

# Schadenskategorie- spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 145

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

# Schadenskategorie- spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

von

Frank Weise  
Daniel Werner  
Bärbel Maier  
Gerd Wilsch

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Berlin

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 145**

**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 Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, 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 Kommunikation.

Die Berichte der **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 29.0325**  
Schadenskategorie-spezifische Bewertung von  
AKR-Prüfverfahren

**Fachbetreuung**  
Janin Kuhnsch

**Referat**  
Betonbauweisen

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

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
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 978-3-95606-543-9

Bergisch Gladbach, November 2020

## Kurzfassung – Abstract

### Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

Ausgehend von den verstärkt auftretenden AKR-Schäden an den vor 2005 hergestellten BAB-Abschnitten verfolgte das Forschungsvorhaben zwei Ziele. So sollte einerseits die Ursache für die mit der AKR-Schadensentwicklung einhergehende Dunkelfärbung der Oberfläche der Betonfahrbahndecke im Fugenbereich ermittelt werden. Andererseits galt es, ausgehend von der Zustands- und Schadenserfassung das AKR-Restschädigungspotenzial der Prüfkörper aus je drei ein- und zweischichtig ausgeführten, unterschiedlich stark AKR-geschädigten BAB-Abschnitten vergleichend zu bewerten. Folgende Ergebnisse wurden u. a. erzielt:

#### 1. Dunkelfärbung

Experimenteller Nachweis mit kombinierter in-situ-Feuchtemessung mit Radar (integral) und NMR (tiefenaufgelöst), dass Dunkelfärbung der Oberfläche der Betonfahrbahndecke im Fugenbereich auf eine erhöhte Durchfeuchtung der Betonrandzone zurückzuführen ist; erfolgreiche Validierung der ZfP-Ergebnisse mit Darr-Wäge-Versuch.

#### 2. Zustand beprobter BAB-Abschnitte und schadenskategorie-spezifische Bewertung der AKR-Prüfverfahren:

- Auffinden von Horizontalrissen im Bereich der Querscheinfuge bei allen AKR-geschädigten BAB-Abschnitten,
- Ermittlung mittlerer Eindringtiefen bei Natrium von maximal 20 bis 45 mm und bei Chlorid von maximal 15 bis 60 mm im Entnahmezustand; keine Korrelation mit der AKR-Schadenskategorie des jeweiligen BAB-Abschnitts,
- Nachweis gleichzeitig auftretender SEB bei allen AKR-geschädigten BAB-Abschnitten im Entnahmezustand,
- keine signifikante Verminderung der Spaltzugfestigkeit durch die verstärkte AKR am Plattenrand,
- Ermittlung eines erhöhten AKR-Restschädigungspotenzials bei vier der sechs beprob-

ten BAB-Abschnitte primär mittels AKR-Performanceprüfungen,

- Ermittlung höherer Dehnungen bei Performanceprüfungen aus Ober- und Unterbeton bestehenden Halbschalen, als an separat aus Ober- und Unterbeton gewonnenen Prismen,
- Unauffälliges Verhalten nahezu aller bei der Performanceprüfung auffälligen Bestandsbetone im 40°C- und 60°C-Betonversuch; vermutete Ursache: mit LIBS nachgewiesene hohe und tiefreichende Auslaugung der Alkalien.

### Evaluation of ASR testing methods in relation to specific damage categories

Our research project had two aims in addressing the increased occurrence of ASR damage on German motorway sections built before 2005: firstly, to establish the cause of the darker discolouration around the joints of concrete road surface that occurs in conjunction with ASR damage. Secondly, based on the status and damage report, it aimed to comparatively evaluate the residual ASR damage potential of test samples from three federal motorway sections of one-layer and three of two-layer pavement, showing different levels of ASR damage. We obtained the following results (among others):

#### 1. Dark discolouration

Experimental evidence using non-destructive testing methods showing that dark discolouration of concrete road surfaces near joints is due to increased moisture in the concrete boundary zone: NDT findings successfully validated by weighing and drying test.

#### 2. Condition of sampled motorway sections and evaluation of ASR test methods used:

- discovery of horizontal cracks located near transverse contraction joint in all motorway sections with ASR damage,
- determination of maximum mean penetration depth of sodium from 20 to 45 mm and of chloride from 15 to 60 mm in sample as

extracted; no correlation with the ASR damage category of the relevant motorway section,

- evidence of simultaneous occurrence of DEF on all ASR-damaged motorway sections in sample as extracted,
- no significant reduction of splitting tensile strength due to increased ASR at slab edge,
- increased ASR residual damage potential found on four of the six motorway sections tested primarily with ASR performance tests,
- increased expansion found during performance tests on half shells consisting of upper and lower concrete compared to prisms taken separately from upper and lower concrete,
- 40°C and 60°C concrete tests revealed no noticeable reactions in almost all existing concrete types that showed irregularities in the performance test. Suggested cause: high and deep levels of alkali leaching determined by LIBS.

## Summary

### Evaluation of ASR testing methods in relation to specific damage categories

Our research project had two aims in addressing the increased occurrence of alkali-silica reaction (ASR) damage on German motorway sections built before 2005: firstly, to establish the cause of the darker discolouration around the joints of concrete road surfaces that occurs in conjunction with ASR damage. Secondly, based on the status and damage report, it aimed to comparatively evaluate the residual ASR damage potential of test samples from three federal motorway sections of one-layer and three of two-layer top course concrete, showing different levels of ASR damage. We obtained the following results (among others):

1. Analysis of causes of dark discolouration of pavement surface near the joints

The two-stage in-situ tests using non-destructive methods gave the first-ever experimental confirmation of the working hypothesis that the dark discolouration of concrete pavement surfaces around joints is caused by increased moisture. The large-scale radar analysis already determined that increased run times of the radar pulses between the surface and the back side of the concrete pavement occur in the joint and joint intersection areas. This indicates increased integral moisture penetration of the concrete pavement. It also clearly shows that the increased moisture penetration in the joint area of the concrete pavement reaches its greatest lateral extension near where the joints intersect. The more detailed NMR moisture measurements in the concrete boundary zones showed good correlation between the increased NMR amplitude that indicates increased moisture content, and the dark discoloured surface in the joint area of the concrete pavement. As with the radar measurement of integral moisture, NMR examination of the concrete boundary zone showed the highest moisture penetration levels near joint intersections and the lowest levels in the middle of the slab. The moisture penetration level of the concrete boundary zone near the transverse contraction joint lies between the two extreme values mentioned above. Additional spot-check moisture measurements of drill dust samples using the weighing and drying test confirmed the radar measurement findings. Thus, a

mean moisture content of 1.2 M.-% was found in the centre of the slab across the whole depth of the concrete pavement. On the slab edge near the transverse contraction joint, the value was 1.6 M.-% and near the joint intersection, 2.2 M.-%. However, the weighing and drying test only confirmed the NMR moisture measurements for the concrete boundary zone near the joint intersection and in the slab centre. We hypothesize that the small difference in moisture levels in the concrete boundary zone is unrepresentable by drill dust extraction and drying. This suggests that the NMR technology has SEFinite advantages over the weighing-drying test due to its greater sensitivity to moisture, its significantly greater depth resolution and its non-destructive character. The disadvantage of NMR moisture measurement using the NMR-MOUSE is, however, that it is limited to a measurement depth of approx. 25 mm.

2. Condition of federal motorway sections tested and evaluation of ASR testing methods in relation to specific damage categories

Following a visual assessment of the concrete pavement, samples were taken from three federal motorway sections of one-layer and three of two-layer pavement showing different categories of ASR damage. The various types of samples were then visually examined and photographed in the laboratory. The focus was on verifying the extent of horizontal crack formation in the joint area, identifying the aggregates used, evaluating the concrete structure (grading curve, grain bonding, air voids, cracks etc.) and checking for the presence of ASR characteristics. On this basis the extent of ASR and secondary ettringite formation (SEF) characteristics were analysed in more detail using petrographic microscopy. LIBS analyses were also carried out that enabled conclusions to be drawn about de-icing salt penetration in the concrete pavement. In addition, to evaluate the effects of ASR on the concrete's mechanical properties, comparative depth-dependent testing was carried out to determine the splitting tensile strength at the middle and the surface zone of the top course. To test the correlation between splitting tensile strength and void structure, depth-dependent testing of the overall porosity was also carried out.

In order to obtain an estimated projection of the remaining useful life of the concrete road surface in each case, we determined the residual ASR damage potential using a range of ASR-conducive storage

conditions for specially made samples. The 40°C and 60°C concrete tests as in [1], as well as the 60°C concrete test with external alkaline application [2] and storage under changing climate conditions [3], were all carried out for comparison purposes. For the tests, differently shaped sample bodies were taken from the upper and lower layers of the concrete top course, both together and separately, and stored in ASR-conducive conditions. Afterwards, the development of ASR and SEF characteristics was analysed again using petrographic microscopy. In addition, the presence of the quantity of alkalis necessary for ASR damage to take place was verified using LIBS.

The following conclusions can be drawn from the examination of the federal motorway sections using the tests described above:

- The findings relating to the first lane in reference sections A14-R1/A14-R2 and A14-R3 showed unexpected differences in ASR damage levels. This is due to the difference in concrete composition: the lower layer of top course concrete on the A14-R3 in the area tested does not primarily contain quartzite, quartz and feldspar, but above all basalt. Furthermore, the greatest deflection of the concrete slabs around the transverse joint area up to 9 mm was measured in the reference section A14-R2.
- Horizontal cracks were found in all ASR-damaged motorway sections near the transverse contraction joints. These were usually at dowel level. In some cases, additional crack levels were identified above and/or below them.
- Apart from A14-GB-A and A14-GB-B, all the concrete pavements in the areas examined contained inadequate amounts of crushed aggregates and too few entrained air voids. The uneven distribution of the entrained air voids is also striking.
- In the motorway sections examined, the maximum mean penetration depth of sodium was 20 to 45 mm and that of chloride was 15 to 60 mm. These penetration depths do not correlate with the ASR damage category of the relevant motorway section.
- As well as signs of ASR, characteristic indications of SEF were also found in all ASR-damaged motorway sections.
- On all ASR-damaged motorway sections, the fact that ASR characteristics were more strongly developed at the surface zone of the top course compared to the middle resulted in no significant reduction of the splitting tensile strength over the depth of the concrete pavement.
- In four of the six motorway sections examined, increased ASR residual damage potential was primarily identified by ASR performance tests. The damage was indicated by expansions beyond the limit value and increased levels of ASR and SEF characteristics identified by petrographic microscopy.
- Comparison of the results of both performance tests reveals that the expansion limit values set for each cyclic storage test procedure are reached earlier in case of exposure to a NaCl solution, and after the maximum number of cycles this limit is much further exceeded, than in the 60°C concrete test with external alkali application (in this case a 3% NaCl solution). The resulting evaluation of the residual ASR damage potential is not affected by this, however.
- In the case of the ASR-conducive storage of different types of samples from the A14-GB-B extraction area, it is striking that separate testing of upper and lower concrete layers certainly makes it possible to evaluate the ASR residual damage potential separately. This leads however to the question of why in the ASR performance test the expansion of half-shells consisting of upper and lower concrete is much higher than that of the prisms taken from either lower or upper concrete separately. In the 40°C and 60°C concrete prism tests, this finding was reversed. This suggests that geometry and orientation (vertical or horizontal in relation to the road surface) of the sample also have a decisive influence on its expansion behaviour. To clarify this important issue, we suggest systemic tests in this context in future.
- Apart from the separately tested lower top course layer in sampling area A1-GB-B, the existing concrete types that showed irregularities in the performance tests revealed no noticeable reactions in the 40° and 60° concrete tests. These results are also supported by the petrographic microscopy findings.
- One possible explanation for the different evaluation of ASR residual damage potential in

the 40°C and 60°C concrete tests on the one hand, and the performance tests on the other, could be the alkali content in each case. Our research using extensive systematic LIBS analyses gave experimental evidence for the first time that during winter usage, the de-icing salt applied to the road surface up to a depth of 45mm is leached out to a large extent in the 40°C and 60°C test. The alkali depletion this causes leads in turn to underestimation of their sensitivity to alkalis, particularly in the case of the slow and late-reacting aggregates, which confirms the working hypothesis described in [4].

- The external application of de-icing salt in the performance tests, on the other hand, resulted in a significant increase of the sodium and chloride content throughout the whole sample cross-section. In detail, the application on all sides of a 3.6% NaCl solution in the 60°C concrete test with external alkali application resulted in an increased sodium content that was relatively evenly distributed over the cross-section. In the storage under changing climatic conditions with NaCl application, the sodium and chloride distribution showed a gradient starting on the surface where the solution was applied and reaching the whole cross-section of the sample.

Finally, we suggest that the testing programme developed here for evaluating ASR testing methods in relation to specific damage categories should be extended to additional sections of the federal motorways to increase the reliability of the findings. In doing so, attention should be paid in particular to verifying the influence of the sample geometry on expansion behaviour in the overall and separate examination of upper and lower layers of the top course concrete. Because this issue is so highly charged, and in order to fundamentally clarify the question, we also suggest adequate systemic tests on the basis of laboratory concretes.

## Literature

- [1] DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [2] FGSV: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen – TP B-StB 14: Widerstand gegen Alkali-

Kieselsäure-Reaktion von Beton bei Alkalizufuhr von außen (60°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen). Entwurf 2016

- [3] FGSV: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen – TP B-StB 14: Widerstand gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion von Beton bei Alkalizufuhr von außen (FIB-Klimawechsellagerung). Entwurf 2016
- [4] GIEBSON, C.: Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2013



## Inhalt

<b>Abkürzungen</b> .....	10	3.5.1 Vorbemerkungen zum Stand der Technik .....	28
<b>1 Problem- und Zielstellung</b> .....	11	3.5.2 Kurzbeschreibung der Prüfkörper- präparation und der adaptierten AKR-Prüfverfahren .....	29
1.1 Problemstellung .....	11	3.6 Aufbauende Untersuchungen an Prüfkörpern nach AKR-provozieren- der Lagerung .....	35
1.2 Zielstellung .....	12	<b>4 Ergebnisse und deren Auswertung</b> .....	35
<b>2 Ursachenanalyse für die Dunkel- färbung der Fahrbahnoberfläche im Fugenbereich (AP1)</b> .....	13	4.1 Charakterisierung der Bohrkerne und Prüfkörper im Entnahmezustand. . .	35
2.1 Untersuchungskonzept .....	13	4.1.1 Visuelle Begutachtung der Bohr- kerne und Prüfkörper .....	35
2.2 Untersucher BAB-Abschnitt .....	14	4.1.2 Analyse der Rissbildung im Fugen- bereich .....	37
2.3 Beschreibung eingesetzter ZfP-Techniken .....	14	4.1.3 Mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung. ....	39
2.4 Ergebnisse und deren Auswertung . . .	17	4.1.4 Analyse des Tausalzeintrags .....	39
2.4.1 Radar .....	17	4.1.5 Vergleichende Ermittlung der Spalt- zugfestigkeit und Gesamtporosität im Rand und in der Mitte der Beton- fahrbahnplatte .....	40
2.4.2 NMR-Relaxometrie und Darr-Wäge- Verfahren .....	17	4.2 Ermittlung des AKR-Restschä- digungspotenzials mit verschieden- artigen AKR-provozierenden Lagerungen .....	42
<b>3 Schadenskategorie-spezifische Bewertung der AKR-Prüfver- fahren (AP2)</b> .....	20	4.3 Aufbauende Untersuchungen an Prüfkörpern nach AKR-provozieren- der Lagerung .....	45
3.1 Untersuchungskonzept .....	20	4.3.1 Mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung. ....	45
3.2 Ausgewählte BAB-Abschnitte .....	22	4.3.2 Analyse der Natrium-, Chlor- und Schwefelverteilung .....	50
3.3 Zustandserfassung und Bohrkern- entnahme mit Dokumentation .....	22	<b>5 Zusammenfassende Betrach- tungen und Ausblick</b> .....	53
3.4 Charakterisierung der Bohrkerne und Prüfkörper aus Platten- segmenten im Entnahmezustand. . . . .	23	5.1 Ursachenanalyse für die Dunkel- färbung der Fahrbahnoberfläche im Fugenbereich (AP1) .....	53
3.4.1 Visuelle Begutachtung und Dokumentation .....	23		
3.4.2 Analyse der Rissbildung im Fugenbereich .....	24		
3.4.3 Mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung. ....	24		
3.4.4 Analyse des Tausalzeintrags .....	25		
3.4.5 Spaltzugfestigkeit .....	28		
3.4.6 Gesamtporosität .....	28		
3.5 Ermittlung des AKR-Restschädigungs- potenzials mit verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen . . . . .	28		

5.2	Schadenskategorie-spezifische Bewertung der AKR-Prüfverfahren (AP2) .....	54
	<b>Literatur</b> .....	56
	<b>Bilder</b> .....	58
	<b>Tabellen</b> .....	59

Die Anhänge zum Bericht sind im elektronischen  
BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de>  
abrufbar.

PK	Prüfkörper
QSF	Querscheinfuge
RL	Richtlinie
RSTO	Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen
RW	Rückwand
SEB	Sekundäre Ettringitbildung
SK	Schadenskategorie
SS	Standspur
UB	Unterbeton
W	Wiederholung
ZfP	Zerstörungsfreie Prüfung

## Abkürzungen

AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
AP	Arbeitspaket
ARS	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau
BAB	Bundesautobahn
BFD	Betonfahrbahndecke
Bk	Belastungsklasse
BK	Bohrkern
BV	Betonversuch
DIN	Deutsches Institut für Normung
DS	Dünnschliff
FK	Fugenkreuz
FR	Fahrtrichtung
FS	Fahrspur
GK	Gesteinskörnung
KWL	Klimawechsel-lagerung
HS	Halbschale
L	Lösung
LF	Längsfuge
LIBS	Laser-Induced-Breakdown-Spectroscopy
NKL	Nebelkammerlagerung
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
OB	Oberbeton
OF	Oberfläche

# 1 Problem- und Zielstellung

## 1.1 Problemstellung

Seit über 15 Jahren beschäftigt sich die Forschung im Straßenbau in Deutschland intensiv mit der Thematik Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Auslöser hierfür waren Schäden, die in Verbindung mit einer AKR an Betonfahrbahndecken von Bundesautobahnen (BAB) aufgetreten sind, deren Herstellung vor 2005 erfolgte. Im Rahmen einer bundesweiten Analyse des BAB-Netzes wurde durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) festgestellt, dass zum Zeitpunkt 2012 ca. 1.500 km Richtungsfahrbahn unter AKR-Verdacht standen [1]. Maßgebendes Kriterium für die Beurteilung war dabei das äußere visuelle Erscheinungsbild der Betonfahrbahnoberfläche. So werden nach [2, 3] in Abhängigkeit vom Grad der Schädigung drei Schadenskategorien (SK) unterschieden (Bild 1). Es sei angemerkt, dass im neuesten überarbeiteten Entwurf von [3] vom Dezember 2018 eine weitere Schadenskategorie SK IV eingeführt wurde. Sie beschreibt die vom Unterbeton der Betonfahrbahndecke ausgehende rautenförmige Rissbildung an den Fugenkreuzen, deren weitergehende Verschöterung bis hin zu Einbrüchen und mögliche Längsrissbildung in den Betonplatten. Der Schädigungsprozess geht dabei nicht mit einer Dunkelfärbung der Oberfläche der Betonfahrbahndecke einher. Aufgrund des im Dezember 2018 bereits weit fortgeschrittenen Bearbeitungszustands dieses Abschlussberichts wurde auf eine nochmalige Überarbeitung des gesamten Haupttextes und der umfangreichen Anlagen zur Berücksichtigung der vierten Schadenskategorie verzichtet.

Bei der SK I wird als Schadensindikator bisher vor allem die Dunkelfärbung im Bereich der Fugenkreuze und Querscheinfugen herangezogen. Dabei ist keine über Schwindrisse hinausgehende Rissbildung erkennbar. Als Ursache für die Dunkelfärbung wurde ein erhöhter Feuchtegehalt in der Betonrandzone vermutet [1].

Das Schadensbild der SK II ist, neben der ausgeprägten Verfärbung im Bereich der Fugen, durch eine verstärkte Rissbildung in Fugenkreuzbereichen gekennzeichnet. Zusätzlich wird oft eine beginnende bis ausgeprägte Netzrissbildung auf der Fahrbahnoberfläche vorgefunden. Gegebenenfalls können auch Längs- und Querrisse an den Quersfugen sowie Längsrisse in den Rüttelgassen auftreten.

ten. All diese Schäden sind jedoch mit noch keinem Substanzverlust verbunden.

Bei der SK III sind die vorstehend aufgeführten Risse noch stärker ausgeprägt. Oft treten zusätzlich noch Kantenschäden und Eckabbrüche auf. Nicht selten reicht der Substanzverlust bis zur Verschöterung im Bereich der Querscheinfugen, die eine starke Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit zur Folge hat. Auffallend ist, dass bei der Schadenserhebung betroffener Autobahnabschnitte oft deutliche Unterschiede in den SK innerhalb eines Streckenloses diagnostiziert wurden. Hinsichtlich des Schädigungsverlaufes können bisher auch keine definierten zeitlichen Voraussagen getroffen werden. Aus der Praxis ist bekannt, dass in Abhängig-

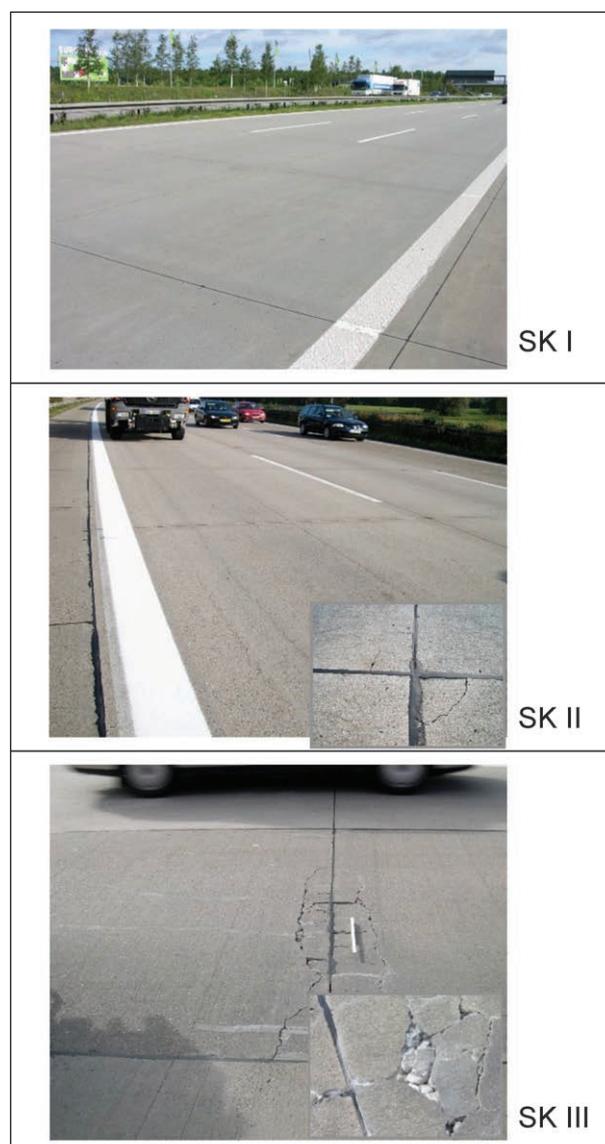


Bild 1: Exemplarische Erscheinungsbilder für die Schadenskategorien [3]

keit vom Grad der Vorschädigung des Betons ein schneller Schädigungsfortschritt auftreten kann. So führten beispielsweise ungünstige Umgebungsbedingungen an mehreren Streckenabschnitten nach den Wintermonaten 2012/2013 und 2016/2017 zu einem sprunghaften Übergang von der SK I zur SK III. Das erschwert natürlich die Abschätzung des AKR-Restschädigungspotenzials für die unter AKR-Verdacht stehenden BAB-Abschnitte. Für die experimentelle Abschätzung des AKR-Restschädigungspotenzials der potenziell AKR-geschädigten Bestandsbetone werden von den durch die BAST zugelassenen AKR-Gutachtern folgende Prüfverfahren verwendet:

- Klimawechsellagerung [4, 5],
- 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr [6, 7, 8],
- Nebelkammerlagerung [9, 10],
- 60°C-Betonversuch ohne externe Alkalizufuhr [9].

Es stellt sich hier die Frage, ob alle Verfahren zu einer gleichen Bewertung des vorhandenen AKR-Restschädigungspotenzials unter Berücksichtigung des bereits in-situ vorhandenen AKR-Schädigungsgrades führen. In diesem Zusammenhang sind die verwendeten Grenzwerte für die Dehnungen bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen sowie deren Aussagesicherheit kritisch zu hinterfragen.

Anhand bereits durchgeführter, einschlägiger AKR-Untersuchungen an Bohrkernen unterschiedlich stark geschädigter Streckenlose (seinerzeit noch

keine Einordnung in Schadenskategorien) ist ersichtlich, dass die während der AKR-provozierenden Lagerung gemessenen Dehnungen einerseits maßgeblich vom Schädigungsgrad der Streckenlose vor Prüfbeginn abhängig sind (Bild 2, links) [11]. Dieser Umstand führt fortwährend zu Grenzwertdiskussionen bei der Bewertung von AKR-geschädigten Bestandsbetonen. Andererseits haben offensichtlich die während der Prüfung extern zugeführten Alkalien einen wesentlichen Einfluss auf die Dehnungsentwicklung und damit auch auf die Bewertung des Restdehnungspotenzials der Bestandsbetone (Bild 2, rechts) [11].

Für die AKR-Bewertung von Laborbetonen mittels des 60°C-Betonversuchs mit externer Alkalizufuhr wurde in den letzten Jahren die Konzentration der NaCl-Lösung von ursprünglich 10,0 M.-% auf 3,0 M.-% abgesenkt. Dies geschah maßgeblich vor dem Hintergrund, dass bei einer externen Alkalizufuhr von 10,0 M.-% praxisbewährte Betonzusammensetzungen unverhältnismäßig beansprucht bzw. bewertet werden [12]. Die Auswirkungen dieses geänderten Prüfregimes und damit des Bewertungshintergrundes auf die Abschätzung des Restdehnungspotenzials der Bestandsbetone wurde bislang nicht näher untersucht. Ferner stellt sich generell die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse.

## 1.2 Zielstellung

Basierend auf dem vorstehend geschilderten Erkenntnisstand verfolgt dieses Forschungsvorhaben zwei Ziele. So soll einerseits geprüft werden, ob

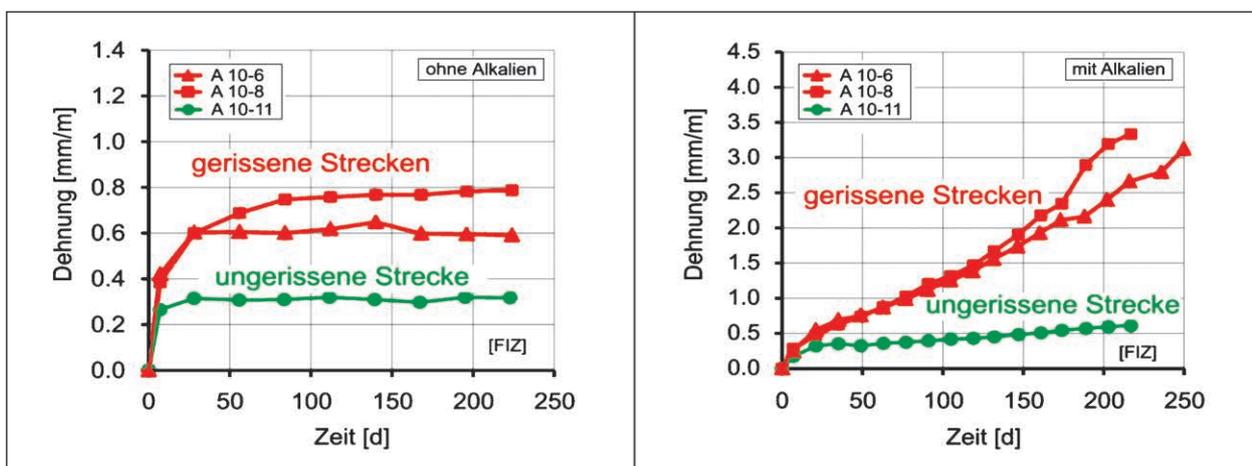


Bild 2: AKR-bedingte Dehnungen von Bohrkernproben unterschiedlich stark geschädigter Streckenlose infolge AKR-provozierender Lagerung (60°C-Betonversuch) [11]

eine erhöhte Durchfeuchtung der Betonrandzone ursächlich für die während der AKR-Schadensevolution auftretende Dunkelfärbung der Fahrbahnoberfläche im Fugenbereich ist (Arbeitspaket AP1). Andererseits sollen erste Grundlagen für eine normative Regelung zur Beurteilung des AKR-Restschädigungspotenzials für bestehende Betonfahrbahndecken gelegt werden (Arbeitspaket AP2). Dabei gilt es, möglichst die Einflüsse aus dem vorgefundenen Schadensbild und somit der AKR-Schadenskategorie, die Bauweise (ein- oder zweischichtig), die bisherige Nutzungsdauer unter Berücksichtigung der Verkehrsbelastung sowie die Betonzusammensetzung der Konstruktionsschichten zu berücksichtigen. In die Betrachtungen werden alle in Deutschland derzeit üblichen AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung des AKR-Restschädigungspotenzials bei bestehenden Betonfahrbahndecken einbezogen. Es soll so eine vergleichende Bewertung bestehender prüfverfahrensspezifischer Dehnungsgrenzwerte ermöglicht werden. Im Detail soll im AP2 möglichst ein Beitrag zur Beantwortung folgender Fragen geleistet werden:

- Wird bei den einzelnen Schadenskategorien das AKR-Restschädigungspotenzial des Bestandsbetons mit den unterschiedlichen AKR-Prüfverfahren gleichartig bewertet?
- Welche Auswirkungen hat die ganzheitliche und separate Betrachtung des Ober- und Unterbetons bei ein- und zweischichtiger Betonbauweise auf diese Bewertung?
- Welchen Einfluss hat die Prüfkörperform auf das Ergebnis der AKR-provozierenden Lagerungen?
- Welche Rolle spielt das Tausalz im Bestandsbeton bei den AKR-provozierenden Lagerungen?
- Wie tief und in welcher Menge wird Tausalz in den Bestandsbeton während seiner Nutzungsphase eingetragen?
- Wird das in der Nutzungsphase eingetragene Tausalz bei den konventionellen Betonversuchen ohne externe Alkalizufuhr ausgelaugt? Falls ja, in welchem Maße geschieht dies?
- Wie tief und in welcher Menge wird bei den Performanceprüfungen Tausalz in den Bestandsbeton eingetragen?
- In welchem Maße wird der AKR-Schädigungsprozess im Entnahmestadium und bei den un-

terschiedlichen AKR-provozierenden Lagerungen von der sekundären Ettringitbildung überlagert?

