

Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 88

bast

Verwendung von AKR-geschädigtem Beton aufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten

von

Klaus-Jürgen Hüniger
Carmen Börner

Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl Baustoffe und Bauchemie

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 88

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 84.0109/2009:
Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichtents

Fachbetreuung
Sabine Hulan
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

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-212-4

Bergisch Gladbach, November 2015

Kurzfassung – Abstract

Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten

Durch vergleichende Untersuchungen an einem RC-Baustoffgemisch, bei dem die Gesteinskörnung aus einem AKR-geschädigten Autobahnabschnitt gewonnen worden ist, und einem Referenzgemisch (ohne AKR-Vorschädigung) sollte die Eignung des AKR-RC-Gemisches als Baustoffgemisch für hydraulisch gebundene Tragschichten untersucht werden. Umfassende Untersuchungen zur Charakterisierung der beiden Ausgangsmaterialien, der Baustoffgemische und an daraus hergestellten HGT-Probekörpern wurden durchgeführt.

Im Ergebnis der Untersuchungen kann gezeigt werden, dass das AKR-geschädigte RC-Baustoffgemisch bezüglich seiner körnungsspezifischen Eigenschaften das Potenzial für eine Verwendung als Frostschutzschicht und auch für eine hydraulisch gebundene Tragschicht besitzt. Eine entsprechende Klassierung zum Erreichen bzw. Einstellen der nach Norm geforderten Kennwerte ist ohne weiteres möglich. Auch die erreichbaren Druckfestigkeiten des Baustoffgemisches liegen mit deutlich über 10 N/mm^2 (im Mittel 15 N/mm^2) in einem Bereich, der das Material für den Anwendungsfall HGT interessant erscheinen lässt. An diesen Festigkeiten ändert sich auch signifikant nichts bei Veränderung der Umgebungsbedingungen (erhöhte Temperaturen bis $40 \text{ }^\circ\text{C}$, hohe Luftfeuchten bis 100% und Alkalizufuhr).

Deutliche Einschränkungen gelten für das Formänderungsverhalten der mit den AKR-geschädigten RC-Baustoffgemischen hergestellten HGT-Proben, insbesondere dann, wenn diese den reaktionsbeschleunigenden Bedingungen einer AKR-Performance-Prüfung ausgesetzt sind. Die an den Baustoffproben gemessenen Dehnungen sind mit ca. 1 mm/m recht hoch, nicht nur im Vergleich zum aktuell geltenden Grenzwert von $0,5 \text{ mm/m}$ (der hier nicht anzusetzen ist), insbesondere im Vergleich zu den Messwerten, die am Referenzmaterial ermittelt werden. Anhand des Kurvenverlaufes ist ersichtlich, dass der Dehnungsendwert nach 10 Zyklen noch nicht erreicht ist. Als Ursache für dieses Verhalten muss eine Kombination/Überlagerung aus weiterhin stattfindender schädigender

AKR (was durch die Untersuchungen unter dem Mikroskop aber nicht zweifelsfrei bestätigt werden konnte) und einer sekundären Ettringitbildung in Betracht gezogen werden. Aus diesen Ergebnissen sollte eine Verwendung von AKR-geschädigten RC-Baustoffgemischen für HGT für jede Baumaßnahme separat bewertet werden.

Use of ASR-damaged concrete recycling material for hydraulically bound base layer

Based on a comparison between a RC-building material mixture, produced from an ASR-damaged concrete road pavement, and a reference RC-building material mixture (without any pre damage) the suitability for using ASR-damaged RC-building material as a mixture in a hydraulically bound base layer (HGT) should be investigated. Therefore comprehensive investigations were made to characterize the starting materials, the RC-building material mixtures and the hydraulically bound base layer (HGT) samples.

As a result of these investigations could be shown that the ASR-damaged RC-material mixture can be used for a frost protection layer and also for a hydraulically bound base layer (HGT) because of the specific grain properties of the aggregates. It is possible without any problems to reach the parameters demanded by norm with a specific classification process (braking and sieving). The compressive strength values could also be determined to a range of 10 MPa and more (the average value is 15 MPa), demonstrating the potential of the material. These strength values do not change significantly under changed testing conditions (increased temperature up to $40 \text{ }^\circ\text{C}$, high relative humidity up to 100% and alkali supply).

Substantial restrictions are valid for the expansion behavior of the samples which are produced with the ASR-damaged RC-building material mixtures especially if these samples are stored under reaction accelerated conditions of the ASR-performance test method. The measured expansions with approximately 1 mm/m are rather high in comparison not only to the actual limit value of this method (the limit value is 0.5 mm/m but it

cannot be taken in this case) but also to the values measured at the reference building material mixture. The expansion curves show that the final value is not even reached after 10 testing cycles. The reason for this expansion behavior might be a combination/superposition of an ASR-damaging process which continues to take place (but this mechanism could not be clearly confirmed by microscopic investigations) and a delayed ettringite formation. Based on these results the use of ASR-damaged RC-building material mixtures for hydraulically bound base layers (HGT) should be evaluated separately for each building project.

Inhalt

1	Vorbemerkung und Zielsetzung	7	5.3	Untersuchungen der HGT-Probe- körper – Formänderungen	24
2	Ausgangsstoffe – Prüfungen nach DIN EN 13242 und TL Gestein-StB 04/07	7	5.3.1	Untersuchungen mit dem Referenz-Baustoffgemisch	25
2.1	RC-Baustoff aus AKR – unempfind- lichem Gemisch (Referenzgemisch) . . .	7	5.3.2	Untersuchungen mit dem vorgeschiedigten AKR-RC- Baustoffgemisch	27
2.2	RC-Baustoff aus AKR – geschädigtem Gemisch (BAB A 14)	10	5.4	Mikroskopische Untersuchungen der HGT-Probekörper nach Lagerung	28
2.3	Beurteilung der Qualität der RC-Ausgangsstoffe	12	5.4.1	Untersuchungen am Probekörper, hergestellt mit dem Referenz- material	28
3	Baustoffgemische – Prüfungen nach TL Beton-StB 07 und TP HGT-StB 94	12	5.4.2	Untersuchungen an Probekörpern, hergestellt mit dem AKR-RC-Bau- stoffgemisch	29
3.1	RC-Baustoffe aus AKR – unempfind- lichem Material (Referenz)	12	6	Auswertung und Schlussfolgerungen	32
3.2	RC-Baustoffgemisch aus AKR – geschädigtem Gemisch	17	7	Literatur	34
3.3	Bewertung der Ergebnisse der Baustoffgemische	21			
4	Prüfungen an HGT-Probekörpern – Festigkeiten	21			
4.1	HGT-Probekörper (zylinderförmige Proben) und Festigkeiten	21			
4.2	Bestimmung der Veränderung von Baustoffkennwerten infolge Klima- lagerung	21			
5	Prüfungen an Probekörpern – Formänderungen	22			
5.1	Lichtmikroskopische Untersuchungen an Bohrkernen des Autobahn- abschnittes A 14	22			
5.2	Untersuchungen an Bohrkernen des Autobahnabschnittes A 14	23			

Anhang

Die Anhänge I und II sind im elektronischen
BAST-Archiv ELBA unter:

<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar

1 Vorbemerkung und Zielsetzung

Das Grundprinzip einer hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT) ist die Realisierung einer schubfesten, vollflächigen Verbindung aller Körner untereinander in einem Baustoffgemisch. Die Übertragung der Druckkräfte erfolgt dann von Korn zu Korn. Erreicht wird dieser Zustand, wenn das Baustoffgemisch den optimalen Wassergehalt aufweist, d. h. optimaler Wassergehalt bei größter Dichte des Baustoffgemisches (Proctordichte). Bei dieser Dichte sind alle Hohlräume mit Mörtel gefüllt, aber die Körner berühren sich noch. Hierfür ist ein geringer Zementgehalt von wenigen Masseteilen ausreichend, dessen exakte Menge jedoch über entsprechend geplante Voruntersuchungen bestimmt worden ist.

Die Verwendung von RC-Baustoffen aus „normalem“ Betonaufbruch in HGT ist Stand der Technik, da solche Baustoffgemische i. d. R. die Anforderungen nach TL Beton-StB und TP HGT-StB erfüllen. Bei RC-Baustoffgemischen aus alkaligeschädigten Betonen ist die Situation dadurch verändert, dass die einzusetzenden Gesteinskörnungen erstens einen entsprechenden Vorschädigungsgrad infolge einer schädigenden AKR besitzen (geringere Kornfestigkeit, Gelmengen, die den Wasserbedarf für die optimale Verdichtung beeinflussen können) und zweitens durch noch nicht abgeschlossene Reaktionen ihr Volumen auch nachträglich ändern können. Diese beiden Grundprämissen bestimmen das durchgeführte Untersuchungsprogramm, da bei einer HGT deren Qualität (Festigkeit, Dauerhaftigkeit, Formänderung) insbesondere von der Kontaktzone der RC-Gesteinskörnungen untereinander abhängt.

Die Herangehensweise bestand darin, vergleichende Untersuchungen an einem Referenz-Baustoff (AKR-unempfindlich) und einem AKR-geschädigten RC-Baustoff hinsichtlich der Eignung des RC-Gemisches aus alkaligeschädigtem Betonaufbruch für die Verwendung als Baustoffgemisch in hydraulisch gebun-

denen Tragschichten (HGT) durchzuführen. Der Referenz-Baustoff erfüllt die Anforderungen nach Norm, was nachfolgend anhand von Prüfergebnissen dokumentiert wird. Die Kennwerte beim RC-Baustoff aus alkaligeschädigtem Betonaufbruch sind analog zum Referenzgemisch gewonnen worden. Eine Vielzahl von Ergebnissen zu beiden vergleichend untersuchten Baustoffgemischen liegt vor und wird in diesem Abschlussbericht zusammengefasst dargestellt. Am Ende wird eine Wertung der Ergebnisse hinsichtlich einer möglichen Eignung des RC-Gemisches für die Verwendung in einer HGT gegeben, die sich im Wesentlichen auf die Ergebnisse der Untersuchungen zum Formänderungsverhalten und zu möglichen Veränderungen im Gefüge der HGT-Probekörper unter dem Mikroskop stützt.

In den einzelnen Kapiteln werden die Ergebnisse tabellarisch zusammengestellt und am Ende jeden Abschnitts kurz diskutiert. Die Probenbezeichnungen und die Prüfbedingungen sind den jeweiligen Tabellen zu entnehmen.

Das Referenz-Baustoffgemisch stammt aus einer Recyclinganlage für Betonbruch aus der Region, das vergleichend zu bewertende RC-Baustoffgemisch aus alkaligeschädigtem Fahrbahndeckenbeton stammt aus einem Abschnitt der BAB A 14.

2 Ausgangsstoffe – Prüfungen nach DIN EN 13242 und TL Gestein-StB 04/07

Zur Charakterisierung der beiden RC-Baustoffe sollen die tabellarischen Übersichten der jeweiligen Prüfergebnisse nach Norm dienen. Die Anforderungen, die eingehalten werden müssen, sind in den Tabellen mit enthalten.

2.1 RC-Baustoff aus AKR – unempfindlichem Gemisch (Referenzgemisch)

Zusammensetzung nach BTR RC-StB Pkt. 3.3.1		
Die Ermittlung der prozentualen Zusammensetzung erfolgte am Korn > 4 mm		
Stoffgruppe	Anteile > 4 mm in M.-%	
	Maximalwert nach BTR RC-StB 04	Ist-Wert
Betonbruch	-	92,0
Asphaltanteile aus Anhaftungen	≤ 20	2,8
Stoffe mit niedrigen Festigkeiten z. B. Ziegel, Mörtel und porige mineralische Baustoffe	≤ 10	5,1
Störstoffe im Gesamtgemisch z. B. Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien	≤ 0,2	0,0

Tab. 1: Stoffliche Kennzeichnung

Prüfkörnung in mm	Prüfwert Mg/m ³	Soll	Kategorie
Gesamtgemisch 0/32	2,528	-	-
8/12,5	2,585	-	-

Tab. 2: Rohdichte (DIN EN 1097-6)

Prüfkörnung > 4 mm	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
voll gebrochen	100		
voll + teilgebrochen	100	90 - 100	
Rundkorn	0	0 - 3	C _{90/3}

Tab. 3: Bruchflächigkeit (DIN EN 933-5)

Prüfkörnung > 4 mm	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
ungünstige Kornform	22,7	≤ 50	SI ₅₀

Tab. 4: Kornformkennzahl (DIN EN 933-4)

Prüfkörnung 8/12	Schlagzertrümmerungswert	
	SZ _{8/12,5} in M.-%	Kategorie
Probe 1	32,0	
Probe 2	31,7	
Probe 3	31,3	
Mittelwert	31,7	SZ₃₂
Soll BTR RC-StB 04: für STS der Bkl. SV bis II		SZ ₂₈
Soll BTR RC-StB 04: für STS der Bkl. III bis VI		SZ ₃₂
Soll BTR RC-StB 04: für FSS		SZ ₃₄

Tab. 5: Widerstand gegen Zertrümmerung (DIN EN 1097-2)

Prüfkörnung > 31,5	Schotterschlagwert	
	SD 10 in M.-%	
Probe 1	32,6	
Probe 2	32,5	
Probe 3	32,9	
Mittelwert	32,7	≤ 33,0
Soll BTR RC-StB 04: für STS der Bkl. III bis VI		≤ 33,0

Tab. 6: Widerstand gegen Zertrümmerung (DIN EN 52115-2)

Prüfkörnung 8/16	Absplitterung in M.-%	
	< 4 mm	< 0,71 mm
Probe 1	2,9	0,4
Probe 2	3,2	0,4
Probe 3	3,1	0,3
Mittelwert	3,1	0,4
Sollwert lt. BTR RC-StB 04		≤ 4,0* (Kategorie F₄) ≤ 5,0*

Gesamtgemisch 0/45	Anteil < 0,063 mm in M.-%		
	vor Frostversuch	nach Frostversuch am Anteil > 0,063 mm	Summe vor und nach Frostversuch
Probe 1	4,3	0,3	4,6
Probe 2	3,8	0,6	4,4
Probe 3	4,6	0,3	4,9
Mittelwert	4,2	0,4	4,6
Sollwert lt. BTR RC-StB 04 für FSS		≤ 2,0	≤ 5,0

* Bei Überschreitung bis max. 10 M.-% ist die Bestimmung der Anteile < 0,063 mm am Gesamtgemisch vor und nach dem Frostversuch erforderlich (gültig nur für RC-Baustoffe für Frostschutzschichten)

Tab. 7: Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (DIN EN 1367-1)

2.2 RC-Baustoff aus AKR – geschädigtem Gemisch (BAB A 14)

Zusammensetzung nach BTR RC-StB Pkt. 3.3.1		
Die Ermittlung der prozentualen Zusammensetzung erfolgte am Korn > 4 mm		
Stoffgruppe	Anteile > 4 mm in M.-%	
	Maximalwert nach BTR RC-StB 04	Ist-Wert
Betonbruch	-	98,89
Asphaltanteile aus Anhaftungen	≤ 20	0,23
Stoffe mit niedrigen Festigkeiten z. B. Ziegel, Mörtel und porige mineralische Baustoffe	≤ 10	0,0
Störstoffe im Gesamtgemisch z. B. Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien	≤ 0,2	0,9

