Richtlinie des DAfStb, Teil 3, Febr. 2007, korrekt beurteilt werden bzw. wenn nicht, welche Veränderungen bei diesen Verfahren vorzunehmen sind (z. B. andere Dehnungsgrenzwerte).

In die Untersuchungen wurden folgende Verfahren zur Prüfung von Gesteinskörnungen und Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken mit Waschbetonoberfläche einbezogen:

- Untersuchung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen (Gesteinskörnungsprüfungen),
- 80°C-Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie),
- 70°C-Mörtelschnelltest (Alternativverfahren nach Alkali-Richtlinie),
- 40°C-Betonversuch mit Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie,
- 60°C-Betonversuch über Wasser nach Alkali-Richtlinie,
- Untersuchung der Alkaliempfindlichkeit von Betonzusammensetzungen für Fahrbahndecken mit Waschbetonoberfläche (AKR-Performance-Prüfungen),
- 60°C-Betonversuch ohne/mit Alkalizufuhr,
- FIB-Klimawechselagerung ohne/mit Taumittelbeaufschlagung mit anschließenden Dünnschliffuntersuchungen.

#### 1.2 Ergebnisse und Aussagen

In Tabelle 49 sind die Dehnungen der Probekörper aus den Gesteinskörnungsprüfungen und aus den AKR-Performance-Prüfungen am Waschbeton mit je einer der sechs groben Gesteinskörnungen zum jeweiligen Prüfende aufgeführt. Ein **grün** gedruckter Wert zeigt eine Dehnung an, die den Grenzwert

nicht überschreitet, ein **rot** gedruckter Wert zeigt eine Dehnung an, die **über** dem Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung liegt. Wurde die Prüfung trotz Unterschreitung des Grenzwertes aufgrund eines anderen Kriteriums **nicht bestanden**, so wird dies auch als **roter** Wert angezeigt.

In Tabelle 50 sind die Aussagen der Gesteinskörnungs- und AKR-Performance-Prüfungen tabellarisch zusammengefasst, die sich aus den Dehnungen von Tabelle 49 ableiten lassen. Ein „v“ bedeutet, dass die Dehnung den Grenzwert nicht überschritt. Ein „Ø“ bedeutet, dass die Dehnung den für das jeweilige Verfahren gültigen Grenzwert der maximalen Dehnung überschritt. Die Fußnoten A), B) bzw. C) weisen auf eine vom Erreichen bzw. Überschreiten des Grenzwertes der maximal zulässigen Dehnung unabhängige Bewertung hin (s. Abkürzungen und Fußnoten in Tabelle 49).

Die Ergebnisse des Granodiorits II (5/8) wurden zu Vergleichszwecken durch Ergebnisse mit Granodiorit mit der Lieferkörnung 2/8 sowie einem Granodiorit aus anderen Untersuchungen ergänzt (siehe Tabelle 49 und Tabelle 50).

In den Untersuchungen mit Andesit-Splitt I Mitteldeutschland (GK 1.2.1), Rhyolith-Splitt Süddeutschland (GK 1.2.2) und Gabbro-Splitt (GK 1.2.3) zeigte sich, dass die Grenzwerte in allen angewendeten Prüfverfahren nicht erreicht bzw. überschritten wurden. Die Gesteinskörnungsprüfung führte im Ergebnis zu der Aussage, dass diese Gesteinskörnungen als unbedenklich hinsichtlich einer Alkali-Reaktion im Beton zu bezeichnen sind. In allen AKR-Performance-Prüfungen wurden die Waschbetone mit 430 kg Straßenbauzement je m<sup>3</sup> Beton und je einer dieser drei Gesteinskörnungen als geeignet für die Feuchtigkeitsklasse WS in Bezug auf das Risiko einer schädigenden Alkali-reaktion im Beton bewertet.

Die Gesteinskörnung Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland (GK 1.3.1) wurde von beiden Schnelltests in der Gesteinskörnungsprüfung nicht als unbedenklich hinsichtlich einer Alkalireaktion im Beton eingestuft. Mit der 40°C-Nebelkammerlagerung wurde diese Gesteinskörnung hingegen als unbedenklich hinsichtlich einer Alkalireaktion bewertet. Der untersuchte Waschbeton mit 430 kg Straßenbauzement je m<sup>3</sup> Beton und Rhyolith-Splitt als Gesteinskörnung erreichte im 60°C-Betonversuch mit 10 M.-% NaCl in der Prüflösung nicht den Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung, zeigte je-