- Hat der gegenüber der Plattenmitte verstärkt im Fugenbereich ablaufende AKR-Schädigungsprozess eine verminderte Spaltzugfestigkeit zur Folge? Falls ja, stellt sich die Frage nach der Korrelation mit der Porenstruktur.

## 2 Ursachenanalyse für die Dunkelfärbung der Fahrbahnoberfläche im Fugenbereich (AP1)

### 2.1 Untersuchungskonzept

Zur Verifizierung der Rolle der Feuchte bei der Dunkelfärbung der Fahrbahnoberfläche im Fugenbereich wurde die Feuchteverteilung in einer repräsentativen Fahrbahnplatte eines BAB-Abschnitts in zwei Schritten mit zerstörungsfreier Prüftechnik vor Ort untersucht. So wurde im ersten Schritt die laterale Verteilung des integralen Feuchtegehalts über die Dicke der Fahrbahnplatte mittels Radar großflächig analysiert. Darauf aufbauend wurde im zweiten Schritt die Feuchteverteilung in der Betonrandzone entlang ausgewählter Messlinien mittels NMR-Technik tiefenaufgelöst bestimmt. Die mittels ZfP-Technik gewonnenen Befunde wurden anschließend an schrittweise über die Tiefe entnommenen Bohrmehlproben mittels Darr-Wäge-Verfahren validiert. Einen zusammenfassenden Überblick über die Vorgehensweise gibt abschließend Bild 3.

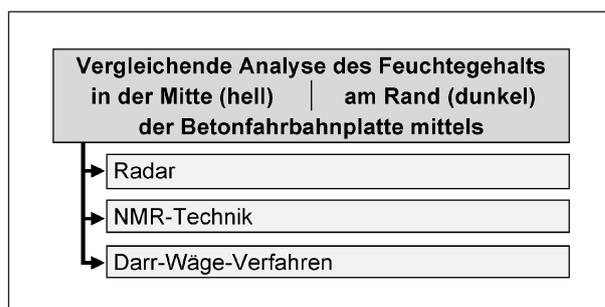


Bild 3: Vorgehensweise bei der Ursachenanalyse für die Dunkelfärbung im Bereich der Querscheinfuge bei repräsentativer Fahrbahnplatte (AP1)

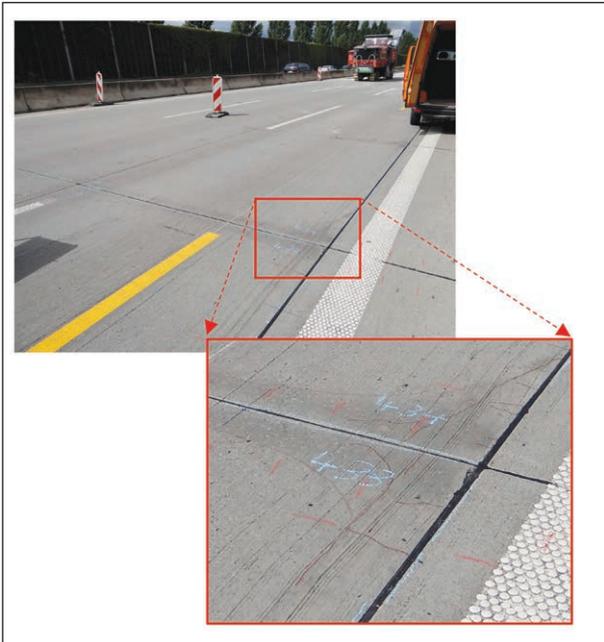


Bild 4: Äußeres Erscheinungsbild des untersuchten BAB-Abschnitts

## 2.2 Untersucher BAB-Abschnitt

Die Untersuchungen erfolgten exemplarisch an zwei Fahrbahnplatten des BAB-Abschnitts der A 113. Einen optischen Eindruck vom äußeren Erscheinungsbild des untersuchten BAB-Abschnitts vermittelt Bild 4. Deutlich erkennbar ist die Dunkelfärbung im Bereich der Querscheinfuge und des Fugenkreuzes. Aber auch die Längsfuge ist, wenn auch in abgeschwächter Form, hiervon betroffen. Zusätzlich treten vermehrt Risse im Bereich des Fugenkreuzes der Betonfahrbahndecke auf. Aus diesem Grund ist dieser BAB-Abschnitt hinsichtlich seiner Schadensevolution in die Schadenskategorie II-III einzustufen. Der BAB-Abschnitt wurde 2004 in einschichtiger zweilagiger Bauweise ausgeführt. Die Betonfahrbahndecke hat eine Dicke von ca. 27 cm und ist durch einen Vliesstoff von der darunter befindlichen ca. 20 cm dicken Planumsverfestigung getrennt. Die Untersuchungen erfolgten nach zwölfjähriger Nutzungsdauer des BAB-Abschnitts.

## 2.3 Beschreibung eingesetzter ZfP-Techniken

Bei der zunächst erfolgten großflächigen Durchmusterung der Betonfahrbahndecke mit Radar [2, 3] wird ein aus Sende- und Empfangsantenne bestehendes Antennenpaar linienförmig entlang eines Messrasters auf der Fahrbahnoberfläche verfahren

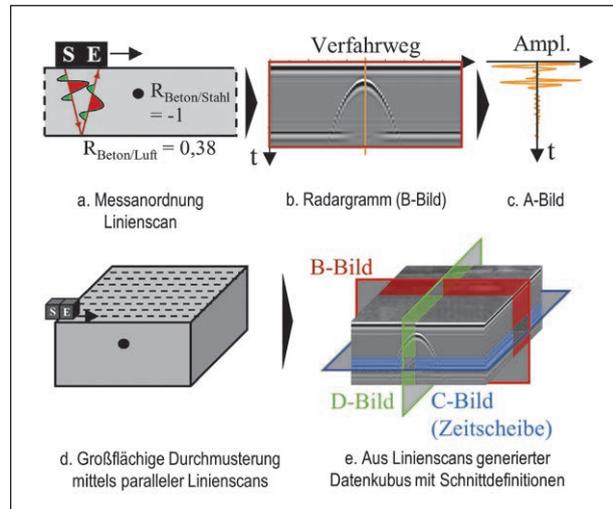


Bild 5: Schematische Darstellung des Messprinzips und der Visualisierung der Ergebnisse bei Radar

(Bild 5a). Die Sendeantenne sendet dabei kurze elektromagnetische Impulswellen aus, die an Metallen aber auch an Materialgrenzschichten mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften reflektiert werden. Dies ist beispielsweise im vorliegenden Anwendungsfall beim Übergang zwischen dem Beton und den metallischen Dübeln bzw. Ankern im Bereich der Querschein- bzw. Längsfuge gegeben. Analoges gilt für den Übergang zwischen dem Beton und dem Vliesstoff auf der Unterseite der Betonfahrbahndecke. Ein Maß für die Reflexion der elektromagnetischen Impulsquelle bei einem Übergang zwischen den Materialien bzw. dem Material und dem Medium stellt der Reflexionskoeffizient  $r$ , der mit der Gleichung 1 aus den relativen Permittivitäten  $\epsilon_{r1}$  und  $\epsilon_{r2}$  der beiden aneinandergrenzenden Materialien bzw. Medien 1 und 2 ermittelt wird, dar:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (\text{Gl. 1})$$

Die relative Permittivität  $\epsilon_r$  kennzeichnet die dielektrischen Materialeigenschaften von nichtleitenden Materialien und ist die maßgebende Größe für die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  der elektromagnetischen Impulsquelle in einem nichtleitendem Material. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  wird nach Gleichung 2 aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und der relativen Permittivität  $\epsilon_r$  berechnet:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Der zeitliche Verlauf der Amplitude der reflektierten Signale wird von der Empfangsantenne registriert und simultan am Radargerät visualisiert (Bilder 5b

und 5c). In der Regel werden die Messdaten als Radargramm (B-Bild) dargestellt. So wird in einem solchen Radargramm die Amplitude der reflektierten Signale über den Verfahrensweg des Antennenpaares und die Bauteiltiefe grauwert- bzw. farbcodiert aufgetragen. Im Gegensatz zu den ebenen wird ein punktförmiger oder zylindrischer Reflektor (hier: Stahldübel und -anker) aufgrund des Öffnungswinkels der Antenne als hyperbolisch verlaufende Diffraktion im Radargramm abgebildet. Aus den Radargrammen, die entlang aller parallel verlaufenden Messlinien aufgenommen werden, kann ein Datenkubus generiert werden (Bilder 5d und 5e). Wird dieser bei einer bestimmten Laufzeit (Bauteiltiefe) horizontal geschnitten, erhält man eine Zeitscheibe (Tiefenschnitt), die auch als C-Bild bezeichnet wird. Weiterhin ist es möglich, D-Bilder durch senkrechte Schnitte zu den B-Bildern aus dem Datenkubus zu generieren. Auf diese Art und Weise können zusätzliche Informationen zur inneren Struktur und lateralen Feuchteverteilung im Untersuchungsobjekt gewonnen werden.

Für die hier besonders interessierende Verifizierung des Feuchtezustandes in der Betonfahrbahndecke nutzt man den Umstand, dass sich die relative Permittivität  $\epsilon_r$  des trockenen Betons bei Feuchtezutritt signifikant erhöht. Ursächlich hierfür ist der signifikante Unterschied der relativen Permittivität des trockenen Betons (4-6) und des reinen Wassers (81). So stellt sich im Beton in Abhängigkeit von der Belegung des Porenraums mit Wasser ein Mischwert für die resultierende Permittivität zwischen 8-14 ein [14]. Der Gleichung 2 ist zu entnehmen, dass dies zu einer verminderten Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulswelle im Untersuchungsobjekt führt. Im Radargramm äußert sich dies in einer Laufzeiterhöhung der von der Rückwand (RW) der Betonfahrbahndecke reflektierten Signale bei gleichbleibender Fahrbahndicke. Dieser Sachverhalt ist schematisch in Bild 6 dargestellt.

Die großflächige Durchmusterung der Betonfahrbahndecke erfolgte im vorliegenden Fall mit einem universellen Radargerät, das es ermöglicht, eine der Aufgabenstellung angepasste Antenne anzuschließen. Als Antenne fand eine 2,6 GHz bodengekoppelte Antenne Anwendung. Handmessungen hatten gezeigt, dass trotz der hohen Antennenfrequenz die Eindringtiefe der elektromagnetischen Impulswelle ausreicht, um die Rückwandreflexion aufzunehmen. Es wurden zwei Betonfahrbahnplatten und deren angrenzende Bereiche flächendeckend untersucht.

Zur Erreichung einer möglichst hohen Ortsauflösung wurde ein Messlinienabstand von 1 cm und ein Messpunkt Abstand innerhalb einer Messlinie von 0,5 cm gewählt. Die Messlinien waren parallel zur Querscheinfuge ausgerichtet. Realisiert wurde dies mittels eines selbstentwickelten Bauwerksscanners, der eine schnelle, automatisierte und definierte Bewegung der Antenne auf der Betonfahrbahnplatte ermöglicht (Bild 7) [15]. Die maximal mögliche Größe der Messfläche für den platzierten Scanner beträgt ca. 2,20 m x 1,50 m. Das Scannen der ca. 5 m langen und 3,4 m breiten Fahrbahnplatte sowie der Randbereiche der angrenzenden Platten erfolgte mit acht verschiedenen Platzierungen des Scanners. Die so gewonnenen Datensätze wurden anschließend zur ganzheitlichen Bewertung in einem Datenkubus zusammengeführt und für eine bessere Visualisierung tiefenabhängig verstärkt und gefiltert (Bandpass). Aus dem so erzeugten Datenkubus wurden dann ausgewählte C- und D-Bilder generiert.

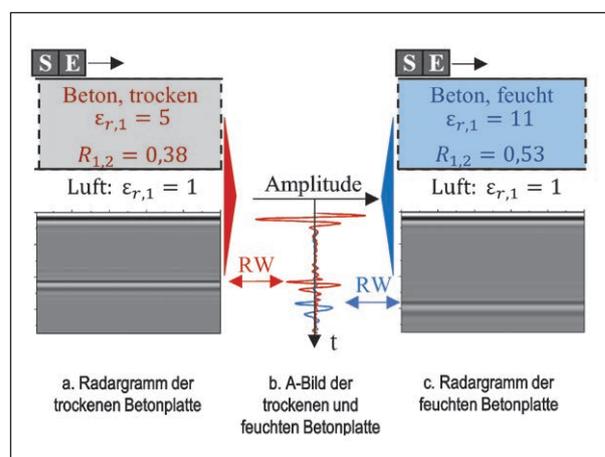


Bild 6: Schematische Darstellung der Laufzeitverlängerung der Rückwandreflexion an der Betonfahrbahndecke für die Feuchteanalyse mit dem Radarverfahren



Bild 7: Vor Ort eingesetzter Bauwerksscanner für eine schnelle und automatisierte Durchführung der Radarmessung mit einem engen Messraster

Die zusätzlich für Detailuntersuchungen eingesetzte NMR-Relaxometrie (Nuclear Magnetic Resonance) zur Ermittlung des Feuchtezustandes in der Betonrandzone basiert auf der Wechselwirkung der im Beton vorhandenen Wasserstoffkerne mit einem von außen angelegten magnetischen Feld und zusätzlich eingebrachter elektromagnetischer Impulse.

Grundlage des Messprinzips ist der Eigendrehimpuls der Wasserstoffkerne. Dieser ist proportional zum magnetischen Kernmoment. Im Ausgangszustand sind die magnetischen Kernmomente, die als magnetische Momentvektoren dargestellt werden können, zufällig im Raum ausgerichtet und besitzen alle die gleiche Energie. Durch das Anlegen eines äußeren magnetischen Feldes ( $B_0$ ) richten sich diese magnetischen Momentvektoren an den Feldlinien des  $B_0$ -Feldes (parallel zur z-Achse) aus und beginnen um diese, mit der sogenannten Larmorfrequenz ( $f_0$ ) zu präzedieren (Bild 8a). Dies erfolgt in zwei, energetisch unterschiedlichen Zuständen, dem parallelen Zustand (Nord-Süd Ausrichtung, energetisch niedriger) und dem antiparallelen Zustand (Süd-Nord Ausrichtung, energetisch höher). Dabei überwiegt die Anzahl der magnetischen Momentvektoren in Richtung der Primärmagnetfeldlinien (paralleler Zustand), wodurch eine Nettomagnetisierung ( $M_0$ ) parallel zum Primärmagnetfeld resultiert (Bild 8a).

Mittels eines elektromagnetischen Pulses ( $B_1$ ), der über eine externe Spule mit der Larmorfrequenz ( $f_0$ ) eingestrahlt wird, werden die Wasserstoffkerne angeregt. Dabei werden die Einzelpräzessionen in Phasenkohärenz gebracht und ein Gleichgewicht zwischen parallelem und antiparallelem Zustand

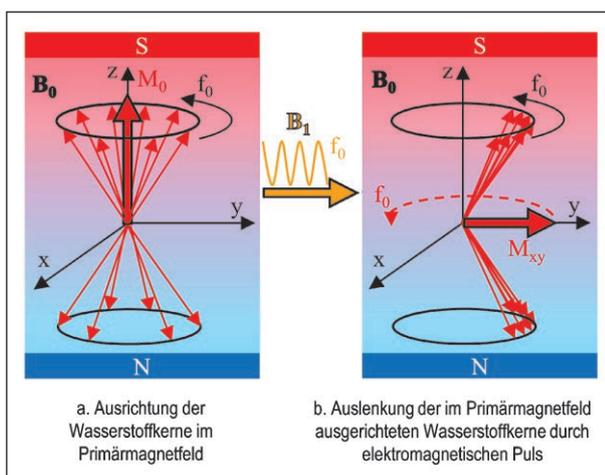


Bild 8: Schematische Darstellung des NMR-Messprinzips

hergestellt. Die Summe der in Phasenkohärenz präzedierenden magnetischen Momenten führt zu einer Gesamtmagnetisierung ( $M_{xy}$ ), die mit  $f_0$  um die z-Achse rotiert (Bild 8b). Dieses oszillierende Magnetfeld erzeugt in der zuvor für den elektromagnetischen Puls benutzten Spule eine Wechselspannung. Ihre Amplitude ist proportional zur Anzahl der Wasserstoffkerne im Messvolumen und damit proportional zur vorhandenen Betonfeuchte. Unmittelbar nach Beendigung des elektromagnetischen Pulses, beginnt das System zu relaxieren, wobei sich das thermodynamische Gleichgewicht des Ausgangszustandes einstellt. Da im vorliegenden Fall nur eine Auswertung der Amplituden der induzierten Spannungen vorgenommen wurde, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Beschreibung der Relaxationsprozesse und deren Hintergründe verzichtet. Eine detaillierte Beschreibung des Messprinzips der NMR-Relaxometrie ist unter anderem [16] zu entnehmen.

Im vorliegenden Fall kam zur Ermittlung des Feuchtezustandes der Betonrandzone ein NMR-Mobile Universal Surface Explorer (MOUSE) PM 25 der Firma Magritek zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein Messsystem in Aufsatztechnik. Bild 9a zeigt eine schematische Darstellung des Messaufbaus. Das sensitive Volumen befindet sich dabei im Streufeld des Primärmagneten und erfasst eine Schichtdicke von 120  $\mu\text{m}$ . Durch das Verfahren der gesamten Messapparatur senkrecht zum Prüfobjekt kann die Lage des sensitiven Volumens von der Prüfkörperoberfläche bis in eine Tiefe von 24,8 mm variiert werden. Bild 9b zeigt die praktische Umsetzung der NMR-Relaxometriemessungen auf der Fahrbahn-decke.

Im Rahmen der Messkampagne wurden zwei unterschiedliche NMR-Messungen durchgeführt. Zunächst wurden orientierend NMR-Messungen ent-

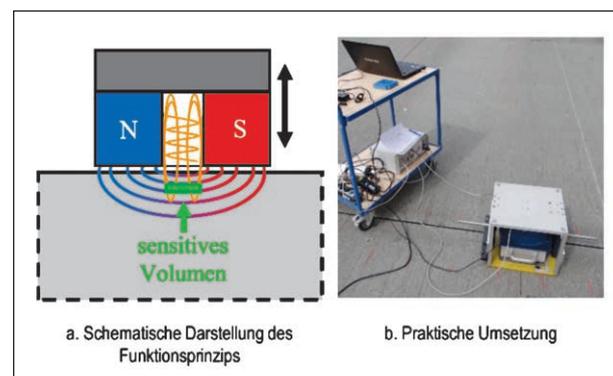


Bild 9: NMR-MOUSE

lang zuvor gewählter Linien (vom Fugenkreuz in Richtung Plattenmitte und senkrecht zur Querscheinfuge in Richtung Plattenmitte) in jeweils drei Tiefen (5; 15; 24,8 mm) durchgeführt. Aufbauend darauf wurden hochaufgelöste Tiefenprofile in der Plattenmitte, am Plattenrand und am Fugenkreuz ermittelt. Dabei wurden die Signalamplituden in den Tiefen (0; 1; 2; 3; 5; 7; 9; 11; 13; 15; 17; 19; 21; 23; 24,8 mm) bestimmt. Die mittlere Echozeit, d. h. die Zeit zwischen Signalende des B1-Impulses und der Ermittlung der Signalamplitude, betrug während der Messungen 288  $\mu$ s. Damit kann davon ausgegangen werden, dass der Hauptteil der Signalamplitude aus dem Zwischenschichtwasser und dem Wasser in Kapillarporen und Mikrorissen resultiert [17]. Das chemisch in den CSH-Phasen gebundene Wasser kann aufgrund der extrem schnellen Relaxation mit dem genutzten Messsystem nicht erfasst werden und hat damit keinen Anteil an der ermittelten Signalamplitude.

## 2.4 Ergebnisse und deren Auswertung

### 2.4.1 Radar

Einen zusammenfassenden Überblick über die Radarergebnisse vermittelt Bild 10. Ausgangspunkt ist hierbei die Draufsicht des untersuchten BAB-Abschnitts mit dem rot gekennzeichneten Radarmessfeld. Ausgehend davon zeigt Bild 10a exemplarisch drei D-Bilder, die durch das Schneiden des Datenkubus senkrecht zur Verfahrerrichtung des Antennenpaares gewonnen wurden. In diesen drei D-Bildern ist erkennbar, dass sich im Bereich der Querscheinfuge die Laufzeit der Radarimpulse zwischen der Oberfläche und der Rückwand der Betonfahrbahndecke um ca. 0,4 ns erhöht. Bemerkenswert ist hierbei, dass sich mit zunehmendem Abstand zum Fugenkreuz die laterale Ausdehnung des links und rechts an die Querscheinfuge angrenzenden Bereichs der Betonfahrbahnplatte, der eine erhöhte Laufzeit aufweist, vermindert. So reduziert sich diese von ca. 0,5 m (Schnitt D1-D1) über ca. 0,25 m (Schnitt D2-D2) auf ca. 0,15 m (Schnitt D3-D3) je Seite. Dieser Trend ist auch bei der lateralen Ausdehnung der Dunkelfärbung der Betonoberfläche erkennbar.

Die Laufzeiterhöhung zwischen der Oberfläche und der Rückwand der Betonfahrbahndecke lässt unter der Berücksichtigung der an Bohrkernen ermittelten maximalen Dickenschwankung der Betonfahrbahndecke von  $\pm 5$  mm den Schluss zu, dass der inte-

grale Feuchtegehalt in der Betonfahrbahndecke im Fugenbereich höhere Werte annimmt. Auch das in einer Tiefe von 27,5 cm gewonnene C-Bild bestätigt diese Schlussfolgerung. So ist in dem C-Bild erkennbar, dass die Reflexion der Impulswelle an der Rückwand der Fahrbahnplatte im Fugenbereich noch nicht vorhanden ist. Anzumerken ist, dass die im mittleren unteren Bereich des C-Bildes erkennbaren gleichartigen Intensitäten der reflektierten Signale (rot eingerahmte Bereiche) wie im Fugenbereich Artefakte darstellen. Sie werden durch den Scanner, das heißt durch den unterschiedlichen Abstand zwischen der Radarantenne und der Fahrbahnoberfläche, hervorgerufen.

Ergänzend zeigt Bild 11 die aus dem Datenkubus generierten Laufzeiten der reflektierten Radarsignale entlang einer vom Fugenkreuz in die Plattenmitte verlaufenden virtuellen Messlinie. Dazu wurde lokal die genaue Laufzeit des Rückwandsignals im entsprechenden Vertikalschnitt des Datenkubus gepickt.

Es ist hier gleichfalls erkennbar, dass im dunkel gefärbten Bereich der Fahrbahnoberfläche (grau hinterlegt) erhöhte Laufzeiten der elektromagnetischen Pulse zwischen der Oberfläche und der Rückwand der Betonfahrbahndecke auftreten. So ist dies wiederum ein Indiz für den kausalen Zusammenhang zwischen dem integral über die Fahrbahndecke erhöhten Feuchtegehalt und der Dunkelfärbung der Betonoberfläche.

Aufschluss über den Feuchtegehalt in der Randzone der Betonfahrbahndecke geben die nun folgenden NMR-Messungen. Zusätzlich konventionell durchgeführte Messungen mittels Darr-Wäge-Verfahren erlauben eine Bewertung der mit innovativer Prüftechnik gewonnenen Ergebnisse.

### 2.4.2 NMR-Relaxometrie und Darr-Wäge-Verfahren

Die Ergebnisse der punktuell mit der NMR-Mouse entlang je einer Messlinien in drei ausgewählten Tiefen in der Betonrandzone gemessenen Feuchtegehalte sind Bild 12 zu entnehmen. So wird hier einerseits der Feuchtezustand in der Betonrandzone entlang einer vom Fugenkreuz ausgehenden Messlinie analog zu den Radaruntersuchungen (Bild 11) analysiert (Bild 12a). Andererseits erfolgt eine adäquate Betrachtung ausgehend von der Querscheinfuge in der Mitte des ersten Fahrstreifens (Bild 12b). Beiden Diagrammen ist gemeinsam,

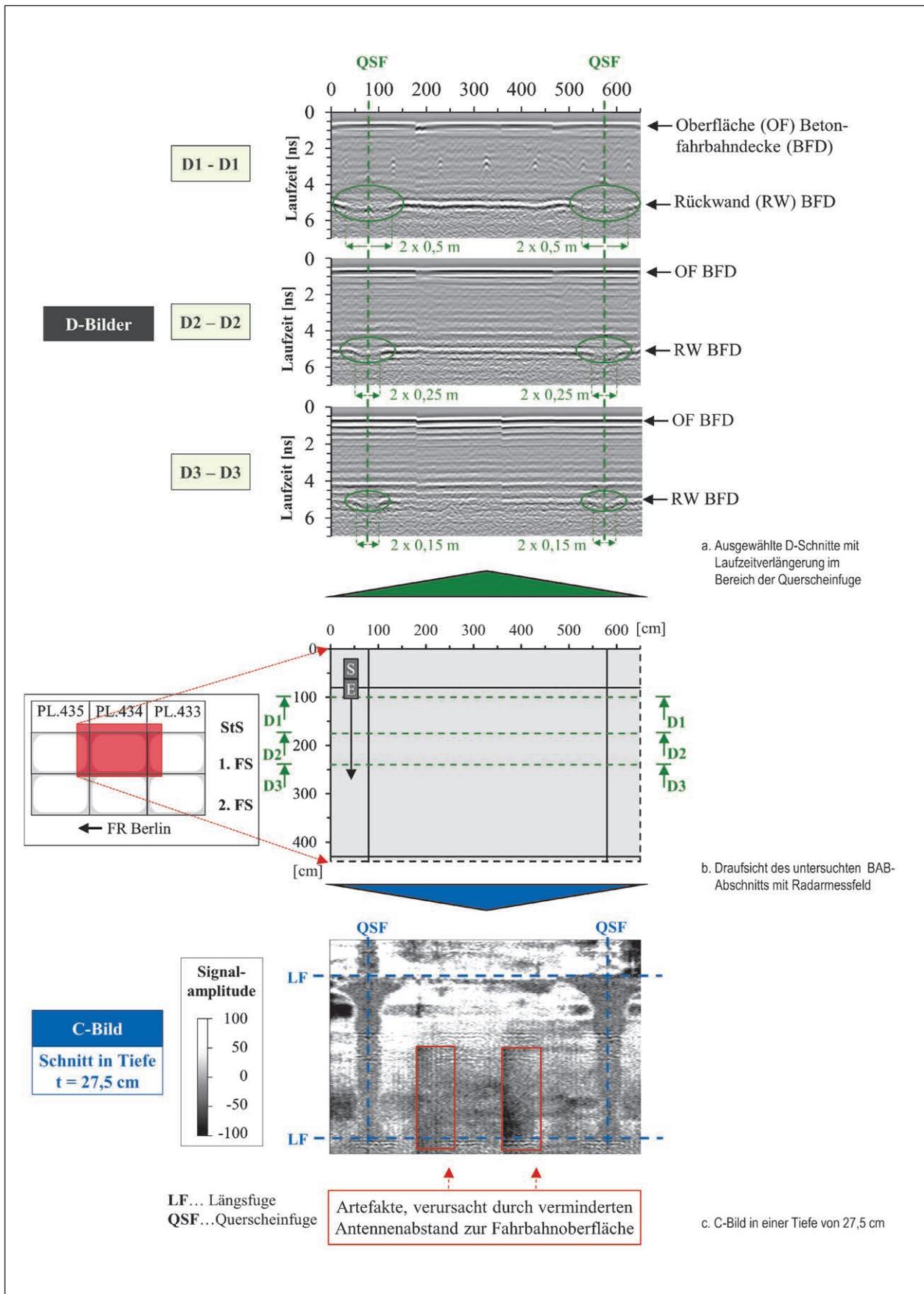


Bild 10: Ergebnis integraler Feuchtemessung mit Radar in der Betonfahrbahndecke – ausgewählte D-Bilder sowie ein C-Bild im Bereich der Rückwand

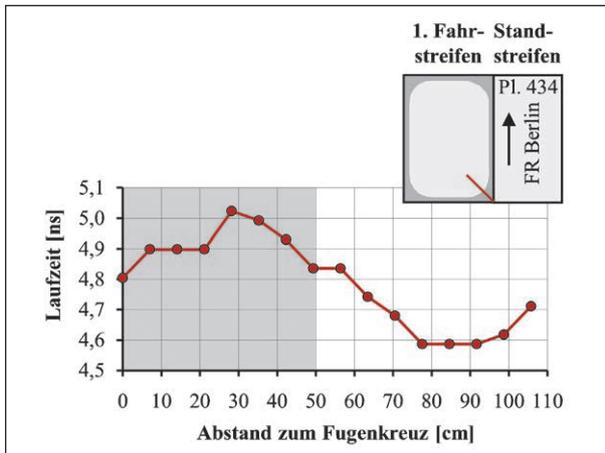
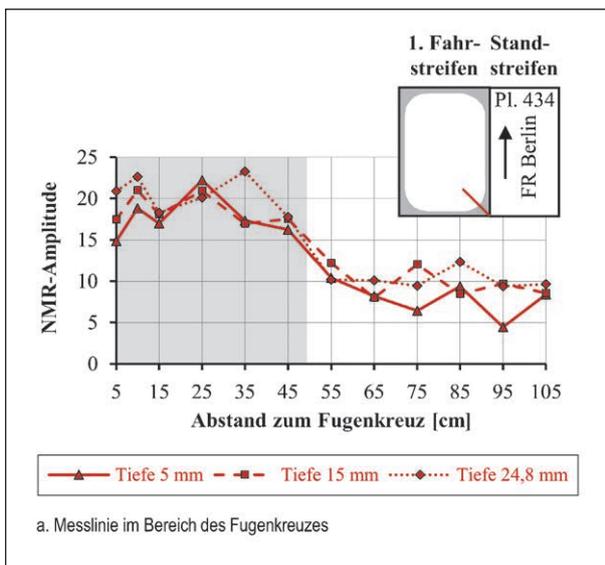
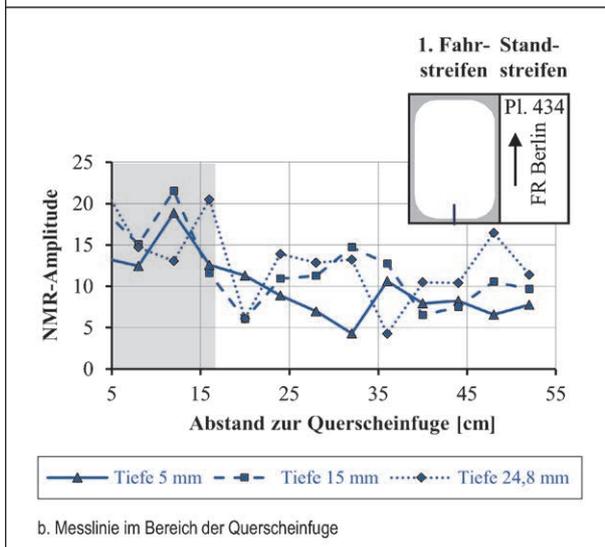


Bild 11: Ergebnis der Radar-Laufzeitmessung entlang einer Messlinie im Bereich des Fugenkreuzes (grau hinterlegte Diagrammfläche entspricht dunkelgefärbten Bereich der Fahrbahnoberfläche)



a. Messlinie im Bereich des Fugenkreuzes



b. Messlinie im Bereich der Querscheinfuge

Bild 12: Ergebnis der NMR-Feuchtemessung in ausgewählten Tiefen der Betonrandzone entlang zweier Messlinien

dass aus Anschaulichkeitsgründen die laterale Ausdehnung der dunkel gefärbten Fahrbahnoberfläche jeweils grau hinterlegt wurde. Vor diesem Hintergrund ist in beiden Diagrammen erkennbar, dass die erhöhten NMR-Amplituden und somit gleichfalls erhöhten Feuchtegehalte in der Betonrandzone mit einer Dunkelfärbung der Fahrbahnoberfläche einhergehen. Außerdem lassen die tendenziell im Fugenkreuzbereich ermittelten höheren NMR-Amplituden als im Bereich der Querscheinfuge auf eine höhere Durchfeuchtung der Betonrandzone schließen.