Tab. 8: Stoffliche Kennzeichnung

Prüfkörnung in mm	Prüfwert Mg/m ³	Soll	Kategorie
Gesamtgemisch 0/45	2,560	-	-
8/12,5	2,541	-	-

Tab. 9: Rohdichte (DIN EN 1097-6)

Prüfkörnung > 4 mm	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
voll gebrochen	100		
voll + teilgebrochen	100	90 - 100	
Rundkorn	0	0 - 3	C _{90/3}

Tab. 10: Bruchflächigkeit (DIN EN 933-5)

Prüfkörnung > 4 mm	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
ungünstige Kornform	6,0	≤ 15	SI ₁₅

Tab. 11: Kornformkennzahl (DIN EN 933-4)

Prüfkörnung 8/12	Schlagzertrümmerungswert	
	SZ _{8/12,5} in M.-%	Kategorie
Probe 1	25,6	
Probe 2	24,7	
Probe 3	25,8	
Mittelwert	25,4	SZ₃₂
Soll nach TL Gestein-StB 04, Anhang A		SZ₃₂

Tab. 12: Widerstand gegen Zertrümmerung (DIN EN 1097-2)

Prüfkörnung 35,5/45	Schotterschlagwert	
	SD 10 in M.-%	
Probe 1	45,0	
Probe 2	47,4	
Probe 3	46,2	
Mittelwert	46,2	
Soll nach TL Gestein-StB 04, Anhang A		≤ 33,0

Tab. 13: Widerstand gegen Zertrümmerung (DIN EN 52115-2)

Prüfkörnung 8/16	Absplitterung in M.-%		
	< 4 mm		
Probe 1	0,19		
Probe 2	0,10		
Probe 3	0,17		
Mittelwert	0,15		
Sollwert lt. TL Gestein-StB 04	≤ 1,0* (Kategorie)F₁ ≤ 5,0*		
Gesamtgemisch 0/45	Anteil < 0,063 mm in M.-%		
	vor Frostversuch	nach Frostversuch am Anteil > 0,063 mm	Summe vor und nach Frostversuch
Probe 1	1,4	0,40	1,80
Probe 2	2,3	0,37	2,67
Probe 3	2,4	0,34	2,74
Mittelwert	2,0	0,37	2,40
Sollwert lt. BTR RC-StB 04 für FSS		≤ 2,0	≤ 4,0
* Bei Überschreitung bis max. 10 M.-% ist die Bestimmung der Anteile < 0,063 mm am Gesamtgemisch vor und nach dem Frostversuch erforderlich (gültig nur für RC-Baustoffe für Frostschutzschichten)			

Tab. 14: Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (DIN EN 1367-1)

2.3 Beurteilung der Qualität der RC-Ausgangsstoffe

Die als Referenzgemisch geprüfte RC-Gesteinskörnung 0/45 entspricht in den Eigenschaften den Anforderungen für eine

- Schottertragschicht 0/45,
- Frostschuttschicht 0/45,
- hydraulisch gebundene Tragschicht.

Das untersuchte Referenzgemisch entspricht nach BTR RC-StB 04, Tabelle II 1.4-5 „Zuordnungswerte Feststoff für RC-Baustoffe/nicht aufbereiteter Bauschutt“ dem Zuordnungswert $\leq Z$ 1.1 der LAGA-TR.

Das Referenzgemisch entspricht nach BTR RC-StB 04, Tabelle II 1.4-6. „Zuordnungswerte Eluat für RC-Baustoffe/nicht aufbereiteter Bauschutt“ dem Zuordnungswert $\leq Z$ 1.1 der LAGA-TR.

Das alkaligeschädigte RC-Gemisch 0/45 aus der A 14 erfüllt die Anforderungen hinsichtlich der gesteins- und gemischspezifischen Kennwerte an ein

Splitt-Schotter-Brechsand-Gemisch 0/45 für den Einsatz in Tragschichten ohne Bindemittel (Schottertragschicht), an ein Baustoffgemisch für Frostschuttschichten nach BTR RC-StB 04 und

TL SoB-StB und entspricht in den Eigenschaften den Anforderungen für eine Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT). Diese Aussage gilt jedoch erst einmal nur nach Prüfung der gesteinspezifischen Eigenschaften der AKR-RC-Ausgangsstoffe.

Das alkaligeschädigte RC-Gemisch 0/45 von der A 14 entspricht nach BTR RC-StB 04, Tabelle II 1.4-5 „Zuordnungswerte Feststoff für RC-Baustoffe/nicht aufbereiteter Bauschutt“ dem Zuordnungswert $\leq Z$ 1.1 der LAGA-TR.

Das alkaligeschädigte RC-Gemisch 0/45 von der A 14 entspricht nach BTR RC-StB 04, Tabelle II 1.4-6. „Zuordnungswerte Eluat für RC-Baustoffe/nicht aufbereiteter Bauschutt“ dem Zuordnungswert $\leq Z$ 1.1 der LAGA-TR.

3 Baustoffgemische – Prüfungen nach TL Beton-StB 07 und TP HGT-StB 94

Hier sollen die Ergebnisse in Tabellenform für beide RC-Gemische übergeben werden.

3.1 RC-Baustoffe aus AKR – unempfindlichem Material (Referenz)

Prüfsieb (mm)	Kennung	Siebdurchgang (%)	Anforderungen an die Korngrößenverteilung	
			0/45 Allg.	0/45 SDV
63	1,4 D	100,0	100	
45	D	97,5	90 - 99	
22,4		73,4	55 - 85	63 - 77
11,2		51,4	35 - 68	43 - 60
5,6		40,9	22 - 60	30 - 52
2		30,4	16 - 47	23 - 40
1		24,5	9 - 40	14 - 35
0,5		14,9	5 - 35	10 - 30
< 0,063*		4,2		
Kategorien		O C₉₀	O C₉₀	O C₉₀

* Die Anteile < 0,063 mm wurden durch eine Nasssiebung ermittelt

Tab. 15: Korngrößenverteilung und Bestimmung der Feianteile (DIN EN 933-1) von Baustoffgemischen für Schottertragschichten

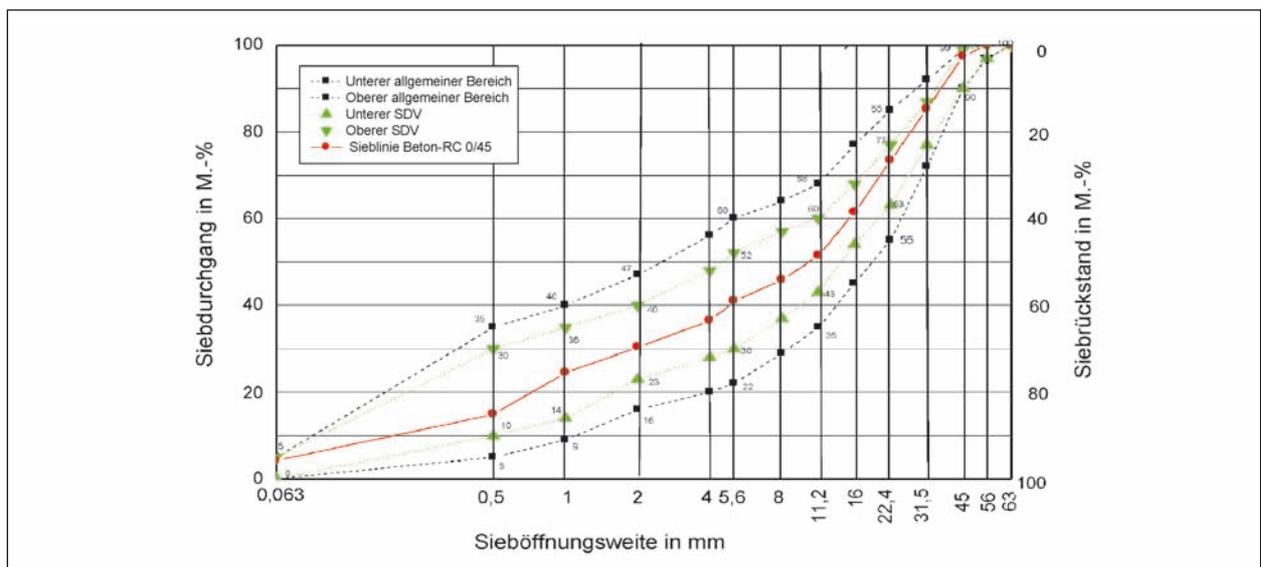


Bild 1: Baustoffgemisch 0/45 für Kies- und Schottertragschichten; Klein Beuchow, Referenzmaterial

Prüfsieb (mm)	Siebdurchgang (%)	Soll für FSS nach TL SoB-StB
63	100,0	
45	97,5	
31,5	85,3	
22,4	73,4	47 - 87
16	61,4	-
11,2	51,4	-
8	45,8	-
5,6	40,9	-
4	36,5	-
2	30,4	15 - 75
1	24,5	-
0,5	14,9	-
0,063	4,2	5 - 15
< 0,063*	0,0	
Kategorien	O C ₉₀	O C ₉₀

* Die Anteile < 0,063 mm wurden durch eine Nasssiebung ermittelt

Tab. 16: Korngrößenverteilung und Bestimmung der Feinanteile (DIN EN 933-1) von Baustoffgemischen für Frostschutzschichten

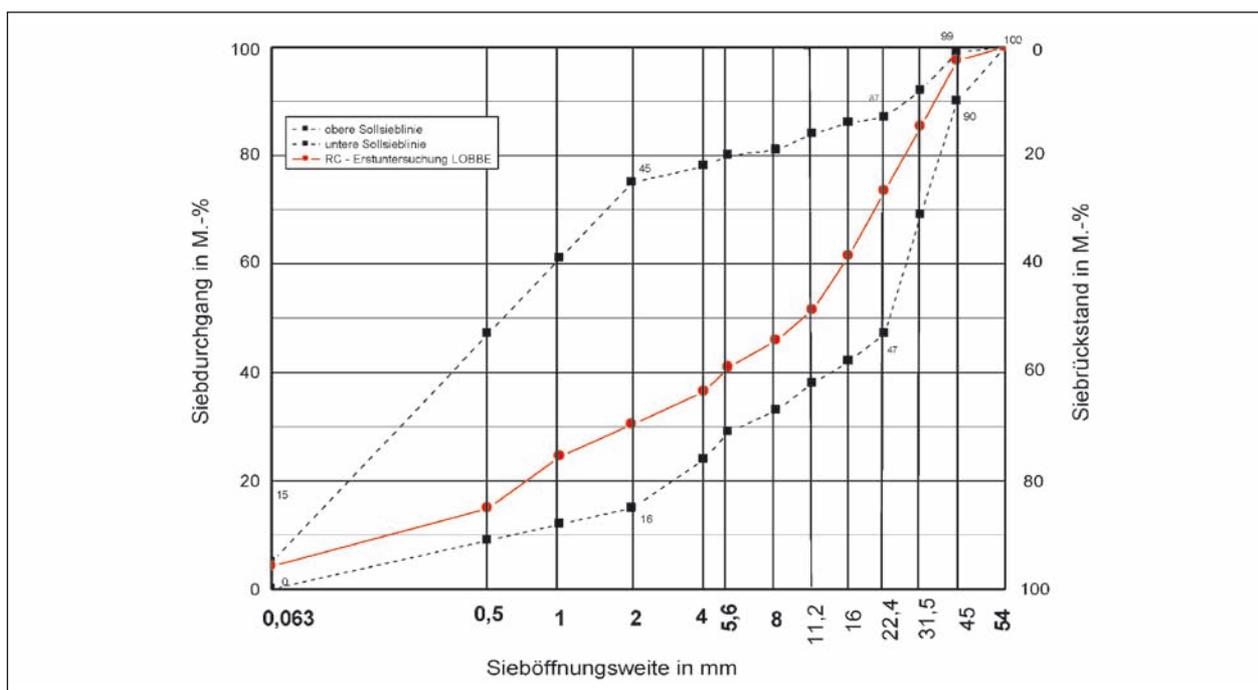


Bild 2: Baustoffgemisch 0/45 für Frostschutzschichten; Klein Beuchow, Referenzmaterial

Prüfsieb (mm)	Siebdurchgang (%)	Soll für HGT nach TL Beton-StB 07, Pkt. 3.2
63	100,0	
45	97,5	90 - 100
31,5	85,3	90
22,4	73,4	-
16	61,4	-
11,2	51,4	-
8	45,8	-
5,6	40,9	-
4	36,5	-
2	30,4	16 - 45
1	24,5	-
0,5	14,9	-
0,063	4,2	5 - 15
< 0,063*	0	

* Die Anteile < 0,063 mm wurden durch eine Nasssiebung ermittelt

Tab. 17: Korngrößenverteilung und Bestimmung der Feianteile (DIN EN 933-1) von Baustoffgemischen für hydraulisch gebundene Tragschichten 0/45

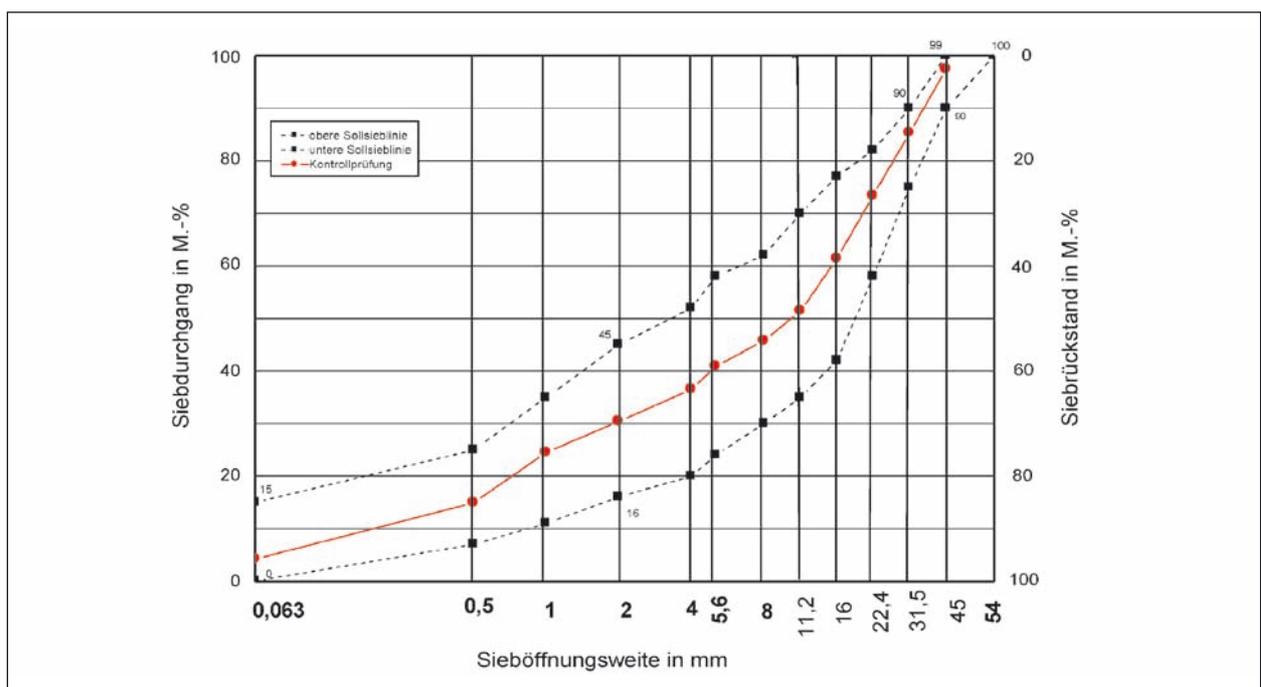


Bild 3: Baustoffgemisch 0/45 für hydraulisch gebundene Tragschichten; Klein Beuchow, Referenzgemisch