Prüfverfahren		Gesteinskörnungsprüfung						Performance-Prüfung Waschbeton				
		SPV 80 °C FIZ	SPV 80 °C FIB	MST 70 °C	NK 40 °C	NK 40 Riss- weite	60°C-BV <sup>(6)</sup>	60°C-BV <sup>(8)</sup> 0 % NaCl	60°C-BV <sup>(8)</sup> 3 % NaCl	60°C-BV <sup>(8)</sup> 10 % NaCl	KWL H <sub>2</sub> O	KWL 0,6 mol NaCl
GK Nr.	Fraktion Splitt	5/8 mm			5/16 bzw. 2/16 mm			5/8 mm				
		mm/m	mm/m	mm/m	mm/m	mm	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m
1.2.1	Andesit I Mitteldeutschland	0,34	0,55	0,53	0,32	k. R.	0,08	0,02	0,10	0,13	0,25	0,33
1.2.2	Rhyolith Süddeutschland	0,70	0,84	0,89	0,38	k. R.	0,15	0,05	0,13	0,22	0,23	0,33
1.2.3	Gabbro	0,06	0,15	0,73	0,40	k. R.	0,24	0,07	0,17	0,28	0,26	0,28
1.3.1	Rhyolith Mitteldeutschland	1,38	1,33	2,05	0,42 <sup>(6)</sup>	0,25 <sup>(2)</sup>	0,45	0,03	0,18	0,40 <sup>(A)</sup>	0,31	0,46 <sup>(B)</sup>
1.4.1	Andesit II Mitteldeutschland	1,40	1,45	2,30	0,43 <sup>(7)</sup>	0,20 <sup>(2)</sup>	0,36	0,10	0,26	0,53	0,27	0,56
1.4.3	Granodiorit II 5/8	0,79 <sup>(1)</sup>	0,79	1,74	0,64 <sup>(3)</sup>	< 0,05 <sup>(3)</sup>	0,89	0,09	0,31	0,57	0,37 <sup>(C)</sup>	0,70
1.4.3	Granodiorit II 2/8	n. b.	0,92	1,70	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	0,32	0,58
1.4.2	Granodiorit I 8/16 <sup>(D)</sup>	n. b.	0,70	1,56	0,17- 0,32 <sup>(E)</sup>	k. R.	1,20 <sup>(F)</sup>	n. b.	n. b.	n. b.	0,35	0,61
Grenzwert		≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 0,6	< 0,2 <sup>(4)</sup>	≤ 0,30	- <sup>(5)</sup>	- <sup>(5)</sup>	≤ 0,5	≤ 0,4	≤ 0,5
Lagerungsdauer (Tage)		13	13	28	~ 274	~ 274	140	168	168	168	168	168
<b>Abkürzungen und Fußnoten zu Tabelle 49 und Tabelle 50:</b>												
GK Gesteinskörnung												
SPV 80°C-Schnellprüfverfahren am Mörtel (Referenzprüfverfahren)												
MST 70°C-Mörtelschnelltest (Alternativverfahren)												
NK 40°C-Nebelkammerlagerung												
BV Betonversuch												
k. R. keine Risse												
n. b. nicht bestimmt												
KWL Klimawechsellaagerung über Wasser												
KWL 0,6 mol NaCl bedeutet Klimawechsellaagerung mit Prüflösung mit 0,6 mol/l NaCl												
grün Dehnungen erreichten bzw. überschritten den Grenzwert nicht												
rot Dehnungen über dem Grenzwert												
1) Test wurde wiederholt, Ergebnis: 0,63 mm/m												
2) nach 365 Tagen Lagerung (nach rd. 9 Monaten waren noch keine Risse erkennbar)												
3) nach 9 Monaten Lagerung												
4) Kriterium gilt für eine Lagerungsdauer von 9 Monaten												
5) Grenzwert derzeit nur für eine Taumittellösung mit 10 M.-% NaCl definiert												
6) rd. 0,47 mm/m nach 365 Tagen, Rissweite ≥ 0,2 mm nach 12 Monaten												
7) auch rd. 0,43 mm/m nach 365 Tagen, Rissweite ≥ 0,2 mm nach 12 Monaten												
8) Dehnung zwischen dem rd. 28. und dem rd. 168. Tag der Lagerung (20 Wochen)												
A) Grenzwert nicht überschritten, nach 140 Tagen starker Dehnungsanstieg, bedenklich, Dünnschliffuntersuchung für Beurteilung erforderlich												
B) Grenzwert nicht überschritten, zwischen 6. und 8. Zyklus starker Dehnungsanstieg, nicht geeignet												
C) Grenzwert später (zwischen 9. und 10. Zyklus) überschritten												
D) Ergebnisse FIB bzw. MFPA Weimar, außer F)												
E) Rissweite nach 11 Monaten < 0,2 mm												
F) Ergebnis FIZ												

Tab. 49: Dehnungen während der Gesteinskörnungs- und AKR-Performance-Prüfungen

doch einen starken Dehnungsanstieg ab dem 140. Tag der Lagerung. Daher muss der Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland für die Verwendung in Waschbeton als nicht geeignet bezeichnet werden. In der Klimawechsellaagerung mit 0,6 mol/l NaCl in

der Prüflösung wurde der Grenzwert zwischen dem 6. und dem 8. Lagerungszyklus ebenfalls nicht erreicht. Der beobachtete starke Anstieg der Dehnung zwischen dem 6. und dem 8. Lagerungszyklus führte jedoch dazu, dass das FIB den Rhyo-