Die zusätzlich punktuell mit der NMR-Mouse vergleichend in der Plattenmitte, im Bereich der Querscheinfuge und beim Fugenkreuz mit hoher Tiefenauflösung ermittelten Feuchteprofile sind Bild 13 zu entnehmen. Zur Validierung des NMR-Befundes sind zusätzlich die mit dem Darr-Wäge-Verfahren an Bohrmehlproben ermittelten Feuchteprofile dargestellt. Ausgehend von den im Lageplan ausgewiesenen Messstellen ist auch hier eindeutig erkennbar, dass in den dunkel gefärbten Randbereichen der Fahrbahnplatte deutlich höhere NMR-Amplituden und damit signifikant erhöhte Feuchtegehalte in der Betonrandzone ermittelt wurden. Bemerkenswert ist in diesem Kontext aber auch, dass die dunkel gefärbten Bereiche beim Fugenkreuz (FK) signifikant höhere NMR-Amplituden als bei der Querscheinfuge (QSF) aufweisen.

Bei der Validierung des NMR-Befundes mittels Darr-Wäge-Verfahren wird die erhöhte Durchfeuchtung der Betonrandzone in der Nähe des Fugenkreuzes im Vergleich zum Querscheinfugenbereich bestätigt. Eine Differenzierung des Feuchtezustandes in der Betonrandzone (bis 40 mm Tiefe) zwischen dem Rand (Querscheinfuge) und der Mitte der Platte war beim Darr-Wäge-Verfahren nicht möglich. Es wird vermutet, dass der geringe Feuchteunterschied in der Betonrandzone mittels Bohrmehlentnahme und Trocknung nicht abbildbar ist. Dies legt den Schluss nahe, dass die NMR-Technik aufgrund ihrer höheren Sensitivität gegenüber Feuchte, ihrer signifikant höheren Tiefenauflösung und ihres zerstörungsfreien Charakters deutliche Vorteile gegenüber dem Darr-Wäge-Verfahren besitzt. Nachteilig ist jedoch bei der Feuchtemessung mit der NMR-MOUSE, dass diese auf eine Mess-tiefe von ca. 25 mm beschränkt ist.

Die mit dem Darr-Wäge-Verfahren ermittelten Feuchteprofile zeigen auch, dass die mit der NMR-Technik ermittelten differenzierten Feuchte-

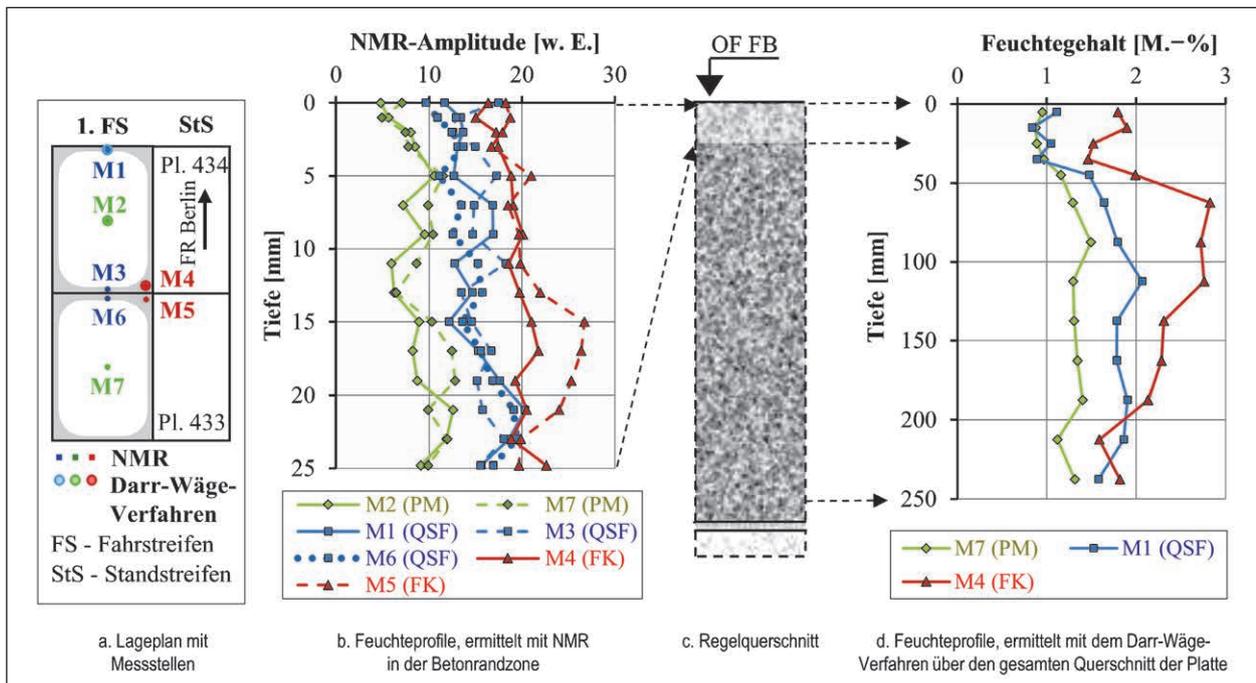


Bild 13: Ergebnis punktueller tiefenaufgelöster Feuchtemessung mit NMR und Darr-Wäge-Verfahren in der Mitte und am Rand (bei Querscheinfuge und Fugenkreuz) der Betonfahrbahnplatte

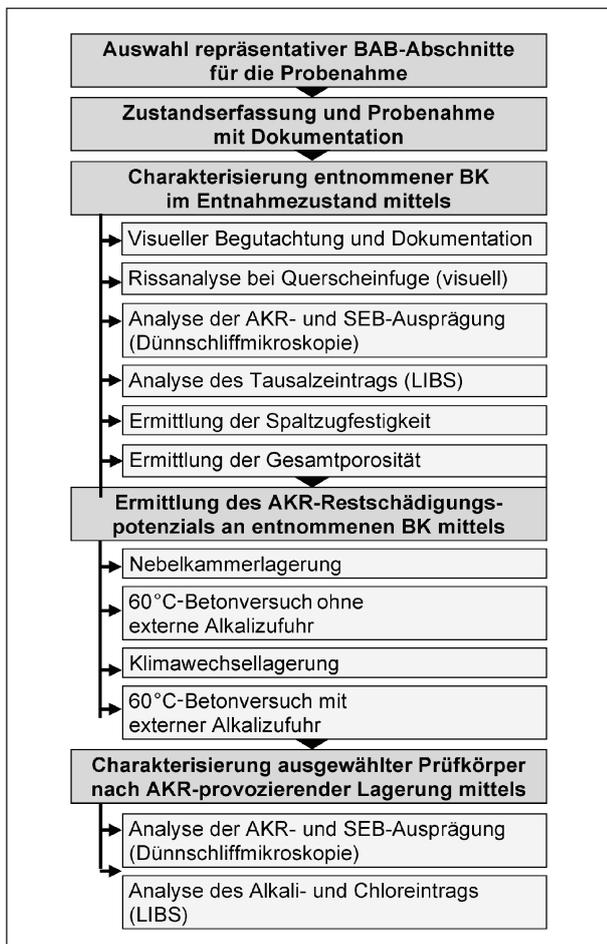


Bild 14: Vorgehensweise bei der Bewertung der AKR-Prüfverfahren (AP2)

zustände in der Betonrandzone gleichfalls im Kernbereich der Betonfahrbahnplatte vorgefunden werden. So treten hier ebenfalls in der Nähe des Fugenkreuzes die höchsten und in der Plattenmitte die geringsten Durchfeuchtungen auf. Zwischen beiden Feuchtezuständen liegt der Feuchtegehalt des Plattenrandes im Bereich der Querscheinfuge. Der mittlere Feuchtegehalt über die gesamte Höhe der Betonfahrbahnplatte beträgt in der Plattenmitte 1,2 M.-%, am Plattenrand im Bereich der Querscheinfuge 1,6 M.-% und in der Nähe des Fugenkreuzes 2,2 M.-%. Das bestätigt auch den in Kapitel 2.4.1 dargestellten und diskutierten Befund der Radarmessungen.

### 3 Schadenskategorie-spezifische Bewertung der AKR-Prüfverfahren (AP2)

#### 3.1 Untersuchungskonzept

Zur Erreichung der in Kapitel 1.2 umfassend dargestellten Zielstellung des Arbeitspakets AP2 wurde das in Bild 14 dargestellte Prüfprogramm erarbeitet und realisiert.

Im ersten Schritt wurden gemeinsam mit der BAST sechs unterschiedlich AKR-geschädigte BAB-Ab-

schnitte für die Bohrkernentnahme festgelegt. Ein wesentliches Kriterium bei der Streckenauswahl war hierbei, dass möglichst alle Schadenskategorien berücksichtigt werden. Bevorzugt sollten lokal aneinandergrenzende BAB-Abschnitte einer Autobahn mit einer unterschiedlichen AKR-Schadensausprägung ausgewählt werden. Weiterhin sollten verschiedenartige Bauweisen (ein- und zweischichtig) bei der Streckenauswahl Berücksichtigung finden. Basierend darauf wurden im nächsten Schritt die einzelnen BAB-Abschnitte beprobt. Dies schloss vor der Bohrkern- bzw. Plattenentnahme eine Zustandserfassung der beprobten Betonfahrbahnplatten ein. Die Bohrkernentnahme selbst erfolgte nach einem einheitlichen Entnahmeplan unter der Berücksichtigung der vorgesehenen Laborprüfungen, der Bauweise und den von der jeweiligen Straßenverwaltung für die Beprobung freigegebenen Fahrbahnstreifen (Fahr- und Standstreifen). Bild 15 zeigt exemplarisch den Entnahmeplan für den zweischichtig ausgeführten BAB-Abschnitt A14-R1. Bei der alternativ erfolgten segmentweisen Entnahme der Fahrbahnplatten wurden aus diesen im Labor die erforderlichen Bohrkern- bzw. Prismen gewonnen.

Die vor Ort durchgeführte Zustandserfassung und Bohrkern- bzw. Plattenentnahme wurde detailliert in speziell hierfür entworfenen Formblättern dokumentiert.

Alle vor Ort und im Labor aus Plattensegmenten entnommenen Prüfkörper wurden im Labor detailliert visuell begutachtet und dokumentiert. Das schloss auch die Rissanalyse im Bereich der Dübel bei den Prüfkörpern aus dem Plattenrandbereich ein. Die im Bereich des Fugenkreuzes entnommenen Diagnosebohrkerne ( $\varnothing$  10 cm) dienten der Ermittlung der Ausprägung der AKR und der sekundären Ettringitbildung (SEB) der Fahrbahnplatte im

Entnahmezustand. Realisiert wurde dies mittels Dünnschliffmikroskopie. Zusätzlich wurden diese auch partiell für die Ermittlung des Tausalzeintrags mittels Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) genutzt. Zur besseren Verifizierung des Einflusses der verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen auf die Auslaugung an Natrium und Chlor (AKR-Prüfungen in Anlehnung an die Alkali-Richtlinie) bzw. auf den externen Tausalzeintrag (AKR-Performanceprüfungen) erfolgten die LIBS-Analysen bevorzugt an Bohrkernen aus der Plattenmitte. Auf die ursprünglich vorgesehene vergleichende Betrachtung des Tausalzeintrags am Rand und in der Mitte der Fahrbahnplatte wurde verzichtet. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass in einem vorangegangenen bzw. parallel durchgeführten BAST-Projekt [18, 19] festgestellt wurde, dass gegenüber der Plattenmitte kein signifikant höherer Tausalzeintrag im Plattenrand auftritt.

Zur Verifizierung der mechanischen Auswirkungen der verstärkten Ausprägung der AKR im Bereich der Querscheinfuge gegenüber der Plattenmitte wurde an je drei weiteren Bohrkernen ( $\varnothing$  10 cm) aus beiden Bereichen tiefenaufgelöst die Spaltzugfestigkeit ( $\varnothing$  10 cm) ermittelt. Zwei weitere Bohrkern- gleiches Durchmessers dienten der korrelativen Analyse zwischen tiefenaufgelöster Porosität und Spaltzugfestigkeit. Zur Vermeidung verfälschender Randeffekte wurden für die verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen die Bohrkern- (aus Fahrbahnplatten vor Ort) bzw. Prismen (aus Plattensegmenten) aus der Plattenmitte entnommen. Aufgrund der hohen Anzahl der hierfür erforderlichen Prüfkörper konnten diese jedoch nicht bei allen hier untersuchten BAB-Abschnitten aus dem 1. Fahrstreifen entnommen werden. Deshalb erfolgte alternativ die Bohrkernentnahme aus dem Standstreifen. Der Durchmesser der Bohrkern- betrug

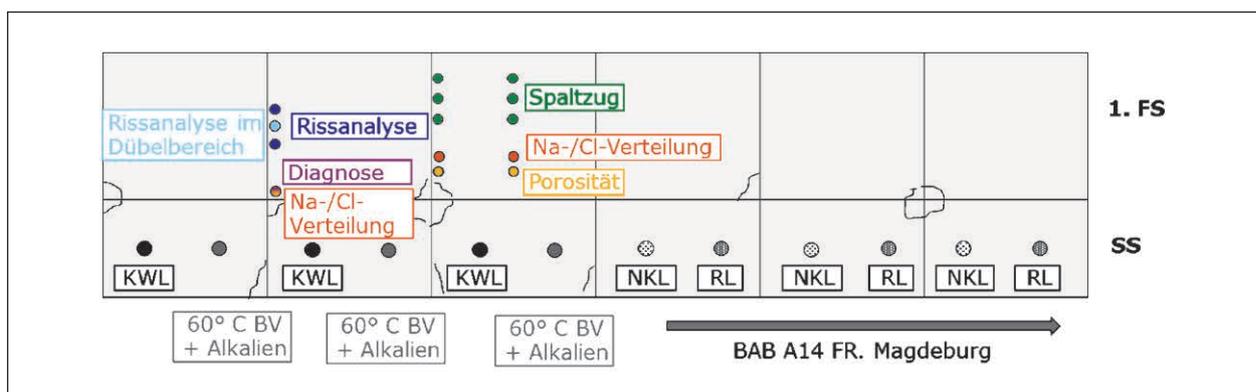


Bild 15: Entnahmeplan für die Entnahmestelle A14-R1 (zweischichtige Bauweise)

dabei je nach Bauweise 350 mm (zweischichtig) und 150 mm (einschichtig). Aus den großen Bohrkernen wurden anschließend je zwei Prismen aus dem Ober- und Unterbeton gewonnen. Aus den kleinformatischen Bohrkernen hingegen wurden Halbschalen herausgearbeitet. Als AKR-provozierende Lagerungen gelangten einerseits der 40°C- und 60°C-Betonversuch in Anlehnung an die Alkalirichtlinie des DAfStb [9] sowie andererseits die beiden AKR-Performanceprüfungen nach [20] zum Einsatz.

Nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen wurde die Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale an ausgewählten Prüfkörpern mittels Dünnschliffmikroskopie untersucht. Zusätzlich wurde an diesen Prüfkörpern die Tausalzverteilung mittels LIBS analysiert.

### 3.2 Ausgewählte BAB-Abschnitte

Einen Überblick über die gemeinsam mit der BAST ausgewählten und beprobten BAB-Abschnitte gibt die Tabelle 1. Den Schwerpunkt der Entnahme bildete die BAB A 14. So wurden hier einerseits die Referenzabschnitte R1, R2 und R3 der Erprobungsstrecke für unterschiedliche Oberflächenbehandlungen und dünn-schichtige Überbauungen zwischen den Anschlussstellen Könnern und Bernburg beprobt. Die Auswahl dieser in zweischichtiger Bauweise ausgeführten BAB-Abschnitte erfolgte vor dem Hintergrund, dass trotz der vermuteten Zugehörigkeit aller BAB-Abschnitte zu einem Baualos unterschiedliche Schadenskategorien auftraten. So sind die BAB-Abschnitte A14-R1 und A14-R2 in die Schadenskategorien III bzw. II-III einzuordnen, während der BAB-Abschnitt A14-R3 keine AKR-Schäden aufwies. Andererseits wurden auf der BAB

A 14 in der Nähe der Götschetalbrücke 2010 und 2014 segmentweise benachbarte Fahrbahnplatten, die in einschichtiger Bauweise hergestellt wurden, entnommen. Motivation hierfür war, die Verifizierung des Einflusses des fortschreitenden AKR-Schädigungsprozesses auf das AKR-Restschädigungspotenzial. So war 2010 der betreffende BAB-Abschnitt (A14-GB-A) in die Schadenskategorie 0-I einzuordnen. In den darauffolgenden vier Jahren bis zur erneuten Entnahme 2014 ist der AKR-Schädigungsprozess so weit vorangeschritten, dass sich die AKR-Schadenskategorie auf I-II erhöhte. Dieser später beprobte BAB-Abschnitt wird nachfolgend als A14-GB-B bezeichnet.

Aufgrund des umfangreich bei der Götschetalbrücke entnommenen Probenmaterials konnte hier zusätzlich der Einfluss der ganzheitlichen und separaten Betrachtung des Ober- und Unterbetons bei der Ermittlung des AKR-Restschädigungspotenzials untersucht werden. Das schließt auch die Verifizierung des Einflusses der Prüfkörpergeometrien und der Orientierung der Prüfkörper (vertikal oder horizontal zur Fahrbahnoberfläche) ein. Neben der BAB A 14 wurde auch ein in einschichtiger Bauweise hergestellter BAB-Abschnitt auf der BAB A 4 mit der Schadenskategorie III beprobt.

### 3.3 Zustandserfassung und Bohrkernentnahme mit Dokumentation

Die Zustandserfassung und Bohrkernentnahme auf der BAB A 4 und den drei Referenzabschnitten der BAB A 14 erfolgte 2013. Insgesamt wurden 39 Bohrkernkerne mit einem Durchmesser von 100 mm, 28 Bohrkernkerne mit einem Durchmesser von 150 mm sowie 36 Bohrkernkerne mit einem Durchmesser von 350 mm gezogen. Die segmentweise Plattenentnahme

Bezeichnung	BAB	Bundesland	Fahrtrichtung	Betriebskilometer	Fahrbahnstreifen		Bauweise		Baujahr	Schadenskategorie				Entnahmedatum	Anzahl entnommener BK mit Ø [mm]			Anmerkungen
					SS	FS 1	ein-schichtig	zwei-schichtig		0	I	II	III		100	150	350	
A4	A4	Sachsen	Görlitz	14,3	-	X	X	-	unbekannt	-	-	-	X	31.01.2013	8 (9)	16 (17)	-	
A14-R1	A 14	Sachsen-Anhalt	Magdeburg	143,53-143,56	X	X	-	X	2000	-	-	-	X	12.08.2013	10	4	12	
A14-R2				151,00-151,05	X	X	-	X	2000	-	-	-	X	12.08.2013	10	4	12	
A14-R3				154,10-154,15	X	X	-	X	2000	X	-	-	-	20.08.2013	10	4	12	
A14-GB-A	A 14	Sachsen-Anhalt	Halle/Saale	122,0	-	X	X	-	2000	X	-	-	17.09.2010	segmentweise Entnahme zweier Betonfahrbahnplatten				
A14-GB-B			Halle/Saale	122,0	-	X	X	-	2000	-	X	-	3.09.2014	segmentweise Entnahme einer halben Betonfahrbahnplatten				

Tab. 1: Übersicht über ausgewählte BAB-Abschnitte (Entnahmebereiche)

auf der BAB A 14 im Bereich der Götschetalbrücke erfolgte 2010 und 2014.

Zur einheitlichen Dokumentation des Zustands der Fahrbahnplatten und der Bohrkern- bzw. Plattenentnahme bei den einzelnen beprobten BAB-Abschnitten wurden die bereits von der BAM im AKR-Pilotprojekt FE 08.0215/2011/GRB [18] erarbeiteten Formblätter benutzt. Gegenstand des ersten Formblatts sind allgemeine Angaben. Es werden folgende Parameter erfasst:

- Entnahmetag,
- Wetterverhältnisse bei Entnahme,
- durchmesserspezifische BK-Anzahl,
- detaillierte Angaben zum Entnahmeort,
- Entnahmeverantwortliche,
- ausführende Firma,
- Bauweise,
- Oberflächentextur und
- Fugenausbildung.

Das zweite Formblatt beinhaltet eine detaillierte Schadensbeschreibung mit Fotodokumentation. So werden folgende Befunde der visuellen Begutachtung der Fahrbahnplatte differenziert für die Bereiche Längs- und Querruge sowie den Plattenbereich nach folgenden Kriterien klassifiziert:

- Verfärbungen,
- Querrisse,
- Netzzrisse,
- Ausbrüche,
- Abwitterungen,
- Verschotterungen und
- Aufwölbungen.

Untersetzt wird dieser Befund mit Übersichts- und Detailfotos zum äußeren Erscheinungsbild. Ein weiteres Formblatt gibt Aufschluss über die genaue Positionierung der entnommenen Bohrkern- bzw. Plattensegmente und deren Verwendungszweck bei den Laboruntersuchungen mittels eines Lageplans. Darauf aufbauend gibt ein detaillierter Prüfplan Aufschluss über die geplante Verwendung der einzelnen Bohrkern- bzw. Plattensegmente.

Die basierend auf dem vorstehend geschilderten Prozedere erstellte Dokumentation der BK-Entnahme und der adäquat aufbereiteten segmentweisen Plattenentnahme ist für jeden BAB-Abschnitt der Anlage A1 zu entnehmen. Aufschluss über die sich anschließenden vielfältigen Laboruntersuchungen geben die folgenden Kapitel.

### 3.4 Charakterisierung der Bohrkern- und Prüfkörper aus Plattensegmenten im Entnahmezustand

#### 3.4.1 Visuelle Begutachtung und Dokumentation

Nach der Entnahme und dem Transport der Bohrkern- und Plattensegmente an die BAM wurden diese im Labor detailliert visuell begutachtet. Zur einheitlichen Dokumentation der Befunde der visuellen Begutachtung aller Bohrkern- und Prüfkörper wurden hier auch die von der BAM im AKR-Pilotprojekt FE 08.0215/2011/GRB [18] erarbeiteten Formblätter benutzt. Dabei werden ausgehend vom Lageplan der einzelnen Bohrkern- und Plattensegmente des jeweiligen BAB-Abschnitts im ersten Formblatt neben allgemeinen Angaben zur Zuordnung jedes Bohrkerns bzw. des aus dem Plattensegment gewonnenen Prüfkörpers vor allem folgende geometrische Parameter erfasst:

- Abmessungen,
- Vorhandensein, Abmessungen und Tiefenlage der Dübel,
- Bauweise (einschichtig, ein- bzw. zweilagig; zweischichtig),
- Schichtdicken von Ober- und Unterbeton und
- Verlauf und Tiefenlage von Rissen.

Im zweiten Formblatt stehen folgende Angaben zum visuellen Befund der Prüfkörper im Vordergrund:

- Größe und Art der Gesteinskörnung,
- Beschaffenheit der Fahrbahn- und Manteloberfläche sowie der Rückseite (z. B. Abplatzungen, Risse, reaktive Gesteinskörnungen, Gelausscheidungen in Rissen und Poren, sonstige Porenfüllungen),
- Porosität (Verdichtungs- und Luftporen, Fehlstellen) und

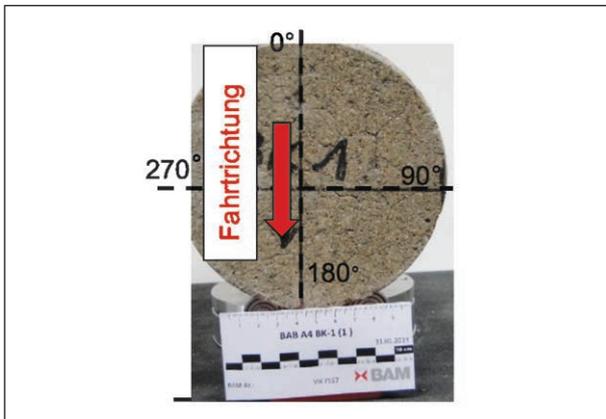


Bild 16: Ansicht Stirnseite mit Winkelzuordnung von Bohrkern BK 1 des BAB-Abschnittes A 4

- Gefüge (Gleichmäßigkeit, Güte der Kornbindung, Stetigkeit der Sieblinie).

Auch hier werden analog zur Dokumentation der Bohrkern- und Plattensegmententnahme die Befunde mit Fotos untersetzt. Dabei werden die Fahrbahnoberfläche, die Rückseite des BK's bzw. Prüfkörpers sowie seine Mantelfläche als Abwicklung fotografisch einheitlich dokumentiert. Bei Feststellung von Auffälligkeiten werden diese zusätzlich mit Detailbildern erfasst. Zur einheitlichen Zuordnung aller Fotos wird ausgehend von der Fahrtrichtung die Stirnseite des Bohrkerns (Fahrbahnoberfläche) mit Winkelangaben versehen (Bild 16).

Die an den einzelnen BK's und Prüfkörpern visuell gewonnenen Befunde sind für jeden Entnahmebereich in der Anlage A2 aufgeführt.

### 3.4.2 Analyse der Rissbildung im Fugenbereich

Bereits vorangegangene eigene Untersuchungen [18] haben gezeigt, dass die Dunkelfärbung der Fahrbahnoberfläche im Bereich der Querscheinfuge und die in der Folgezeit auftretenden weiteren schadenskategorie-spezifischen Merkmale oft mit einer horizontalen Rissbildung parallel zur Fahrbahnoberfläche in verschiedenen Tiefenhorizonten einhergehen. Aus diesem Grund wurde sowohl bei der Bohrkern- und segmentweisen Plattentnahme vor Ort als auch bei der Bohrkern- bzw. Prüfkörperdokumentation im Labor das Vorhandensein von Rissen im Fugenbereich visuell geprüft und dokumentiert.

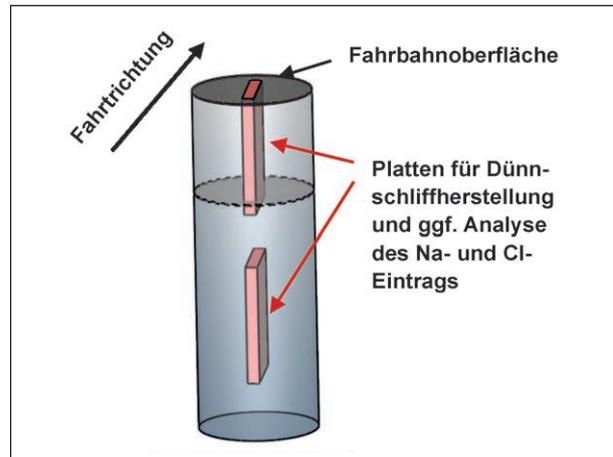


Bild 17: Räumliche Einordnung herausgearbeiteter Segmente aus dem Diagnosebohrkern aus dem Fugenkreuz der Fahrbahnplatte für die DS-Herstellung (Mikroskopie) und Analyse des Tausalzeintrags bei ein- und zweischichtiger Bauweise (Querscheinfuge links)

### 3.4.3 Mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung

Die Basis für die Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung des Fahrbahndeckenbetons im Entnahmestand bei den einzelnen BAB-Abschnitten bildet der jeweils im Bereich des Fugenkreuzes entnommene Bohrkern (siehe zum Beispiel Bild 15). Die Analyse selbst erfolgte mittels Dünnschliffmikroskopie. Dabei wurde je ein Dünnschliff (DS) aus dem Ober- und Unterbeton des Diagnosebohrkerns mit den Abmessungen 90 mm x 60 mm untersucht. Charakterisiert wurden hierbei die Gesteinskörnung, das Betongefüge und die Ausprägung der AKR- bzw. SEB-Merkmale.

Die Basis für die Herstellung der Dünnschliffe bildeten plattenförmige Rohlinge, die nach visueller Begutachtung aus besonders auffälligen Bereichen durch wasserfreies Schneiden gewonnen wurden. Wie Bild 17 zeigt, wurde je ein Rohling aus dem Ober- und Unterbeton mit einer Höhe von 9 cm, einer Breite von 6 cm und einer Dicke von ca. 10 mm herausgearbeitet. Nach erneuter visueller Begutachtung der Schnittflächen wurde die Seite festgelegt von der aus die Dünnschliffe gewonnen werden sollen. Anschließend wurde der Rohling schonend bei 40 °C im Vakuumofen getrocknet und danach in fluoreszierendes Epoxidharz eingebettet. Die Fluoreszenz ermöglicht eine Kontrastanhebung und somit eine bessere Visualisierbarkeit von Rissstrukturen und Poren. Die Dünnschliffpräparation aus dem mit Epoxidharz getränkten Rohling selbst erfolgte in einem externen Labor.