	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
Durchgang bei D	97,5	90-99	O C ₉₀
Durchgang bei 1,4D	100	100	

Tab. 18: Überkorn

Prüfkörnung 0/45	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
Feinanteile < 0,063 mm	4,9	0-5	LF _{NR} /UF ₅
Durchgang bei 1,4D	100	100	O C ₉₀

Tab. 19: Bestimmung der Feinanteile (DIN EN 933-1)

Probenbezeichnung	Farbbezugslösung Standardfarbe mandarin-orange	
	heller als Standardfarbe	dunkler als Standardfarbe
Referenzgemisch	X	

Tab. 20: Bestimmung von organischen Bestandteilen (DIN EN 1744-1)

	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
100 % Proctordichte in Mg/m ³	1,935	-	-
Optimaler Wassergehalt	10,6	-	-

Tab. 21: Proctorversuch (DIN EN 13286-2)

Prüfkörnung 0/22 mm	CBR-Wert in %	Ist-Wert	Soll BTR RC-StB 04
		115	≥ 40 % für FSS ≥ 80 % für STS

Tab. 22: CBR (DIN EN 13286-47)

Versuch	Verdichtungsgrad in %	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k ₁₀ in m/s
1	100	3,43 · 10 ⁻⁵
Soll BTR RC-StB 04		≥ 1 · 10 ⁻⁵

Tab. 23: Wasserdurchlässigkeitsbeiwert (DIN 18130 T.1, Verfahren ZY-ES-ST)

Prüfkörnung	Schüttdichte Mg/m ³	Soll	Kategorie
0/45	1,531	-	-

Tab. 24: Schüttdichte

Gemisch	Zuordnungswert nach Erstprüfung	Zuordnungswert nach BTR RC-StB 04
0/45	Z 1.1	≤ Z 1.1

Tab. 25: Umweltrelevante Merkmale – Chemische Untersuchung gem. BTR RC-StB 04 nach LAGA

3.2 RC-Baustoffgemisch aus AKR – geschädigtem Gemisch

Prüfsieb (mm)	Kennung	Siebdurchgang (%)	Anforderungen an die Korngrößenverteilung	
			0/45 Allg.	0/45 SDV
63	1,4 D	100,0	100	
45	D	100,0	90-99	
22,4		85,8	55-85	63-77
11,2		66,2	35-68	43-60
5,6		46,9	22-60	30-52
2		27,7	16-47	23-40
1		19,4	9-40	14-35
0,5		12,2	5-35	10-30
< 0,063*		2,4		
Kategorien		O C₉₀	O C₉₀	O C₉₀

* Die Anteile < 0,063 mm wurden durch eine Nasssiebung ermittelt

Tab. 26: Korngrößenverteilung und Bestimmung der Feianteile (DIN EN 933-1) von Baustoffgemischen für Schottertragschichten

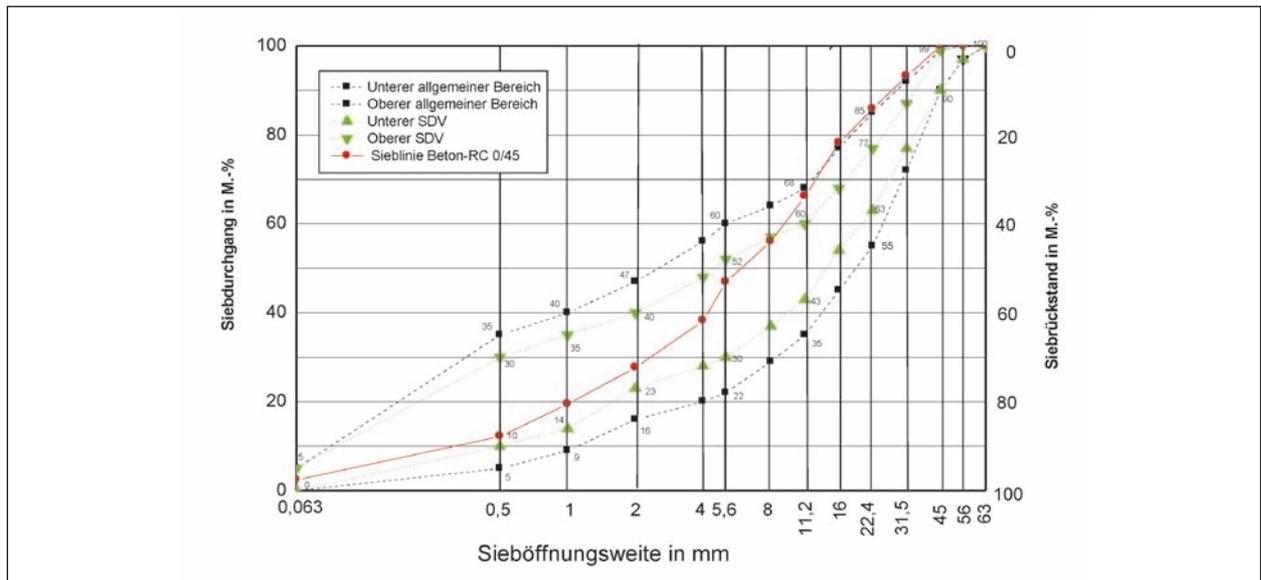


Bild 4: Baustoffgemisch 0/45 für Kies- und Schottertragschichten; A 14, km 36, Platte 384

Prüfsieb (mm)	Siebdurchgang (%)	Soll für FSS nach TL SoB-StB
63	100,0	
45	100,0	
31,5	93,2	
22,4	85,8	47-87
16	78,2	-
11,2	66,2	-
8	56,0	-
5,6	46,9	-
4	38,2	-
2	27,7	15-75
1	19,4	-
0,5	12,2	-
0,063	2,4	0-5
< 0,063*	0,0	

* Die Anteile < 0,063 mm wurden durch eine Nasssiebung ermittelt

Tab. 27: Korngrößenverteilung und Bestimmung der Feianteile (DIN EN 933-1) von Baustoffgemischen für Frostschutzschichten

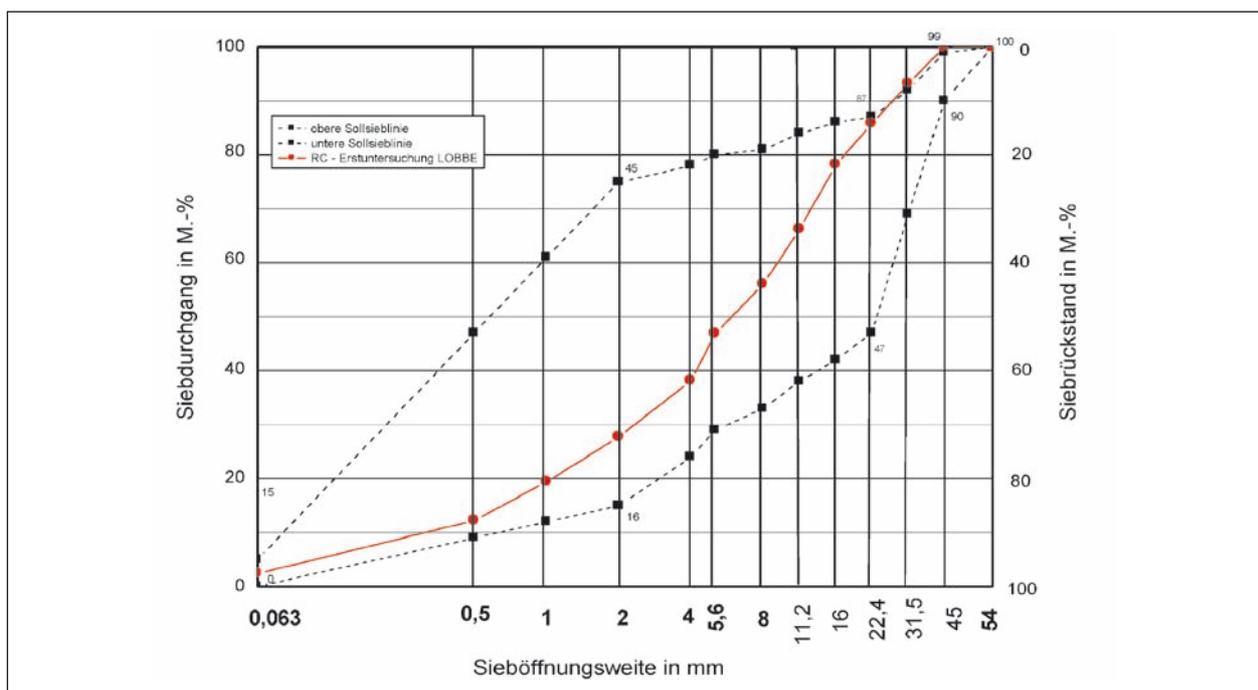


Bild 5: Baustoffgemisch 0/45 für Frostschutzschichten; A 14, km 36, Platte 384

Prüfsieb (mm)	Siebdurchgang (%)	Soll für HGT nach TL Beton-StB 07, Pkt. 3.2
63	100,0	
45	100,0	
31,5	93,2	90-100
22,4	85,8	90
16	78,2	-
11,2	66,2	-
8	56,0	-
5,6	46,9	-
4	38,2	-
2	27,7	16-45
1	19,4	-
0,5	12,2	-
0,063	2,4	0-15
< 0,063*	0,0	

* Die Anteile < 0,063 mm wurden durch eine Nasssiebung ermittelt

Tab. 28: Korngrößenverteilung und Bestimmung der Feinanteile (DIN EN 933-1) von Baustoffgemischen für hydraulisch gebundene Tragschichten 0/45

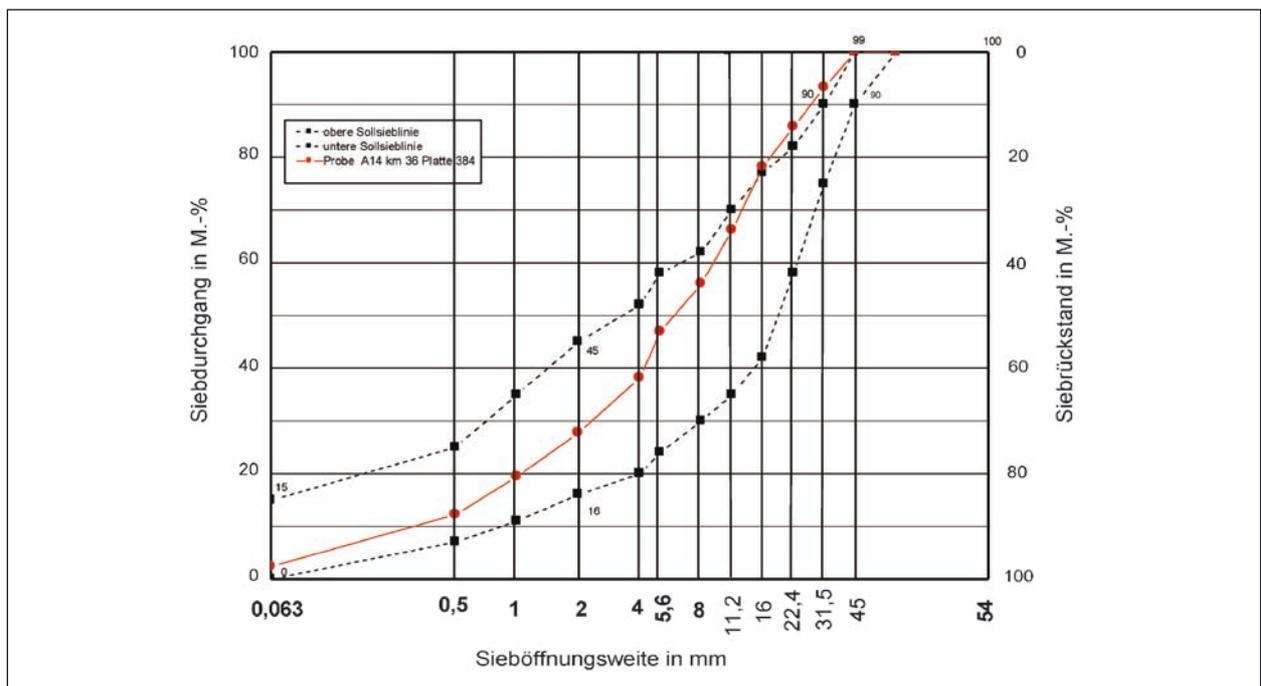


Bild 6: Baustoffgemische für hydraulisch gebundene Tragschichten; A 14, km 36, Platte 384

	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
Durchgang bei D	100	90-99	
Durchgang bei 1,4D	100	100	O C ₉₀

Tab. 29: Überkorn

Prüfkörnung 0/45	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
Feinanteile < 0,063 mm	2,4	0-5	LF _{NR} /UF ₅

Tab. 30: Bestimmung der Feinanteile (DIN EN 933-1)

Probenbezeichnung	Farbbezugslösung Standardfarbe mandarin-orange	
	heller als Standardfarbe	dunkler als Standardfarbe
A 14, km 36, Platte, 384	X	

Tab. 31: Bestimmung von organischen Bestandteilen (DIN EN 1744-1)

	Anteil in M.-%		Kategorie
	Prüfwert	Soll	
100 % Proctordichte in Mg/m ³	1,770	-	-
Optimaler Wassergehalt	13,7	-	-

Tab. 32: Proctorversuch (DIN EN 13286-2)

Prüfkörnung	Schüttdichte Mg/m ³	Soll	Kategorie
0/45	1,418	-	-

Tab. 33: Schüttdichte

Gemisch	Zuordnungswert nach Erstprüfung	Zuordnungswert nach BTR RC StB 04
0/45	Z 1.1	≤ Z 1.1

Tab. 34: Umweltrelevante Merkmale – Chemische Untersuchung gem. BTR RC-StB 04 nach LAGA

3.3 Bewertung der Ergebnisse der Baustoffgemische

Das Referenzgemisch 0/45 entspricht in den Eigenschaften den Anforderungen an Baustoffgemische für eine

- Schottertragschicht 0/45,
- Frostschuttschicht 0/45,
- hydraulisch gebundene Tragschicht.