Gesteinskörnung (Splitt)		Gesteinskörnungsprüfung					Performance-Prüfung am Waschbeton				
		SPV 80 °C FIZ	SPV 80 °C FIB	MST 70 °C	NK <sup>(2)</sup> 40 °C	60°C-BV <sup>(6)</sup>	60 °C <sup>(8)</sup> 0 % NaCl <sup>(5)</sup>	60°C <sup>(8)</sup> 3 % NaCl <sup>(5)</sup>	60°C <sup>(8)</sup> 10 % NaCl	KWL H <sub>2</sub> O	KWL 0,6 mol NaCl
GK	Fraktion	5/8 mm			5/16 bzw. 2/16 mm		5/8 mm				
1.2.1	Andesit I Mitteldeutschland	v	v	v	v	v	k. A.	k. A.	v	v	v
1.2.2	Rhyolith Süddeutschland	v	v	v	v	v	k. A.	k. A.	v	v	v
1.2.3	Gabbro	v	v	v	v	v	k. A.	k. A.	v	v	v
1.3.1	Rhyolith Mitteldeutschland	∅	∅	∅	v <sup>(6)</sup>	∅	k. A.	k. A.	v <sup>(A)</sup>	v	v <sup>(B)</sup>
1.4.1	Andesit II Mitteldeutschland	∅	∅	∅	v <sup>(7)</sup>	∅	k. A.	k. A.	∅	v	∅
1.4.3	Granodiorit II 5/8	v <sup>(1)</sup>	v	∅	∅ <sup>(3)</sup>	∅	k. A.	k. A.	∅	v <sup>(C)</sup>	∅
1.4.3	Granodiorit II 2/8	k. A.	v	∅	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	v	∅
1.4.2	Granodiorit I 8/16 <sup>(D)</sup>	k. A.	v	∅	v <sup>(E)</sup>	∅ <sup>(F)</sup>	k. A.	k. A.	k. A.	v	∅

v (grün) Dehnung erreichte bzw. überschritt den Grenzwert nicht  
v (rot) Dehnung unter dem Grenzwert, Prüfung wegen eines anderen Kriteriums nicht bestanden  
∅ Dehnung über dem Grenzwert  
k. A. keine Aussage

Tab. 50: Aussagen der Gesteinskörnungs- und AKR-Performance-Prüfungen (Fußnoten s. Tabelle 49)

lith-Splitt aus Mitteldeutschland als nicht geeignet für die Herstellung von Waschbeton im Hinblick auf das Risiko einer schädigenden Alkalireaktion im Beton bewertet (siehe Tabelle 48).

Der Andesit-Splitt II aus Mitteldeutschland (GK 1.4.1) konnte mit dem Ergebnis beider Schnelltests nicht als unbedenklich hinsichtlich einer Alkalireaktion im Beton bewertet werden. In der 40°C-Nebelkammerlagerung zeigte sich der Andesit-Splitt II als „unbedenklich hinsichtlich einer Alkalireaktion“. Der untersuchte Waschbeton mit 430 kg Straßenbauzement je m<sup>3</sup> Beton und Andesit-Splitt II aus Mitteldeutschland als Gesteinskörnung erwies sich in der Klimawechsellagerung mit Beaufschlagung von Wasser als unbedenklich hinsichtlich des Risikos einer schädigenden Alkalireaktion im Beton. Im 60°C-Betonversuch mit 10 M.-% NaCl und in der Klimawechsellagerung mit 0,6 mol/l NaCl in der Prüflösung wurde der Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung überschritten. Somit führten diese beiden AKR-Performance-Prüfverfahren zu der Aussage, dass der Andesit-Splitt II aus Mitteldeutschland für die Herstellung von Waschbeton für die Feuchtigkeitsklasse WS ungeeignet im Hinblick auf das Risiko einer schädigenden Alkalireaktion im Beton ist.

Die Gesteinskörnung Granodiorit-Splitt II (GK 1.4.3) wurde mit dem Referenzprüfverfahren als unbedenklich bewertet. Mit der 40°C-Nebelkammerlagerung und dem Alternativverfahren konnte diese Gesteinskörnung nicht als unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion im Beton bewertet werden. In der Klimawechsellagerung mit Wasser als Prüflösung wurde der Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung nicht zwischen dem 6. und 8. Zyklus, jedoch zwischen dem 9. und 10. Zyklus überschritten. Die Überschreitung der maximal zulässigen Dehnung von Waschbeton mit 430 kg Straßenzement je m<sup>3</sup> und Granodiorit-Splitt II als Gesteinskörnung im 60°C-Betonversuch mit 10 M.-% NaCl in der Prüflösung bzw. in der Klimawechsellagerung mit 0,6 mol/l NaCl in der Prüflösung führen zu dem Schluss, dass der untersuchte Granodiorit-Splitt II für die Herstellung von Waschbeton ungeeignet für die Feuchtigkeitsklasse WS im Hinblick auf das Risiko einer Alkalireaktion im Beton ist.

Ergänzend zum Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung wurden die Gesteinskörnungen mit dem 60°C-Betonversuch über Wasser gemäß Alkali-Richtlinie Teil 3, Anhang B (Gesteinskörnungsprüfung) untersucht. Das französische Verfahren ist Grundlage des RILEM-Verfahrens AAR-4 [3]



Gesteinskörnung (Splitt)		AKR-Merkmale			AKR-Potenzial der groben Gesteinskörnung
		AKR-Gel in Poren	Risse im Gesteinskorn	Risse im Zementstein	
1.2.1	Andesit I Mitteldeutschland	x	–	–	0
1.2.2	Rhyolith Süddeutschland	x	–	–	0
1.2.3	Gabbro	x	–	–	0
1.3.1	Rhyolith Mitteldeutschland	x	x	–	++
1.4.1	Andesit II Mitteldeutschland	x	x	x	+++
1.4.2	Granodiorit I	x	(x)	–	+
1.4.3	Granodiorit II	x	x	–	++

x vorhanden  
– nicht vorhanden  
0 keine AKR-Merkmale erkennbar = Festgesteinskörnung ausreichend alkaliunempfindlich  
+ vermehrtes Auftreten von AKR-Merkmalen = Festgesteinskörnung alkaliempfindlich/alkalireaktiv  
++ häufiges Auftreten von AKR-Merkmalen = Festgesteinskörnung (deutlich) alkaliempfindlich/alkalireaktiv  
+++ AKR-Merkmale treten in Beton schädigendem Ausmaß auf = Festgesteinskörnung (stark) alkaliempfindlich/alkalireaktiv