Für die Mikroskopie der Dünnschliffe gelangten zwei Mikroskope zum Einsatz. So wurden zunächst mit dem Stereomikroskop Olympus SZX16 Übersichtsaufnahmen unter Normal- und UV-Licht bei 0,7-facher Vergrößerung angefertigt. Basierend darauf wurden die DS mit dem Polarisationsmikroskop Axioskop 40 der Firma Zeiss vertiefend in Anlehnung an ASTM C 856-11 [21] untersucht. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der Identifizierung der verwendeten Gesteinskörnung einschließlich deren Korngrößen und Kornform sowie der Charakterisierung der Gefügeausbildung und deren möglichen Schädigung. Bei den Schädigungsindikatoren waren Risse, Reaktionsprodukte und Phasenneubildungen von besonderem Interesse.

Zur einheitlichen Erfassung und Bewertung aller DS-Befunde wurden die bereits im Pilot 1 [18] erarbeiteten Formblätter verwendet. Dabei wurden folgende Charakteristika erfasst:

- grobe Gesteinskörnung > 2 mm (Art, Häufigkeit, Mineralbestand, Größtkorn und Kornform),
- Gesteinskörnung ≤ 2 mm (Gesteinsart, Mineralbestand),
- Porenfüllung (Füllungsgrad, Häufigkeit, Füllungsart, Herkunft von Phasenneubildungen),
- Risse (Verlauf, Häufigkeit, Hauptorientierung, maximale Breite, Art und Grad der Rissfüllung, Herkunft von Phasenneubildungen) und
- zusammenfassende Bewertung der Schadensmerkmale hinsichtlich AKR und SEB nach Tabelle 2.

**3.4.4 Analyse des Tausalzeintrags**

Die Analyse des Tausalzeintrags in den Fahrbahndeckenbeton erfolgte ausschließlich mit dem bereits vorstehend mehrfach genannten LIBS-Verfahren. Vor dem Hintergrund der sekundären Ettringit-

Klassifizierung	Häufigkeit der Merkmale
-	keine
+	punktuell eindeutig
++	häufig
+++	vorhandene Merkmale im betonschädigenden Ausmaß

Tab. 2: Bewertung der Schadensmerkmale bei der DS-Mikroskopie

bildung wurde zusätzlich die Anwendbarkeit des Verfahrens für die bildgebende großflächige Ermittlung der Schwefelverteilung verifiziert.

Das Messprinzip von LIBS ist in Bild 18 schematisch dargestellt. Es ist ersichtlich, dass ein gepulster Laserstrahl zunächst fokussiert und dann auf die Baustoffoberfläche (hier in der Regel der Vertikalschnitt des Bohrkerns) appliziert wird. Durch die hohe Leistungsdichte des applizierten Laserstrahls wird ein kleines Volumen des Baustoffs aufgeschmolzen und verdampft. Es entsteht ein Plasma, was mit der Bildung einer Schockwelle durch die Verdrängung der Luft einhergeht. Durch die hohe Temperatur im Plasma (ca. 10.000 bis 12.000 K) werden alle chemischen Bindungen aufgebrochen. Zusätzlich werden die Elektronen in den einzelnen Atomen auf ein höheres Energieniveau gehoben (z. B. von  $E_{Niv.0}$  auf  $E_{Niv.1}$  oder  $E_{Niv.2}$ ) bzw. aus dem Atom herausgelöst (Ionisation: Übergang der Elektronen von  $E_{Niv.0}$  auf  $\geq E_{ionisiert}$ ). Während der sich anschließenden Ausdehnung und Abkühlung des Plasmas wird zunächst ein kontinuierliches Spektrum und danach ein elementspezifisches Linienspektrum emittiert. Letzteres ist nur dann gegeben, wenn die im Atom gebundenen Elektronen von einem energiereicheren in ein energieärmeres Niveau übergehen (z. B. von  $E_{Niv.2}$  auf  $E_{Niv.1}$  oder  $E_{Niv.0}$  bzw. von  $E_{Niv.1}$  auf  $E_{Niv.0}$ ).

Bei der spektroskopischen Auswertung der emittierten Strahlung gibt die Wellenlänge Aufschluss über die im verdampften Volumen enthaltenen Elemente. Zusätzlich erlaubt die Intensität der Strahlung Rückschlüsse auf die Konzentration der einzelnen Elemente. Dies ermöglicht eine quantitative Bestimmung der Elemente über die Kalibrierung mittels definierter zusammengesetzter Proben. Weitergehende Angaben zur baustoffanalytischen Anwendung von LIBS sind [22] bis [27] zu entnehmen.

Realisiert wurden die Messungen mit dem für die Baustoffanalytik kommerziell erhältlichen Fiber-LIBS-Lab-System der Firma SECOPTA analytics

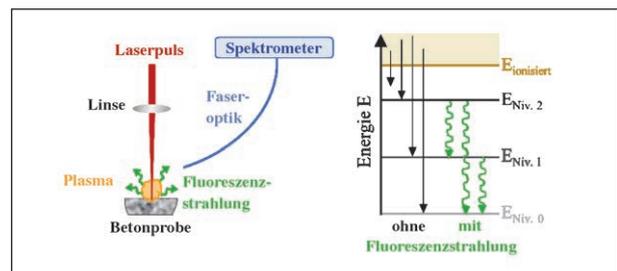


Bild 18: Schematische Darstellung des Messprinzips von LIBS

GmbH. Ein Schema der hierbei verwendeten Messanordnung sowie Fotos vom Gerätesystem sind Bild 19 zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass hier ein NdCr-YAG Mikrochip-Laser, der mit Laserdioden optisch gepumpt wird, Anwendung findet. Die Übertragung der Pumpstrahlung von den Dioden zum Laserkristall im Messkopf erfolgt über eine Glasfaser. Die gepulste Laserstrahlung wird mit zwei Spiegeln (A2 und A3) umgelenkt. Der als zweites zum Einsatz kommende Parabolspiegel (A3) fokussiert zusätzlich den auf die Baustoffoberfläche gerichteten Laserstrahl. Zum Ausschluss verfälschender atmosphärischer Einflüsse (Stickstoff, Sauerstoff) wird der Bereich in dem sich das Plasma befindet mit Helium gespült. Zusätzlich wird so die Nachweisempfindlichkeit von Chlor signifikant erhöht.

Die bei der Abkühlung des laserinduzierten Plasmas emittierte Strahlung wird gleichfalls mittels zweier Spiegel (A3 und D1) umgelenkt. Dabei wird die mit dem Parabolspiegel D1 fokussierte Strahlung in eine optische Faser (D2) eingekoppelt. Mittels einer Verzweigung der optischen Faser wird anschließend die Strahlung in je ein Spektrometer, das im ultravioletten Bereich (UV) bzw. im nahen Infrarotbereich (NIR) arbeitet, eingespeist. Die Wellenlängen für die hier primär interessierende Analyse von Natrium, Chlor und Kalzium befinden sich im nahen Infrarotbereich. Zusätzlich werden im ultravioletten Bereich Kalzium und Silizium bestimmt. Ein typisches mit LIBS gewonnenes Spektrum einer Zementsteinoberfläche ist in Bild 20 exemplarisch dargestellt. Eine detaillierte elementspezifische Zu-

ordnung der Wellenlänge ist der Tabelle 3 zu entnehmen. Dabei sind die hier verwendeten element-spezifischen Wellenlängen durch eine fette Schrift hervorgehoben.

Element	Ionisierungs-zustand	Wellenlänge [nm]
Natrium	<b>Na I</b>	<b>818,3</b>
	Na I	819,5
Chlor	<b>Cl I</b>	<b>837,6</b>
Kalzium	<b>Ca II</b>	<b>315,9</b>
	Ca II	317,9
	Ca II	849,8
	Ca II	854,2
Silizium	Si I	251,6
	<b>Si I</b>	<b>288,2</b>

Tab. 3: Zuordnung der Wellenlänge zu ausgewählten Elementen [28]

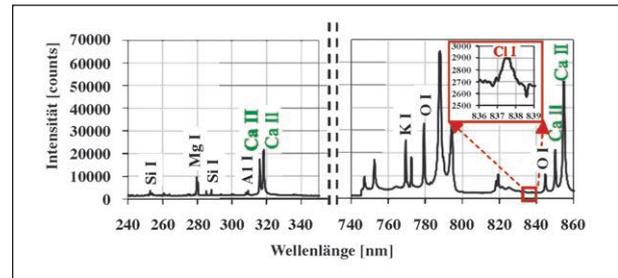


Bild 20: Typisches LIBS-Spektrum für die Analyse einer Zementsteinprobe aus CEM I 42,5 R mit definierter NaCl-Zugabe ( $c_{Cl} = 1,08 \text{ M.-%}$  und  $c_{Na} = 0,57 \text{ M.-%}$ ) im UV- und NIR-Bereich

**Legende**

- A1:** NdCr:YAG Mikrochip-Laser ( $\lambda_{Laser} = 1064 \text{ nm}$ ,  $E_{Puls} = 3 \text{ mJ}$ ,  $f_{Puls} = 100 \text{ Hz}$ ,  $t_{Puls} = 1,5 \text{ ns}$ );
- A2:** Dichroitischer Spiegel; **A3/D1:** Parabolspiegel;
- D2:** optische Y-Faser

a. Schematische Darstellung der Messanordnung

b. Übersichts- und Detailfoto des Gerätesystems

Bild 19: Beschreibung des verwendeten FiberLIBS-Systems

Die LIBS-Messungen und ihre Auswertungen erfolgten weitestgehend automatisch unter Nutzung selbst entwickelter Softwaretools. Vor dem Hintergrund, dass die Alkalien für die schädigende AKR durch den Tausalzeintrag von außen und weniger durch Löseprozesse im Gesteinskorn bereitgestellt werden, fand bei der Auswertung die Kalziumverteilung als Ausschlusskriterium Anwendung. Dies ermöglicht die Identifikation des Zementsteins und damit die Eliminierung der im Betonstraßenbau üblichen nicht kalzitischen bzw. nicht dolomitischen Gesteinskörnung. Bild 21 veranschaulicht exemplarisch die Vorgehensweise bei der Ermittlung des Na-Tiefenprofils aus den gemessenen Ca- und Na-Flächenscans mit erfasster Gesteinskörnung. Als Beispiel dient dabei ein mit LIBS abgescannter Vertikalschnitt durch das obere Segment eines Bohrkerns aus einer ca. zehn Jahre alten Fahrbahndecke eines BAB-Abschnitts. Dabei wird die Intensität des LIBS-Signals farbcodiert dargestellt. Deutlich erkennbar ist im hier dargestellten Na-Flächenscan, dass die eingesetzte Gesteinskörnung einen hohen Natriumgehalt aufweist. Dies führt bei der Akkumulation und Mittelung der kalibrierten

LIBS-Messsignale entlang der einzelnen horizontalen Messlinien zu einem sehr indifferenten Na-Tiefenprofil, das den Tausalzeintrag in den Fahrbahndeckenbeton nicht hinreichend widerspiegelt. Aufgrund des verfälschenden Einflusses des Natriums in der Gesteinskörnung auf die Abbildung des primär im Zementstein erfolgenden Transports der Tausalzlösung wurde die Gesteinskörnung identifiziert und eliminiert. Hierfür wurde der signifikant höhere Kalziumgehalt im Zementstein gegenüber der Gesteinskörnung genutzt, was im Ca-Flächenscan mit erfasster Gesteinskörnung deutlich erkennbar ist (Bild 21, oben). Das nach Eliminierung der Gesteinskörnung im Na-Flächenscan generierte Na-Tiefenprofil beschreibt den Tausalzeintrag in die Betonfahrbahndecke plausibel. So weist dieses einen von der Oberfläche in das Innere der Betonfahrbahndecke gerichteten Gradienten auf, der auf eine Mindesteindringtiefe des Natriums von ca. 15 mm schließen lässt. Aus Vergleichbarkeitsgründen wurde die selbe Vorgehensweise bei der Ermittlung der Cl-Tiefenprofile aus den Messdaten von LIBS gewählt.

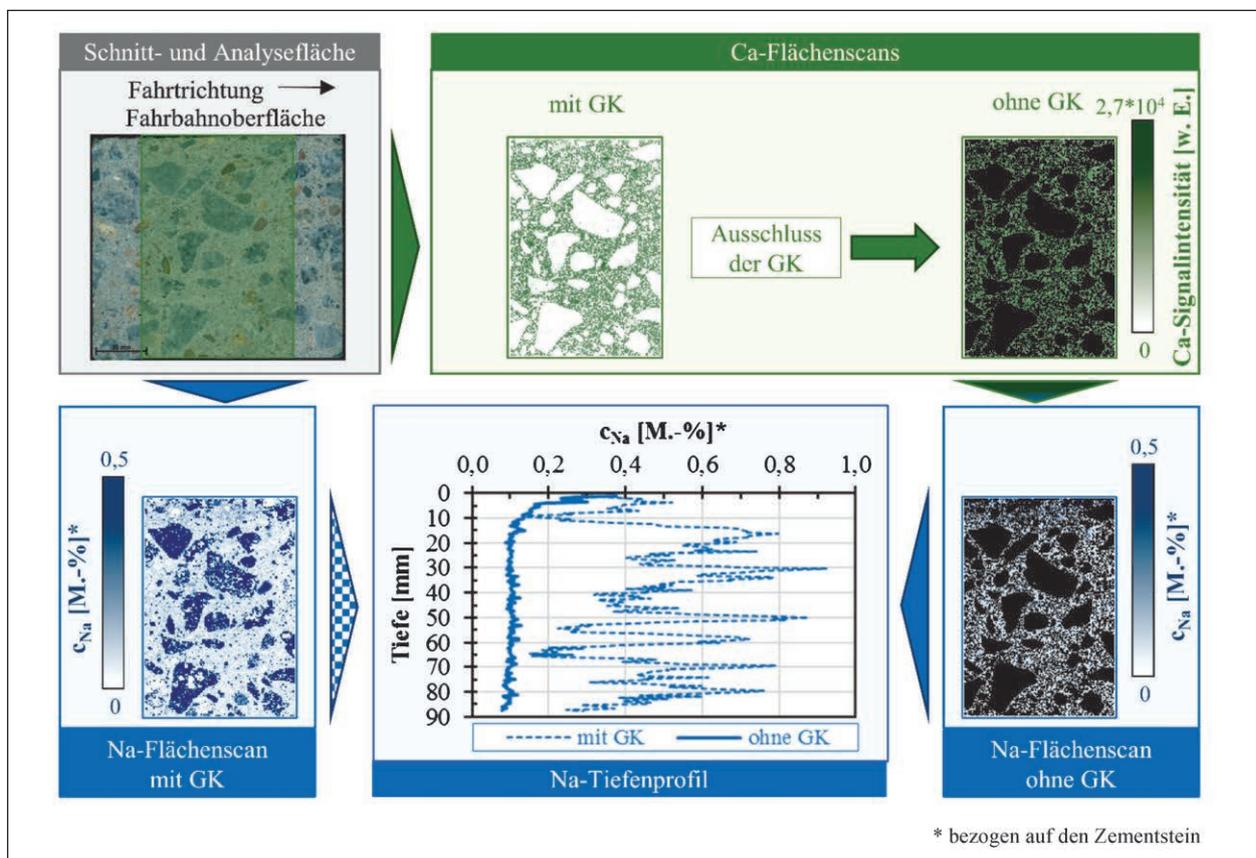


Bild 21: Vorgehensweise bei der Ermittlung des Natriumtiefenprofils bei der Auswertung der LIBS-Flächenscans unter Nutzung des Ca-Ausschlusskriteriums zur Eliminierung der Gesteinskörnung (GK) am Beispiel des oberen Segments eines Bohrkerns aus der Plattenmitte eines BAB-Abschnitts

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten LIBS-Analysen erfolgten an je einer Betonscheibe aus dem Ober- und Unterbeton des Bohrkerns bzw. Plattensegments (Herkunft: aus Fugenkreuz bzw. Plattenmitte). Zur Vermeidung verfälschender Einflüsse durch ein Schneidmittel wurde die Messfläche für LIBS trocken geschnitten. Die so erhaltene Schnittfläche wurde anschließend mittels Druckluft gereinigt und danach ohne weitere Präparation schrittweise meanderförmig mit dem Laserstrahl abgescannt. Die Größe der Messfläche für LIBS betrug 90 mm x 60 mm. Als Messpunkteabstand wurde in x- und y-Richtung jeweils 0,5 mm gewählt. Am jeweiligen Messpunkt wurden je sechs kurze energiereiche Laserpulse (Pulsenergie: ca. 3 mJ; Länge: ca. 1,5 ns) appliziert. Der Durchmesser des Spots betrug ca. 100 µm. Daraus ergibt sich eine Energiedichte im Fokus von ca. 40 GW/cm<sup>2</sup>. Für einen Flächenscan betrug die Messzeit ca. 0,5 h.

Weiterführende Angaben zur Kalibrierung und der Güte der quantitativen LIBS-Messungen sind [29, 30] zu entnehmen.

### 3.4.5 Spaltzugfestigkeit

Neben dem Tausalzeintrag wurden an weiteren Bohrkernen im Entnahmezustand auch die Auswirkungen der AKR-Schädigung auf die mechanischen Eigenschaften des Fahrbahndeckenbetons näher untersucht. Aufgrund der scheinbar stärkeren Ausprägung der AKR-Merkmale im Bereich der Querscheinfuge wurde die Spaltzugfestigkeit vergleichend an Bohrkernscheiben aus dem Rand und der Mitte der Fahrbahnplatte tiefenabhängig geprüft. Zu diesem Zweck wurden aus den Bohrkernen Scheiben mit einer Höhe von 50 mm mittels nassem Zugschnitt gewonnen. Anschließend wurden die Bohrkernscheiben bei  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  und  $(65 \pm 5) \%$  relativer Luftfeuchte bis zur Massekonstanz schonend getrocknet. Die Spaltzugfestigkeit wurde danach mittels eines in Längsrichtung verlaufenden linienförmigen Lasteintrags in Anlehnung an die AL SP-Beton [31] bestimmt. Die Lasteinleitung erfolgte über 10 mm breite und 50 mm lange Hartfaserstreifen. Die Grundbelastung betrug  $(0,05 \pm 0,01) \text{ N/mm}^2$ . Als Belastungsgeschwindigkeit wurde  $0,05 \pm 0,01 \text{ N/mm}^2$  gewählt.

### 3.4.6 Gesamtporosität

Die Porosität des Betons beeinflusst sowohl sein Festigkeits- und Verformungsverhalten als auch

seine Dauerhaftigkeit maßgebend. Im Kontext der AKR sind hier vor allem zwei Prozesse von Bedeutung. So hat eine verminderte Porosität einerseits einen geringen Expansionsraum für Phasen-neubildungen und somit einen erhöhten Expansionsdruck bei Neuphasenbildungen zur Folge. Andererseits bedingt die höhere Gefügedichte des Betons eine Verminderung des für die AKR erforderlichen Feuchte- und Alkalieneintrags. Neueste Untersuchungen von Voland [32] zeigen in diesem Zusammenhang, dass tendenziell eine verminderte Gefügedichte des Betons die schädigende AKR stärker befördert.

Für Normalbetone beträgt die sich aus offenen und geschlossenen Poren bildende Gesamtporosität in der Regel zwischen 8 und 12 Vol.-%. Die bei Fahrbahndeckenbetonen künstlich eingeführten Luftporen müssen zu diesem Anteil noch hinzugerechnet werden.

Im Rahmen dieses Projektes wurde die Gesamtporosität an Bohrkernscheiben aus der Plattenmitte und dem Plattenrand über das Verhältnis Rohdichte zu Reindichte [33] tiefenaufgelöst bestimmt. Dabei wurde die Reindichte nach DIN 66137-2 [34] mit der Gaspyknometrie bestimmt. Die Ermittlung der Rohdichte hingegen erfolgte nach DIN EN 12390-7 (105°C-Trocknung, Unterwasserwägung) [35].

## 3.5 Ermittlung des AKR-Restschädigungspotenzials mit verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen

### 3.5.1 Vorbemerkungen zum Stand der Technik

Für die Ermittlung des AKR-Restschädigungspotenzials des Bestandsbetons von Fahrbahndecken gibt es kein spezielles Regelwerk. Vielmehr wurden bei der bisherigen gutachterlichen Tätigkeit und im Rahmen von Forschungsprojekten für diesen Zweck die in der Alkali-Richtlinie des DAfStb [9] beschriebenen Betonversuche für eine vorgegebene Standardrezeptur bei 40 °C und 60 °C sowie vermehrt in den letzten Jahren die im ARS 04/2013 [20] aufgeführten AKR-Performanceprüfverfahren adaptiert. Als AKR-Performanceprüfverfahren finden in Deutschland der 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr und die Klimawechsellaagerung (KWL) Anwendung. Der zunehmende Stellenwert der Performanceprüfverfahren gegenüber den konventionellen AKR-Betonversuchen liegt darin be-

gründet, dass diese vor allem die externe Alkalizufuhr in die Betonfahrbahndecken infolge der Tausalzbeaufschlagung beim Winterdienst und die klimatisch bedingten Temperatur- und Feuchtwechselbeanspruchungen berücksichtigen. Bei der Klimawechsellagerung schließt dies zusätzlich die Frost-Tausalzwechsel-Beanspruchung ein. Entwickelt wurden all diese Verfahren vor dem Hintergrund der Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung (Betonversuche nach Alkali-Richtlinie des DAfStb) bzw. der AKR-Empfindlichkeit einer pessimalen Standardrezeptur bzw. der konkreten Fahrbahndeckenrezeptur (AKR-Performanceprüfungen) im Vorfeld einer Baumaßnahme. Allein die „Empfehlung für die Schadensdiagnose und Instandsetzung von Betonbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind“ des DAfStb in den Fassungen von 1993 und 2015 [10, 36] hat die AKR-Schadensdiagnose von Bauwerken und Bauteilen explizit zum Inhalt. Als AKR-Prüfverfahren findet dabei ausschließlich der 40°C-Betonversuch Anwendung. Kritisch wird zu diesem Prüfverfahren allerdings in der Literatur [37] postuliert, dass es hier aufgrund der Auslaugung von Alkalien mit zunehmender Prüfdauer zu einer Unterbewertung der Alkaliempfindlichkeit der langsam und spät reagierenden Gesteinskörnungen infolge eines frühzeitig entstehenden Alkalimangels kommen kann [38]. Da sich die Auslaugung der Alkalien mit steigender Temperatur erhöht, wird der 60°C-Betonversuch noch kritischer diesbezüglich bewertet. Daher wird in vielen Ländern (u. a. USA und Kanada) der 60°C-Betonversuch nicht mehr angewandt.

All den vorstehend diskutierten AKR-Prüfverfahren ist gemeinsam, dass als Hauptschädigungsindikator die Dehnung der Prüfkörper nach definierter AKR-provozierender Lagerung herangezogen wird. Dabei werden bei der Beurteilung des AKR-Restschädigungspotenzials der Bestandsbetone in der Regel die gleichen Grenzwerte wie bei der adäquaten Prüfung der Laborbetone herangezogen. Eine Ausnahme bildet die Nebelkammerlagerung in Anlehnung an die „Empfehlung für die Schadensdiagnose und Instandsetzung von Betonbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind“ des DAfStb [10]. Hier wird nicht der Dehnungsgrenzwert für den Laborbeton von 0,6 mm/m nach [9] in Ansatz gebracht, sondern ein erhöhter Grenzwert von 0,8 mm/m. Dies geschieht vor dem Hintergrund, dass die Feuchte- und Temperaturdehnung des Bestandsbetons in der Nebelkammer bis zu 0,6 mm/m betragen kann [39]. Weiterhin sei

angemerkt, dass bei der Klimawechsellagerung der Dehnungsgrenzwert beim Bestandsbeton gegenüber dem des Laborbetons bei der jeweiligen Beaufschlagung um 0,1 mm/m angehoben wird. Zusätzlich wird die maximale Anzahl der KWL-Zyklen von 12 mit sich vermindender planmäßiger Restnutzungsdauer des untersuchten BAB-Abschnittes reduziert.

### 3.5.2 Kurzbeschreibung der Prüfkörperpräparation und der adaptierten AKR-Prüfverfahren

Einen zusammenfassenden Überblick über die praktizierte Vorgehensweise bei der Ermittlung des AKR-Restschädigungspotenzials mit den verschiedenartigen für den Bestandsbeton adaptierten AKR-Prüfverfahren gibt die Tabelle 4. Das dargestellte Spektrum reicht dabei von der Gewinnung und Präparation der Prüfkörper, ihrer hygrothermischen Vorkonditionierung, der Null- und zyklischen Messung der Zustands- und Schädigungsindikatoren (Längen- und Masseänderung) vor, während bzw. unmittelbar nach der AKR-provozierenden Lagerung bis zur Kurzbeschreibung der jeweiligen Lagerungsregime.

An die visuelle Begutachtung der für die AKR-provozierende Lagerung vorgesehenen Bohrkerne und Plattensegmente aus der Plattenmitte im Labor schloss sich die Gewinnung der Prüfkörper an. Die Art und die Abmessungen der Prüfkörper für die jeweilige AKR-provozierende Lagerung sind für die beprobten BAB-Abschnitte den Tabellen 4a und 4b zu entnehmen. Es ist hier ersichtlich, dass für den 40°C-Betonversuch einerseits Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Länge von 250 mm (Entnahmebereich: A4) sowie Halbschalen aus Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm (Entnahmebereiche: A14-GB-A und A14-GB-B) Einsatz fanden. Angemerkt sei, dass so das AKR-Restschädigungspotenzial des Ober- und Unterbetons der Fahrbahndecke ganzheitlich erfasst wird, was in der Regel bei einer einschichtigen Bauweise auch ausreichend ist. Andererseits wurden zur separaten Bewertung des AKR-Restschädigungspotenzials des Ober- und Unterbetons aus den Bohrkerne mit einem Durchmesser von 350 mm bzw. aus den Plattensegmenten parallel zur Fahrbahnoberfläche Prismen mit den Abmessungen 250 mm x 100 mm x 100 mm aus dem Ober- und Unterbeton gewonnen (Entnahmebereiche: A14-R1, A14-R2, A14-R3, A14-GB-B; Orientierung der

Prismen: in Fahrtrichtung). Dies ist vor allem bei zweischichtiger Bauweise von großem Interesse.

Auch beim 60°C-Betonversuch ohne und mit externer Alkalizufuhr wurde das AKR-Restschädigungspotenzial einerseits ganzheitlich für den Ober- und Unterbeton an Halbschalen, die aus den Bohrkernen mit einem Durchmesser von 150 mm gewonnen wurden, bestimmt (Entnahmebereiche: A4; A14-GB-A und A14-GB-B).

Andererseits wurde das AKR-Restschädigungspotenzial des Ober- und Unterbetons getrennt an paarweise aus Bohrkernen ( $\varnothing$  350 mm) bzw. Plattensegmenten entnommenen Prismen mit den Abmessungen von 280 mm x 75 mm x 75 mm ermittelt (Entnahmebereiche: A14-R1, A14-R2, A14-R3 bzw. A14-GB-B).

Auch bei der Klimawechsellagerung wurde das AKR-Restschädigungspotenzial des Ober- und Unterbetons sowohl ganzheitlich an Halbschalen (Gewinnung aus Bohrkernen mit einem Durchmesser von 150 mm bei Entnahmebereichen A4; A14-GB-A und A14-GB-B) als auch separat an Prismen mit unterschiedlichen Abmessungen bestimmt. So wurden bei den Entnahmebereichen A14-R1, A14-R2 und A14-R3 aus den Bohrkernen mit einem Durchmesser von 350 mm Prismen mit den Abmessungen 250 mm x 100 mm x 100 mm gewonnen. Bei dem Entnahmebereich A14-GB-B wurden aus den Plattensegmenten Prismen mit den Abmessungen 400 mm x 100 mm x 100 mm aus dem Ober- und Unterbeton herausgeschnitten. Zusätzlich wurden die Ränder der mit der Prüflösung beaufschlagten Fläche der Prüfkörper zur Verbesserung der Fugenabdichtung mit Silikon angefast.

Nach dem Zuschnitt wurden die Prüfkörper an den Stirnseiten mit Messmarken versehen. Hierzu wurde an jeder Stirnseite des Prüfkörpers mittig je eine Bohrung eingebracht. In diesen wurde im nächsten Schritt der kalt aushärtende Zweikomponentenklebstoff X60 aus Methylmetacrylat eingefüllt. Danach wurde der Messzapfen in die mit dem Klebstoff versehene Bohrung eingeführt. Zur Vermeidung verfälschender Einflüsse wurde die Dicke des Klebebettes zwischen der Stirnseite des Messzapfens und dem Bohrlochgrund einerseits und der Mantelfläche des Messzapfens und der Bohrlochwandung andererseits minimiert. Zur Erhöhung des Auszugwiderstandes des Messzapfens wurde dieser einseitig mit einer zweifach hintereinander angeordneten schwalbenschwanzförmigen Profilierung versehen.

Nach der Applikation der Messzapfen erfolgte die Vorkonditionierung der Prüfkörper. So wurden zunächst alle Prüfkörper mindestens zwei Wochen bei  $(20 \pm 2)$  °C und einer relativen Luftfeuchte von  $(65 \pm 5)$  % gelagert. Zwischenzeitlich wurden die Abmessungen der Prüfkörper bestimmt. Weiterhin musste ausschließlich bei den für die Klimawechsellagerung vorgesehenen Prüfkörpern die Vorkonditionierung nochmals unterbrochen werden. Dies war erforderlich, um den Moosgummi auf den oberen Bereich der PK-Mantelfläche zur Sicherstellung des Verbleibs der Prüflösung auf der Prüfkörperoberseite aufzukleben. Zusätzlich wurde der angefasten Fugenbereich zwischen Moosgummi und Betonrandzone umlaufend mit einer Silikonnaht abgedichtet. Weiterhin wurden die Stirnseiten der Prüfkörper mit einem alukaschierten Buthylklebeband versehen. Einen optischen Eindruck von der Präparation der KWL-Prüfkörper vermittelt Bild 22a.