Das alkaligeschädigte RC-Gemisch 0/45 entspricht in den geprüften Eigenschaften den Anforderungen an Baustoffgemische für eine

- Frostschuttschicht 0/45,
- hydraulisch gebundene Tragschicht.

stellt. Nachfolgend werden die Werte zusammengefasst dargestellt.

Bewertung

Die Unterschiede zwischen den beiden untersuchten RC-Gemischen in den erzielbaren Druckfestigkeiten nach 28 Tagen bei Lagerung unter Normbedingungen sind sehr gering, so dass aus diesen Ergebnissen eine Eignung auch des alkaligeschädigten RC-Gemisches für die Verwendung in HGT erst einmal nicht ausgeschlossen werden kann. Die Festigkeiten liegen in der gleichen Größenordnung, womit auch gezeigt wird, dass die Herstellung mit beiden Gemischen möglich ist und prinzipiell gleiche Gefüge erzielbar sind.

4 Prüfungen an HGT-Probekörpern – Festigkeiten

4.1 HGT-Probekörper (zylinderförmige Proben) und Festigkeiten

Die ermittelten Festigkeiten der einzelnen Probekörper (je Serie 3) sind im Anhang zusammenge-

4.2 Bestimmung der Veränderung von Baustoffkennwerten infolge Klimalagerung

Es wurden mehrere Probekörper je Serie untersucht und nach den entsprechenden Lagerungsregimes die Festigkeiten an den zylinderförmigen Proben ermittelt. Die erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 36 zusammenfassend dargestellt.

	Festigkeiten [N/mm ²] der Probekörper					
	1	2	3	4	5	Mittelwert
Referenzgemisch	15,4	12,8	17,2	14,3	17,0	15,3
AKR-RC-Gemisch A14	14,1	18,0	12,7	15,1	19,2	15,8

Tab. 35: 28-d-Festigkeiten der RC-Gemische ohne Klimabeeinflussung

	Festigkeiten [N/mm ²] der Probekörper					
	1	2	3	4	5	Mittelwert
Referenzgemisch	12,3	16,6	14,5	16,8	15,4	15,1
AKR-RC-Gemisch A14	16,3	16,5	16,4	17,0	16,8	16,6

Tab. 36: Druckfestigkeit der RC-Gemische nach Nebelkammerlagerung (ohne Alkalizufuhr)

	Festigkeiten [N/mm ²] der Probekörper nach Nebelkammerlagerung und Alkalizufuhr während der NK-Lagerung (keine Performanceprüfung)					
	1	2	3	4	5	Mittelwert
Referenzgemisch	11,8	12,2	12,4	10,8	-	11,8
AKR-RC-Gemisch A14	14,6	13,8	15,9	17,5	17,8	15,9

Tab. 37: Baustoffkennwerte infolge Klimalagerung bei Alkalizufuhr

5 Prüfungen an Probekörpern – Formänderungen

Sowohl die Bohrkerne der BAB A 14, woraus das alkalivorgeschädigte RC-Baustoffgemisch gewonnen worden ist, bzw. der BAB A 9, als auch HGT-Probekörper werden einer Nebelkammerlagerung (40 °C), dem 60°C-Betonversuch (beide in Anlehnung an die Alkali-Richtlinie [1]) und einer AKR-Performance-Prüfung (60°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr und mit Wasser nach ARS 04/2013 [2]) unterzogen. Eine Übersicht der durchgeführten Untersuchungen enthält Tabelle 38 im Kapitel 5.3. Vorher erfolgte eine Bewertung des Betongefüges durch lichtmikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen. Auch hierbei wurde sich auf den Bohrkern der BAB A 14 konzentriert, da dieser Beton als RC-Gemisch in den weiteren Untersuchungen verwendet worden ist.

5.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen an Bohrkernen des Autobahnabschnittes A 14

An nachfolgend ausgewählten mikroskopischen Aufnahmen kann eindeutig belegt werden, dass im Beton des Autobahnabschnittes A 14 eine schädigende AKR stattgefunden hat. Bild 7 zeigt dabei das Gefüge des Betons der A 14. Größere gebrochene Körner sind in einer Zementsteinmatrix mit feiner Gesteinskörnung (Sand) eingebettet. Bild 8 zeigt bei höherer Vergrößerung ein typisches Schadensbild für das Auftreten einer AKR. Ein Riss in einem Gesteinskorn ist teilweise mit Gel gefüllt und es kommt zur Rissfortsetzung in die umgebende Matrix hinein. Den gleichen Sachverhalt dokumentiert Bild 9 an

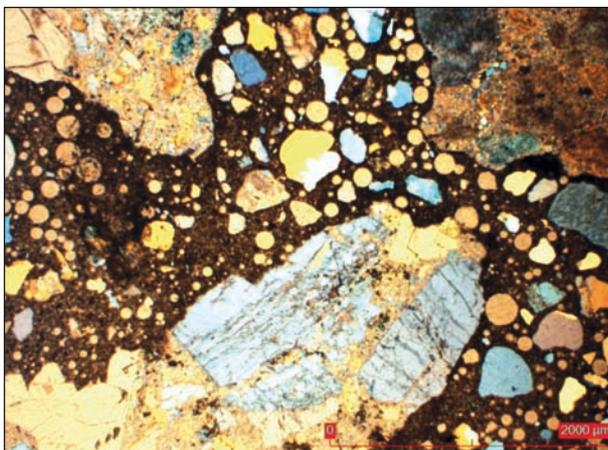


Bild 7: Gefüge des Betons des Bohrkernes der A 14 im angelieferten Zustand

einem weiteren gebrochenen Korn. Dass im Verlauf der schädigenden AKR Gele gebildet werden, die sich in angrenzenden Poren von geschädigten Gesteinskörnern ablagern, offenbart Bild 10.

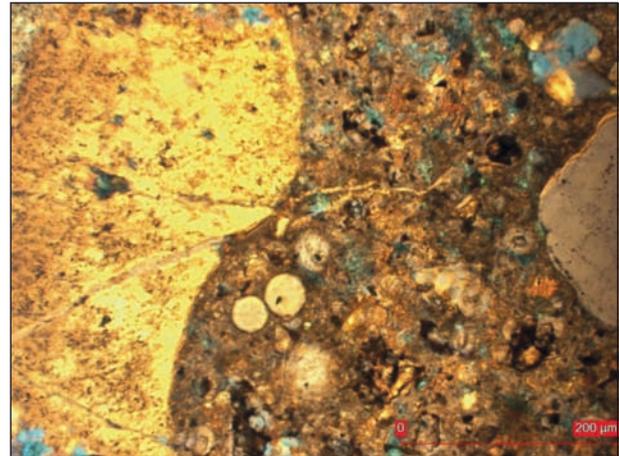


Bild 8: Risse in einem gebrochenen Gesteinskorn und Fortsetzung in der Matrix

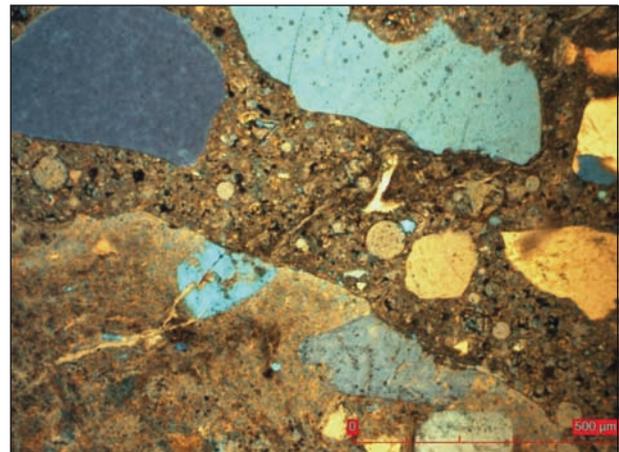


Bild 9: Risse in einem gebrochenen Gesteinskorn und Fortsetzung in der Matrix

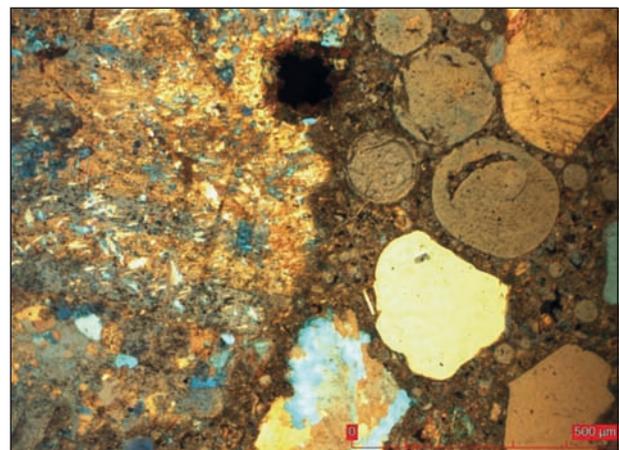


Bild 10: Mit gelartigen Reaktionsprodukten gefüllte Poren in der Zementstein-Matrix

5.2 Untersuchungen an Bohrkernen des Autobahnabschnittes A 14

Die Bohrkern der A 14 ($d = 95 \text{ mm}$) wurden präpariert und verschiedenen verschärften Lagerungsbedingungen ausgesetzt. Ziel dieses Teiles war es zu prüfen, inwieweit das schädigende Potenzial der Fahrbahndeckenbetone noch vorhanden ist. Die Ergebnisse werden in den Bildern 11 bis 13 dargestellt.

Mit ca. $1,40 \text{ mm/m}$ werden beträchtliche Restdehnungen allein nur unter den Bedingungen der Nebelkammer gemessen. Da die Bohrkern vor Einlagerung vorkonditioniert worden sind, stellt der gemessene Dehnungswert das tatsächlich im Beton noch vorhandene Restdehnungspotenzial dar.

Beim 60°C -Bettonversuch gemäß Alkali-Richtlinie des DAfStb wurden die Untersuchungen abweichend von der Prüfvorschrift bis zum 168sten Tag verlängert, da die gemessenen Dehnungen im letzten Zyklus (bis zum 140sten Tag) zurückgegangen sind (siehe Bild 12).

Auch wenn der Grenzwert von $0,3 \text{ mm/m}$ für die hier geprüften Probekörper und die gewählten Randbedingungen (Rezeptur) nicht gilt, werden auch mittels dieser Prüfung deutlich zunehmende Dehnungen an Bohrkernen aus der A 14 gemessen. Die Ergebnisse der Nebelkammeruntersuchungen werden durch die Prüfung bei 60°C bestätigt. Die Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen sind Bild 13 zu entnehmen.

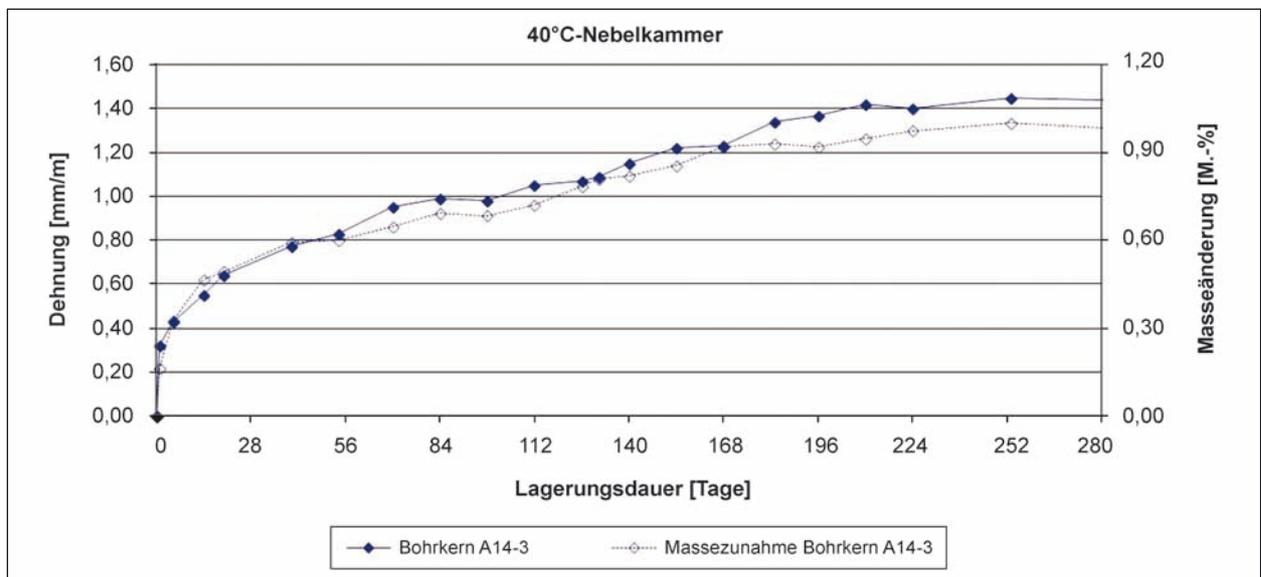


Bild 11: Dehnung des Bohrkernes A14-3 in der Nebelkammer

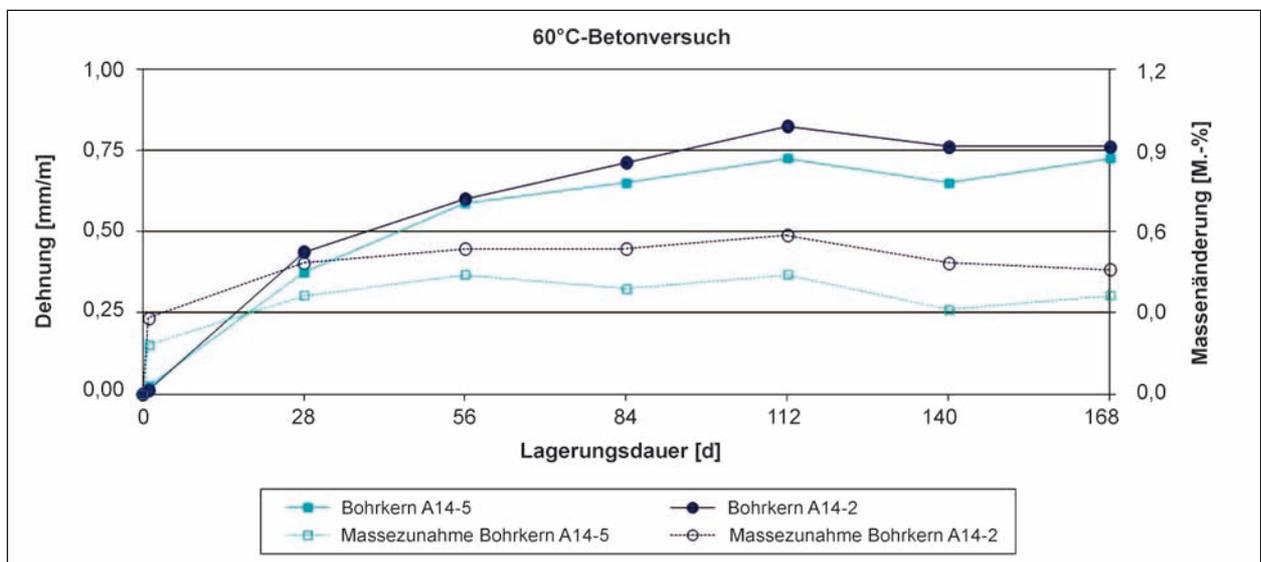


Bild 12: Dehnungen der beiden Bohrkern A14-2 und A14-5 während des 60°C -Bettonversuches