**Tab. 51:** Beobachtungen und Aussagen aus den Dünnschliffuntersuchungen des FIB an Betonproben nach der Klimawechsellaagerung mit 0,6 molarer NaCl-Lösung in Bezug auf das Auftreten von AKR-Merkmalen

(siehe Literatur – Teil 2). Es dient dort u. a. der Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Dehnung nach einer 20wöchigen Lagerung weniger als 0,3 mm/m beträgt [1]. Dieser Grenzwert wurde auch nach Erfahrungen von [4] als Wert für die maximal zulässige Dehnung bestätigt. Mit dem 60°C-Betonversuch über Wasser wurde der Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung von Beton mit den Gesteinskörnungen Andesit-Splitt I Mitteldeutschland, Rhyolith-Splitt Süddeutschland bzw. Gabbro-Splitt nicht erreicht. Der mit den Gesteinskörnungen Rhyolith Mitteldeutschland, Andesit II Mitteldeutschland bzw. Granodiorit hergestellte Beton überschritt mit diesem Prüfverfahren den Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung (0,45 mm/m, 0,36 mm/m bzw. 0,89 mm/m).

## 2 Schlussfolgerungen

### 2.1 Eignung der AKR-Prüfverfahren nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb für die Prüfung von Gesteinskörnungen für Waschbeton

Im Rahmen des Forschungsprojektes sollte geklärt werden, ob mit den Standardprüfverfahren nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) die Alkaliemp-

findlichkeit bzw. Eignung von Gesteinskörnungen, die in Waschbeton verwendet werden sollen, der Erfahrung entsprechend korrekt beurteilt wird. Es geht also zum einen darum zu klären, ob Gesteinskörnungen, die für die Verwendung in Waschbeton hinsichtlich der Gefahr für das Auftreten einer schädigenden AKR geeignet sind, sowohl mit dem Referenzprüf- bzw. dem Alternativverfahren nach Alkali-Richtlinie als auch mit dem Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung bzw. dem 60°C-Betonversuch über Wasser gleichlautend als solche bewertet werden.

Es hat sich gezeigt, dass dies für die Prüfergebnisse aller untersuchten und als ausreichend alkaliunempfindlich bekannten Gesteinskörnungen (GK 1.2.1 bis GK 1.2.3) der Fall ist. Bei der Prüfung der als alkaliempfindlich bzw. potenziell alkaliempfindlich bezeichneten Gesteinskörnungen wurde festgestellt, dass die Aussagen auf Basis der Untersuchungsergebnisse verschiedener Prüfverfahren nicht in jedem Fall gleichlautend ausfallen. Daher werden die Ergebnisse jeder Gesteinskörnung einzeln betrachtet.

Darüber hinaus war im Rahmen des Forschungsprojektes zu untersuchen, ob die Ergebnisse der beiden AKR-Performance-Prüfverfahren (60°C-Betonversuch des FIZ mit bzw. ohne Alkalizufuhr und Klimawechsellaagerung des FIB mit Alkalien bzw. mit Wasser) auch für Waschbetone gut übereinstimmen.

### **Andesit-Splitt I aus Mitteldeutschland (GK 1.2.1), Rhyolith-Splitt aus Süddeutschland (GK 1.2.2) und Gabbro-Splitt (GK 1.2.3)**

Die Ergebnisse der verwendeten AKR-Prüfverfahren nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie bestätigen den aktuellen Stand der Erfahrungen in Bezug auf die Alkaliempfindlichkeit der o. g. Gesteinskörnungen für die Verwendung in Straßenbaubetonen für die alte Standardbauweise. Die Aussagen aller verwendeten AKR-Prüfverfahren nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie stimmten überein, da die Gesteinskörnungen Andesit-Splitt I Mitteldeutschland, Rhyolith-Splitt Süddeutschland und Gabbro-Splitt im Waschbeton als „ausreichend alkaliunempfindlich“ bewertet wurden. Für alle drei Gesteinskörnungsprüfungen wurde die Eignung für Waschbeton hinsichtlich des Risikos für das Auftreten einer schädigenden AKR korrekt vorhergesagt.

Mithilfe von Dünnschliffuntersuchungen (siehe Tabelle 51) nach dem Ende der FIB-Klimawechsellaagerung mit 0,6 molarer NaCl-Lösung wurde in den Betonen, die unter Verwendung von Andesit-Splitt I aus Mitteldeutschland, Rhyolith-Splitt aus Süddeutschland bzw. Gabbro-Splitt hergestellt wurden, AKR-Gel als Reaktionsprodukt einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion gefunden. Als Ursache für die Entstehung von AKR-Gel wurde das Vorhandensein reaktionsfähiger Flinte in der Sandkörnung festgestellt. Eine Beteiligung der jeweiligen Splittkörnung an der Entstehung des AKR-Gels konnte aber in keinem Fall eindeutig nachgewiesen werden. Da das entstandene AKR-Gel weder zu Rissen im Gesteinskorn noch zu einer Schädigung des Zementsteingefüges führte, muss die AKR als nicht schädigend bezeichnet werden. Ein Potenzial für eine schädigende AKR konnte für die drei Gesteinskörnungen daher nicht festgestellt werden.