Nach der mindestens zweiwöchigen Vorkonditionierung der Prüfkörper bei Normklima schloss sich sowohl beim 60°C-Betonversuch ohne und mit externer Alkalizufuhr als auch bei der Klimawechsellagerung eine weitere hygrothermische Vorlagerung der präparierten Prüfkörper an. So wurden die für den 60°C-Betonversuch ohne und mit externer Alkalizufuhr vorgesehenen Prüfkörper ca. 30 Minuten in Wasser bei einer Temperatur von  $(20 \pm 2)$  °C getaucht. Anschließend wurde mittels Zellstofftüchern das Oberflächenwasser von den Prüfkörpern entfernt. Danach wurden die ausschließlich für den 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr vorgesehenen Prüfkörper sechs Tage in geschlossenen Behältern bei einer Temperatur von  $(20 \pm 2)$  °C gelagert. Daran schloss sich eine 14-tägige Lagerung der Prüfkörper bei Normklima an. Es folgte eine erneute 6-tägige Lagerung der Prüfkörper über Wasser bei einer Temperatur von  $(60 \pm 2)$  °C. Die Vorlagerung der Prüfkörper wurde mit ihrer eintägigen Lagerung in geschlossenen Behältern über Wasser bei einer Temperatur von  $(20 \pm 2)$  °C beendet.

Bei der Klimawechsellagerung schloss an die mindestens zweiwöchige Lagerung der Prüfkörper bei Normklima eine viertägige Trocknungsphase bei 60 °C des ersten KWL-Zyklus mit anschließender Abkühlung auf  $(20 \pm 2)$  °C an.

Nach der verfahrensspezifisch unterschiedlichen Vorkonditionierung der Prüfkörper erfolgte die Nullmessung für die Zustands- und Schädigungsindikatoren. So wurde einerseits die Länge, das heißt der Abstand zwischen den Messzapfen, mit einer Ge-

naugigkeit von 1 µm gemessen. Andererseits wurde die Masse der Prüfkörper mit einer Genauigkeit von 0,1 g bestimmt. Beide Messgrößen wurden zur Eliminierung verfälschender Einflüsse bei einer Lufttemperatur von (20 ± 2) °C und einer rel. Luftfeuchte von (65 ± 5) % bestimmt. Einen optischen Eindruck vom Messplatz für die Längen- und Massebestimmung vermittelt Bild 22b.

Einen zusammenfassenden Überblick über die sich an die Nullmessung anschließenden genauen Lagerungs- und Messregime für die Prüfkörper bei den jeweiligen AKR-provozierenden Lagerungen gibt die Tabelle 4. So werden beim 40°C-Betonver-

such die vorkonditionierten Prüfkörper mindestens neun Monate bei einer Temperatur von (40 ± 2) °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von mindestens 99 % in einer Nebelkammer gelagert. Die Länge und Masse der Prüfkörper werden zu definierten Zeitpunkten durch kurzzeitige Entnahme aus der Nebelkammer und damit bei ca. 40 °C bestimmt. Dies hat zur Folge, dass die gegenüber der Referenzmessung ermittelten Längenänderungen sowohl die hygrisch als auch thermisch bedingten Dehnungen des Prüfkörpers einschließen. Diese Anfangsdehnung kann bis zu 0,6 mm/m betragen. Der für den 40°C-Betonversuch in [10] festgelegte Dehnungsgrenzwert bezieht sich auf eine neunmo-



Bild 22: Impressionen zur KWL

Kriterium der Verfahrensbeschreibung	Betonversuche in Anlehn. an Regelwerk des DAfStb [1+2]		Performanceprüfungen in Anlehnung an das ARS 04/2013	
	40°C-BV	60°C-BV	60°C-BV mit ext. Alkalizufuhr	Klimawechsellagerung
Prüfkörper (Form und Regelabmessungen)	3 Bohrkern: Ø 100 mm, l = 250 mm	3 Halbschalen: 250 x 150 x 75 mm³		6 Halbschalen: 250 x 150 x 75 mm³
	3 Prismen: 250 x 100 x 100 mm³	3 Prismen: 280 x 75 x 75 mm³		3 Prismen: 250 x 100 x 100 mm³
PK-Präparation	Anbringen der Messmarken an PK-Stirnseiten unmittelbar nach Zuschchnitt (bei KWL-PK: zusätzlich Anfasen der Kanten auf der PK-Oberseite)			
PK-Vorkonditionierung	zweiwöchige Lagerung der Prüfkörper bei (20 ± 2) °C und (65 ± 5) % relativer Luftfeuchte mit zwischenzeitlicher Bestimmung aller PK-Abmessungen			
		(30 ± 5) minütiges Tauchen der PK in H <sub>2</sub> O bei (20 ± 2) °C, anschl. Entfernung des Oberflächenwassers + Längen- und Massenermittlung an PK's		Unterbrechung der Vorkonditionierung nach 12 Tagen für: • Kleben des Moosgummis und Fugenabdichtung mit Silikon für Beaufschlagung der PK-Oberseite mit Prüflösung • Abdichtung der PK-Stirnseiten mit Alu-kaschier. Buthyklebeband
		6-tägige Lagerung der PK in geschlossenen Behältern über H <sub>2</sub> O bei (20 ± 2) °C		
		14-tägige Lagerung der PK bei Normklima ((20 ± 2) °C und 65 ± 5) % rel. LF.)		
		6-tägige Lagerung der PK in geschlossenen Behältern über H <sub>2</sub> O bei (60 ± 2) °C		
	1-tägige Lager. der PK in geschlossenen Behältern über H <sub>2</sub> O bei (20 ± 2) °C			
	4-tägige Trocknungsphase im 1. KWL-Zyklus und anschließender PK-Abkühlung auf (20 ± 2) °C			

Tab. 4: Übersicht über die Vorgehensweise bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen

Kriterium der Verfahrensbeschreibung	Betonversuche in Anlehn. an Regelwerk des DAfStb [1+2]		Performanceprüfungen in Anlehnung an das ARS 04/2013	
	40°C-BV	60°C-BV	60°C-BV mit ext. Alkalizufuhr	Klimawechselagerung
Nullmessung (Zustands- + Schädigungsindikat.)	Ermittlung der Referenzwerte für die Länge und Masse bei einer Lufttemperatur von (20 ± 2) °C und einer rel. Luftfeuchte von (65 ± 5) % (Genauigkeit: Längenmessung: Messzapfenabstand: 0,001 mm; Massebestimmung: 0,1 g)			
Lagerungsregime	<ul style="list-style-type: none"> <li>9-monatige Lagerung bei (40 ± 2) °C und einer rel. LF ≥ 99 % (Nebelkammer)</li> <li>zwischenzeitlich kurzzeitige Entnahme der PK für Längen- und Massenermittlung (vernachlässigbare Temperaturabsenkung des Prüfkörpers)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>mindestens 5-monatige Lagerung der PK bei (60 ± 2) °C und einer rel. LF ≥ 98 % (PK über H<sub>2</sub>O in geschlossenen Edelstahlbehältern)</li> <li>zwischenzeitliche Abkühlung der Behälter mit PK's auf (20 ± 2) °C für Längen- und Massenermittlung</li> <li>Entnahme der PK aus Behältern für Messungen (Zeitfenster ≤ 2 min/PK)</li> <li>Drehung der PK um 180° nach jeder Messung</li> </ul>	mindestens 10 Wechsellagerungszyklen mit folgendem Einzelzyklusregime: 5 d Trocknung der PK bei (60 ± 5) °C in Wärmeschrank zuzügl. 4 h Abkühlung bei Normklima in geschlossenen Boxen 2 d vollständiges Eintauchen der PK in Prüflösung (hier 3%ige NaCl-Lös.; Volumenverhältnis VPK/VPL = 1/1,6) 6 d PK-Lagerung in dicht geschlossenen Edelstahlbehältern bei (60 ± 2) °C und > 98 % rel. LF. (PK über Wasser) 1 d Abkühlung der Behälter mit PK auf (20 ± 2) °C	mindestens 12 KWL-Zyklen mit folgendem Einzelzyklusregime: 4 d Trocknungsphase bei 60°C (Beginn: Temperaturschock; Ende: PK-Temperatur auf (20 ± 2) °C) Beaufschlagung der PK-Oberseiten mit Prüflösung (je 3 PK mit entm. H <sub>2</sub> O und 3,6%iger NaCl-Lös.) 14 d Nebelphase bei 45 °C 3 d Frost-Tauwechselphase zwischen 20 °C und -20 °C mit abschließender PK-Temperatur auf (20 ± 2) °C für Messungen
Messregime für Indikatoren während + nach Lager.	Ermittlung nach 1, 3, 7, 14, 28 d, danach alle 4 Wochen bis zum 9. Monat	Ermittlung aller 4 Wochen bis zum 5. Monat	Messung nach jedem Wechsellagerungszyklus	Messung nach Frostphase bei jedem KWL-Zyklus (Prüflös. entfernt)
ε-Grenzwert [mm/m]	≥ 0,08 nach [10]	≥ 0,03 in Anlehnung an [9]	≥ 0,03 (3%ige NaCl-Lös.) nach [8]	≥ 0,07 (NaCl-L.); ≥ 0,06 (H <sub>2</sub> O) [19]

Tab. 4: Fortsetzung

Angaben zum beprobten BAB-Abschnitt										Prüfkörper					AKR-provozierende Lagerung								
Bezeichnung	Schadens-kategorie				Bau- und Entnahme-jahr	Bauweise		Fahrbahn-streifen		Platten-bereich		Schicht/Lage		Zylinder (∅ 10 cm, L = 25 cm)	Halb-schalen (25 x 15 x 7,5 [cm])	Prisma			Beton-verseuche		Performance-prüfungen		
	0	I	II	III		ein-schichtig	zwei-schichtig	SS	FS 1	Rand	Mitte	OB+UB	OB			UB	28 x 7,5 x 7,5 [cm]	25 x 40 x 10 [cm]	40 x 10 x 10 [cm]	40 °C	60 °C	60°C-BV. mit ext. Alkalizu	KWL
A4	-	-	-	X	7/2013	X	-	-	X	-	X	X	-	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-
A14-R1	-	-	X		2000/2013	-	X	X	-	-	X	-	X	-	-	X	-	X	-	X	-	X	-
A14-R2	-	-	-	X	2000/2013	-	X	X	-	-	X	-	X	-	-	X	-	X	-	X	-	X	-
A14-R3	X	-	-	-	2000/2013	-	X	X	-	-	X	-	X	-	-	X	-	X	-	X	-	X	-

Tab. 5a: Prüfkörperspezifische Prüfmatrix für AKR-provozierende Lagerungen in den beprobten BAB-Abschnitten



lagerungszyklen bei der Verwendung einer 3%igen NaCl-Lösung betrug 0,3 mm/m [8].

Bei der Klimawechsellagerung durchliefen alle Prüfkörper 12 KWL-Zyklen. Jeder KWL-Zyklus besteht dabei aus einer ca. 4-tägigen Trocknungsphase, einer 14-tägigen Nebelphase und einer 3-tägigen Frost-Tauwechselphase (Bild 24). Die Trocknungsphase wird mit einer Temperaturschockbeanspruchung eingeleitet. Nach der Trocknungsphase bei 60 °C und der sich anschließenden Abkühlung auf 20 °C werden jeweils drei Prüfkörper einer Prüfserie vergleichend mit entmineralisiertem Wasser bzw. einer 3,6%igen NaCl-Lösung beaufschlagt, die während der Nebel- und der Frost-Tauwechselphase auf dem Prüfkörper verbleibt.

Die beaufschlagte Tausalzmenge ist dabei so bemessen, dass in einem Zyklus ca. 360 g NaCl/m<sup>2</sup> in Form einer Lösung auf die Prüfkörperoberfläche appliziert werden. Wenn man nun unterstellt, dass mit einem modernen Streufahrzeug ca. 15 g/m<sup>2</sup> NaCl pro Einsatz auf den Fahrbahndeckenbeton aufgebracht wird, entspricht die in einem Zyklus aufgebrauchte Streusalzmenge ca. 24 Streueinsätzen.

Nach Beendigung der Frost-Tauwechselphase wird die Prüflösung auf den Prüfkörpern entfernt und anschließend deren Masse- und Längenänderung bestimmt. Die Bezugswerte für die Bewertung der Veränderung dieser Messgrößen werden, wie bereits vorstehend erwähnt, im ersten Zyklus nach der Trocknungsphase bestimmt. Zu Beginn der Trocknungsphase wird die zuvor entfernte Prüflösung wieder aufgebracht. Nach der Trocknungsphase werden die Prüfkörper mit neuen Prüflösungen beaufschlagt.

Als Beurteilungskriterium für das AKR-Restschädigungspotenzial nach Beendigung der KWL dient auch hier die Dehnung. Der Grenzwert für Bestandsbetone beträgt hierbei in Abhängigkeit von der Art der Beaufschlagung 0,6 mm/m (Wasser) und 0,7 mm/m (NaCl-Lösung) [19]. Zusätzlich wird der Dehnungsanstieg zwischen dem 6. und 8. KWL-Zyklus zur Bewertung herangezogen.

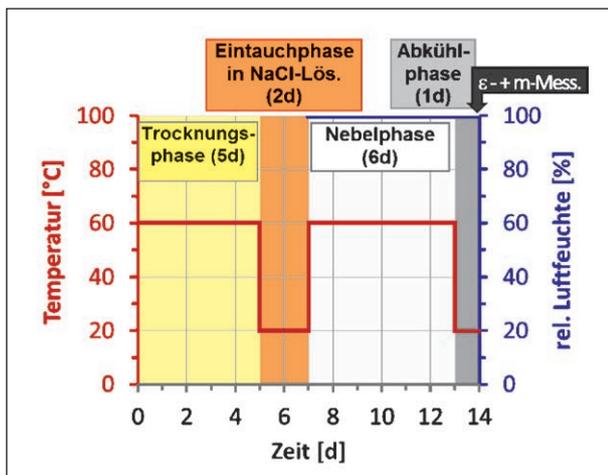


Bild 23: Lagerungsregime in einem Wechselzyklus im 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr

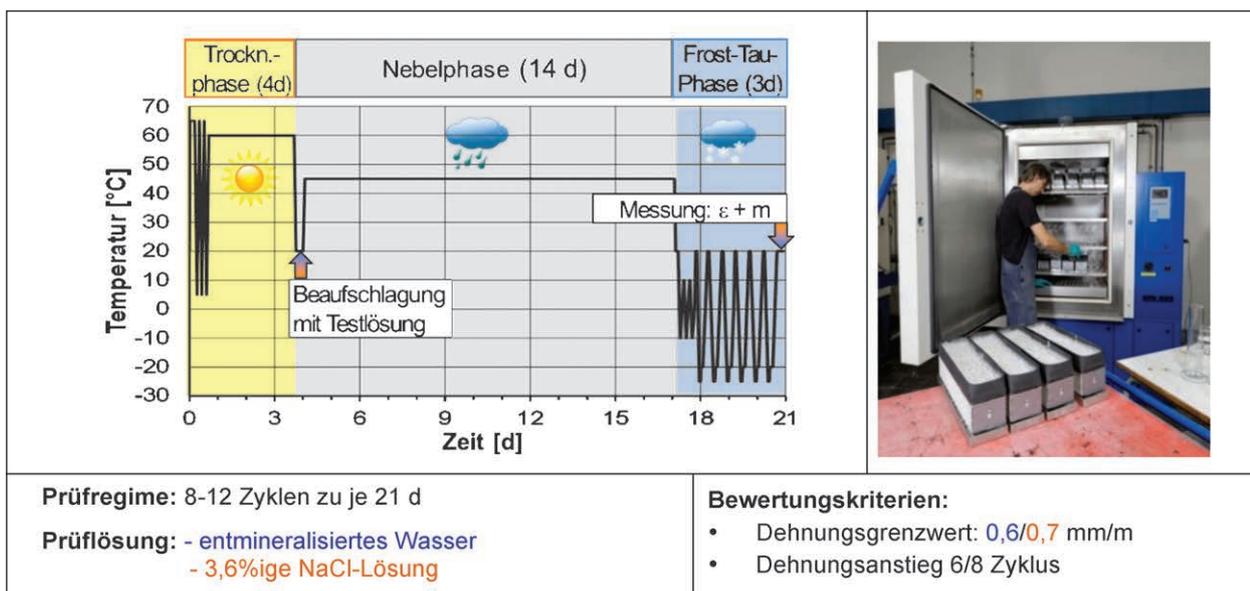


Bild 24: Prüfprozedere bei der KWL

### 3.6 Aufbauende Untersuchungen an Prüfkörpern nach AKR-provozierender Lagerung

Zur Verifizierung der Ergebnisse der Dehnungsmessungen nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen der Prüfkörper wurde einerseits die Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale mittels Dünnschliffmikroskopie und andererseits die Natrium-, Chlor- und Schwefelverteilung in verschiedenen PK-Schnittflächen mit LIBS analysiert. Die Basis hierfür bildete jeweils der Prüfkörper mit der höchsten Dehnung nach der jeweiligen AKR-provozierenden Lagerung. Auf eine weitergehende Beschreibung der Dünnschliffmikroskopie und von LIBS wird hier verzichtet, da sie den vorstehenden Kapiteln 3.4.3 und 3.4.4 entnommen werden kann. Vielmehr soll nachfolgend ausgehend vom Stand der Technik die Motivation für die durchgeführten Untersuchungen aufgezeigt werden.

So wird zurzeit in der Fachwelt vermehrt die Überlagerung der Schädigungsprozesse bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen diskutiert. Das betrifft beispielsweise die bereits in vorangegangenen BAST-Projekten [18, 19] erstmals aufgezeigte Überlagerung des AKR-Schädigungsprozesses mit der sekundären Ettringitbildung bei den AKR-provozierenden Lagerungen der Prüfkörper bei 60 °C. In diesem Kontext ist auch die Rolle der Tausalzbeaufschlagung bisher unzureichend geklärt. Ein weiterer, aber im Rahmen dieses Projektes nicht grundlegend zu bearbeitender Diskussionspunkt ist die Rolle der Frost-Tausalzbeanspruchung bei der Klimawechsellagerung. Eigene Untersuchungen zeigen, dass diese Beanspruchung zu einem signifikanten Dehnungsanteil bei der KWL führen können [41]. Weiterhin stellt sich die bisher völlig unbeantwortete Frage nach dem Einfluss der Prüfkörpergeometrie (z. B. Prisma oder Halbschale) auf die Dehnung und die mit ihr interagierende Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale bei den AKR-Performanceprüfungen.

Ein weiterer zentraler Diskussionspunkt ist die bereits im vorstehenden Kapitel 3.5.1 postulierte Behauptung, dass es beim 40°C- und 60°C-Betonversuch durch die Auslaugung von Alkalien aus dem Bestandsbeton mit zunehmender Prüfdauer zu einer Unterbewertung der Alkaliempfindlichkeit der langsam und spät reagierenden Gesteinskörnungen kommen kann. Ursächlich hierfür soll ein frühzeitig entstehender Alkalimangel sein. Diese Annahme beruht vor allem auf der chemischen Analyse des

Wassers über den die Prüfkörper bei 38 °C und 60 °C gelagert wurden [37]. Eine tiefenaufgelöste flächige Analyse des ausgelaugten Chlorids und vor allem Natriums bei Labor- und Bestandsbetonen steht noch aus und ist deshalb ein zentraler Untersuchungsgegenstand in diesem Vorhaben. Auch der bei den AKR-Performanceprüfungen stattfindende Tausalzeintrag in die Prüfkörper wurde bisher unzureichend untersucht. So wurde beim 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr lediglich der Chlorteil nasschemisch analysiert [8]. Der vor dem Hintergrund der AKR primär interessierende Natriumeintrag war bisher kein Untersuchungsgegenstand. Eigene im Rahmen eines BAST-Vorhabens [18] durchgeführte LIBS-Analysen zum Tausalzeintrag bei der Klimawechsellagerung zeigen, dass Natrium und Chlor in großen Mengen tief in den Prüfkörper eindringen. Vergleichend an Bohrkernen aus AKR-geschädigten Fahrbahndecken im Entnahmestand erfolgte LIBS-Analysen zeigen einen signifikant geringeren Tausalzeintrag. Es gilt nun, diese Erkenntnis durch adäquate LIBS-Analysen an weiteren BAB-Abschnitten zu überprüfen.

## 4 Ergebnisse und deren Auswertung

### 4.1 Charakterisierung der Bohrkerne und Prüfkörper im Entnahmestand

#### 4.1.1 Visuelle Begutachtung der Bohrkerne und Prüfkörper

Einen zusammenfassenden Überblick über den Befund der visuellen Begutachtung der Bohrkerne und Prüfkörper für alle Entnahmebereiche gibt die Tabelle 6. Eine weitergehende detaillierte Dokumentation ist der Anlage A2 zu entnehmen.

Bei allen beprobten Abschnitten wurden unabhängig von der AKR-Schadenskategorie Abwitterungen auf der Fahrbahnoberfläche festgestellt. Im Gegensatz dazu wurden mit zunehmender AKR-Schadenskategorie auf der Fahrbahnoberfläche vermehrt Risse vorgefunden.

Besonders aufschlussreich war die visuelle Begutachtung der Mantelflächen der Bohrkerne und Prüfkörper hinsichtlich der Art der hauptsächlich im Ober- und Unterbeton verwendeten Gesteinskörnung. Im Entnahmebereich A4 wurde als Hauptge-

Angaben zum beprobten BAB-Abschnitt										Ergebnis visueller Begutachtung des BK-Gefüges									
Bezeichnung	Schadens-kategorie				Bau- und Entnahmejahr	Bauweise		Fahrbahn-streifen		Stirnseite (Fahrbahn-oberfläche)		Mantelfläche						Bemerkung	
	0	I	II	III		ein- schichtig	zwei- schichtig	SS	FS 1	Risse	Abwitterungen	Hauptbestandteil grober Gesteinskörnung		Risse, parallel zur Fahrbahnoberfläche im Fugenbereich	Verteilung künstlicher Luftporen		Porenfüllungen		Reaktionsraum um Ge- steinskörnung
												OB	UB		gleichmäßig	ungleichmäßig			
A4	-	-	-	X	?/ 2013	X				Netz- risse	X	Granodiorit, Sandstein, Quarz		X	X	-	partiell	verein- zelt	geringer Gehalt an künstlichen Luftporen im Oberbeton
A14-R1	-	-	-	X	2000/ 2013	-	X	-	X	X	X	Basalt, Quarzit, Quarzsandstein, Feldspat	Quarzit, Quarz- sandstein, Rhyolith, Flint	X	X	-	partiell	verein- zelt	geringer Gehalt an künstlichen Luftporen in mittlerer Bohr- kernhöhe
A14-R2	-	-	-	X	2000/ 2013	-	X	-	X	X	X	Basalt, Quarzit, Quarzsandstein, Feldspat	Quarzit, Quarz- sandstein, Rhyolith, Flint	X	-	X	partiell	-	geringer Gehalt an künstlichen Luftporen in mittlerer Bohr- kernhöhe
								X	-	X	-	Basalt, Quarzit, Quarzsandstein	Quarzit, Quarz- sandstein, Flint, Rhyolith, Basalt	?	-	X	partiell	verein- zelt	
A14-R3	X	-	-	-	2000/ 2013	-	X	-	X	-	X	Basalt, Quarzit, Quarzsandstein, Feldspat	Basalt, Quarzit, Quarzsandstein, Rhyolith	-	-	X	-	-	
A14-GB-A	X				2000/ 2010	X	-	-	X	verein- zelt	verein- zelt	Rhyolith, Quarzit, Sandstein		X <sup>1)</sup>	X	-	-	verein- zelt	Repräsentativität ein- geschränkt, da BK- Entnahme nur aus Segment aus Plattenmitte
A14-GB-B		X			2000/ 2014	X	-	-	X	verein- zelt	verein- zelt	Rhyolith, Quarzit, Sandstein		X <sup>1)</sup>	X	-	-	verein- zelt	

<sup>1)</sup> Detektion bei Entnahme der Plattensegmente

Tab. 6: Überblick über die Ergebnisse der visuellen Begutachtung des Gefüges der Bohrkern- und Prüfkörper für alle beprobten BAB-Abschnitte

steinskörnung ein Granodiorit sowie als Nebenge- steinskörnung ein Sandstein und ein Quarz im Ober- und Unterbeton identifiziert.

Entgegen der ursprünglichen Annahme zeigte sich allerdings, dass bei den in zweischichtiger Bauweise ausgeführten Referenzstrecken A14-R1, A14-R2 und A14-R3 partiell unterschiedliche Gesteinsarten verwendet wurden. Das betrifft insbesondere den Unterbeton beim 1. Fahrstreifen. Während bei den Referenzstrecken A14-R1 und A14-R2 im Unterbeton vor allem Quarzit sowie Quarzsandstein, Rhyolith und Flint Einsatz fanden, wurde bei der Entnahmestelle A14-R3 primär ein Basalt verwendet. Damit ist die ursprüngliche Annahme, dass alle drei Referenzstrecken einem Baulos angehören und deshalb die gleiche Betonzusammensetzung besitzen, widerlegt. Weiterhin erklärt es auch die in den einzelnen Referenzstrecken vorgefundenen unterschiedlichen Schädigungszustände der Betonfahrbahn- decke.

In den Entnahmebereichen A14-GB-A und A14-GB-B wurden im Ober- und Unterbeton als Haupt-

gesteinskörnung ein Rhyolith sowie als Nebenge- steinskörnung ein Quarzit und ein Sandstein identi- fiziert.

Bei den drei zweischichtig ausgeführten Entnahme- bereichen der BAB A 14 R1, R2 und R3 schwankten die Schichtdicken des Oberbetons sehr stark. Bei der A14-R1 wurde für den Oberbeton eine minimale Schichtdicke von 60 mm, bei der A14-R3 sogar von nur 50 mm vorgefunden. Gemäß der zur Bauzeit gültigen ZTV-Beton-StB 93 sollte zudem der Anteil der gebrochenen Körnung (Edelsplitt) über 8 mm mindestens 50 M.-% und bezogen auf den Gesamt- anteil der Gesteinskörnung mindestens 35 M.-% betragen. Die visuelle Beurteilung ergab, dass diese Anforderungen bei allen drei Entnahmebereichen deutlich unterschritten werden.

Bei der visuellen Begutachtung der Mantelfläche der Bohrkern- und Prüfkörper aus dem Bereich der Querscheinfuge wurden bei allen beprobten BAB- Abschnitten mit AKR-Schäden Horizontalrisse fest- gestellt. Nähere Angaben hierzu sind Kapitel 4.1.2 zu entnehmen.

Auffallend war weiterhin, dass mit Ausnahme von A14-GB-A und A14-GB-B in allen Entnahmebereichen entweder ein zu geringer Gehalt oder eine ungleichmäßige Verteilung der künstlich eingeführten Luftporen vorgefunden wurde. Oft waren die Luft- und Verdichtungsporen mit weißlichen Reaktionsprodukten gefüllt. Weiterhin wurden makroskopisch Reaktionssäume identifiziert. Diese traten meist an den Korngrenzen des Flints auf.

#### 4.1.2 Analyse der Rissbildung im Fugenbereich

Im Rahmen der visuellen Begutachtung wurden die in den einzelnen BAB-Abschnitten im Fugenbereich entnommenen Bohrkern- und Plattensegmente auch auf mögliche Horizontalrisse unter Berücksichtigung

der Dübel- und Ankerlage untersucht. Da die Bohrkernentnahme vor Ort ausschließlich im Bereich der Querscheinfuge erfolgte, erlaubt die Bohrkernbegutachtung nur Rückschlüsse auf die Rissausbildung in diesem Fugenbereich. Die vollständige segmentweise Plattenentnahme hingegen ermöglicht darüber hinaus auch Aussagen zur Rissausbildung im Bereich der Längsfuge.

Die bei der visuellen Begutachtung der Mantelfläche der Bohrkern- identifizierten Rissverläufe zeigt exemplarisch Bild 25. Es ist erkennbar, dass sowohl eine als auch mehrere horizontale Rissebenen vorgefunden wurden.

Bei der segmentweisen Plattenentnahme war die Rissausbildung im Fugenbereich bereits vor Ort durch die Dunkelfärbung augenscheinlich. Dies ver-

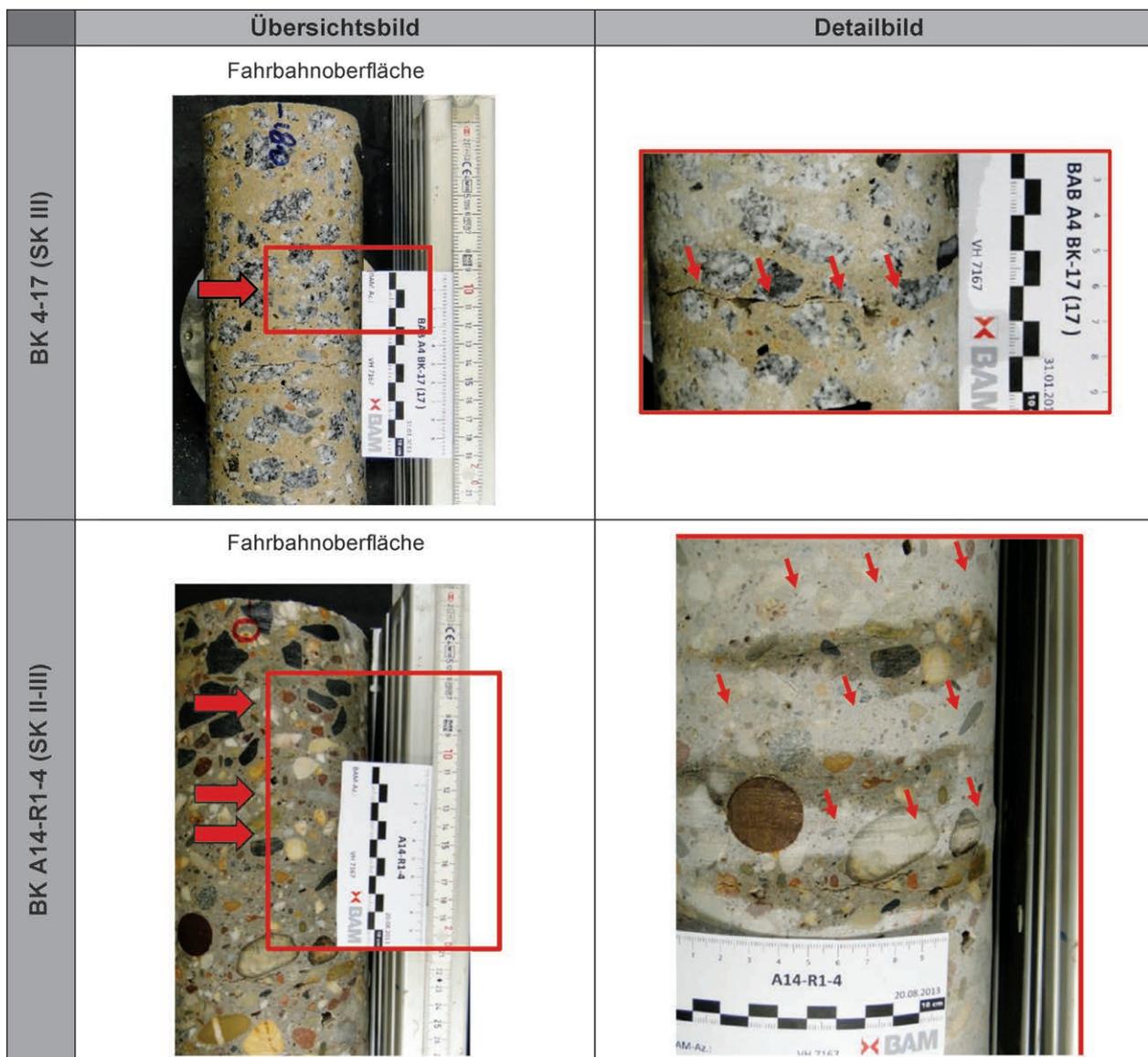


Bild 25: Typische bei der visuellen Begutachtung der Bohrkernmantelfläche identifizierte Rissverläufe



Bild 26: Fotodokumentation zur horizontalen Rissbildung im Bereich der Querschein- und Längsfugen in der Ebene der Dübel und Anker

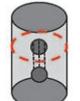
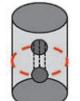
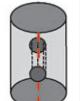
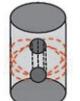
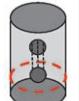
anschaulicht Bild 26 bei der Plattenentnahme 2010 und 2014 (Entnahmebereiche A14-GB-A und A14-GB-B). Unverkennbar ist, dass in beiden Fällen umlaufend ein Horizontalriss in der Dübel- und Anker-ebene bei der Querschein- und Längsfuge verläuft.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Rissbefunde bei allen Entnahmebereichen (1. Fahrstreifen) gibt die Tabelle 7. Dabei werden in Abhängigkeit von der Lage der Rissebene zur Oberfläche der Betonfahrbahndecke die im Kopf der Tabelle 7 zeichnerisch dargestellten fünf Risskonfigurationen an der Bohrkernmantelfläche unterschieden. So können die Rissebenen parallel, senkrecht und geneigt zur Oberfläche der Betonfahrbahndecke über, unter und in der Dübelhöhe verlaufen.