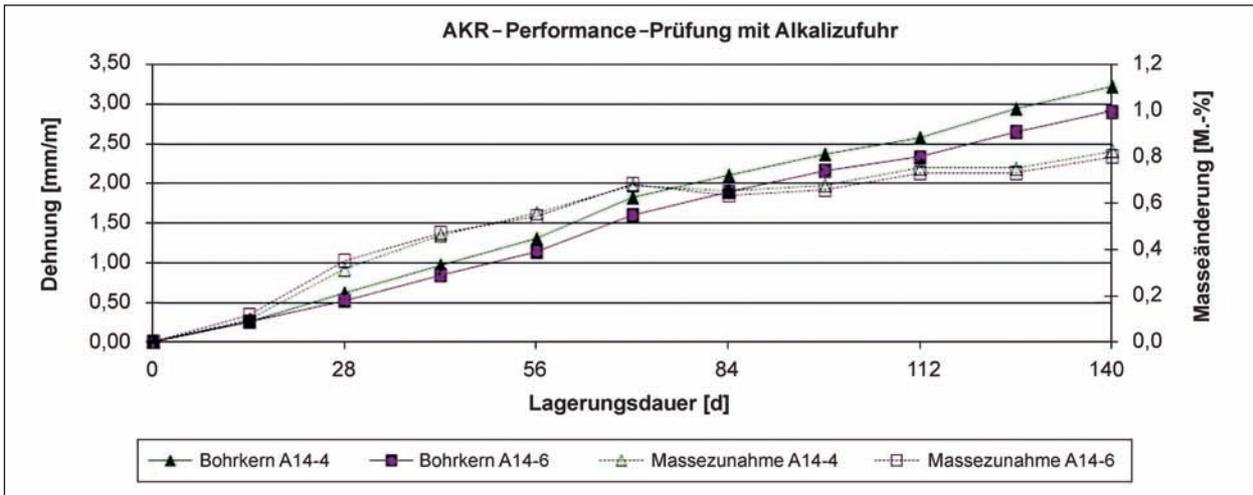


Bild 13: Ergebnisse der AKR-Performance-Prüfungen an den Bohrkernen A14-4 und A14-6

Hier wird der Nullpunkt durch den Beginn des 1. Zyklus festgesetzt, die 28-tägige Vorlagerung ist im Diagramm nicht enthalten.

Mit Dehnungen von ca. 3,0 mm/m wird ein Restschädigungspotenzial bei Zufuhr von Alkalien unter dem Lastfall WS deutlich sichtbar.

Die Bohrkernuntersuchungen dienen dem Nachweis, dass eine AKR im Betonabschnitt aus der A 14 stattgefunden hat und ein Reaktionspotenzial noch vorhanden ist. Aus dem RC-Beton dieses Autobahnabschnittes wurden HGT-Probekörper hergestellt und an diesen Formänderungen bestimmt sowie unter dem Mikroskop eine Gefügebewertung vorgenommen.

5.3 Untersuchungen der HGT-Probekörper – Formänderungen

Mit dem Referenzgemisch als auch mit dem alkali-vorgeschädigten RC-Gemisch aus der A 14 werden HGT-Probekörper hergestellt, die es ermög-

lichen, sowohl Dehnungsmessungen in der Nebelkammer, mittels 60°C-Betonversuch und ebenfalls mittels AKR-Performance-Prüfung zu realisieren. Bei den Abmessungen der HGT-Probekörper für die jeweiligen Prüfungen erfolgt eine weitgehende Anlehnung an die laut Vorschriften geforderten Werte. Das bedeutet, dass die Probekörper für den 60°C-Betonversuch sowie für die AKR-Performance-Prüfung die Abmessungen 75 · 75 · 280 mm³ besitzen. Einzig für die Nebelkammerversuche weichen die Abmessungen von der geforderten Probekörpergeometrie (100 · 100 · 500 mm³) ab und orientieren sich an den Abmessungen für die AKR-Performance-Prüfung und den 60°C-Betonversuch.

Eine Übersicht zu den durchgeführten Untersuchungen zur Formänderung gibt Tabelle 38.

Bei der vorläufigen Auswertung muss immer berücksichtigt werden, dass die Probekörper hinsichtlich ihrer Zusammensetzung nicht den Vorgaben der jeweiligen Prüfverfahren genügen. Eine

Durchgeführte Untersuchungen	Probenbezeichnungen		
	AKR-geschädigte Bohrkern der A 14	HGT-Prismen Referenzgemisch	HGT-Prismen AKR-RC-Gemisch
Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (40 °C) ¹	A14-3	Nr. 12, 22	Nr. 10, 11
60°C-Betonversuch ¹	A14-2, A14-5	Nr. 18, 19, 20	Nr. 7, 8, 9
AKR-Performance-Prüfung (60°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr) ²	A14-4, A14-6	Nr. 12, 13, 14	Nr. 1, 2, 3
AKR-Performance-Prüfung (60°C-Betonversuch mit Wasser) ²		Nr. 15, 16, 17	Nr. 4, 5, 6

¹ in Anlehnung an die Alkali-Richtlinie, allerdings mit Zusammensetzung für eine HGT
² nach ARS 04/2013 mit Zusammensetzung für eine HGT

Tab. 38: Zusammenstellung der durchgeführten Untersuchungen einschließlich Zuordnung der Proben

Diskussion des Dehnungsverlaufes kann sich zwar an den Grenzwerten der Verfahren orientieren, diese sind aber im vorliegenden Fall nicht gültig. Vielmehr ist ein Vergleich der Ergebnisse zwischen Referenzgemisch und AKR-RC-Gemisch wesentlich zielführender. Trotzdem soll an einigen Stellen der Bezug zu den Grenzwerten aufgeführt werden.

5.3.1 Untersuchungen mit dem Referenz-Baustoffgemisch

Nach einer anfänglichen Temperatur- und Feuchte- dehnung in der Nebelkammer werden Dehnungs-

endwerte von ca. 0,45 mm/m erreicht, ein Wert, der nur gering über die Feuchte- und Temperaturdehnung, die hier offensichtlich bei ca. 0,35 mm/m anzusetzen ist, hinausgeht. Das Ergebnis lässt damit auf keine weiteren Reaktionen des Referenzgemisches infolge reaktionsbeschleunigter Bedingungen schließen (Bild 14).

Der Grenzwert des 60°C-Betonversuches liegt bei 0,3 mm/m nach einer Lagerung von 140 Tagen, dieser wird vom Referenzgemisch erreicht bzw. mit ca. 0,4 mm/m geringfügig überschritten (Bild 15). Auch dieses Ergebnis ist ähnlich zu interpretieren, wie das nach der 40°C-Nebelkammerlagerung.

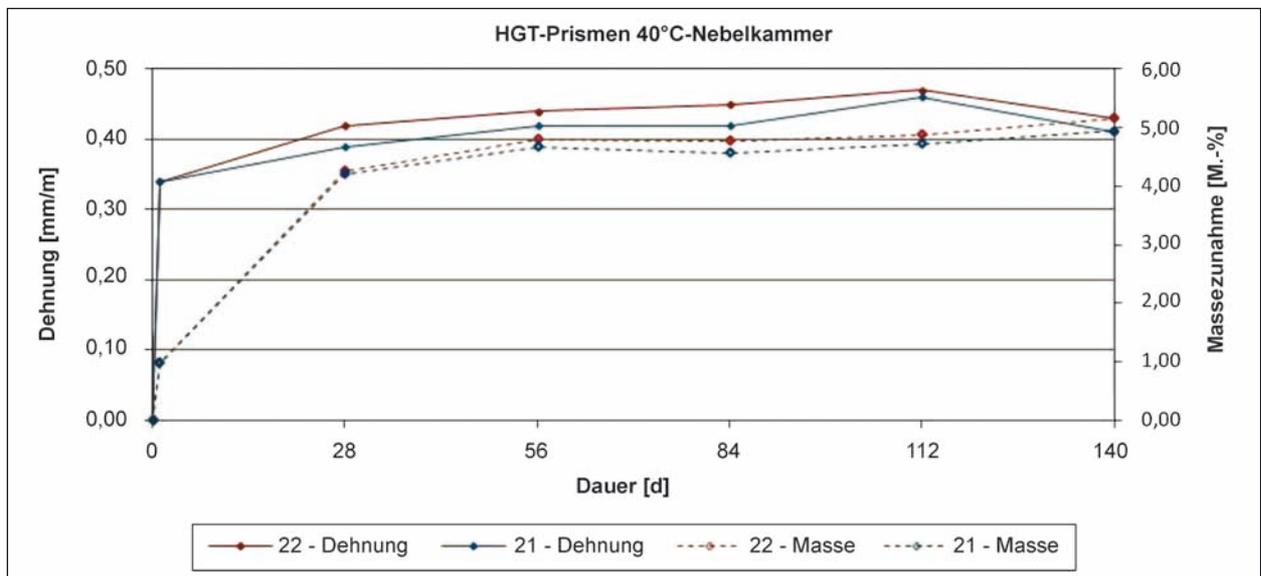


Bild 14: Dehnungen der HGT-Prismen 21 und 22 des Referenzgemisches in der Nebelkammer

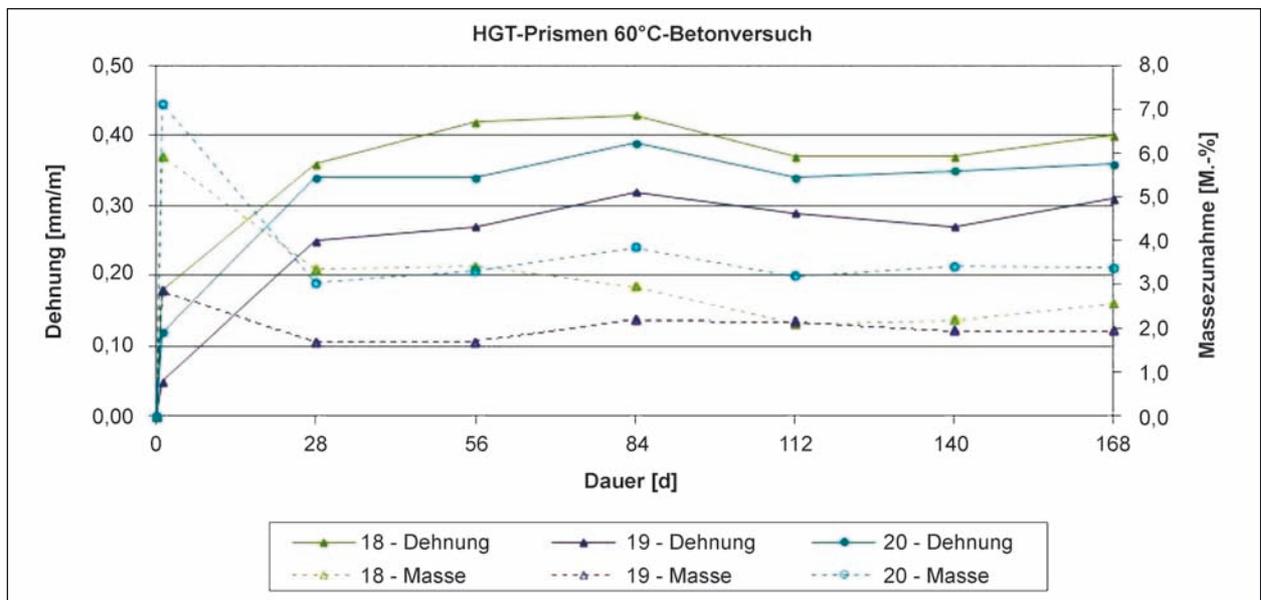


Bild 15: Dehnungen der HGT-Prismen 18, 19 und 20 des Referenzgemisches während des 60°C-Betonversuches

Reaktionen des Referenzgemisches unter diesen reaktionsbeschleunigten Bedingungen finden ebenfalls nicht oder nur in geringem Maße statt. Trotzdem sollen entsprechende mikroskopische Untersuchungen zeigen, worin mögliche Ursachen für das gemessene Dehnungsverhalten zu sehen sind. Ursächlich hierfür können natürlich auch die zum 60°C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie veränderte Betonrezeptur und das offenporige Gefüge der HGT-Proben sein.

Der Grenzwert der AKR-Performance-Prüfung liegt bei Beaufschlagung mit einer 10%igen NaCl-Lösung bei 0,5 mm/m und wird vom Referenzgemisch bei der Zufuhr von Alkalien tangiert (Bild 16). Auch bei Wahl der Prüflösung Wasser wird ein Dehnungswert von ca. 0,5 mm/m erreicht. Zwischen den Ergebnissen beider Prüflösungen gibt es demnach nur geringe Unterschiede im Dehnungsverlauf, was auf ein sehr geringes Reaktionspotenzial hinweist.