### **Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland (GK 1.3.1)**

Mit beiden Schnelltests am Mörtel wurde der Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung mit dem untersuchten Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland überschritten.

Mit dem 60°C-Betonversuch mit 10 M. % NaCl in der Prüflösung (Performance-Prüfung) wurde der Grenzwert ebenfalls nicht erreicht, jedoch trat nach 140 Tagen ein sehr starker kontinuierlicher Anstieg der Dehnung auf.

Der Grenzwert wurde mit der Klimawechsellaagerung mit 0,6 molarer NaCl-Lösung nicht erreicht.

Wegen des starken Anstiegs der Dehnung ab dem 6. Zyklus wurde diese Gesteinskörnung jedoch als „nicht für Waschbeton für Fahrbahndecken geeignet“ bewertet. Ausschlaggebendes Bewertungskriterium war die Überschreitung des Grenzwerts der maximal zulässigen Dehnung noch vor dem 12. Zyklus. Mithilfe von Dünnschliffuntersuchungen (siehe Tabelle 3) nach dem Ende der Klimawechsellaagerung (FIB) konnten in Betonproben vereinzelt Risse in der Gesteinskörnung und AKR-Reaktionsprodukte in einzelnen angrenzenden Poren des Zementsteingefüges beobachtet werden. Ein schädigender Verlauf war bei weiterer Prüfung zu erwarten. Daher wurde dem Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland ein Potenzial für das Auftreten einer schädigenden AKR zugeschrieben.

Mit dem 60°C-Betonversuch über Wasser (Gesteinskörnungsprüfung) wurde der Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung des Rhyolith-Splitts aus Mitteldeutschland für Waschbeton für die Feuchtigkeitsklasse WS überschritten.

Der Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung (Gesteinskörnungsprüfung) wurde mit dem Rhyolith-Splitt aus Mitteldeutschland bestanden. Der Dehnungsgrenzwert (9-Monats-Grenzwert) wurde auch nach 365 Tagen nicht erreicht. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Dehnung 0,47 mm/m. Die Rissweite am 300-mm-Würfel betrug nach rd. 365 Tagen mehr als 0,2 mm.

Das Ergebnis beider AKR-Performance-Prüfverfahren lautet: „Nicht geeignet für Beton für Fahrbahnen der Feuchtigkeitsklasse WS im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton“.

### **Andesit-Splitt II Mitteldeutschland (GK 1.4.1)**

Mit beiden Schnelltests am Mörtel und mit dem 60°C-Betonversuch über Wasser (Gesteinskörnungsprüfung) wurde mit dem untersuchten Andesit-Splitt II aus Mitteldeutschland der jeweilige Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung überschritten. Mit den beiden AKR-Performance-Prüfverfahren wurden die maximal zulässigen Dehnungen ebenso überschritten. Zusätzlich wurde mittels Dünnschliffuntersuchungen nach der Klimawechsellaagerung mit 0,6 molarer NaCl-Lösung (Ergebnisse siehe Tabelle 51) neben AKR-Gel in den Zementsteinporen auch Risse im Gesteinskorn gefunden, die sich bis in den Zementstein fortsetzen. Somit wurde nachgewiesen, dass im Beton mit An-

desit-Splitt II aus Mitteldeutschland eine schädigende AKR abgelaufen ist. Die Aussagen beider AKR-Performance-Prüfungen lauten daher übereinstimmend: „Andesit-Splitt II aus Mitteldeutschland ist für die Verwendung in Betonfahrbahnen in Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton nicht geeignet“.

Mit dem Betonversuch mit 40°C-Nebelkammerlagerung wurde der Grenzwert der maximal zulässigen Dehnung hingegen nicht erreicht. Die Betonbalken mit Andesit-Splitt II Mitteldeutschland zeigten auch nach 365 Tagen Nebelkammerlagerung keine weitere Dehnungszunahme. Mit den Ergebnissen der 40°C-Nebelkammerlagerung bzw. der Klimawechsellagerung über Wasser im Rahmen einer Gesteinskörnungsprüfung allein wäre die Alkaliempfindlichkeit dieser Gesteinskörnung anders bewertet worden als auf Basis der Ergebnisse des 60°C-Betonversuchs über Wasser (Gesteinskörnungsprüfung).

#### **Granodiorit-Splitt I (GK 1.4.2 – frühere Untersuchungen des FIB)**

In Dünnschliffuntersuchungen des FIB an Betonproben mit dem Granodiorit I wurde nach der Klimawechsellagerung mit 0,6 molarer NaCl-Lösung vereinzelt AKR-Gel gefunden, dessen Entstehung zum Teil dem Granodiorit zugeschrieben wird. Ein Teil des entstandenen AKR-Gels wurde nicht dem Splitt, sondern der Reaktivität des Sandes zugeschrieben. Darüber hinaus wurde dem Granodiorit I aufgrund der aufgetretenen Dehnungen in der Klimawechsellagerung ein Potenzial für das Auftreten einer schädigenden AKR zugeschrieben. Daher wird der Granodiorit-Splitt I für die Verwendung in Straßenbetonen der Feuchtigkeitsklasse WS im Hinblick auf das Risiko für das Auftreten einer schädigenden AKR als nicht geeignet bezeichnet.