Es zeigt sich, dass mit Ausnahme von A14-R3 (Schadenskategorie 0) bei allen Entnahmebereichen vor allem quasi parallel zur Fahrbahnoberfläche verlaufende Horizontalrisse vorgefunden wurden. Bemerkenswert ist dabei, dass bei den Entnahmebereichen A14-R1 und A14 R2 (Schadenskategorien II-III und III) drei Rissebenen über die

Höhe der Betonfahrbahndecke im Bereich der Querscheinfuge identifiziert wurden. Bei dem ebenfalls in die Schadenskategorie III einzuordnenden Entnahmebereich A4 trat jedoch nur eine Rissebene in der Dübelhöhe auf. Das lässt den Schluss zu, dass sich nicht zwingend mit zunehmender Schadenskategorie die Anzahl der horizontal verlaufenden Rissebenen erhöht. Bemerkenswert ist aber auch, dass bereits bei den Fahrbahndecken mit geringen sichtbaren AKR-Indikatoren auf der Fahrbahnoberfläche (Entnahmebereiche A14-GB-A (SK 0-I) und A14-GB-B (SK I-II)) eine horizontale Rissebene in der Höhe des Dübels und Ankers im Bereich der Querschein- und Längsfuge vorhanden war.

Resümierend kann ausgehend von der sehr begrenzten Stichprobenzahl festgestellt werden, dass alle AKR-geschädigten Entnahmebereiche Horizontalrisse aufweisen. In der Regel verläuft dabei die Rissebene im Bereich der Stabdübel parallel zur Oberfläche der Betonfahrbahndecke.

Angaben zum beprobten BAB-Abschnitt										Risscharakterisierung					Anmerkungen		
Bezeichnung	Schadens-kategorie				Bau- und Ent-nahmehjahr	Bauweise		Fahrbahn-streifen		Prüfkörper-bezehn.							
	0	I	II	III		ein-schichtig	zwei-schichtig	SS	1. FS								
A4	-	-	-	X	2013	X	-	-	X	BK 4-2	-	-	X	-	-	BK-Entnahme zwischen Dübeln	
	-	-	-	-		X	-	-	-	X	BK 4-17	-	X	-	-		-
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 4-19	-	X	-	-		-
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 4-20	-	-	-	X		-
A14-R1	-	-	-	X	2000/2013	-	X	-	X	BK 14-R1-2	X	X	-	-	-	2 Rissebenen	
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R1-3	-	X	-	-	-	BK-Entnahme zwischen Dübeln
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R1-4	X	X	-	-	X	
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R1-5	-	X	-	-	-	
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R1-6	-	X	-	-	-	
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R1-7	X	-	-	-	-	
-	-	-	-	X	-	-	-	-	BK 14-R1-8	-	X	-	-	-			
A14-R2	-	-	-	X	2000/2013	-	X	-	X	BK 14-R2-2	X	X	-	-	X	3 Rissebenen	
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R2-3	X	X	-	-	-	2 Rissebenen
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R2-4	X	X	-	-	-	2 Rissebenen
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R2-5	X	-	-	-	-	BK-Entnahme zwischen Dübeln
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R2-6	X	-	-	-	-	
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R2-7	-	X	-	-	-	
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R2-8	-	X	-	-	-	
	-	-	-	-		X	-	-	-	-	BK 14-R2-8	-	X	-	-	-	
A14-R3	X	-	-	-	2000/2013	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-		
A14-GB-A	X	-	-	-	2000/2010	X	-	-	X	-	umlaufender Horizontalriss in Dübel- und Ankerebene bei Querschein- und Längsfugen					visuelle Begutachtung bei Plattentnahme	
A14-GB-B	-	X	-	-	2000/2014	X	-	-	X	-							

Tab. 7: Überblick über Rissbefunde im Bereich der Querscheinfuge für alle beprobten BAB-Abschnitte

#### 4.1.3 Mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung

Auf die Darstellung der Ergebnisse der Dünnschliffmikroskopie im Entnahmestand wird an dieser Stelle verzichtet. Vielmehr sei hier auf Kapitel 4.3.1 verwiesen. Dort werden die Ergebnisse der Dünnschliffmikroskopie im Entnahmestand und nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen ganzheitlich aufgezeigt und diskutiert.

#### 4.1.4 Analyse des Tausalzeintrags

Einen zusammenfassenden Überblick über die mit LIBS ermittelte Eindringtiefe von Natrium und Chlorid in die Betonfahrbahndecke aller beprobten BAB-Abschnitte im Entnahmestand gibt die Tabelle 8. Beim BAB-Abschnitt A4 wurde an der Probe aus dem Bereich der Querscheinfuge des 1. Fahrstreifens jeweils für Natrium und Chlorid eine mittlere Eindringtiefe von 30 mm bestimmt. Bei den aus

der Plattenmitte entnommenen Proben der Referenzstrecken A14-R1, A14-R2 und A14-R3 wurden beim Natrium mit 40 bis 45 mm und beim Chlorid mit 50 bis 60 mm jeweils vergleichbare mittlere Eindringtiefen ermittelt. Bemerkenswert ist bei den zeitlich versetzt in den Entnahmebereichen A14-GB-A und A14-GB-B aus dem 1. Fahrstreifen in der Plattenmitte entnommenen Proben, dass sich vermutlich durch längere Nutzungsdauer und den damit einhergehenden erhöhten winterlichen Tausalzeintrag die mittlere Eindringtiefe von Natrium von 15 mm auf 40 mm und von Chlorid von 20 mm auf 40 mm erhöht hat. Die exakten Flächenscans und die daraus ermittelten Tiefenprofile sind für alle Einzelmessungen der Anlage A4 zu entnehmen.





signifikante Verminderung der Spaltzugfestigkeit über die gesamte Höhe der Fahrbahnplatte zur Folge hat.

### 4.2 Ermittlung des AKR-Restschädigungspotenzials mit verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen

Die detaillierten Ergebnisse der Dehnungsmessungen bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen der hierfür aus den sechs beprobten BAB-Abschnitten gewonnenen Prüfkörper sind der Anlage A4 zu entnehmen. Darauf aufbauend geben die Tabellen 10a und 10b einen zusammenfassenden Ergebnisüberblick. So ist hier ausgehend von den relevanten Angaben zum jeweils beprobten BAB-Abschnitt und der verwendeten Prüfkörperart mit Ausweisung der jeweils berücksichtigten Betonschichten bzw. -lagen der Befund der Dehnungsmessung für die jeweilige AKR-provozierenden La-

gerung vergleichend dargestellt. Dabei erfolgt die Bewertung der verfahrensspezifisch ermittelten mittleren Dehnung hinsichtlich des jeweiligen Grenzwertes aus Anschaulichkeitsgründen mittels eines Ampelsystems. So sind grün hinterlegte Bereiche ein Indiz für eine deutliche Unterschreitung des jeweiligen Grenz- bzw. Richtwertes der Dehnung. Rot hinterlegte Bereiche hingegen weisen auf ein Erreichen bzw. Überschreiten des jeweiligen Dehnungsgrenzwertes hin. Ist der Bereich gelb hinterlegt, liegt der ermittelte mittlere Dehnungswert nur geringfügig unter dem jeweiligen Grenzwert. Vor diesem Bewertungshintergrund ergibt sich folgendes Bild bei den einzelnen BAB-Abschnitten:

- A4 (SK III)

Die ausschließlich ganzheitlich für den Ober- und Unterbeton ermittelten Dehnungen ergeben ein differenziertes Bild bei den 40°C- und 60°C-Betonversuchen einerseits und den Performanceprüfungen andererseits. Während das Restschädigungspotenzial aufgrund der Ergeb-

Angaben zum beprobten BAB-Abschnitt										Prüfkörper					AKR-provozierende Lagerung									
Bezeichnung	Schadens-kategorie				Bau- und Entnahme-jahr	Bauweise		Fahrbahn-streifen		Platten-bereich		Schicht/Lage			Zylinder (∅ 10 cm, L = 25 cm)	Halb-schalen (25 x 15 x 7,5 [cm])	Prisma			Beton-verseuche		Performance-prüfungen		
	0	I	II	III		ein-schichtig	zwei-schichtig	SS	1. FS	Rand	Mitte	OBA-UB	OB	UB			28 x 7,5 x 7,5 [cm]	25 x 25 x 25 [cm]	40 x 40 x 20 [cm]	40 °C	60 °C	60°C-BV. mit ext. Alkalizuf. (3%ige NaCl-Lösung)	NaCl-Lös. H <sub>2</sub> O	KWL
A4	-	-	-	X	7/2013	X	-	-	X	-	X	X	-	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-
A14-R1	-	-	X	-	2000/2013	-	X	X	-	-	X	-	X	-	-	-	X	-	X	-	-	X	X	X
A14-R2	-	-	-	X	2000/2013	-	X	X	-	-	X	-	X	-	-	-	X	-	X	-	-	X	X	X

Legende für Befund der AKR-provoz. Lagerung:

- X starke Unterschreitung des Dehnungsgrenzwert
- X geringe Unterschreitung des Dehnungsgrenzwert
- X ≥ Dehnungsgrenzwert

Tab. 10a: Befund der AKR-provozierenden Lagerungen in den beprobten BAB-Abschnitten



- A14-R2 (1. FS: SK III)

Die adäquat wie bei der Entnahmestelle A14-R1 ausschließlich separat für den Ober- und Unterbeton ermittelten Dehnungen bei den Betonversuchen und Performanceprüfungen liegen deutlich unter den jeweiligen Grenzwerten. Aus diesem Grund ist kein erhöhtes Restschädigungspotenzial gegeben. Das wirft die Frage auf, warum im 1. Fahrstreifen stark ausgeprägte AKR-Schäden visuell vorgefunden wurden und der Beton des Standstreifens kein erhöhtes AKR-Restschädigungspotenzial aufweist. Die Ursache hierfür konnte bisher nicht geklärt werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit kann der Einsatz unterschiedlicher Gesteinskörnungen im Ober- und Unterbeton in beiden Fahrbahnstreifen ausgeschlossen werden.

- A14-R3 (SK 0)

Alle bei den Betonversuchen und Performanceprüfungen ermittelten Dehnungen an den Unter- und Oberbetonprüfkörpern liegen weit unter den jeweiligen Grenzwerten. Merkmale, die auf ein erhöhtes Restschädigungspotenzial infolge AKR deuten, waren nicht vorhanden.

- A14-GB-A (SK 0-I)

Die hier ausschließlich mittels Dehnungsmessungen an Halbschalen erfolgte ganzheitliche Bewertung des Restschädigungspotenzials des Ober- und Unterbetons bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen zeigt ähnlich wie bei der Entnahmestelle A4, dass die Ergebnisse der Betonversuche auf ein deutlich geringeres Restschädigungspotenzial als bei den Performanceprüfungen schließen lassen. Anzumerken ist in diesem Kontext, dass beim 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr nach 9 Zyklen und bei der Klimawechsellaagerung mit NaCl- und H<sub>2</sub>O-Beaufschlagung nach ca. 6 Zyklen der jeweilige Dehnungsgrenzwert überschritten wird. Vor diesem Hintergrund führt auch die Verminderung der Zyklenzahl bei der Klimawechsellaagerung in Abhängigkeit von der avisierten Restnutzungsdauer zu keiner signifikanten Verminderung des Restschädigungspotenzials. Die Richtigkeit dieser Prognose wird durch den visuellen Befund der Betonfahrbahndecke dieses BAB-Abschnitts nach einer vierjährigen weiteren Nutzung bestätigt. So zeigte sich, dass die für eine AKR typischen Schäden

weiter vorangeschritten sind. Dies hatte eine Hochstufung der AKR-Schadenskategorie von 0-I auf I-II zur Folge. Es stellte sich nun die Frage, welche Auswirkungen diese verstärkte Schädigung auf die Dehnungen bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen hat. Zu diesem Zweck wurde eine weitere Fahrbahnplatte dieses BAB-Abschnitts segmentweise ausgebaut und anschließend im Labor weitergehend untersucht. Die Ergebnisse der Dehnungsmessungen bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen werden nachfolgend aufgezeigt (A14-GB-B).

- A14-GB-B (SK I-II)

Aus Vergleichbarkeitsgründen wurden auch hier zunächst die Dehnungsmessungen an Halbschalen zur ganzheitlichen Bewertung des Restschädigungspotenzials des Ober- und Unterbetons bei den Betonversuchen und Performanceprüfungen durchgeführt. Die Dehnungsmessungen zeigen, dass der Schädigungsfortschritt durch die weitere Nutzung des BAB-Abschnitts keine signifikanten Auswirkungen auf die Bewertung des Restschädigungspotenzials bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen hat. So lassen auch hier die beim 40°C- und 60°C-Betonversuch ermittelten Dehnungen auf kein erhöhtes Restschädigungspotenzial schließen. Bei den beiden Performanceprüfungen ist dieses jedoch eindeutig signifikant erhöht.

Zur getrennten Verifizierung des Schädigungspotenzials vom Ober und Unterbeton wurden Prismen aus beiden Schichten bzw. Lagen der Betonfahrbahndecke verschiedenartig AKR-provozierend gelagert. Bemerkenswert ist hierbei, dass sowohl bei den Betonversuchen als auch bei den Performanceprüfungen der jeweilige Dehnungsgrenzwert beim Unterbeton und nicht beim Oberbeton überschritten wird. Das lässt eine Differenzierung des Restschädigungspotenzials beider Schichten bzw. Lagen der Betonfahrbahndecke zu. So ist dieses offensichtlich ausschließlich beim Unterbeton signifikant erhöht.

Interessant ist in diesem Kontext auch ein Vergleich der bei den Performanceprüfungen ermittelten mittleren Dehnungswerte der Halbschalen (ganzheitliche Erfassung des Ober- und Unterbetons) und der Prismen aus dem Ober- bzw.

Prüfkörperart	mittlere Dehnung der Prüfkörper nach		
	KWL (12 Zyklen) mit Beaufschlagung von		60°C-BV mit ext. Alkali-zufuhr (10 Zykl., 3%ige NaCl-L.)
	NaCl-Lösung	H <sub>2</sub> O	
[mm/m]			
Halbschale (OB + UB)	1,727	1,073	0,339
Prisma (OB)	0,371	0,353	0,167
Prisma (UB)	0,874	0,662	0,243

Tab. 11: Ergebnisvergleich der in den Performanceprüfungen ermittelten Dehnungen bei ganzheitlicher und separater Betrachtung des Ober- und Unterbetons am Beispiel der Entnahmestelle A14-GB-B

Unterbeton (Tabelle 11). Es ist ersichtlich, dass bei beiden Performanceprüfungen an Halbschalen deutlich höhere Dehnungen bestimmt wurden als an den Prismen.

Das legt die Vermutung nahe, dass die Prüfkörpergeometrie und die Orientierung der Prüfkörper (vertikal oder horizontal zur Fahrbahnoberfläche) auch maßgebenden Einfluss auf das Dehnungsverhalten ausüben. Dies wiederum wirft die Frage auf, ob die bisherige Bewertung des AKR-Restschädigungspotenzials mit einem einheitlichen Dehnungsgrenzwert unabhängig von den vorstehenden Prüfkörperparametern zukünftig sinnvoll ist.

Resümierend zu den vorstehenden Bewertungen der Dehnungen bei den einzelnen BAB-Abschnitten bei den Betonversuchen und Performanceprüfungen stellt sich nun die Frage, ob die erhöhte Dehnung der Prüfkörper bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen auf eine alleinige AKR zurückzuführen ist. Auch ist die Analyse des Natriumeintrags in diesem Kontext von zentralem Interesse. Die folgenden aufbauenden Untersuchungen sollen hierüber Aufschluss geben.

### 4.3 Aufbauende Untersuchungen an Prüfkörpern nach AKR-provozierender Lagerung

#### 4.3.1 Mikroskopische Analyse der AKR- und SEB-Ausprägung

Die detaillierten Ergebnisse der Dünnschliffmikroskopie vor und nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen der Prüfkörper sind für

die einzelnen beprobten BAB-Abschnitte den Anlagen A3.1 (A4, A14-R1, A14-R2, A14-R3) und A3.2 (A14-GB-A, A14-GB-B) zu entnehmen. Aufbauend darauf geben die Tabellen 12a bis 12c einen zusammenfassenden Überblick über alle Befunde der Dünnschliffmikroskopie. Zum besseren Verständnis der Befunde werden diesen die Angaben zum beprobten BAB-Abschnitt sowie der Herkunft, der Form und dem Beanspruchungszustand der Prüfkörper vorangestellt. Zusätzlich wird die jeweilige Herkunft des Dünnschliffs (aus Ober- oder Unterbeton) aufgezeigt. Der Befund der Dünnschliffmikroskopie selbst gibt zunächst Aufschluss über die dort vorgefundenen Hauptbestandteile der Gesteinskörnungen. Dabei wird zwischen gebrochenem Festgestein und Lockergestein (gerundet) unterschieden. Weiterhin beinhaltet der Befund eine differenzierte Bewertung der Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale mit zusätzlicher Farbcodierung. Anzumerken ist, dass in der Regel aus jedem Prüfkörper nur ein Dünnschliff gewonnen wurde und deshalb die Repräsentativität des Befundes unter Umständen eingeschränkt sein kann. Auch sei darauf aufmerksam gemacht, dass bei den Dünnschliffen aus dem Diagnosebohrkern eine stärkere Ausprägung der Schadensmerkmale gegeben ist als bei den Dünnschliffen von Prüfkörpern aus der Plattenmitte. Dies ist auf einen schnelleren Schädigungsfortschritt im Plattenrandbereich zurückzuführen.

Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass bei den rot hinterlegten Gesteinskörnungen eindeutig nachgewiesen werden konnte, dass aus dieser das AKR-Gel stammt. Zur Verbesserung der Anschaulichkeit wurde in den Tabellen 12a bis 12c neben dem Befund der Dünnschliffmikroskopie auch der Befund der Dehnungsmessungen farbcodiert aufgeführt.

Vor dem vorstehend geschilderten Hintergrund ergibt sich für die einzelnen BAB-Abschnitte folgendes Bild:

- A4 (SK III)

Als gebrochenes Festgestein wurde beim Unter- und Oberbeton Granodiorit verwendet. Als Lockergesteine wurden in den Dünnschliffen Quarzit, Sandstein und Kieseliefer identifiziert.

Bereits im Dünnschliff des Diagnosebohrkerns aus dem Fugenkreuz (Entnahmezustand) wurden im Oberbeton punktuell und im Unterbeton häufig eindeutige Merkmale für eine AKR und eine SEB vorgefunden.

Angaben zum beprobten BAB-Abschnitten				Prüfkörper										Beanspruchungs-zustand des PK's				Dünnschliffmikroskopie										Befund der Dehnungsmessun- gen der AKR-prov. Lagerung <sup>1</sup>									
Bezeichnung	Schadens- kategorie			Bau- und Entnahme- jahr	Bau- weise		Herkunft			Form							Angaben zum DS				Befund						Ausprä- gung der										
	0	I	II		ein-	zwei-	Fahrbahn- streifen	Platten- bereich	Schicht/ Lage	Prisma							Her- kunft	Bezeichnung	Hauptbestandteile der GK gebrochen			gerundet			AKR	SEB											
	III	schichtig	SS		FS 1	Fugenkreuz	Mitte	OB+UB	OB	UB	Zylinder	Halbschalen	28 x 7,5 x 7,5 [cm]	25 x 10 x 10 [cm]	40 x 10 x 10 [cm]	Entnahmezustand			40°C-Betonversuch	60°C-BV + ext. Alkalizur. (3 %ige NaCl-L)	NaCl-Lösung	H <sub>2</sub> O	OB	UB			Rhyolith		Basalt	Granodiorit	Grauwacke	Quarzit	Sandstein	Kieselschiefer	Flint	Kalkstein	Merkmale
A4	-	-	-	X	?	2013	X	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	4-4-o	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+			
	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	4-4-u	-	X	-	-	-	-	-	++	++				
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	4-13	-	-	-	-	-	-	-	-	+	++			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4-6-W	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4-14-S	-	-	-	-	-	-	-	-	++	++			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4-14-S	-	-	-	-	-	-	-	-	+	++			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4-15-W	-	-	-	-	-	-	-	-	++	++			
A14-R1	-	-	-	X	2000/2013	-	X	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	14-1-6-o	X	X	-	-	X	X	-	-	++	+			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	14-1-6-u	X	-	-	-	X	X	-	-	++	++			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	14-1-26-OA	-	-	-	-	X	X	-	-	X	+	+		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	14-1-26-UA	X	-	-	-	X	X	-	-	X	+	+		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	14-1-23-OA	-	-	-	-	X	X	-	-	X	+	+		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-	14-1-23-UB	-	-	-	-	X	X	-	-	-	+	+		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-	14-1-25-OB	x	-	-	-	X	X	-	-	X	+	+		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	14-1-25-UB	X	-	-	-	X	X	-	-	X	-	+	+	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	14-1-18-OB	-	-	-	-	-	-	X	-	-	++	+		
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	14-1-18-OA	-	-	-	-	-	-	-	-	++	+			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-1-16-US	-	-	-	-	-	X	X	-	-	+	+			
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-1-20-UW	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	++			

Legende  
X Herkunft des AKR-Gels im Dünnschliff  
- Kein Merkmal erkennbar  
+ punktuell eindeutige Merkmale  
++ häufig eindeutige Merkmale  
+++ vorhandene Merkmale im betonschädigenden Ausmaß  
<sup>1</sup> Farbcodierung analog Tabelle 9

Tab. 12a: Ergebnis der Dünnschliffmikroskopie der Prüfkörper aus den beprobten BAB-Abschnitten A4 und A14-R1 vor und nach verschiedenartiger AKR-provozierender Lagerung

Die Dünnschliffe, die aus den Prüfkörpern (Plattenmitte) nach dem 40°C- und 60°C-Betonversuch gewonnen wurden, wiesen keine oder nur vereinzelt AKR- und SEB-Merkmale auf. Dies deckt sich mit den in den Betonversuchen ermittelten geringen Dehnungen. Im Gegensatz dazu wurden bei den Dünnschliffen nach den Performanceprüfungen häufig eindeutige Merkmale einer AKR und SEB vorgefunden. Auch dies korreliert mit den bei den Performanceprüfungen ermittelten hohen Dehnungen.

• A14-R1 (SK II-III)

In den Dünnschliffen wurde als gebrochenes Festgestein im Ober- und Unterbeton ein Rhyolith identifiziert. Im Oberbeton wurde zusätzlich ein Basalt vorgefunden. Als Lockergesteine wurden in den Dünnschliffen des Ober- und Unter-

betons Quarzit, Sandstein und Kalkstein sowie vereinzelt Flint identifiziert.

Im Dünnschliff des Ober- und Unterbetons des Diagnosebohrkerns (Entnahmezustand) wurden häufig eindeutige AKR-Merkmale festgestellt. Die AKR wird dabei im Oberbeton punktuell und im Unterbeton häufig durch eine SEB überlagert. Bemerkenswert ist, dass beim Dünnschliff des Unterbetons nachgewiesen werden konnte, dass das AKR-Gel aus dem Rhyolith, dem Sandstein und dem Flint stammt.

In allen nach dem 40°C- und 60°C-Betonversuch aus dem Ober- und Unterbeton gewonnen Dünnschliffen sind nur punktuell eindeutige AKR- und SEB-Merkmale nachweisbar. Dies korreliert auch mit den moderaten Dehnungen bei beiden Betonversuchen. Bemerkenswert ist, dass in den Dünnschliffen aus den Prismen nach

Angaben zum beprobten BAB-Abschnitten					Prüfkörper										Beanspruchungs-zustand des PK's			Dünnschliffmikroskopie										Befund der Dehnungsmessun-gen der AKR-prov. Lagerung 1							
Bezeichnung	Schadens-kategorie				Bau- und Entnahme-jahr	Bau-weise		Herkunft			Form							KWL	Angaben zum DS		Befund								Ausprä-gung der						
	0	I	II	III		ein-	zwei-	Fahrbahn-streifen	Platten-bereich	Schicht-/Lage	Prisma			Her-kunft	Bezeichnung	Hauptbestandteile der GK gebrochen				gerundet				AKR	SEB										
	schichtig		SS	FS 1		Fugenkreuz	Mitte	OB+UB	OB	UB	Zylinder	Halbschalen	28 x 7,5 x 7,5 [cm]			25 x 10 x 10 [cm]	40 x 10 x 10 [cm]		Entnahmezustand	40°C-Betonversuch	60°C-BV + ext. Alkalizuf.	3 %ige NaCl-L.	H <sub>2</sub> O	OB	UB	Rhyolith	Basalt		Granodiorit	Grauwacke	Quarzit	Sandstein	Kieselschiefer	Flint	Kalkstein
A14-R2	-	-	-	X	2000/2013	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	14-2-6-o	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	++	++	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	14-2-6-u	X	X	-	X	-	-	-	-	-	++	+	
	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	14-2-22-OB	X	-	-	X	X	-	-	-	-	-	+	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-2-22-UB	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	+	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	14-2-26-OA	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-2-22-UA	-	X	-	X	X	-	X	X	-	-	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-2-21-OA	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-2-21-UA	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	+	-
	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	14-2-23-OB	X	X	-	X	X	-	X	X	-	-	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-2-23-UB	X	X	-	X	X	-	X	X	-	-	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-	14-2-20-OS	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	+	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-2-20OW	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-2-28-US	X	X	-	X	X	-	X	X	-	-	+	+	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-2-28-UW	-	X	-	X	X	-	X	X	-	-	+	+	
A14-R3	-	-	-	-	2000/2013	-	X	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	14-3-6o	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-6u	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-24-OA	X	X	-	-	X	-	-	-	-	-	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-26-UA	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-23-OA	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-23-UA	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	++
	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-23-OB	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	+	
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-23-UB	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-18-OB	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-18-OA	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	+	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-16-UB	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	+
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14-3-16-UA	-	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	++

Legende  
X Herkunft des AKR-Gels im Dünnschliff  
- Kein Merkmal erkennbar  
+ punktuell eindeutige Merkmale  
++ häufig eindeutige Merkmale  
+++ vorhandene Merkmale im betonschädigenden Ausmaß

1 Farbcodierung analog Tabelle 9

Tab. 12b: Ergebnis der Dünnschliffmikroskopie der Prüfkörper aus den beprobten BAB-Abschnitten A14-R2 und A14-R3 vor und nach verschiedenartiger AKR-provozierender Lagerung

dem 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr auch nur vereinzelt eindeutige AKR- und SEB-Merkmale vorgefunden wurden. Allerdings stimmt dies mit den moderaten Dehnungen der Prismen des Ober- und Unterbetons bei dieser Performanceprüfung überein. Andererseits ist erkennbar, dass die hohen Dehnungen der Prismen aus dem Oberbeton bei der Klimawechsellagerung bei einer Beaufschlagung mit einer NaCl-Lösung mit einer verstärkten AKR einhergehen.

- A14-R2 (1. FS: SK III)  
 In den Dünnschliffen wurde als gebrochenes Festgestein im Ober- und Unterbeton ein Rhyolith und ein Basalt identifiziert. Als Lockergesteine wurden in den Dünnschliffen vor allem Quarzit, Sandstein, Kalkstein und vereinzelt Flinte vorgefunden.  
 Im Dünnschliff des Ober- und Unterbetons des Diagnosebohrkerns aus dem 1. Fahrstreifen (Entnahmezustand) wurden häufig eindeutige AKR-Merkmale vorgefunden. Diese gingen beim Oberbeton mit einer gehäuft und beim Unter-

beton mit einer vereinzelt auftretenden SEB einher. Auffällig war bei den Dünnschliffen des Ober- und Unterbetons aus dem 1. Fahrstreifen die Anordnung der künstlich eingeführten Luftporen. Vielfach war eine Anreicherung der Luftporen unter den groben Gesteinskörnern erkennbar, die teilweise mit einer Rissbildung einhergehen (siehe Anlage A4.1, Tabelle 6.2) Im Gegensatz dazu wurden in den Dünnschliffen des Ober- und Unterbetons, die aus Bohrkernen aus der Plattenmitte des Standstreifens gewonnen wurden, keine oder nur vereinzelt AKR- und SEB-Merkmale identifiziert. Auch dieser Befund korreliert mit dem Ergebnis der Dehnungsmessungen.