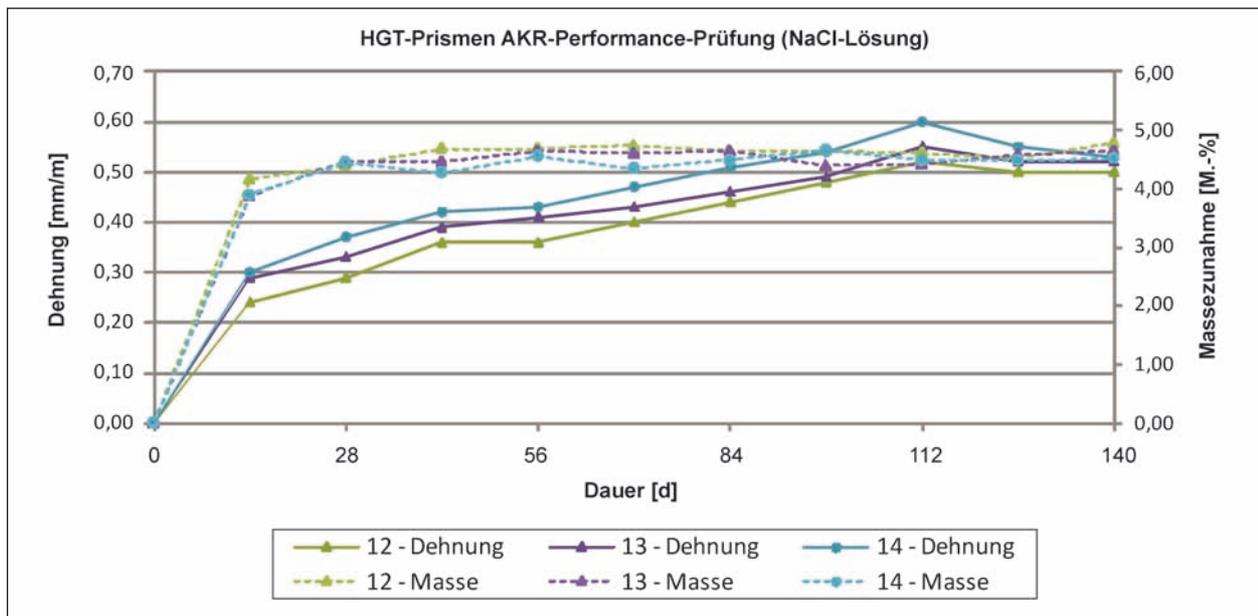


Bild 16: Dehnungen der HGT-Prismen 12, 13 und 14 des Referenzgemisches während der AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr (10%ige NaCl-Lösung)

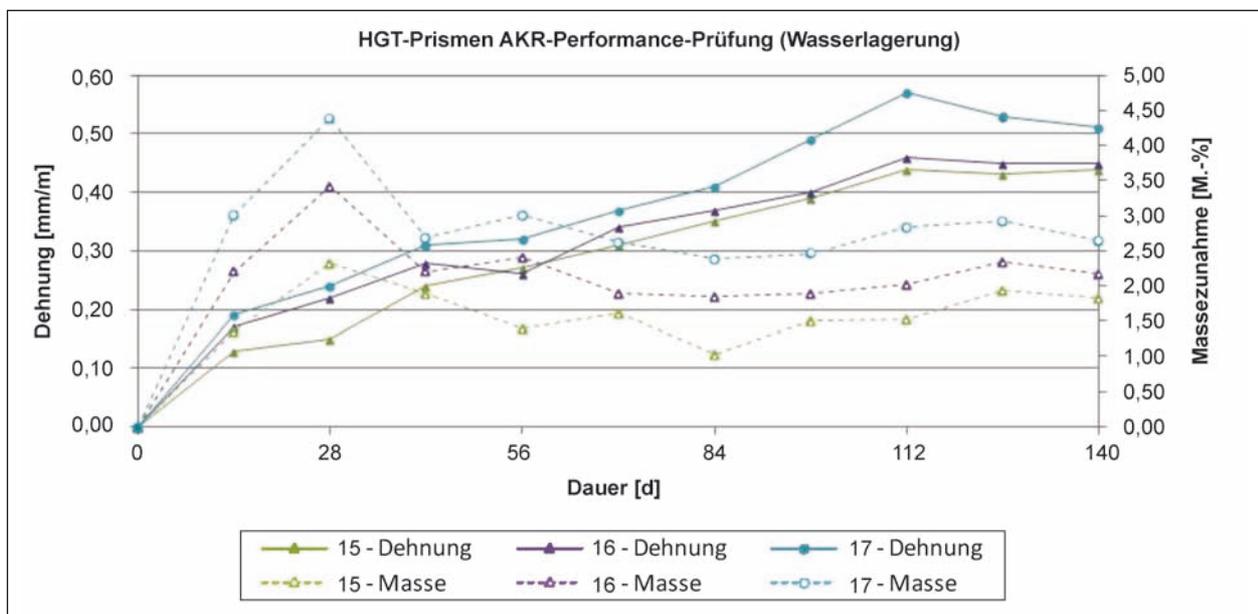


Bild 17: Dehnungen der HGT-Prismen 15, 16 und 17 des Referenzgemisches während der AKR-Performance-Prüfung nur mit Wasserlagerung

5.3.2 Untersuchungen mit dem vorgeschädigten AKR-RC-Baustoffgemisch

Hier werden folgende Ergebnisse diskutiert, insbesondere auch im Vergleich zum Referenzgemisch:

Der Endwert der Dehnung in der Nebelkammer bei dem AKR-RC-Gemisch liegt bei ca. 0,65 mm/m mit immer noch gering ansteigender Tendenz. Dieser Wert ist höher als der Wert der Referenzprobe. Für die Untersuchung von Bauwerksbetonen (keine Fahrbahndecken) und Bestimmung deren Restschädigungspotenzials in der Nebelkammer gilt ein Grenzwert nach Empfehlung des DAfStb [3] von 0,8 mm/m für eine Lagerungsdauer von mindestens 3 Monaten. Zumindest zeigt das Ergebnis an, dass

es ein unterschiedliches Dehnungsverhalten beider untersuchter Baustoffgemische gibt.

Der Wert des vorgeschädigten RC-Baustoffgemisches beim 60°C-Betonversuch liegt mit ca. 0,7 bis 0,8 mm/m fast doppelt so hoch wie der Wert des Referenzgemisches. Hierin zeigt sich zum ersten Mal deutlich das unterschiedliche Reaktionspotenzial beider Baustoffgemische.

Die AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr ergibt einen kontinuierlichen Dehnungsanstieg bis zum letzten Zyklus und erreicht Werte von ca. 0,8 bis 1,0 mm/m. Aber auch die Prüfung nur mit Wasser ergibt fast den gleichen Verlauf und auch hier wird ein Endwertebereich von ca. 1,0 mm/m erreicht.

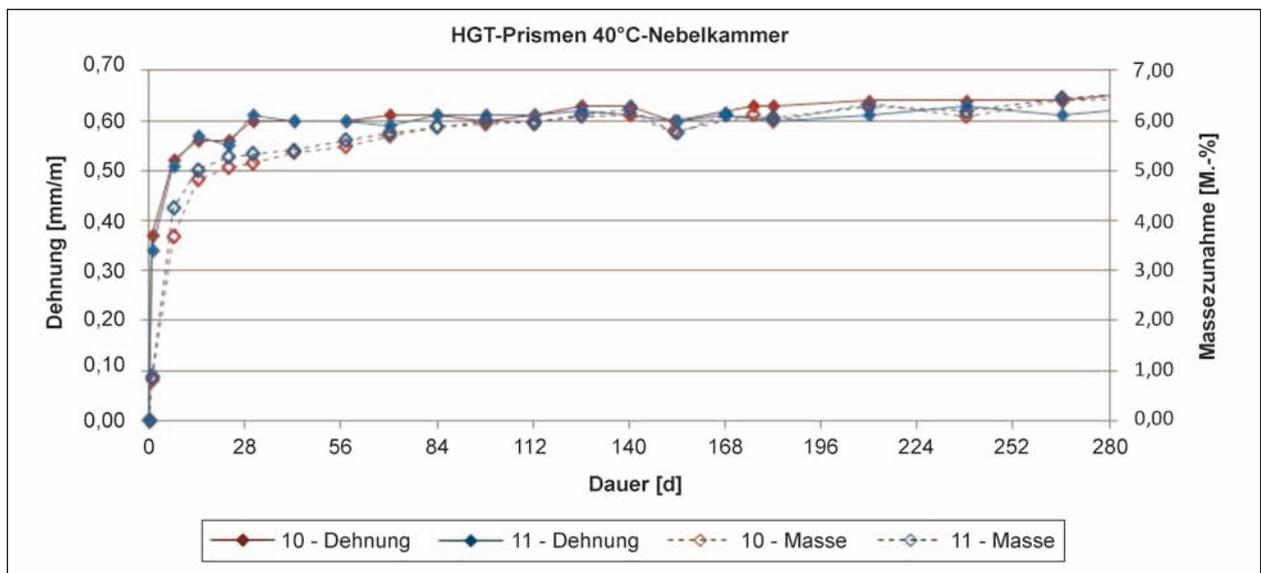


Bild 18: Dehnungen der HGT-Prismen 10 und 11 des AKR-RC-Gemisches in der Nebelkammer

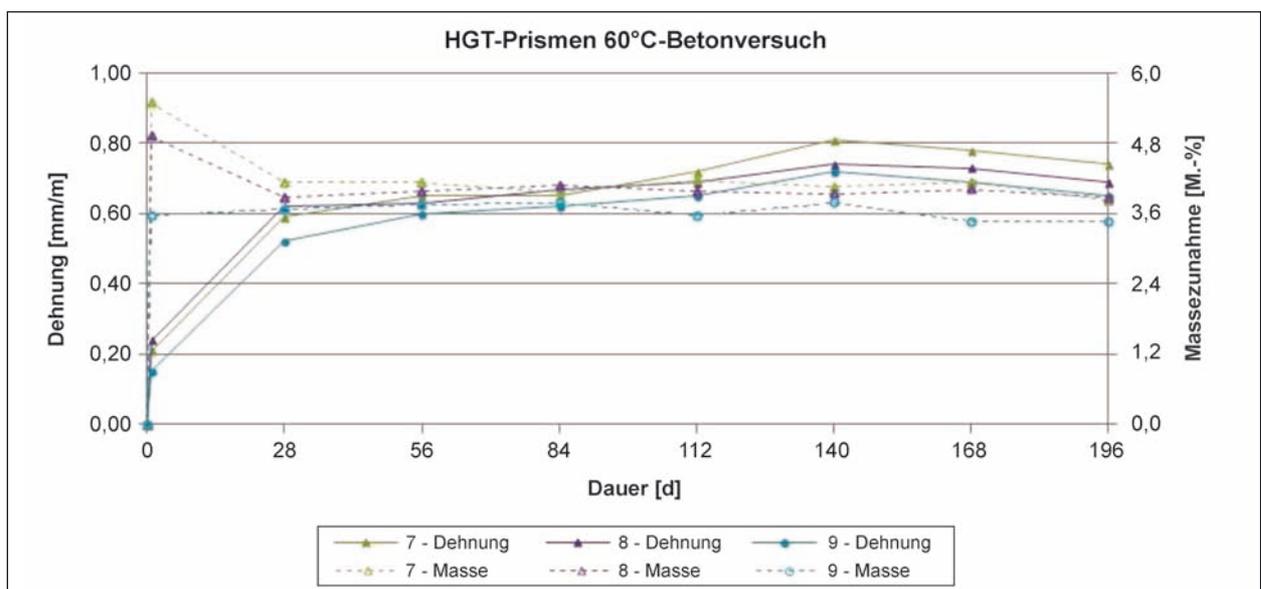


Bild 19: Dehnungen der HGT-Prismen 7, 8 und 9 des AKR-RC-Gemisches während des 60°C-Betonversuches

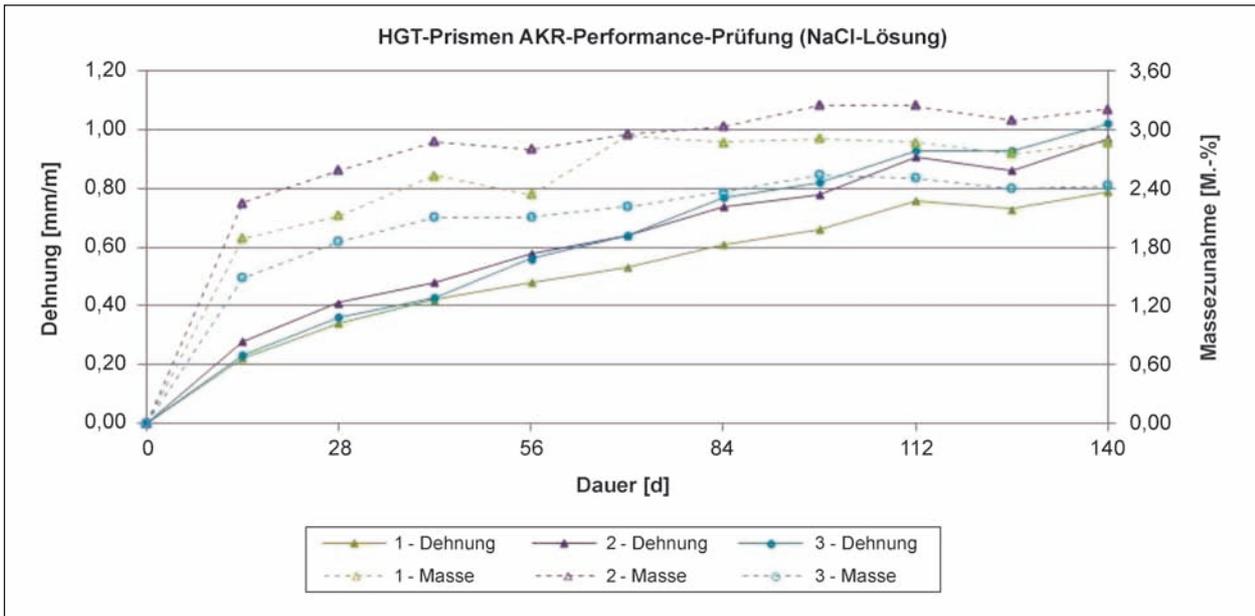


Bild 20: Dehnungen der HGT-Prismen 1, 2 und 3 des AKR-RC-Gemisches während der AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr (10%ige NaCl-Lösung)

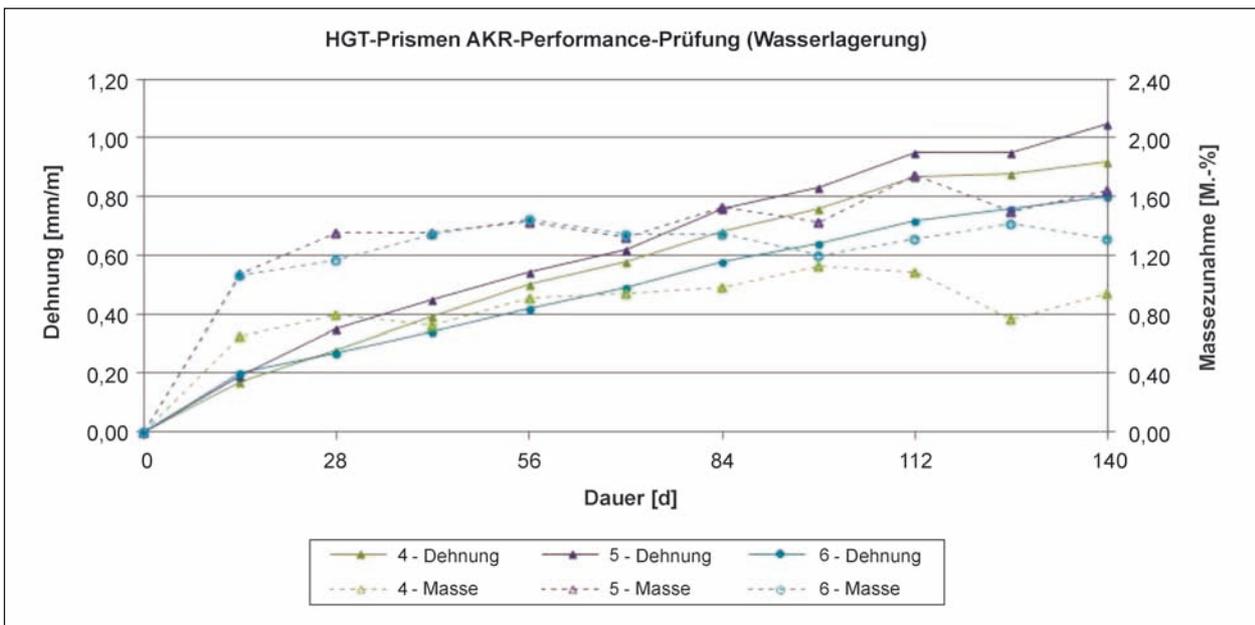


Bild 21: Dehnungen der HGT-Prismen 4, 5 und 6 des AKR-RC-Gemisches während der AKR-Performance-Prüfung nur mit Wasserlagerung

5.4 Mikroskopische Untersuchungen der HGT-Probekörper nach Lagerung

Alle nunmehr nachfolgend im Text genannten Bilder sind im Anhang II zusammengestellt und im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter

[http:// bast.opus.hbz-nrw.de](http://bast.opus.hbz-nrw.de) abrufbar

5.4.1 Untersuchungen am Probekörper, hergestellt mit dem Referenzmaterial

Hierfür ausgewählt worden ist der Probekörper HGT 18, der dem 60°C-Betonversuch unterzogen worden ist.