Der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren) und der 60°C-Betonversuch mit Lagerung über Wasser (beides Gesteinskörnungsprüfungen) wurden bei Verwendung des Granodiorit-Splitts I nicht bestanden.

#### **Granodiorit-Splitt II (GK 1.4.3)**

Mit den beiden AKR-Performance-Prüfverfahren wurde festgestellt, dass der Granodiorit-Splitt II für Waschbeton nicht geeignet ist. Das 80°C-Schnellprüfverfahren hingegen wurde mit dem Granodiorit-Splitt bestanden. Auch die Wiederholung dieser Untersuchung mit dem 80°C-Schnellprüfverfahren

führte zu keinem anderen Ergebnis (Dehnung nach 13 Tagen 0,63 mm/m).

Die 40°C-Nebelkammerlagerung, der 60°C-Betonversuch über Wasser sowie das 70°C-Alternativverfahren (Mörtelschnelltest) wurden mit Granodiorit-Splitt II ebenso wie die AKR-Performance-Prüfung nicht bestanden.

Als Ursache für die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen im Schnellprüfverfahren (Referenzprüfverfahren) und im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (40 °C) bzw. im Mörtelschnelltest (Alternativverfahren) kommen z. B. der jeweils unterschiedliche Aufbereitungszustand der Gesteinskörnung bzw. die unterschiedlich lange Prüfdauer in Betracht. Man geht davon aus, dass der Granodiorit ein Flächensystem aufweist, das im Splitt (> 4 mm) noch vollständig erhalten ist. Bei der Verwendung im Beton stellen die Flächen in den Splittkörnern Wegsamkeiten für die Porenlösung dar. Die alkalische Porenlösung kann unter Umständen infolge der vorhandenen Wegsamkeiten in den Körnern eine AKR auslösen und eine Dehnung der Probekörper bewirken. Bei der Aufbereitung des Gesteins für das Referenzprüfverfahren auf < 4 mm könnte der Splitt dagegen bevorzugt an den Flächen im Gestein zerbrechen, sodass das gebrochene Material kaum noch Wegsamkeiten ins Innere der Körner aufweist. Aufgrund fehlender Wegsamkeiten in Verbindung mit der relativ kurzen Lagerung von 13 Tagen dringt aller Wahrscheinlichkeit nach wesentlich weniger alkalische Lösung in die Körner ein als dies bei derselben, aber ungebrochenen Gesteinskörnung der Fall wäre. In den Körnern wird daher keine schädigende AKR ausgelöst. Reaktionen an der Außenseite der Körner erzeugen keinen Druck in den Körnern und daher keine Dehnung der Probekörper. Über die längere Lagerungsdauer von 28 Tagen im Alternativverfahren hinweg dringt möglicherweise genug Porenlösung in die vorhandenen Wegsamkeiten der Körner ein, um im Inneren eine AKR auszulösen und bei den Probekörpern eine Dehnung zu bewirken. Bei dieser Erklärung handelt es sich um eine nicht verifizierte Arbeitshypothese.

In Dünnschliffuntersuchungen nach der Klimawechsellagerung zeigte sich, dass Risse sowohl im Splittkorn als auch im Zementstein vorhanden sind. An einzelnen Rissflanken des Splittkorns und einigen Poren des Zementsteins findet sich AKR-Gel. Diese Merkmale zeigen, dass der Granodiorit-Splitt II über Potenzial zur Entstehung einer schädigenden AKR verfügt.

Der Granodiorit-Splitt II wurde auf der Grundlage der Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen wegen seiner starken Dehnungszunahme und der Dünnschliffergebnisse als nicht geeignet für Straßen der Feuchtigkeitsklasse WS im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden AKR bewertet. Mit dem Referenzprüfverfahren hingegen, bei dem der Grenzwert nicht erreicht wurde, konnte dies nicht korrekt vorhergesagt werden (Einstufung in E I-S). Im Vergleich dazu wurden die Gesteinskörnungsprüfungen (Alternativverfahren (Mörtelschnelltest), 40°C-Nebelkammerlagerung, 60°C-Betonversuch) nicht bestanden, d. h. eine Bewertung bzw. Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse war auf Basis dieser Ergebnisse nicht möglich.

Die Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen lieferten schlussendlich genauso wie die Dünnschliffuntersuchungen (Ergebnisse siehe Tabelle 51) die Aussage, dass der Granodiorit-Splitt II für Waschbeton für Straßen der Feuchtigkeitsklasse WS im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden AKR nicht geeignet ist.

## 2.2 Einfluss der freiliegenden Splittkörner auf den Ablauf einer AKR

Auf die Herstellung von Betonplatten 30 x 15 cm<sup>2</sup> zur Beurteilung der Oberfläche (Pop-outs) und Bestimmung der Haftzugfestigkeit sowie Beaufschlagung mit Taumittel-Lösung/destilliertem Wasser bei 60 °C über Wasser wurde aufgrund vorliegender Erkenntnisse aus früheren Forschungsprojekten verzichtet [5, 6].

In diesen Forschungsprojekten wurde das Risiko für das Eintreten einer schädigenden Alkali-Kiesel-säure-Reaktion bei Waschbeton mit einer Performance-Prüfung mit dem 60°C-Betonversuch untersucht. Außerdem wurde an Platten mit Waschbetonoberfläche geprüft, ob durch die teilweise freiliegenden Splittkörner die Gefahr einer schädigenden AKR erhöht wurde und zu Pop-outs vereinzelter Splittkörner führte.