• A14-R3 (SK 0)

Die Betonzusammensetzung in diesem BAB-Abschnitt unterscheidet sich grundlegend von der der anderen beiden Referenzabschnitte A14-R1 und R14-R2. So wurde in den Dünnschliffen des Ober- und Unterbetons als gebrochene Gesteinskörnung vor allem Basalt, mitunter ein Rhyolith und eine Grauwacke vorgefunden. Als Lockergesteine wurden im Ober- und Unterbeton Quarzit und Sandstein sowie vereinzelt Flint und Kalkstein identifiziert.

Ähnlich wie beim BAB-Abschnitt A14-R2 wurden in den Dünnschliffen des Ober- und Unterbetons, die aus ausgewählten Prüfkörpern nach

Angaben zum beprobten BAB-Abschnitt					Prüfkörper										Beanspruchungszustand des PK's				Dünnschliffmikroskopie										Befund der Dehnungsmessungen der AKR-prov. Lagerung <sup>1</sup>									
Bezeichnung	Schadens-kategorie			Bau- und Entnahme-jahr	Bau-weise ein- / zwei-schichtig	Herkunft			Form							KWL	Angaben zum DS		Befund								Ausprägung der AKR / SEB Merkmale											
	0	I	II			III	Fahrbahn-streifen	Platten-bereich	Schicht/ Lage	Prisma							Her-kunft	Bezeichnung	Hauptbestandteile der GK gebrochen / gerundet																			
	SS	FS 1	Fugenkreuz			Mitte	OB+UB	OB	UB	Zylinder	Halbschalen	28 x 7,5 x 7,5 [cm]	25 x 10 x 10 [cm]	40 x 10 x 10 [cm]	Entnahmezustand		40°C-Betonversuch	60°C-BV + ext. Alkalizuf. (3 %ige NaCl-L)	NaCl-Lösung	H <sub>2</sub> O	OB	UB	Rhyolith	Basalt	Granodiorit	Grauwacke		Quarzit		Sandstein	Kieselschiefer	Flint	Kalkstein					
A14-GB-A	X			2000/2010	X		-	X	X	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	GB-A-MIK	X	-	-	X	X	X	X	-	+	+						
							X	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	GB-A-NK1	X	-	-	X	X	X	X	-	+	+		
							-	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-A-RL1-W	X	-	-	X	X	X	X	-	+	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	X	-	-A-RL1-S	X	-	-	X	X	-	X	-	+	++
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-	-A-KW-2S	X	-	-	X	X	X	X	-	+++	++
A14-GB-B	X			2000/2014	X		-	X	X	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	-PR-MIK-O	X	-	-	X	X	X	X	-	+	+					
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PR-MIK-U	X	-	-	X	X	X	X	-	++	++	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-MIK-O	X	-	-	X	X	-	X	-	-	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-NK-3-O	X	-	-	X	X	-	X	-	+	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-NK-1-O	X	-	-	X	X	-	X	-	+	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-NK-1-U	X	-	-	X	-	X	X	-	++	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-RL-1-W	X	-	-	X	X	-	X	-	+	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-RL-3W-O	X	-	-	X	X	-	-	-	+	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-RL-3W-U	X	-	-	X	X	-	X	-	++	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-RL-1-S	X	-	-	X	X	-	-	++	++		
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-RL-2-SO	X	-	-	X	X	-	X	-	+	+	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-RL-3-SU	X	-	X	X	-	X	-	+	++		
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-KW-3S	X	-	-	X	X	-	X	-	++	++	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-KW-3W	X	-	-	X	-	-	X	-	++	++	
							-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-KW-1-O	X	-	-	X	-	-	X	X	+	++	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-KW-5-O	X	-	-	X	-	-	X	-	+	+								
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-KW-5-U	X	-	-	X	X	-	X	-	+++	++								
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-PM-KW-3-U	X	-	-	X	X	-	X	-	+++	++								

Legende  
 X Herkunft des AKR-Gels im Dünnschliff  
 - Kein Merkmal erkennbar  
 + punktuell eindeutige Merkmale  
 ++ häufig eindeutige Merkmale  
 +++ vorhandene Merkmale im betonschädigenden Ausmaß

<sup>1</sup> Farbcodierung analog Tabelle 9

Tab. 12c: Ergebnis der Dünnschliffmikroskopie der Prüfkörper aus den beprobten BAB-Abschnitten A14-GB-A und A14-GB-B vor und nach verschiedenartiger AKR-provozierender Lagerung

allen AKR-provozierenden Lagerungen gewonnen wurden, keine oder nur vereinzelt punktuell AKR- und SEB-Merkmale vorgefunden. Auch hier korreliert dieses Ergebnis mit den ermittelten Dehnungen.

- A14-GB-A (SK 0-I)

In den Dünnschliffen des Ober- und Unterbetons wurde als gebrochenes Festgestein ein Rhyolith identifiziert. Als Lockergesteine wurden in den Dünnschliffen des Ober- und Unterbetons vor allem Quarzit und Sandstein sowie Flint, Kalkstein und Kieselschiefer vorgefunden.

Im Dünnschliff des Oberbetons des Diagnosebohrkerns (Entnahmezustand) wurden vereinzelt eindeutige AKR- und SEB-Merkmale festgestellt. Dabei wurde ein Kieselschiefer- und ein Flintkorn als Quellen für das AKR-Gel identifiziert.

In den nach dem 40°C- und 60°C-Betonversuch aus dem Unterbeton gewonnenen Dünnschliffen sind nur punktuell eindeutige AKR- und SEB-Merkmale nachweisbar. Als Quellen für das vorgefundene AKR-Gel wurde ein Quarzitkorn und Flintkörner identifiziert. Der Mikroskopiebefund korreliert auch hier mit den moderaten Dehnungen bei beiden Betonversuchen.

Im Gegensatz zu den Betonversuchen führen die Performanceprüfungen im jeweiligen Dünnschliff des Unterbetons zu einer deutlich stärkeren Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale. Dies trifft im besonders hohen Maß auf die Klimawechsellaagerung zu. Dabei wurde als Quelle für das vorgefundene AKR-Gel ein Flint- und ein Quarzitkorn identifiziert. Abschließend sei angemerkt, dass auch hier eine Korrelation zwischen dem Mikroskopiebefund und der erhöhten Dehnung der Halbschalen bei den Performanceprüfungen besteht.

- A14-GB-B (SK I-II)

Wie beim BAB-Abschnitt A14-GB-A wurde in den Dünnschliffen des Ober- und Unterbetons als gebrochenes Festgestein ein Rhyolith identifiziert. Analoges gilt für das Lockergestein. So wurden auch hier in den Dünnschliffen des Ober- und Unterbetons vor allem Quarzit und Sandstein sowie Flint, Kalkstein und Kieselschiefer vorgefunden.

Im Dünnschliff des Ober- und Unterbetons des Diagnosebohrkerns aus dem Bereich des Fugenkreuzes des 1. Fahrstreifens (Entnahmezustand) wurden beim Oberbeton punktuell und beim Unterbeton häufig eindeutige AKR- und SEB-Merkmale vorgefunden. Auch hier wurden Körner aus Kieselschiefer und Flint als Quellen für das AKR-Gel identifiziert. Bemerkenswert ist aber auch, dass bei dem zusätzlich gewonnenen Dünnschliff aus einem Bohrkern aus der Mitte der Fahrbahnplatte des 1. Fahrstreifens (Entnahmezustand) im Oberbeton keine AKR-Merkmale vorgefunden wurden. Deshalb diente der in der Plattenmitte ermittelte Mikroskopiebefund als Referenz für die Bewertung der AKR- und SEB-Ausprägung im Beton nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen.

Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den adäquaten Untersuchungen beim BAB-Abschnitt A14-GB-A werden auch hier die Dünnschliffe, die aus den Halbschalen nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen gewonnen wurden, zunächst bewertet. Es ist erkennbar, dass auch hier der 40°C- und der 60°C-Betonversuch nur punktuell zu eindeutigen AKR- und SEB-Merkmalen führt. Dieser Befund korreliert auch mit den moderaten Dehnungen der Prüfkörper bei den Betonversuchen. Im Gegensatz dazu haben alle Performanceprüfungen eine verstärkte Ausprägung der AKR und SEB zur Folge. Auch dies korreliert mit dem Ergebnis der ganzheitlichen Dehnungsermittlung des Ober- und Unterbetons.

Aufschlussreich ist die mikroskopische Betrachtung der Dünnschliffe, die aus Prismen des Ober- bzw. Unterbetons nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen gewonnen wurden. Dabei zeigt sich, dass sowohl die Betonversuche als auch die Performanceprüfungen beim Unterbeton zu einer signifikant höheren Ausprägung der AKR und SEB als beim Oberbeton führen. Auch dies korreliert mit dem Befund der Dehnungsermittlung.

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, dass bei den Performanceprüfungen oft der AKR-Schädigungsprozess eine Verstärkung erfährt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist vermutlich der externe Tausalzeitrag. Dieser wurde jedoch vor allem aufgrund der verfügbaren Messtechnik bisher unzureichend untersucht. Ähnlich verhält es sich mit der

vielfach postulierten Auslaugung von Natrium, die bei den Betonversuchen zu einer Verminderung des AKR-Schädigungsprozesses infolge eines frühzeitig entstehenden Alkalimangels führen soll. Im nachfolgenden Kapitel wird diesen Fragestellungen nachgegangen. Als Messmethode findet dabei das bereits im Kapitel 3.4.4 umfassend beschriebene LIBS-Verfahren Anwendung.

#### 4.3.2 Analyse der Natrium-, Chlor- und Schwefelverteilung

Die Ergebnisse der LIBS-Analyse sind für alle Proben aller Entnahmebereiche der Anlage A4 zu entnehmen. Exemplarisch sind in den Bildern 27a bis 27f die LIBS-Ergebnisse für den Oberbeton des Entnahmebereichs A14-R1 (Schadenskategorie II-III) vor und nach den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen dargestellt. Die Bezeichnung, die Herkunft und der Zustand der analysierten Proben können jeweils der oberen Schriftleiste entnommen werden. Die räumliche Einordnung der Analysefläche im Prüfkörper und deren Foto ist jeweils darunter dargestellt. Angemerkt sei, dass die Positionierung des Prüfkörpers seiner Lage bei der jeweiligen AKR-provozierenden Lagerung ent-

spricht. Die mit LIBS ermittelte Natrium-, Chlor- und Schwefelverteilung wird jeweils als Flächenscan und Tiefenprofil veranschaulicht.

Den Tiefenprofilen in Bild 27a ist zu entnehmen, dass im Entnahmestadium die Eindringtiefe von Natrium ca. 40 mm und von Chlor ca. 60 mm beträgt. Eine vergleichende Betrachtung mit den jeweiligen Tiefenprofilen nach dem 40°C- und dem 60°C-Betonversuch (Bilder 27b und 27c) zeigt, dass durch diese Beanspruchung Natrium und Chlor bis in eine Tiefe von jeweils ca. 40 mm stark ausgelaugt werden. Damit wird erstmals gezeigt, dass die Auslaugungsprozesse nicht nur die äußere Betonrandzone, sondern durchaus auch tiefere Bereiche erfassen.

Andererseits ist aber auch bemerkenswert, dass bei beiden AKR-Performanceprüfverfahren das Tausalz über den gesamten Prüfkörperquerschnitt eingetragen wird (Bilder 27d und 27e). So stellt sich durch die allseitige zyklische Beaufschlagung der Prüfkörper mit der 3%igen NaCl-Lösung beim 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr ein erhöhter relativ gleichmäßig über den Querschnitt verteilter Natriumgehalt ein. Bei der adäquaten Betrachtung des Chloridprofils ist erkennbar, dass im

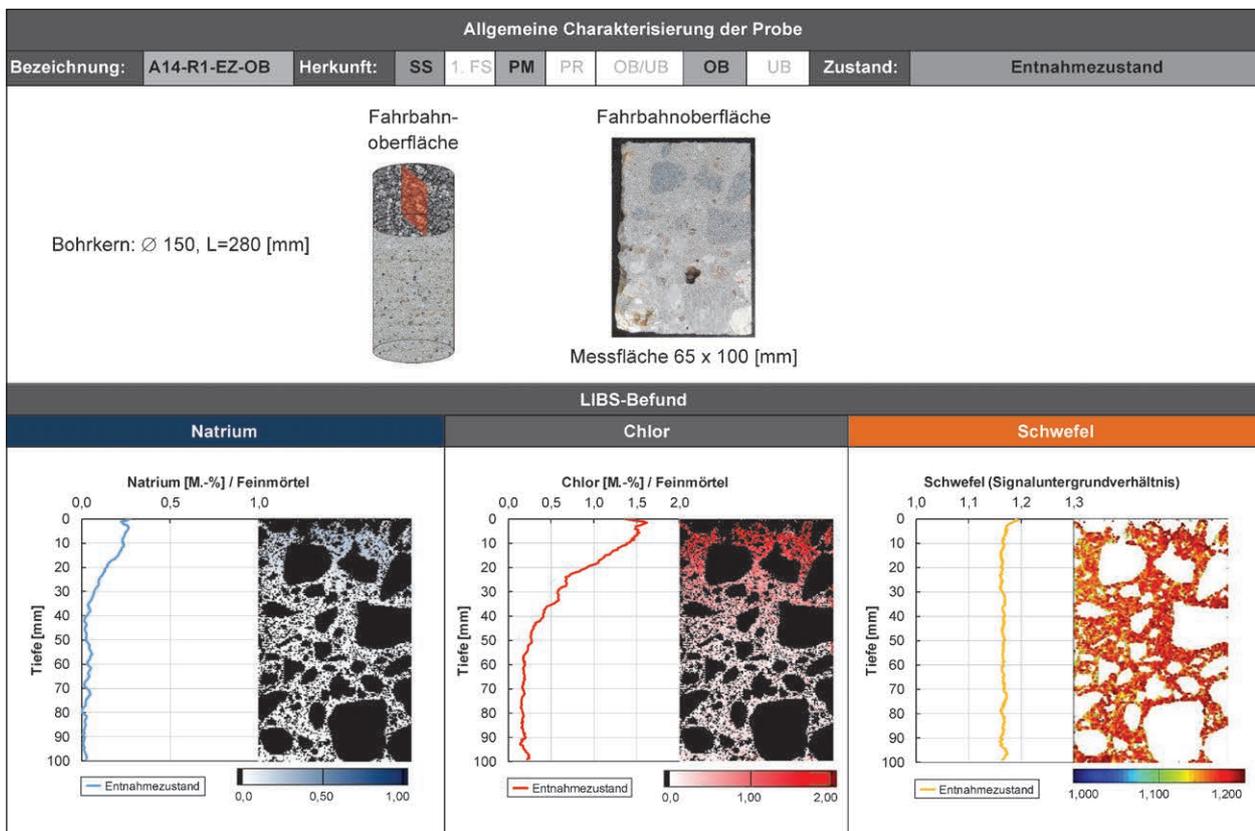


Bild 27a: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)

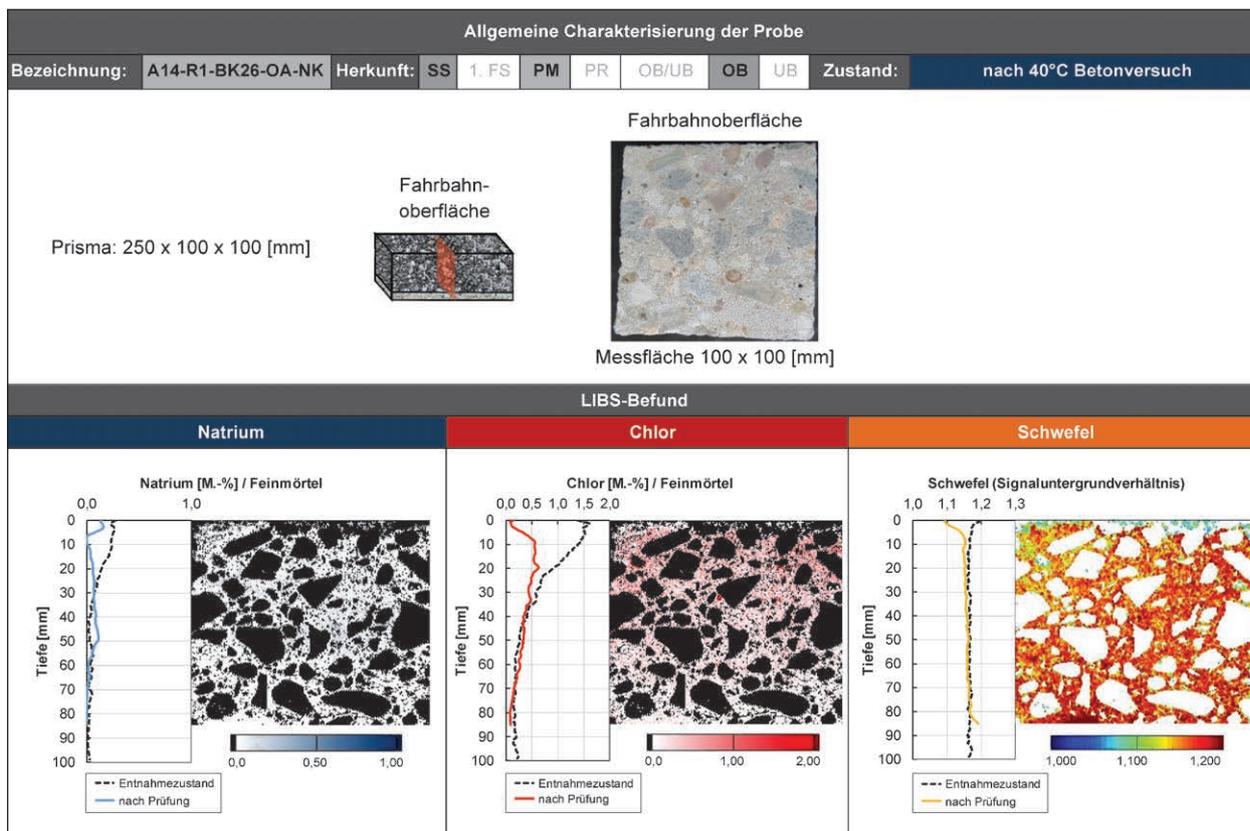


Bild 27b: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)

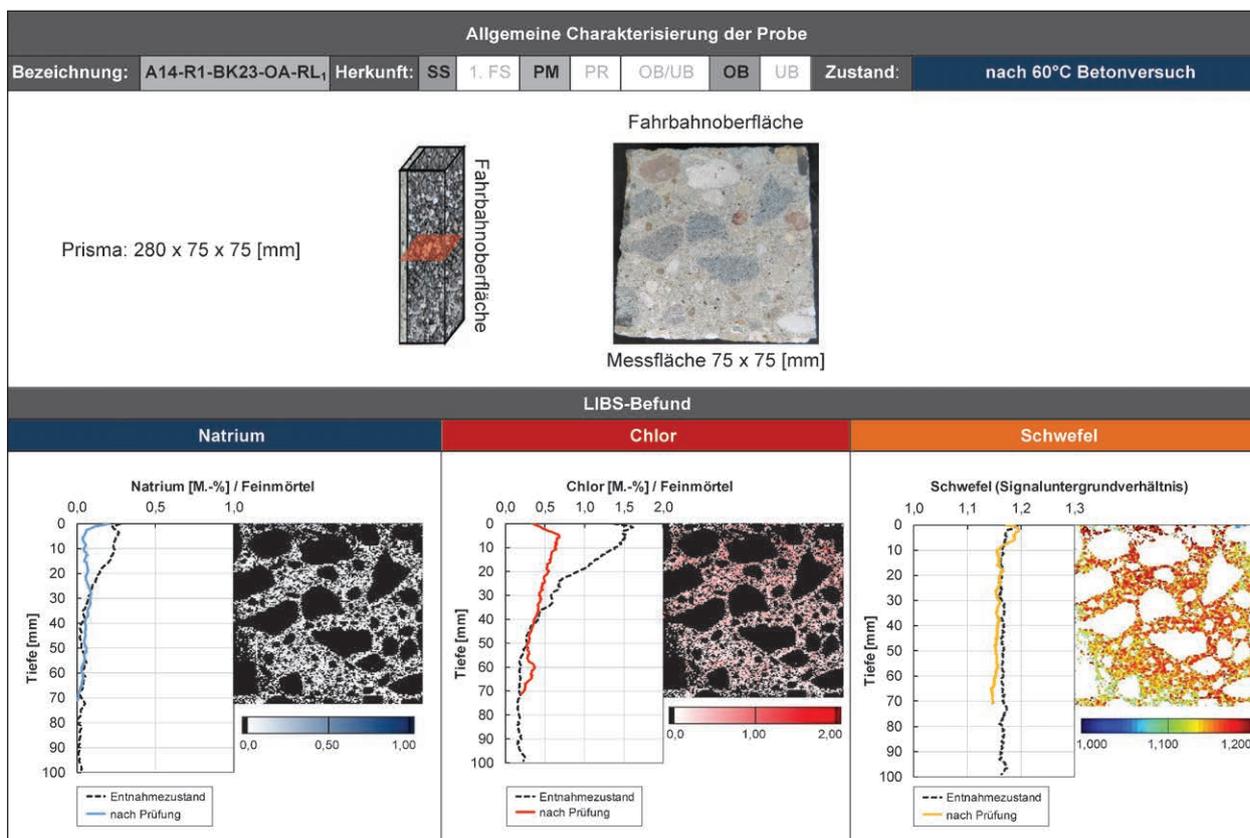


Bild 27c: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)

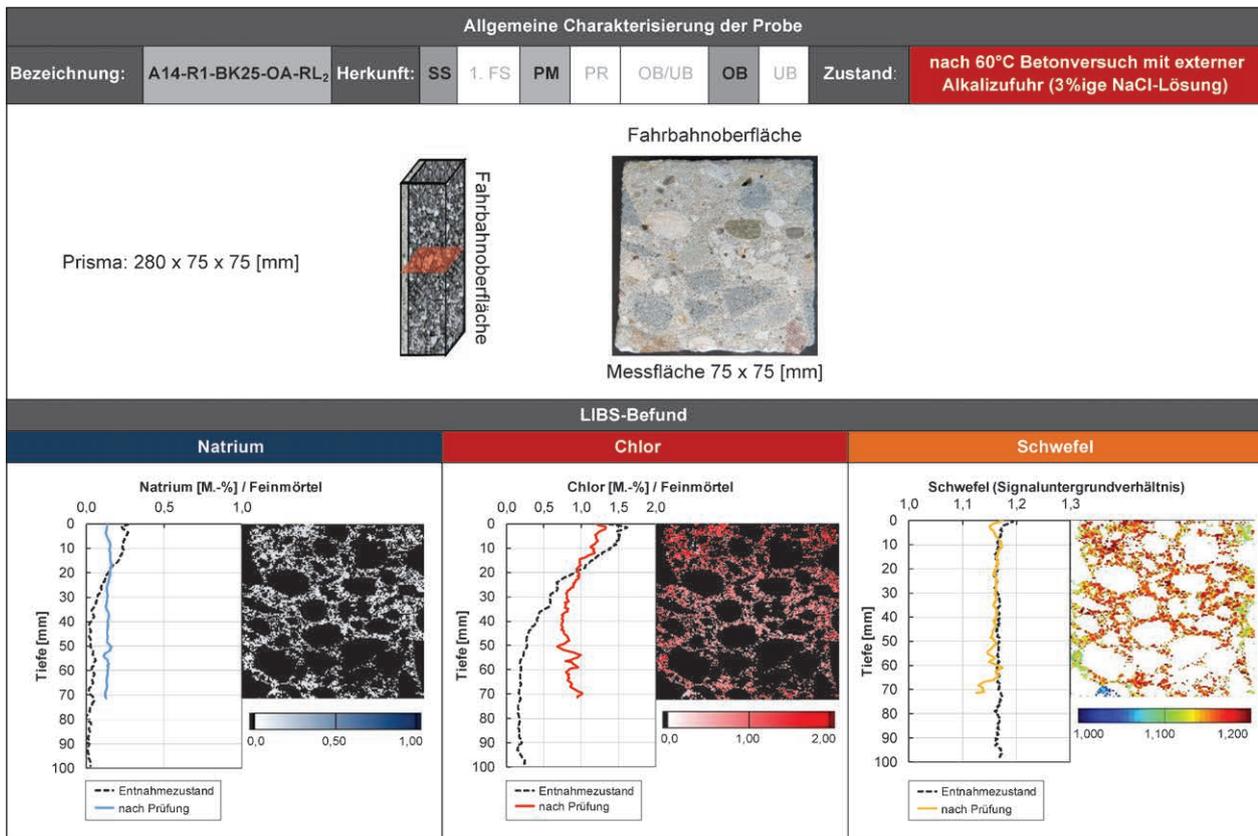


Bild 27d: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)

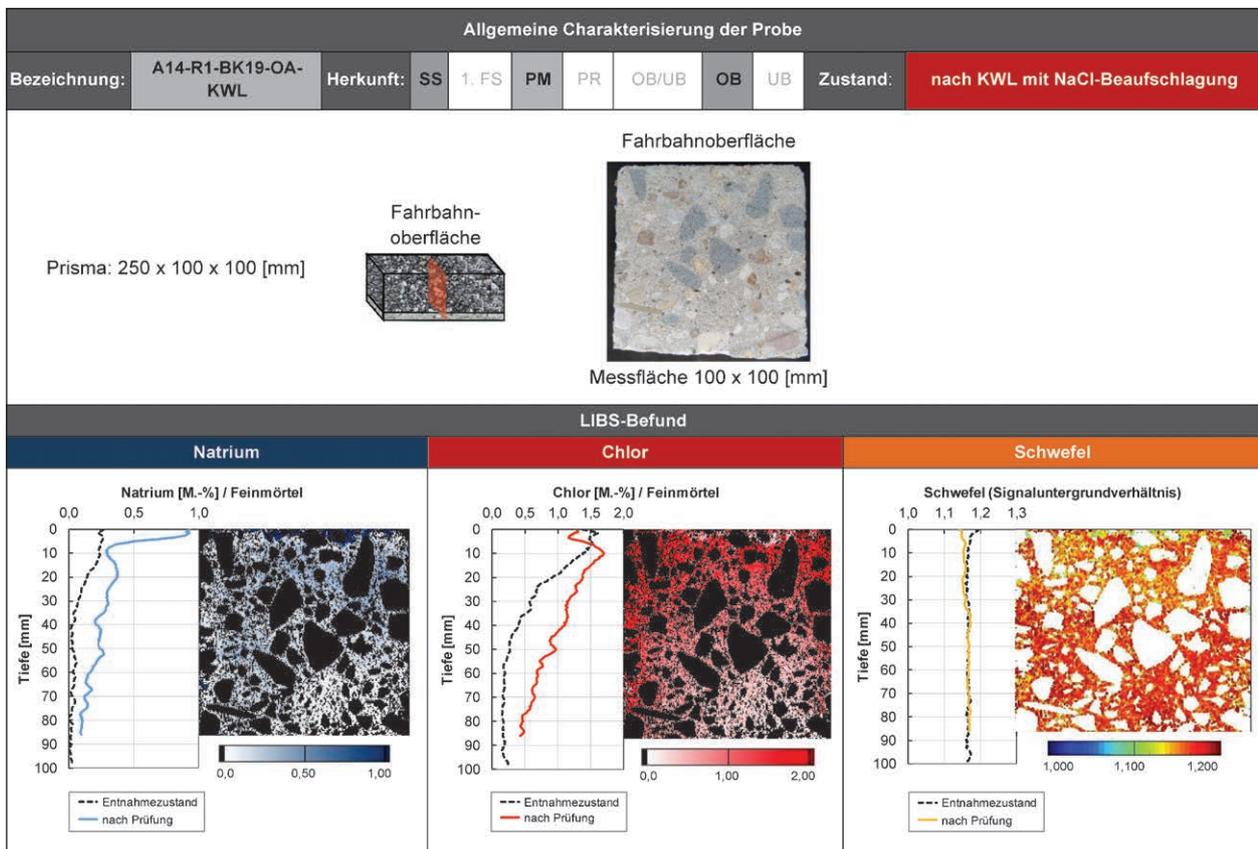


Bild 27e: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)

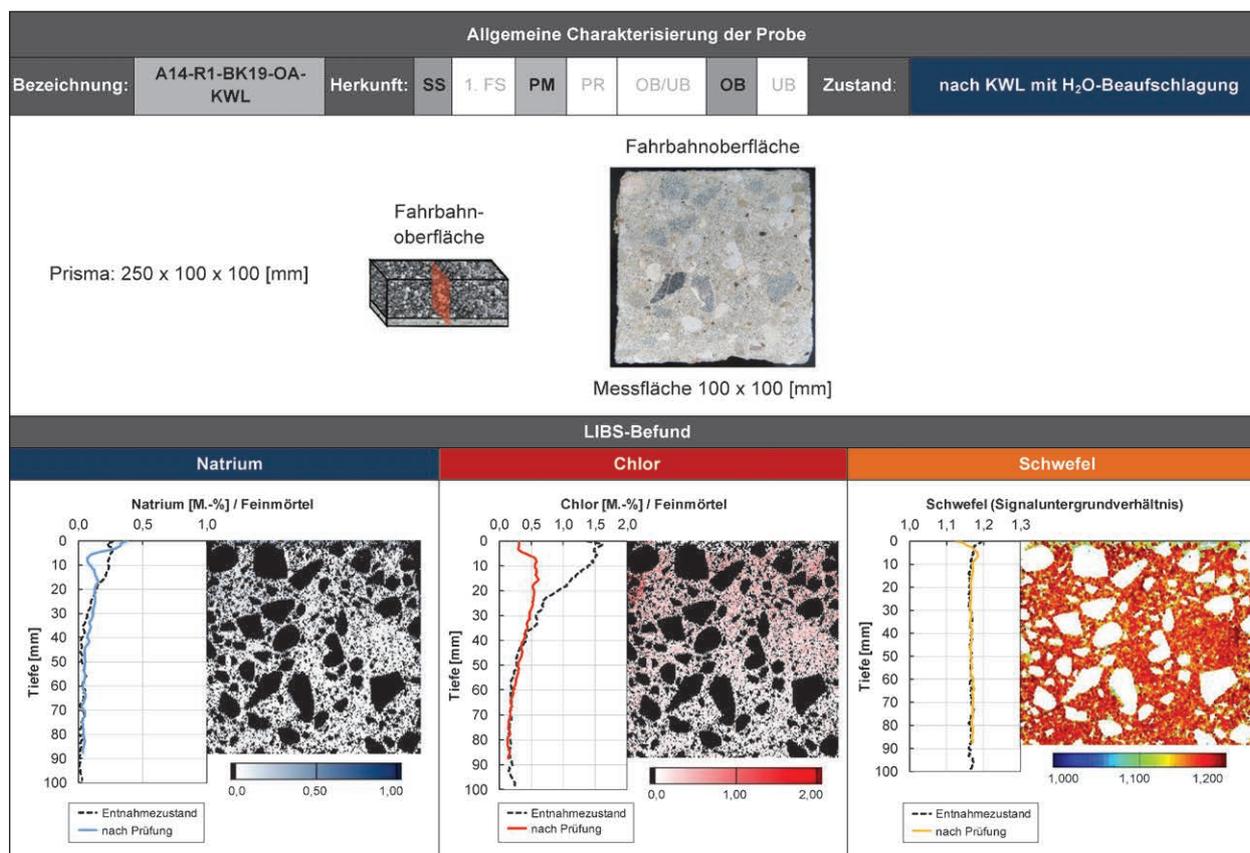


Bild 27f: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)

Kernbereich des Prüfkörpers tendenziell geringere Gehalte vorgefunden werden als in der Betonrandzone. Der höchste Chloridgehalt tritt dabei in der Betonrandzone mit der Fahrbahnoberfläche auf.