Bild 22 dokumentiert das typische Gefüge der Probe Referenzgemisch. Im Bild sind Kalkablagerungen in den Hohlräumen und auf Oberflächen

von HGT-Betonbestandteilen zu sehen. Der im Bild markierte Messpunkt belegt anhand der dort erfolgten EDX-Messung die Zusammensetzung solcher Bereiche (siehe hierzu Bild 23 – EDX-Diagramm des Messpunktes aus Bild 22).

Bild 24 demonstriert bei einer geringen Vergrößerung ebenfalls ein haufwerksporiges, relativ locker gebautes Gefüge der HGT-Probe ohne Besonderheiten hinsichtlich des Stattfindens von schädigenden Reaktionen. Deutlich kann hier das punktweise Verkitten der RC-Körner beobachtet werden.

Bild 25 belegt anhand der Aufnahme eine Verbundzone zwischen zwei HGT-Betonbereichen (HGT-Körner) den guten Kornverbund. Eine Bildung treibender, den Verbund störender, Substanzen kann nicht festgestellt werden.

Bild 26 dokumentiert die verkittend wirkende Substanz zwischen den RC-Körnern, hierbei sollte es sich hauptsächlich um Kalk handeln, wie das EDX-Diagramm aus Bild 27 bestätigt.

Damit kann auch durch diese mikroskopischen Untersuchungen belegt werden, dass in den Probekörpern, hergestellt mit dem RC-Referenzgemisch keine Hinweise auf das Stattfinden einer AKR gefunden werden können.

5.4.2 Untersuchungen an Probekörpern, hergestellt mit dem AKR-RC-Baustoffgemisch

Diese Untersuchungen werden umfassend angelegt. Ursprünglich war vorgesehen, analog zu den Untersuchungen an den Bohrkernproben Dünnschliffe zu präparieren und diese unter dem Polarisationslichtmikroskop zu bewerten. Dieser Plan musste aufgegeben werden, da sich keine vernünftig auswertbaren Präparate, die einer lichtmikroskopischen Untersuchung zugänglich sind, herstellen ließen. Demzufolge muss auch hier auf die REM-Untersuchungen zurückgegriffen werden. Ausgewählt worden sind die Probekörper HGT 1, HGT 4, HGT 7 und HGT 10. Diese Auswahl repräsentiert die Ergebnisse der Lagerung der HGT-Proben mit AKR-RC-Gemisch nach folgenden Lagerungsarten:

HGT 10: 40°C-Nebelkammerlagerung,

HGT 7: 60°C-Betonversuch,

HGT 4: AKR-Performance-Prüfung (Wasserlagerung),

HGT 1: AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr (10%ige NaCl-Lösung).

Die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen im Einzelnen:

HGT 10: 40°C-Nebelkammerlagerung

Das typische Gefüge der Probe nach Nebelkammerlagerung ist in Bild 28 dargestellt. Besonderheiten werden bei dieser relativ geringen Vergrößerung erst einmal nicht gefunden. Die verschmierten Bereiche bestehen aus Kalk, der sich auf der Oberfläche der Probe abgelagert hat.

Der Grenzbereich zwischen Original-Gesteinskörnung und Originalmatrix des Fahrbahndeckenbetons ist in Bild 29 zu sehen. Auch hier gibt es erst einmal keine Besonderheit zu beobachten.

An einigen Stellen im Betongefüge gibt es Hinweise auf eine sekundäre Ettringitbildung. Bild 30 zeigt hierzu eine typische Aufnahme, das dazu gehörende EDX-Diagramm enthält Bild 31. Dort sind die typischen Peaks für Calcium, Schwefel, Aluminium und Sauerstoff zu erkennen.

Gelartige Ablagerungen in Hohlräumen der Probe HGT 10, die zusätzlich Alkalien enthalten, dokumentiert Bild 32. Die EDX-Analyse gibt dabei Hinweise auf das Vorhandensein von Natrium und Kalium neben den zu erwartenden Elementen Silicium und Calcium (Bild 33).

Bild 34 zeigt eine Vergrößerung der Bereiche aus Bild 32, mit deutlich sichtbaren schollenartigen Strukturen und gelartiger Ausbildung in einer Pore (Hohlraum). Das EDX-Diagramm (Bild 35) belegt nunmehr deutlich das Vorhandensein von Alkalien in solchen Gefügebereichen der Probe HGT 10.

Abschließend zu dieser Probe zeigt Bild 36 einen Probenbereich, der durch Treiberscheinungen zwischen Bestandteilen der HGT-Probe gekennzeichnet ist. In der Mitte zwischen den Gefügebestandteilen der HGT-Probe verläuft ein Riss, das dort lokalisierte gelartige Produkt weist erhöhte Alkaligehalte auf.

Damit kann zur Probe HGT 10 (AKR-RC-Gemisch nach Nebelkammerlagerung) zusammenfassend festgestellt werden:

- An einigen Stellen werden gelartige Produkte gefunden, die Reste des Originalmaterials oder auch Neubildungen infolge Nebelkammerlagerung sein können.

- Es gibt einige wenige Hinweise auf Treibreaktionen exakt durch diese gelartige Substanz.
- An einigen Stellen wird Ettringit gefunden, der zusätzlich zu Dehnungen führen kann.

HGT 7: 60°C-Betonversuch

Ein typisches Gefügebild zeigt Bild 37. Am Rand einer in der Abbildung zu erkennenden Pore kommt es zur Ablagerung von kurzfasrigen Gebilden, die nach EDX-Analyse weitgehend als CSH-Gel anzusprechen sind. Das EDX-Diagramm beider Messpunkte von Bild 37 enthält Bild 38. Weiterhin typisch für die untersuchte Probe sind Kalkablagerungen auf einem RC-Korn, wie Bild 39 bestätigt. Das zum markierten Messpunkt gehörende EDX-Diagramm ist in Bild 40 dargestellt.

Dass es unter den reaktionsbeschleunigenden Bedingungen des 60°C-Betonversuches auch zur Bildung gelartiger Reaktionsprodukte kommt, dokumentiert Bild 41. In diesem Bild ist eine großflächige Ablagerung von gelartigem Material am Rand einer Pore sichtbar. Das von einem Bereich der Ablagerung aufgenommene EDX-Diagramm zeigt an, dass diese Substanz erhöhte Gehalte insbesondere an Natrium enthält (Bild 42). Kalium wird auch in erhöhten Konzentrationen nachgewiesen. Dieses kann jedoch auch dem Aluminium zugeordnet werden, z. B. dann, wenn sich im Messbereich des Elektronenstrahls Feldspäte befinden.

Eine Vergrößerung des Bereiches der gelartigen Ablagerung ist in Bild 43 zu sehen. Mit kurzen feinfasrigen Kristallen durchsetzt ist in diesem Bild die gelartige Struktur deutlich zu erkennen.

Weitere Belege für den Nachweis gelartiger Reaktionsprodukte enthalten die Bilder 44 und 45. Dort werden in Poren gelartige Ablagerungen vorgefunden, die anhand der EDX-Analyse (Bild 46) eindeutig als AKR-Gel identifiziert werden können.

An dieser Stelle muss jedoch festgehalten werden, dass nicht festgestellt werden kann, ob sich das Gel im Verlauf der 60°C-Lagerung neu gebildet hat oder ob es bereits aufgrund der Vorschädigung vorhanden war. Die Menge an Gel als großflächige Ablagerung deutet auf letzteres hin, was somit anzeigen würde, dass die gebildeten Gelmengen im Originalbeton der A 14 beträchtlich waren. Andererseits weist der Ort des Gelnachweises darauf hin, dass es ebenfalls gut möglich ist, dass sich das Gel erst im HGT-Probekörper und dann unter den reak-

tionsbeschleunigten Bedingungen gebildet hat. Das würde dann auch die gemessenen Dehnungen von ca. 0,8 mm/m (doppelt so hoch im Vergleich zum Referenzmaterial) erklären.

Zusätzlich werden unter diesen Lagerungsbedingungen ebenfalls Hinweise auf die Bildung von Ettringit gefunden. Die Bilder 47 und 48 zeigen langfasrige Kristallaggregate, die gemäß EDX-Analyse (Bild 49) als Ettringit anzusprechen sind.

Damit sollte es in dieser Probe zu einer Überlagerung zweier schädigender bzw. treibender Prozesse gekommen sein, die durchaus zu den beobachteten Dehnungen führen können.

Zusammenfassend muss zur Probe HGT 7 und diesen Lagerungsbedingungen festgestellt werden:

- Charakteristisch für diese Probe und damit die Lagerungsart 60°C-Betonversuch sind großflächige, gelartige Ablagerungen in Poren bzw. im Gefüge der HGT-Probe. Solche Bereiche sind gekennzeichnet durch den Nachweis an Calciumsilicatgelen, jedoch stellenweise mit erhöhten Alkaligehalten (Natrium und auch Kalium).
- An manchen Stellen wird Ettringit vorgefunden, welcher einen zusätzlichen Beitrag zur Dehnung der Proben geliefert haben kann.

HGT 4: AKR-Performance-Prüfung (Wasserlagerung)

Bild 50 zeigt eine Übersicht über das Betongefüge der Probe HGT 4 nach der AKR-Performance-Prüfung (Wasserlagerung). Bei höherer Vergrößerung zeigt sich das Gefüge als relativ dicht mit körnigen Ablagerungen auf der Probenoberfläche (Bild 51). Anhand des EDX-Diagramms (Bild 52) können die abgelagerten Körner auf der Oberfläche als Kalk und CSH-Phasen identifiziert werden. Auch im Bereich von Poren, insbesondere an deren Rändern, sind solche Ablagerungen zu sehen, auch hierbei können diese als Kalk in Kombination mit CSH vorliegen. Belege hierfür enthalten die Bilder 53 und 54 (EDX-Diagramm).

Ein ausgesprochen typisches Bild des Gefüges der Probe HGT 4 liefert Bild 55. Dort wird an einem flach geformten Porenrand ein Kristallrasen gefunden, der in dieser Art an zahlreichen Stellen der Probe vorhanden ist. Die EDX-Analyse solcher Kristallisationsprodukte (Bild 56) weist diese eindeutig als Ettringitkristalle aus.

Die Bilder 57 und 58 zeigen hierzu weitere Bereiche mit großflächigen Ablagerungen, in denen Sulfat nachweisbar ist. Das EDX-Diagramm (Bild 59) weist solche Bereiche zwar überwiegend aus Kalk bestehend aus, Schwefel und auch Aluminium sind jedoch immer mit nachzuweisen, was auf die Bildung von Ettringit hindeutet, hier dann in etwas geringeren Konzentrationen.

Ein weiteres typisches Gefügemerkmal sind schollenartige Strukturen, wie sie in Bild 60 zu erkennen sind. Hier wird nunmehr neben Calcium auch Silicium nachgewiesen, was auf das Vorhandensein von CSH-Phasen in diesem Bereich hinweist. Aber auch hier findet man Schwefel, wie das EDX-Diagramm in Bild 61 ausweist. Demnach ist auch hier eine CSH-Phasenbildung mit einer Sulfatanreicherung in der Struktur verknüpft.

An einigen Stellen im HGT-Probengefüge werden Poren vorgefunden, von denen radialstrahlig Risse ausgehen. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 62 zu sehen. Der Porenrand besteht hauptsächlich aus CSH bzw. Kalk, es kann jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass auch hier geringe Mengen an Schwefel ebenfalls vorhanden sind, eine genaue EDX-Analyse ist aufgrund des Abschattungseffektes an dieser Stelle nicht möglich gewesen.

Zum Abschluss der Untersuchungen der Probe HGT 4 soll ein weiteres Bild (Bild 64) mit den typischen großflächigen Bildungen von fasrigen Kristallen in Form eines Kristallrasen gezeigt werden, um zu demonstrieren, dass in dieser Probe die Bildung von Ettringit bzw. von langfasrigen Kristallisationsprodukten ausgesprochen typisch ist. Hinweise auf die Bildung eines AKR-Gels (schollenartige Gelstrukturen, erhöhte Alkaligehalte über EDX) werden demgegenüber nicht gefunden.

Zusammenfassend zu den Untersuchungen dieser Probe muss festgestellt werden:

- Es gibt an vielen Stellen Hinweise auf die Bildung von Ettringit im Gefüge, welcher in Form von großflächigem Kristallrasen ausgebildet ist.
- Es werden auch Kalk und CSH im Gefüge gefunden, ähnlich wie bei Probe HGT 1. In diesen Phasen kann nach EDX-Analysen durchaus auch Sulfat enthalten sein.
- Hinweise auf eine Beteiligung einer AKR an den Dehnungen gibt es aus diesen mikroskopischen Untersuchungen nicht.

HGT 1: AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr

Eine Übersicht über das Gefüge der Probe HGT 1 nach AKR-Performance-Prüfung unter Zufuhr von Alkalien gibt Bild 65. Dort werden im Wesentlichen Kalkablagerungen gefunden, die EDX-Analyse (Bild 66) weist jedoch ebenfalls geringe Anteile an Natrium, Chlor (vom NaCl), aber auch von Schwefel und an einer Stelle Kalium neben Calcium aus. Weitere typische Gefügebilder mit Kalkablagerungen neben NaCl enthalten die Bilder 67 und 68. Die Ablagerungen sehen stellenweise wie eine Art Sinterschicht aus (Sinterkalk). Aber auch hier belegt die EDX-Analyse, dass neben Calcium auch immer Chlor und auch wieder Schwefel detektiert werden kann (Bild 69).

Weiterhin typisch und für diese Lagerungsart zu erwarten sind massive NaCl-Ablagerungen in Porenräumen bzw. generell im Gefüge des HGT-Probekörpers. Beispiele hierfür sind die Bilder 70 und 71. Ein typisches EDX-Spektrum zeigt Bild 72. An diesem Messpunkt wird nahezu ausschließlich NaCl detektiert, welches sich schichtenartig im Betongefüge wiederfinden lässt.

Ein Beweis für die großflächige Ablagerung von NaCl im Gefüge der Probe HGT 1 ist in Bild 73 zu sehen. Hier ist ein Elementmapping-Bild dargestellt (die Farbuordnung zu den Elementen ist aus der Legende in der Abbildung ersichtlich), welches eindeutig belegt, dass NaCl neben Kalk z. B. in der Nähe eines Quarzkornes angereichert vorkommt.