In den Untersuchungen stellte sich heraus, dass die beiden auf die Oberfläche aufgetragenen Oberflächenverzögerer keinen signifikanten Einfluss auf die Gefügeausbildung im oberflächennahen Bereich des Betons hatten, was sich in einer in etwa gleich hohen Haftzugfestigkeit der Oberfläche mit bzw. ohne Oberflächenverzögerer zeigte. Nach der Lagerung in 60°C über Wasser bzw. in Taumittel-

lösung mit 10 M.-% NaCl war die Haftzugfestigkeit der geschalteten Rückseite der Waschbetonplatten nur geringfügig höher als auf deren texturierter Oberseite. Eine Schädigung des oberflächennahen Mörtels durch die Verzögerer-Einwirkung ist daher nicht zu befürchten. Pop-outs der oberflächennahen Körner in der texturierten Waschbetonoberfläche konnten nicht beobachtet werden.

In den Dünnschliffuntersuchungen des FIB konnten im Bereich der Waschbetonoberfläche keine Reaktionsprodukte einer AKR gefunden werden.

## 2.3 Abschließende Hinweise

Für die Bewertung der Eignung der untersuchten groben Gesteinskörnungen zur Herstellung von Waschbeton in der Feuchtigkeitsklasse WS im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kiesel-säure-Reaktion (AKR) können zusammenfassend folgende Hinweise gegeben werden:

Die Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der sechs groben Gesteinskörnungen auf Basis der Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen ergab, dass drei der Gesteinskörnungen als „geeignet für die Feuchtigkeitsklasse WS im Hinblick auf die Vermeidung einer schädigenden AKR“ zu bezeichnen sind. Bei ausschließlicher Verwendung der Ergebnisse der Standardprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie konnte diese Aussage getroffen werden, wenn eine der folgenden Bedingungen erfüllt war:

- Alle Gesteinskörnungsprüfungen nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb wurden bestanden.
- Der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren) nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wurde bestanden.
- Der 60°C-Betonversuch nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie wurde bestanden.

Die alleinige Anwendung des Referenzprüfverfahrens führte in einigen wenigen Fällen zu einer anderen Bewertung der Alkaliempfindlichkeit als mit der AKR-Performance-Prüfung. Gleiches gilt für die Anwendung des 9-Monats-Grenzwertes des Betonversuchs mit 40°C-Nebelkammerlagerung.

Ein Einfluss der Waschbetonoberfläche auf den Ablauf einer AKR konnte bei den untersuchten Betonzusammensetzungen nicht nachgewiesen werden. Im Bereich der Waschbetonoberflächen wurden in keinem Fall AKR-Reaktionsprodukte gefunden.

## Literatur

### Teil 2 – Untersuchungen des FIZ

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton. Alkali-Richtlinie. Berlin : Beuth, 2007 (DAfStb-Richtlinie)
- [2] MÜLLER, C.; BORCHERS, I.; EICKSCHEN, E.: AKR-Prüfverfahren : Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. In: Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007) 8, S. 528-538
- [3] RILEM Recommended Test Method AAR-4: Detection of potential alkali-reactivity – 60°C accelerated method for testing aggregate combinations using concrete prisms – Committee Document RILEM/TC-ARP/06/22, 2006 (to be published in Materials & Structures)
- [4] NIXON, P. J.; LINDGÅRD, J.; BORCHERS, I.; WIGUM, B. J.; SCHOUENBORG, B.: The EU “PARTNER” Project – European standard tests to prevent alkali reaction in aggregates final results and recommendations. In: BROEKMANS, M. A. T. M.; WIGUM, B. J. (eds): Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, 2008
- [5] MÜLLER, C.; EICKSCHEN, E.: Untersuchungen an Betonplatten mit Waschbetonoberflächen, Technischer Bericht TB-BTe 1977/BASt/2008, Forschungsinstitut der Zementindustrie Düsseldorf, 2008
- [6] MÜLLER, C.; EICKSCHEN, E.: Dauerhaftigkeit von Fahrbahndeckenbeton in Waschbetonbauweise, IGF-Vorhaben 15298 N, AiF-Schlussbericht vom 23.04.2010

### Teil 3 – Untersuchungen des FIB

- [1] STARK, J.; WICHT, B.: Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser Verlag, Basel, 2001
- [2] STARK, J. u. a.: Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Schriftenreihe des F. A. Finger-Instituts für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, 2008
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 15/2005 und Nr. 12/2006, Sachgebiet 06.1: Straßenbaustoffe; Anforderungen, Eigenschaften/Sachgebiet 06.2: Straßenbaustoffe; Qualitätssicherung
- [4] DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DIN, Beuth-Verlag, Berlin 2001
- [5] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 14/2006, Sachgebiet 04.4: Straßenbefestigung; Bauweisen/Sachgebiet 06.1: Straßenbaustoffe; Anforderungen, Eigenschaften
- [6] SEYFARTH, K.; GIEBSON, C.: Beurteilung des AKR-Schädigungspotenzials von Betonen mittels Klimawechsellagerung. Beitrag zum 45. Forschungskolloquium des DAfStb (6./7. Oktober 2005, Wien), Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), S. 189-192
- [7] STARK, J.; FREYBURG, E.; GIEBSON, C.: Latest Insights and Advances in Understanding the ASR. International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), Cape Town, Südafrika, 21.-23. November 2005, Tagungsband
- [8] STARK, J.; SEYFARTH, K.: Performance Testing Method for Durability of Concrete Using Climate Simulation. Proceedings of the 7<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, May 28 – June 3, 2006, Ed. by V. M. MALHOTRA, S. 305-326