Bei der Klimawechsellagerung mit einseitiger Beaufschlagung der Prüffläche mit der 3,6%igen NaCl-Lösung stellt sich über dem Prüfkörperquerschnitt ein Gradient in der Natrium- und Chlorverteilung ein. Interessant dabei ist, dass in der unmittelbar an die Fahrbahnoberfläche angrenzenden Betonrandzone eine starke Zunahme des Natriumgehaltes erkennbar ist. Diese geht gleichzeitig mit einer dortigen Abnahme des Chloridgehaltes einher. Die Ursache für dieses Phänomen konnte im Rahmen dieses Projektes nicht geklärt werden und ist deshalb Gegenstand der weiteren Forschung. Im Gegensatz zur Tausalzbeaufschlagung führt bei der Klimawechsellagerung die Verwendung von Wasser als Prüflösung zu ähnlichen Auslaugungseffekten wie die vorstehend diskutierten Betonversuche.

Abschließend sei zu den Schwefelverteilungen angemerkt, dass tendenziell die verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen zu einer Abreicherung von Schwefel in der äußersten Betonrandzone der Fahrbahnoberfläche führen.

## 5 Zusammenfassende Betrachtungen und Ausblick

### 5.1 Ursachenanalyse für die Dunkelfärbung der Fahrbahnoberfläche im Fugenbereich (AP1)

Die zweistufig durchgeführten in-situ Untersuchungen mit zerstörungsfreier Prüftechnik bestätigen erstmals experimentell die eingangs geäußerte Arbeitshypothese, dass die erhöhte Durchfeuchtung des Betons ursächlich für die Dunkelfärbung der Oberfläche der Betonfahrbahnplatte im Fugenbereich ist. So wurde bereits bei der großflächigen Analyse mit Radar festgestellt, dass in den Bereichen der Querscheinfuge und des Fugenkreuzes erhöhte Laufzeiten der Radarimpulse zwischen der Oberfläche und der Rückwand der Betonfahrbahnplatte auftreten. Dies ist ein Indiz für eine erhöhte integrale Durchfeuchtung der Betonfahrbahnplatte. Unverkennbar ist dabei, dass die laterale Ausdehnung der höheren Durchfeuchtung des Fugenbereichs der Betonfahrbahnplatte in der Nähe des Fugenkreuzes am größten ist. Die vertiefend durchgeführten NMR-Feuchtemessungen in der Betonrandzone weisen eine gute Korrelation zwischen der er-

höhten NMR-Amplitude, die einen Indikator für einen erhöhten Feuchtegehalt darstellt, und der dunkel gefärbten Oberfläche im Fugenbereich der Betonfahrbahndecke auf. Ähnlich wie bei der integralen Feuchtemessung mit Radar weist die mit NMR-Technik durchmusterte Betonrandzone im Bereich des Fugenkreuzes die höchste und in der Plattenmitte die geringste Durchfeuchtung auf. Der Durchfeuchtungsgrad der Betonrandzone im Bereich der Querscheinfuge liegt zwischen den beiden vorstehend geschilderten Extremwerten. Zusätzlich durchgeführte punktuelle Feuchtemessungen an Bohrmehlproben mittels Darr-Wäge-Verfahren bestätigen den Befund der Radarmessungen. So wurde in der Plattenmitte über die gesamte Höhe der Betonfahrbahndecke ein mittlerer Feuchtegehalt von 1,2 M.-% ermittelt. Am Plattenrand im Bereich der Querscheinfuge betrug dieser 1,6 M.-% und in der Nähe des Fugenkreuzes 2,2 M.-%. Die Ergebnisse der NMR-Feuchtemessungen konnten allerdings nur für die Betonrandzone im Bereich des Fugenkreuzes und der Plattenmitte mit dem Darr-Wäge-Verfahren bestätigt werden. Es wird vermutet, dass der geringe Feuchteunterschied in der Betonrandzone mittels Bohrmehlentnahme und Trocknung nicht abbildbar ist. Dies legt den Schluss nahe, dass die NMR-Technik aufgrund ihrer höheren Sensitivität gegenüber Feuchte, ihrer signifikant höheren Tiefenauflösung und ihres zerstörungsfreien Charakters deutliche Vorteile gegenüber dem Darr-Wäge-Verfahren besitzt. Nachteilig ist jedoch bei der Feuchtemessung mit der NMR-MOUSE, dass diese auf eine Messtiefe von ca. 25 mm beschränkt ist.

## 5.2 Schadenskategorie-spezifische Bewertung der AKR-Prüfverfahren (AP2)

In diesem Arbeitspaket wurden nach der visuellen Begutachtung der Fahrbahnoberfläche je drei in ein- und zweischichtiger Bauweise ausgeführte BAB-Abschnitte mit unterschiedlicher AKR-Schadenskategorie beprobt. Anschließend wurden die hierbei gewonnenen verschiedenartigen Prüfkörper im Labor visuell begutachtet und fotografisch dokumentiert. Von zentralem Interesse war dabei die Verifizierung der Ausprägung der horizontalen Rissbildung im Fugenbereich, die Identifikation der verwendeten Gesteinskörnungen, die Beurteilung des Betongefüges (Sieblinie, Kornbindung, Luftporen, Risse u. a.) sowie die Prüfung des Vorhandenseins

von AKR-Merkmalen. Aufbauend erfolgte eine tiefergehende Analyse der Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale mittels Dünnschliffmikroskopie. Zusätzlich durchgeführte LIBS-Analysen ermöglichten Rückschlüsse zum Tausalzeintrag in die Betonfahrbahndecke. Weiterhin wurde zur Bewertung der Auswirkungen der AKR auf die mechanischen Eigenschaften des Betons tiefenabhängig die Spaltzugfestigkeit vergleichend in der Mitte und am Rand der Fahrbahnplatte bestimmt. Zur Überprüfung der Korrelation zwischen der Spaltzugfestigkeit und der Porenstruktur wurde zusätzlich die Gesamtporositäten tiefenabhängig bestimmt.

Zur prognostischen Abschätzung des AKR-Restschädigungspotenzials wurden speziell konfektionierte Prüfkörper verschiedenartig AKR-provozierend gelagert. Es fanden sowohl der 40°C- und 60°C-Betonversuch nach [9], als auch der 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr [6] und die Klimawechsellagerung [4] vergleichend Anwendung. Hierbei wurde der Ober- und Unterbeton der Fahrbahndecke sowohl ganzheitlich als auch separat unter Verwendung verschiedener Prüfkörpergeometrien AKR-provozierend gelagert. Danach wurde die Ausprägung der AKR- und SEB-Merkmale erneut mittels Dünnschliffmikroskopie analysiert. Zusätzlich wurde das für den AKR-Schädigungsprozess benötigte Alkaliangebot mittels LIBS verifiziert.

Ausgehend von den so untersuchten BAB-Abschnitten ergibt sich folgendes Fazit:

- Die wider Erwarten vorgefundene unterschiedliche AKR-Schadensausprägung im 1. Fahrstreifen bei den Referenzstrecken A14-R1/A14-R2 und A14-R3 ist auf eine unterschiedliche Betonzusammensetzung zurückzuführen. So fand im Unterbeton des Entnahmebereichs A14-R3 nicht primär Quarzit, Quarz und Feldspat, sondern vor allem Basalt Anwendung. Bei der Referenzstrecke A14-R2 wurden zudem mit bis zu 9 mm die größten Plattenverkrümmungen im Querscheinfugenbereich gemessen.
- Bei allen AKR-geschädigten BAB-Abschnitten wurden im Bereich der Querscheinfuge Horizontalrisse vorgefunden. In der Regel verliefen diese in Dübelhöhe. Mitunter wurden zusätzlich darüber und/oder darunter weitere Rissebenen identifiziert.
- Mit Ausnahme von A14-GB-A und A14-GB-B wurde im Fahrbahndeckenbeton aller Entnahmebereiche ein zu geringer Gehalt an gebroche-

ner Gesteinskörnung sowie an künstlich eingeführten Luftporen vorgefunden. Auffallend war auch deren ungleichmäßige Verteilung.

- Bei den untersuchten BAB-Abschnitten betrug die mittlere Eindringtiefe von Natrium maximal 20 bis 45 mm und die von Chlorid maximal 15 bis 60 mm. Eine Korrelation der jeweiligen Eindringtiefe mit der AKR-Schadenskategorie des jeweiligen BAB-Abschnitts ist nicht gegeben.
  - Bei allen AKR-geschädigten BAB-Abschnitten wurden neben den AKR- auch SEB-Merkmale vorgefunden.
  - Bei allen AKR-geschädigten BAB-Abschnitten hat die stärkere Ausprägung der AKR-Merkmale am Plattenrand gegenüber der Plattenmitte keine signifikante Verminderung der Spaltzugfestigkeit über die Höhe der Betonfahrbahndecke zur Folge. Vielversprechender ist es hier, zukünftig das Verformungsverhalten vergleichend zu bewerten.
  - Bei vier der sechs untersuchten BAB-Abschnitte wurde primär in den AKR-Performanceprüfungen ein erhöhtes AKR-Restschädigungspotenzial ermittelt. Schädigungsindikatoren waren hierbei die über den Grenzwert hinausgehende Dehnungen und vermehrt bei der Dünnschliffmikroskopie vorgefundene AKR- und SEB-Merkmale.
  - Bei einer vergleichenden Betrachtung der Ergebnisse beider Performanceprüfungen zeigt sich, dass der jeweilig für das Prüfverfahren festgelegte Grenz- bzw. Richtwert für die Dehnung bei der KWL mit Beaufschlagung einer NaCl-Lösung früher erreicht und nach maximaler Zyklenzahl deutlich stärker überschritten wird als beim 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr (hier 3%ige NaCl-Lösung). Die daraus resultierende Bewertung des AKR-Restschädigungspotenzials ist jedoch davon unbenommen.
  - Bemerkenswert ist zu den AKR-provozierenden Lagerungen verschiedenartiger Prüfkörper aus dem Entnahmbereich A14-GB-B, dass durch die separate Prüfung des Ober- und Unterbetons zwar das AKR-Restschädigungspotenzial beider Schichten getrennt voneinander bewertet werden kann. Es stellt sich jedoch die Frage, warum bei den AKR-Performanceprüfungen die Dehnung der aus Ober- und Unterbeton bestehenden Halbschalen deutlich höher ist, als die der aus dem Unter- bzw. Oberbeton herausgearbeiteten Prismen. Bei den 40°C- und 60°C-Betonversuchen kehrt sich dieser Trend um. Das legt die Vermutung nahe, dass die Prüfkörpergeometrie und die Orientierung der Prüfkörper (vertikal oder horizontal zur Fahrbahnoberfläche) auch maßgebenden Einfluss auf das Dehnungsverhalten ausüben. Zur Klärung dieses wichtigen Sachverhalts werden perspektivisch systematische Untersuchungen hierzu angeregt.
  - Mit Ausnahme des separat geprüften Unterbetons im Entnahmbereich A14-GB-B verhalten sich die bei den Performanceprüfungen auffälligen Bestandsbetone im 40°C- und 60°C-Betonversuch deutlich unauffälliger. Auch hier werden die Ergebnisse der Dehnungsmessungen durch den Befund der Dünnschliffmikroskopie gestützt.
  - Einen möglichen Grund für die unterschiedliche Bewertung des AKR-Restschädigungspotenzials bei den 40°C- und 60°C-Betonversuch einerseits und den Performanceprüfungen andererseits stellt das jeweils vorhandene Alkaliangebot dar. So wurde hier erstmals experimentell mittels umfangreicher systematisch durchgeführter LIBS-Analysen gezeigt, dass das während der Nutzung im Winter bis in eine Tiefe von ca. 45 mm in die Betonfahrbahndecke eingetragene Tausalz zum großen Teil im 40°C- und 60°C-Betonversuch wieder ausgelaugt wird. Die damit einhergehende Alkaliverarmung wiederum führt insbesondere bei den langsam und spät reagierenden Gesteinskörnungen zu einer Unterbewertung ihrer Alkaliempfindlichkeit, was die Richtigkeit der in [38] geäußerten Arbeitshypothese bestätigt.
  - Die externe Tausalzbeaufschlagung bei den Performanceprüfungen hingegen hat eine signifikante Zunahme des Natrium- und Chloridgehalts über den gesamten Prüfkörperquerschnitt zur Folge. Dabei hat die allseitige Beaufschlagung mit einer 3%igen NaCl-Lösung im 60°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr eine erhöhte relativ gleichmäßig über den Querschnitt verteilten Natriumgehalt zur Folge. Bei der Klima-wechselagerung mit NaCl-Beaufschlagung stellt sich in der Natrium- und Chloridverteilung ein von der beaufschlagten Prüffläche ausgehender Gradient über den gesamten Querschnitt des Prüfkörpers ein.
- Abschließend wird angeregt, dass das hier erarbeitete Prüfprogramm zur schadenskategorie-spezifischen

schen Bewertung der AKR-Prüfverfahren auf weitere BAB-Abschnitte zur Erhöhung der Aussagesicherheit anzuwenden ist. Besondere Aufmerksamkeit sollte dabei der Verifizierung des Einflusses der Prüfkörpergeometrie und der Orientierung der Prüfkörper (vertikal oder horizontal zur Fahrbahnoberfläche) auf das Dehnungsverhalten bei der ganzheitlichen und separaten Betrachtung des Ober- und Unterbetons geschenkt werden. Aufgrund der hohen Brisanz dieser Fragestellung und zur grundhaften Klärung dieses Sachverhalts werden zusätzlich adäquate systematische Untersuchungen auf Basis von Laborbetonen angeregt.

## Literatur

- [1] WEISE, F.; KIND, T.; STELZNER, L.; WIELAND, M.: Dunkelfärbung der Betonfahrbahn-decke im AKR – Kontext – Ursachenanalyse mit innovativer Prüftechnik. In: Beton und Stahlbetonbau, 113 (2018), Heft 9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 647-655
- [2] FGSV: Merkblatt für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen aus Beton (M BEB), 2009
- [3] ANGERER, R.; MARQUORDT, D. et al.: Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die Bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton. Fortschreibung 2018
- [4] FGSV: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen – TP B-StB 14: Widerstand gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion von Beton bei Alkalizufuhr von außen (FIB-Klimawechsellaufstellung). Entwurf 2016
- [5] STARK, J. et al: AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen. In: beton, 12/2006 (56. Jahrgang), Verlag Bau+Technik GmbH, S. 574-581
- [6] FGSV: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen – TP B-StB 14: Widerstand gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion von Beton bei Alkalizufuhr von außen (60°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen). Entwurf 2016
- [7] MÜLLER, Ch.; BORCHERS, I.; EICKSCHEN, E.: AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. In: Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007) H. 8, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 528-538
- [8] MÜLLER, Ch.; BORCHERS, I.; EICKSCHEN, E.: AKR-Prüfverfahren: Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren. In: Straße und Autobahn, Heft 5 2008, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 272-281
- [9] DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Beuth Verlag, Berlin, 2013
- [10] DAfStb: Empfehlung für die Schadensdiagnose und Instandsetzung von Betonbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind. In: beton, 9/2003 (53. Jahrgang), Verlag Bau+Technik GmbH
- [11] BREITENBÜCHER, R. et al.: Rissbildung an Fahrbahndecken aus Beton: Auswirkungen von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR) – Phase 1: In-situ-Untersuchungen an Fahrbahndecken aus Beton mit/ohne Risse. Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft, 2010
- [12] BORCHERS, I.; MÜLLER, Ch.: Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA. In: Proceedings der 18. Ibausil, Weimar, 12. – 15. September 2012, Weimar. Band 2, S. 327-336
- [13] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e. V.: Merkblatt B10: Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. 2008
- [14] FGSV: Arbeitspapier Anwendung des Georadars zur Substanzbewertung von Straßen. Teil A Bestimmung von Schichtdicken des Oberbaus von Verkehrsflächenbefestigungen mit dem Georadar-Impulssystem. 2016
- [15] KIND, T.; TRELA, C.; SCHUBERT, M.; WÖSTMANN, J.: Aggregates Scattering of GPR Waves in Concrete. In: Proceedings of 15<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar – GPR 2014, 2014
- [16] BLÜMICH, B.; HABER-POHLMAYER, S.; ZIA, W.: Compact NMR. Berlin/Boston: Walter de Gruyter 2014
- [17] SCHULTE HOLTHAUSEN, R.; WEICHOLD, O.: Nondestructive Evaluation of Thermal

- Damage in Concrete by Single-Sided Nuclear Magnetic Resonance. *Journal of Infrastructure Systems* 23 (2016), p. 1
- [18] WEISE, F.; MAIER, B.; KRONEMANN, J.; WERNER, D.; MILLAR, S.: AKR-Voruntersuchungen an Bohrkernen von Fahrbahndecken aus Beton. Abschlussbericht des BAST-Vh. FE 08.0215/2011/GRB, unveröffentlicht, März 2018
- [19] SEYFARTH, K.; WEISE, F.; KUNZ, S. et al.: Futurum – Baustoff Straßenbeton. Abschlussbericht des BAST-Vorhabens FE 08.0214/2011/LRB, unveröffentlicht, November 2018
- [20] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 04/2013: Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge Alkali-Kieselsäure-Reaktion. *Verkehrsblatt* Heft 5, März 2013
- [21] ASTM C 856-11: Standard practice for petrographic examination of hardened concrete. Philadelphia, 2011
- [22] WIGGENHAUSER, H.; SCHAURICH, D.; WILSCH, G.: LIBS for non-destructive testing of element distributions on surfaces. In: *NDT&E International*, vol. 31, no. 4, pp. 307-313, 1998
- [23] WILSCH, G.; WERITZ, F.; SCHAURICH, D.; WIGGENHAUSER, H.: Determination of chloride content in concrete structures with laser-induced breakdown spectroscopy. In: *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 10, pp. 724-730, 2005
- [24] WERITZ, F.; SCHAURICH, D.; WILSCH, G.: Detector comparison for sulfur and chlorine detection with laser induced breakdown spectroscopy in the near-infrared-region. In: *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 62, no. 12, pp. 1504-1511, 2007
- [25] MILLAR, S.; WILSCH, G.; EICHLER, T.; GOTTLIEB, C.; WIGGENHAUSER, H.: Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) im Bauwesen – automatisierte Baustoffanalysen. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 110 (2015), Heft 8, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 501-510
- [26] TAFFE, S.; WILSCH, G.; SCHAURICH, D.; WERITZ, F.: Einsatz der Laser-Induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) im Bauwesen, Teil 1: Verfahrensbeschreibung und Durchführung von Zementanalysen. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 102 (2008), Heft 2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 14-15
- [27] TAFFE, S.; WILSCH, G.; SCHAURICH, D.; WERITZ, F.: Einsatz der Laser-Induzierten Breakdown, Teil 2: Ermittlung von bauschädlichen Salzen. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 103 (2008), Heft S2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 14-15. (Nachdruck aus *Beton- und Stahlbetonbau* 99 (2004), Heft 8, S. 693–694)
- [28] KRAMIDA, A.; RALCHENKO, YU; READER, J.; NIST ASD TEAM: NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.5.6), (Online). Available: <https://physics.nist.gov/asd> [2018, May 8], National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD
- [29] WEISE, F.; MILLAR, S.; G. WILSCH: Analyse des Tausalzeintrags in Fahrbahndeckenbetone mit neuartiger Prüftechnik. In: *Beton- und Stahlbetonbau*, 113 (2018), Heft 9, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 656-666
- [30] MILLAR, S.; GOTTLIEB, C.; GÜNTHER, T.; SANKAT, N.; WILSCH, G.; KRUSCHWITZ, S.: Chlorine determination in cement-bound materials with Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) – a review and validation. In: *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 147, pp. 1-8, 2018
- [31] FGSV: Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn Arbeitsanleitung zur Bestimmung der charakteristischen Spaltzugfestigkeit an Zylinderscheiben als Eingangsgröße in die Bemessung von Betondecken für Straßenverkehrsflächen – AL Sp-Beton, Ausgabe 2006
- [32] VOLAND, K.: Einfluss der Porosität von Beton auf den Ablauf einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Bauhaus Universität Weimar, Dissertation, 2015
- [33] DAfStb: Prüfung von Beton, Empfehlung und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, Heft 422, Beuth Verlag, 1990

- [34] DIN-EN 66137-2: Bestimmung der Dichte fester Stoffe – Teil 2: Gaspyknometrie. Berlin: Beuth Verlag GmbH, Dezember 2014
- [35] DIN-EN 12390-7: Prüfung von Festbeton; Teil 7: Dichte von Festbeton, Berlin: Beuth Verlag, Juli 2009
- [36] DAFStb: Empfehlung für die Schadensdiagnose und Instandsetzung von Betonbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind. In: beton, 10/2015 (65. Jahrgang), Verlag Bau+Technik GmbH
- [37] IDEKER, J.; EAST, B.; FOLLIARD, K.; THOMAS, M.D.A.; FOURNIER, B.: The current state of the accelerated concrete prism test. In: Broekmans, M.A.T.M. and Wigum, B.J. (editors): Proceedings of the 13<sup>th</sup> ICAAR, Trondheim, Norway (2008): 140-151
- [38] GIEBSON, C.: Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2013
- [39] GRIEGER, Ch.; THIEL, T.: Betonschäden durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion – Neue Erkenntnisse aus dem Baustofflabor der HTW Dresden. In: HTW WISSEND, 2013
- [40] MÜLLER, Ch.; WEISE, F.; BORCHERS, I.; VOLAND, K.: Auswirkungen der Gefügedichte der Betone auf den Ablauf einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Abschlussbericht des AiF-Vorhabens 15248 N
- [41] WEISE, F.: Aufbauende Untersuchungen an Laborbetonen – Parameterstudie zu ausgewählten AKR-Einflussgrößen. AKR-Fachforum Betonstraßenbau. BAST, Bergisch Gladbach, Deutschland, 28.11.2017. Veröffentlicht durch FGSV unter: <https://www.fgsv.de/wissentransfer/veranstaltungsarchiv/2017/akrfachforum/download/>

## Bilder

- Bild 1: Exemplarische Erscheinungsbilder für die Schadenskategorien [3]
- Bild 2: AKR-bedingte Dehnungen von Bohrkernproben unterschiedlich stark geschädigter Streckenlose infolge AKR-provozierender Lagerung (60°C-Betonversuch) [11]
- Bild 3: Vorgehensweise bei der Ursachenanalyse für die Dunkelfärbung im Bereich der Querscheinfuge bei repräsentativer Fahrbahnplatte (AP1)
- Bild 4: Äußeres Erscheinungsbild des untersuchten BAB-Abschnitts
- Bild 5: Schematische Darstellung des Messprinzips und der Visualisierung der Ergebnisse bei Radar
- Bild 6: Schematische Darstellung der Laufzeitverlängerung der Rückwandreflexion an der Betonfahrbahndecke für die Feuchteanalyse mit dem Radarverfahren
- Bild 7: Vor Ort eingesetzter Bauwerksscanner für eine schnelle und automatisierte Durchführung der Radarmessung mit einem engen Messraster
- Bild 8: Schematische Darstellung des NMR-Messprinzips
- Bild 9: NMR-MOUSE
- Bild 10: Ergebnis integraler Feuchtemessung mit Radar in der Betonfahrbahndecke – ausgewählte D-Bilder sowie ein C-Bild im Bereich der Rückwand
- Bild 11: Ergebnis der Radar-Laufzeitmessung entlang einer Messlinie im Bereich des Fugenkreuzes (grau hinterlegte Diagrammfläche entspricht dunkelgefärbten Bereich der Fahrbahnoberfläche)
- Bild 12: Ergebnis der NMR-Feuchtemessung in ausgewählten Tiefen der Betonrandzone entlang zweier Messlinien
- Bild 13: Ergebnis punktueller tiefenaufgelöster Feuchtemessung mit NMR und Darr-Wäge-Verfahren in der Mitte und am Rand (bei Querscheinfuge und Fugenkreuz) der Betonfahrbahnplatte

- Bild 14: Vorgehensweise bei der Bewertung der AKR-Prüfverfahren (AP2)
- Bild 15: Entnahmeplan für die Entnahmestelle A14-R1 (zweischichtige Bauweise)
- Bild 16: Ansicht Stirnseite mit Winkelzuordnung von Bohrkern BK 1 des BAB-Abschnittes A4
- Bild 17: Räumliche Einordnung herausgearbeiteter Segmente aus dem Diagnosebohrkern aus dem Fugenkreuz der Fahrbahnplatte für die DS-Herstellung (Mikroskopie) und Analyse des Tausalzeintrags bei ein- und zweischichtiger Bauweise (Querscheinfuge links)
- Bild 18: Schematische Darstellung des Messprinzips von LIBS
- Bild 19: Beschreibung des verwendeten Fiber-LIBS-lab-Systems
- Bild 20: Typisches LIBS-Spektrum für die Analyse einer Zementsteinprobe aus CEM I 42,5 R mit definierter NaCl-Zugabe ( $c_{Cl} = 1,08$  M.-% und  $c_{Na} = 0,57$  M.-%) im UV- und NIR-Bereich
- Bild 21: Vorgehensweise bei der Ermittlung des Natriumtiefenprofils bei der Auswertung der LIBS-Flächenscans unter Nutzung des Ca-Ausschlusskriteriums zur Eliminierung der Gesteinskörnung (GK) am Beispiel des oberen Segments eines Bohrkerns aus der Plattenmitte eines BAB-Abschnitts
- Bild 22: Impressionen zur KWL
- Bild 23: Lagerungsregime in einem Wechselzyklus im 60°C-Betonversuch mit externer Alkali-zufuhr
- Bild 24: Prüfprozedere bei der KWL
- Bild 25: Typische bei der visuellen Begutachtung der Bohrkernmantelfläche identifizierte Rissverläufe
- Bild 26: Fotodokumentation zur horizontalen Rissbildung im Bereich der Querschein- und Längsfugen in der Ebene der Dübel und Anker
- Bild 27a: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)
- Bild 27b: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)
- Bild 27c: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)
- Bild 27d: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)
- Bild 27e: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)
- Bild 27f: Ergebnis der LIBS-Analyse beim Oberbeton im Entnahmebereich A14-R1 (SK: II-III)

## Tabellen

- Tab. 1: Übersicht über ausgewählte BAB-Abschnitte (Entnahmebereiche)
- Tab. 2: Bewertung der Schadensmerkmale bei der DS-Mikroskopie
- Tab. 3: Zuordnung der Wellenlänge zu ausgewählten Elementen [28]
- Tab. 4: Übersicht über die Vorgehensweise bei den verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen
- Tab. 5a: Prüfkörperspezifische Prüfmatrix für AKR-provozierende Lagerungen in den beprobten BAB-Abschnitten
- Tab. 5b: Prüfkörperspezifische Prüfmatrix für AKR-provozierende Lagerungen in den beprobten BAB-Abschnitten
- Tab. 6: Überblick über die Ergebnisse der visuellen Begutachtung des Gefüges der Bohrkern- und Prüfkörper für alle beprobten BAB-Abschnitte
- Tab. 7: Überblick über Rissbefunde im Bereich der Querscheinfuge für alle beprobten BAB-Abschnitte

- Tab. 8: Übersicht über die mit LIBS ermittelten Eindringtiefen von Natrium und Chlor für alle beprobten BAB-Abschnitte
- Tab. 9a: Überblick über ermittelte tiefenabhängige Spaltzugfestigkeiten und Gesamtporositäten in der Mitte und am Rand der Betonfahrbahnplatte für die Entnahmebereiche A4 und A14-R1
- Tab. 9b: Überblick über ermittelte tiefenabhängige Spaltzugfestigkeiten und Gesamtporositäten in der Mitte und am Rand der Betonfahrbahnplatte für die Entnahmebereiche A14-R2 und A14-R3
- Tab. 9c: Überblick über ermittelte tiefenabhängige Spaltzugfestigkeiten und Gesamtporositäten in der Mitte und am Rand der Betonfahrbahnplatte für die Entnahmebereiche A14-GB-A und A14-GB-B
- Tab. 10a: Befund der AKR-provozierenden Lagerungen in den beprobten BAB-Abschnitten
- Tab. 10b: Befund der AKR-provozierenden Lagerungen in den beprobten BAB-Abschnitten
- Tab. 11: Ergebnisvergleich der in den Performance-prüfungen ermittelten Dehnungen bei ganzheitlicher und separater Betrachtung des Ober- und Unterbetons am Beispiel der Entnahmestelle A14-GB-B
- Tab. 12a: Ergebnis der Dünnschliffmikroskopie der Prüfkörper aus den beprobten BAB-Abschnitten A4 und A14-R1 vor und nach verschiedenartiger AKR-provozierender Lagerung
- Tab. 12b: Ergebnis der Dünnschliffmikroskopie der Prüfkörper aus den beprobten BAB-Abschnitten A14-R2 und A14-R3 vor und nach verschiedenartiger AKR-provozierender Lagerung
- Tab. 12c: Ergebnis der Dünnschliffmikroskopie der Prüfkörper aus den beprobten BAB-Abschnitten A14-GB-A und A14-GB-B vor und nach verschiedenartiger AKR-provozierender Lagerung

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2017

#### S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

#### S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

#### S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

#### S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

#### S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)

Alisov, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen

Schellenberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

Mollenhauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

#### S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehlung

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherckenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

#### S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

#### S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**  
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: **Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: **Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: **Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST**

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: **Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: **Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**

Botor, Tost € 15,50

S 136: **KIST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**

Augter, Kayser € 16,50

S 137: **Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: **Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**

Groschup, Große, Eger, Freudenstein

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: **Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn**

Dumer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: **Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**

Radenberg, Flottmann, Drewes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: **Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel**

Radenberg, Manke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

Bräu, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: **Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren**

Weise, Werner, Maier, Wilsch

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.