Großflächige Ablagerungen wiederum von Kalk sind in Bild 74 zu erkennen. Das EDX-Diagramm (Bild 75) weist diese Ablagerungen aber ebenfalls als chlorid- und sulfathaltig aus.

Damit zieht sich durch diese Untersuchungsergebnisse ebenfalls der Befund, dass neben Kalk (bzw. auch CSH) und NaCl fast immer auch Schwefel, sehr wahrscheinlich als Sulfat, nachweisbar ist. Dies stellt eine Parallele zu den Untersuchungen bei 60 °C Wasserlagerung dar. Als Beleg für diese Aussage können auch die Bilder 76 und 77 herangezogen werden.

Ein sehr interessantes Ergebnis ist in Bild 78 zu sehen. Die Abbildung zeigt das Betongefüge bei geringer Vergrößerung. Deutlich kann eine Ummantelung der Original-Körner durch den HGT-Binder festgestellt werden. Diese Binderschicht bedeckt die RC-Körner relativ gleichmäßig. Betrachtet

man sich diese Ummantelungsschicht bei höherer Vergrößerung (Bild 79), werden die Stege zwischen den RC-Körnern sichtbar. Diese bestehen aus Kalk, NaCl und möglicherweise auch Friedelschem Salz. Diese Stege scheinen aufzuquellen.

Neben der in Bild 79 beobachteten quellenden Wirkung von Kalk, CSH und NaCl-Bestandteilen in Mischungen innerhalb der Binderstege kommt es durch die Einlagerung von NaCl ebenfalls zu Störungen im Verbund zwischen den RC-Körnern. Bild 80 zeigt zwei RC-Körner, zwischen denen plättchenförmige NaCl-Kristalle krustenartig eingelagert sind. Auch hier lässt dieser Befund die Schlussfolgerung zu, dass beide RC-Körner durch diese Neubildungen (Ablagerungen) auseinandergetrieben werden.

Ein ganz ähnliches Bild enthält Abbildung 81. Auch dort ist zu sehen, dass der Verbund zwischen den RC-Körnern durch NaCl-Einlagerungen, möglicherweise auch hier mit Kalk und Sulfat vermischt, gestört ist.

Eine weitere mögliche Ursache für das extreme Dehnpotenzial der HGT 1-Probe offenbart Bild 82. Dort sind silicatische, schichtartige Substanzen zu erkennen (ähnlich Tonmineralschichten), die ebenfalls Anzeichen eines Aufquellens anzeigen. Ein durchgeführtes Element-Mapping (Bild 83) zeigt an, dass es im Oberflächenbereich der silicatischen Schichten zu einem geringen, aber messbaren Einbau von Kalium gekommen ist. Möglicherweise wird die quellende Wirkung durch eine Einlagerung von Alkalien zwischen den Schichten hervorgerufen.

Auch Poren sind massiv mit sinterartigen Ablagerungen ausgefüllt. Bild 84 ist hierfür ein Beispiel. Und auch hier zeigt die EDX-Analyse (Bild 85) an, dass das abgelagerte Material neben Kalk und NaCl zusätzlich Schwefel und somit Sulfat enthält, ein Befund der sich zentral durch die Begutachtung dieser Probe zieht.

Eine weitere großflächige Ablagerung typischer Reaktionsprodukte dieser Probe dokumentiert Bild 86. Neben Kalk und CSH wird auch hier Natrium (vom NaCl) gefunden.

Zusammenfassend zu den Untersuchungsergebnissen unter dem REM bei Probe HGT 1 lässt sich feststellen:

- Es werden keine Hinweise auf das Stattfinden einer zusätzlichen AKR gefunden. An einer

Stelle gibt es erhöhte Alkaligehalte neben Silicium, aber dort auch gekoppelt mit Calcium und NaCl.

- Viele der sichtbaren Ablagerungen in Poren und generell im Betongefüge zwischen den HGT-Bestandteilen bestehen aus Kalk, CSH und NaCl. Solche massiven Reaktionsneubildungen enthalten dann meist auch zusätzlich Sulfat.
- An zahlreichen Stellen im Gefüge sieht es so aus, als ob genau diese Mischung aus den unterschiedlichsten Bestandteilen zu einer treibenden Wirkung führt. Hinweise auf einen gestörten Verbund zwischen den RC-Bestandteilen, aufgrund der Einlagerung von NaCl zwischen den Körnern, werden gefunden.
- Ein schichtartiges Ablösen nach einem Quellvorgang wird ebenfalls beobachtet. Hierbei kann es sich um ein nachträgliches Aufquellen nach der Einlagerung von Alkalien in die originalen Alkalisilicatgele oder auch in CSH-Schichten der HGT-Binder handeln.

6 Auswertung und Schlussfolgerungen

Sowohl am Referenzgemisch als auch am alkaligeschädigten AKR-RC-Gemisch aus der A 14 werden Untersuchungen am Gesteinskörnungsmaterial selbst als auch an den Baustoffgemischen durchgeführt. Mit den Gemischen werden HGT-Probekörper hergestellt und unter verschiedenen Bedingungen gelagert. Hierzu zählt die Lagerung unter Normbedingungen bei 20 °C zur Ermittlung von Druckfestigkeiten, unter Nebelkammerbedingungen (40 °C und 100 % rel. LF), unter den Bedingungen des 60°C-Betonversuches (nach Alkali-Richtlinie) und unter Bedingungen entsprechend der AKR-Performance-Prüfung bei zusätzlicher Berücksichtigung einer Alkalizufuhr von außen (10%ige NaCl-Lösung).

Anhand der mechanischen Kennwerte der HGT-Probekörper (zylinderförmige Proben) kann kein signifikant messbarer Einfluss der Vorschädigung durch eine in der Fahrbahndecke stattgefundene AKR auf die Festigkeit der HGT-Probekörper festgestellt werden. Auch die Verschärfung der Lagerungsbedingungen (Nebelkammer + Alkalizufuhr von außen bei 40 °C) ergeben keine deutlich abnehmenden Festigkeiten.

Die Formänderungsuntersuchungen in der Nebelkammer, mittels 60°C-Betonversuch und mittels AKR-Performance-Prüfung mit und ohne Alkalizufuhr ergeben deutlich messbare Unterschiede im Dehnungsverlauf der Probekörper, die mit dem Referenzgemisch hergestellt wurden im Vergleich zu denen, die mit dem AKR-RC-Gemisch hergestellt wurden. Insbesondere deuten zahlreiche Ergebnisse daraufhin, dass es beim AKR-RC-Baustoffgemisch unter den reaktionsbeschleunigenden Bedingungen zu weiteren Reaktionen kommt, die sich gegenüber dem Referenzgemisch in deutlich erhöhten Dehnungen äußern.

Bemerkenswert ist, dass unter den Bedingungen des AKR-Performance-Testes sowohl die Lagerung in 10%iger NaCl-Prüflösung als auch die Lagerung in Wasser ähnliche Dehnungswerte beim AKR-RC-Gemisch ergeben. Möglicherweise machen sich hier die im Beton gespeicherten Alkalien bemerkbar, werden wieder freigesetzt und reagieren mit Feuchte weiter zu einem quellfähigen Gel. Aber auch der nachgewiesene Ettringit kann Treibreaktionen verursachen, die unter den unterschiedlichen Lagerungsbedingungen zu einem ähnlichen Dehnungsverhalten führen.

Vertiefte Untersuchungen hierzu werden an Probekörperscheiben unter dem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Hierbei steht im Mittelpunkt – aus Gefügebesonderheiten, die sich nach unterschiedlichen Lagerungsregimen einstellen – Hinweise für das weitere Stattfinden schädigender und damit insbesondere treibender Reaktionen zu finden. Bei den Untersuchungen der HGT-Proben, hergestellt mit dem Referenzgemisch, können generell keine Gefügemerkmale gefunden werden, die insbesondere auch unter den reaktionsbeschleunigenden Bedingungen der AKR-Performance-Prüfung auf das weitere Stattfinden einer schädigenden AKR hinweisen. Damit werden die Dehnungswerte der HGT-Referenzproben bei den jeweiligen Lagerungsarten als Bezugswerte angesehen. Diese werden den Ergebnissen der HGT-Proben, hergestellt mit AKR-RC-Gemisch, gegenübergestellt.

Nebelkammerlagerung

Im Ergebnis der Nebelkammerlagerung von Probekörpern, hergestellt mit dem AKR-RC-Gemisch, kann festgestellt werden, dass an einigen Stellen gelartige Produkte gefunden werden, die Reste des originalen AKR-Reaktionsproduktes oder auch Neu-

bildungen innerhalb der HGT-Probekörper infolge Nebelkammerlagerung sein können. Es gibt Hinweise unter dem REM auf Treibreaktionen exakt durch dieses gelartige Material. Zusätzlich wird an ganz wenigen Stellen eine Anreicherung von Ettringit gefunden, der möglicherweise zusätzlich zu Dehnungen geführt hat. Diese Gefügebesonderheiten in den Probekörpern, hergestellt mit AKR-RC-Gemisch, können wahrscheinlich die mit ca. 0,6 mm/m erhöhten Dehnungen gegenüber den Probekörpern, hergestellt mit dem Referenz-Baustoffgemisch erklären. Das Dehnungsniveau bleibt jedoch relativ gering, was sich auch in den nur gering nachgewiesenen Gelmengen in den Probekörpern zeigt.

60°C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie

Im Ergebnis des 60°C-Betonversuches kann festgestellt werden, dass es zur Bildung großflächiger, gelartiger Ablagerungen in Poren bzw. im gesamten Gefüge der HGT-Proben gekommen ist. Solche Bereiche sind überwiegend gekennzeichnet durch den Nachweis von Calciumsilicatgelen. Es werden stellenweise auch Bereiche mit erhöhten Alkaligehalten (Natrium und auch Kalium) detektiert. An manchen Stellen wird auch Ettringit gefunden, welcher aufgrund der Menge durchaus einen zusätzlichen Beitrag zur Dehnung der Proben geliefert haben kann. Dieses Ergebnis der Gefügeuntersuchungen deckt sich gut mit den Dehnungsverläufen und den gemessenen Endwerten. Mit ca. 0,7 bis 0,8 mm/m werden unter den Bedingungen des 60°C-Betonversuches doch deutlich erhöhte Dehnungen gemessen. Diese Ergebnisse sind zum einen erhöht gegenüber dem Grenzwert nach Alkali-Richtlinie, der bei 0,3 mm/m liegt (auch wenn dieser hier nicht gilt), zum anderen auch erhöht gegenüber den Dehnungen, die an Probekörpern des Referenzgemisches gemessen wurden. Ob es sich bei diesem Dehnungszuwachs zweifelsfrei ausschließlich um einen Beitrag der AKR handelt, kann nicht abschließend entschieden werden. Der Nachweis von Sulfat und damit zusammenhängend von Ettringit muss bei der Kurvendiskussion und den Dehnungsendwerten jedenfalls mit berücksichtigt werden. Aufgrund des parallelen Auftretens beider treibender Reaktionen sind die Beiträge von AKR und sekundärer Ettringitbildung (SEB) jedoch nicht zu separieren.

AKR-Performance-Prüfung – Wasserlagerung

Im Vergleich der Dehnungswerte zwischen den HGT-Proben, hergestellt mit dem Referenzgemisch und denen, hergestellt mit dem AKR-RC-Gemisch,

muss festgestellt werden, dass es nahezu zu einer Verdoppelung des Dehnungsendwertes beim AKR-RC-Gemisch kommt. Worin können die Ursachen hierfür liegen? Es gibt an vielen Stellen Hinweise auf die Bildung von Ettringit im Gefüge der HGT-Proben mit AKR-RC-Gemisch, welcher als großflächig vorkommender Kristallrasen ausgebildet ist. Es werden auch Kalk und CSH im Gefüge gefunden ähnlich wie bei den Untersuchungen während der AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr. Hinweise auf eine Beteiligung einer AKR an den Dehnungen gibt es jedoch an dieser Stelle nicht. Möglicherweise werden die Alkalien in den bereits vorhandenen Gelen aufgrund des offenporigen Gefüges der HGT-Proben und der Wasserlagerung ausgelaugt. Eine Ettringitbildung wird demgegenüber offensichtlich gefördert. Damit ist der sehr stark unterschiedliche Dehnungsverlauf durchaus auf eine zusätzliche Bildung sekundären Ettringits (SEB) zurückzuführen.

AKR-Performance-Prüfung – Alkalizufuhr (10%ige NaCl-Lösung)

Im Ergebnis der Untersuchungen der HGT-Proben unter den Bedingungen der AKR-Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr (10%ige NaCl-Lösung) lässt sich feststellen, dass auch hier keine Hinweise auf das Stattfinden einer zusätzlichen AKR gefunden werden können. Viele der sichtbaren Ablagerungen in Poren und im Betongefüge zwischen den HGT-Bestandteilen bestehen aus Kalk, CSH und NaCl. Solche festgestellten i. d. R. massiven Reaktionsprodukte, ob bereits vorhanden oder durch die Lagerung neu gebildet, enthalten dann meist auch zusätzlich Sulfat. An zahlreichen Stellen im Gefüge gibt es Hinweise darauf, dass genau diese Mischung aus den unterschiedlichen Bestandteilen zu einer treibenden Wirkung führt. Wie das Sulfat vorliegt, geht aus den Untersuchungen nicht hervor. Es werden jedenfalls keine für Ettringit typischen fasrigen Kristalle nachgewiesen, demzufolge kann es auch Monosulfat sein. Das nachgewiesene Sulfat kann aber auch ein Hinweis dafür sein, dass Ettringit in amorpher Form vorhanden ist. Ein gestörter Verbund zwischen den RC-Bestandteilen aufgrund der Einlagerung von NaCl zwischen die Körner wird festgestellt.

Damit muss abschließend konstatiert werden, dass es infolge reaktionsbeschleunigender Bedingungen, die durch erhöhte Temperaturen und Feuchten und zusätzlich durch eine Alkalizufuhr von

außen gekennzeichnet sind, messbare Formänderungen an den HGT-Probekörpern gibt, die auf treibende, quellende Reaktionen im Gefüge der HGT-Probekörper hinweisen. Als Ursachen sind nicht zwangsläufig AKR-Gelbildungen und das Aufquellen solcher Gele im Gefüge auszumachen. Es werden doch auch deutliche Hinweise auf die Bildung von Ettringit gefunden, die ebenfalls einen Beitrag zur Dehnung der Proben liefern können. Unabhängig von den Ursachen muss aufgrund der stellenweise doch deutlich messbaren Dehnungen auf Basis dieser Untersuchungsergebnisse ein Einsatz AKR-geschädigten Betonaufbruches als Komponente für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) für jedes Bauvorhaben gesondert bewertet werden.

7 Literatur

- [1] DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAfStb. Beuth-Verlag, Berlin, 2007
- [2] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau ARS 04/2013: Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Empfehlung für die Schadensdiagnose und die Instandsetzung. In: Beton 53 (2003), Heft 9, S. 438-443

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 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 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 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 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 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 Merkmalerkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter 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 Abstreuung
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 zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
Radenberg, Miljković, Schäfer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hüniger, Börner
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

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.