- [9] STARK, J.; GIEBSON, C.: Assessing the Durability of Concrete Regarding ASR. Proceedings of the 7<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Montreal, Canada, May 28 – June 3, 2006, Ed. by V. M. MALHOTRA, S. 225-238
- [10] STARK, J.; SEYFARTH, K.; GIEBSON, C.: Beurteilung der Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen und AKR-Performance-Prüfung Beton. 16. Internationale Baustofftagung 20.-23.09.2006, Weimar, Tagungsbericht Band 2, S. 399-426
- [11] STARK, J.; FREYBURG, E.; SEYFARTH, K.; GIEBSON, C.: AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen. beton – Die Fachzeitschrift für Bau+Technik, Verlag Bau+Technik GmbH, Nr. 12/2006 (56. Jahrgang), S. 574-581
- [12] FREYBURG, E.; SCHLIFFKOWITZ, D.: Bewertung der Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen nach petrografischen und mikrostrukturellen Kriterien. 16. Internationale Baustofftagung 2006, Weimar, Tagungsbericht Band 2, S. 355-372
- [13] STARK, J.; FREYBURG, E.; SEYFARTH, K.; GIEBSON, C.; ERFURT, D.: Bewertung der Alkaliaktivität von Gesteinskörnungen. Beton- und Stahlbetonbau (102), Heft 8, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2007, S. 500-510
- [14] STARK, J.; BELLMANN, F.; GATHEMANN, B.; SEYFARTH, K.; GIEBSON, C.: Einfluss alkalihaltiger Enteisungsmittel auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Betonen für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen. ZKG INTERNATIONAL, No. 11-2006 (Vol. 59)
- [15] STARK, J.; SEYFARTH, K.: Assessment of specific pavement concrete mixtures by using an ASR performance-test. In: BROEKMANS, M. A. T. M.; WIGUM, B. J. (eds): Proceedings of the 13<sup>th</sup> ICAAR, Trondheim, Norway, 2008, 320-329
- [16] AiF/DBV-Nr. 14690 BR/268: Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von slow/late Gesteinskörnungen aus Deutschland. Auftraggeber: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V. Schlussbericht: Verbundforschung Alkali-Kieselsäure-Reaktion/AKR-Prüfverfahren. 29.07.2008
- [17] SEYFARTH, K.; GIEBSON, C.; STARK, J.: Prevention of deleterious ASR by assessing aggregates and specific concrete mixtures. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Concrete and Development, Tehran, Iran, 2009
- [18] SEYFARTH, K.; GIEBSON, C.; STARK, J.: AKR-Performance-Prüfung für Fahrbahndecken aus Beton: Erfahrungen aus Labor und Praxis im Vergleich. 17. Internationale Baustofftagung, Weimar (2009)
- [19] STARK, J. et al.: 70 years of ASR with no end in sight? ZKG International, No. 4-2010, pp. 86-95 (Part 1) und No. 5-2010, pp. 55-70 (Part 2), 2010
- [20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): ZTV Beton-StB 07 – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, 2007

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

### 2005

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren  
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

### 2006

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt  
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben  
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt  
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk  
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund  
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

### 2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen  
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen  
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

### 2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise  
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden € 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton  
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)  
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

### 2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen  
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt  
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmeßmethode  
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

### 2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes  
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten  
Blume € 16,00

**S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA)**

Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller,  
Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

**S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus**  
Freudenstein, Birmann € 14,00

**2011**

**S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen**  
Breitenbücher, Youn € 14,50

**S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalserkennung im Rahmen des TP3**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Canzler, Winkler € 16,50

**S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt**  
Ripke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen**  
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

**S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen**  
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter [http:// bast.opus.hbz-nrw.de](http://bast.opus.hbz-nrw.de) heruntergeladen werden.  
Jansen, Kurz € 16,00

**S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ im September 2010 in Bonn** € 15,00

**S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten – Teil 2: Neue Baumaßnahmen**  
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

**S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren „Bewertetes Längsprofil“ – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung**  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

**2012**

**S 74: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche**  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“ € 30,50

**S 75: Abschätzung der Risiken von Hang- und Böschungsrutschungen durch die Zunahme von Extremwetterereignissen**  
Krauter, Kumerics, Feuerbach, Lauterbach € 15,50

**S 76: 42. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau**  
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

**S 77: Netzplanung – Netzbildung – Netzbereinigung**  
Durner € 16,50

**S 78: Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Verfahren**  
Bürckert, Gauterin, Unrau € 16,50

**2013**

**S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung**  
Ripke € 9,00

**S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden**  
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

**S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts**  
Durner € 15,00

**2014**

**S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control**  
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung  
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier  
Jansen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn**  
Durner € 17,00

**S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen**  
Maerschalk, Oertelt € 19,00

**S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®**  
Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**2015**

**S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgebundenen, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht**  
Radenberg, Miljković, Schäfer in Vorbereitung

**S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung**  
Müller, Seidel, Böhm in Vorbereitung

**S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten**  
Hunger, Börner in Vorbereitung

**S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten**  
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche**  
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH  
Zweite Schlachtpforte 7  
28195 Bremen  
Tel. (0421) 3 69 03-53  
Fax (0421) 3 69 03-48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.