

Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 152

bast

Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

von

Oliver Mielich

Universität Stuttgart
Materialprüfungsanstalt

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 152

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 06.0111
Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus
AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

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

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-585-9

Bergisch Gladbach, Juni 2021

Kurzfassung – Abstract

Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Im Bereich des deutschen BAB-Netzes stellt sich derzeit das Problem dar, dass in den Jahren vor 2005/2006 zum Teil Gesteinskörnungen für den Bau von Betonfahrbahndecken verwendet wurden, die eine Alkaliempfindlichkeit aufweisen und dadurch heute mehr oder weniger ausgeprägte AKR-Schäden hervorrufen. Es ist abzusehen, dass in auch den kommenden Jahren mit größeren Erneuerungsmaßnahmen AKR-geschädigter Streckenabschnitte zu rechnen ist. Beim Ausbau dieser Strecken wirkt sich nachteilig aus, dass das anfallende Recyclingmaterial (RC-AKR-Material) zur Herstellung neuer Fahrbahndecken ungeeignet ist. Es sollte daher die Frage geklärt werden, ob und unter welchen Voraussetzungen das beim Ausbau gewonnene Aufbruchmaterial nach Aufbereitung als Sekundärrohstoff in Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) bzw. in hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT) in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Untersuchungen direkt nach der Aufbereitung lassen eine Verwertung von RC-AKR-Material in ToB (Frostschuttschicht, Schottertragschicht) und HGT zunächst interessant erscheinen. Die aus Laborversuchen, im Bestand und an wissenschaftlich begleiteten Neubaumaßnahmen gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass eine Verwertung in einer ToB keinen negativen Einfluss hat, wenn schädigende Auswirkungen einer sich möglicherweise im RC-Material fortsetzenden AKR ausgeschlossen werden können. Allgemein ist bei der Verwendung von Betonrecycling (RC-Material) in ToB eine mögliche Verminderung der Wasserdurchlässigkeit sowie der kapillarbrechenden Wirkung zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu wird eine Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken in HGT nicht empfohlen. Grund ist die Haftung von RC-AKR-Material zum Zementsteingerüst, welche durch eine nachträglich einsetzende AKR gestört wird und örtlich Spannungskonzentrationen ermöglicht, die ein Versagen des Gesamtquerschnitts bei Biegebeanspruchung bewirken. Der vorliegende Beitrag zeigt daher Möglichkeiten und Grenzen auf, welche sich bereits bei der Diagnose, dem Aufbruch und der Aufbereitung sowie bei der Verwertung von AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen ergeben.

Reuse of RC building materials from ASR damaged concrete pavements

In the period prior to 2005/2006 aggregates were partly applied for the construction of concrete pavement within the German motorway network (BAB) which are sensitive to alkali. This has resulted in the problem of the development of ASR damage to a lesser or greater degree. It can be anticipated that more renewal work for sections damaged as a result of ASR will be required. When disassembly these sections, one negative impact is that resultant recycling material (RC-ASR material) is unsuitable for the construction of new concrete pavements. Therefore, it has to be clarified as to whether, and under which conditions, the demolition material obtained during the removal process can be used as secondary raw material in base layers without binding agents (ToB) or hydraulically bound base layers (HGT). Examinations directly after processing have shown that use of RC-ASR material may be of interest in ToB (anti-frost layer, crushed-rock layer) and HGT. Results gained from lab tests, existing surfaces and scientifically monitored new construction work reveal that use in ToB has no negative impact if subsequent ASR can be excluded. When applying concrete recycling (RC material) it must in general be considered that RC material may have a negative impact on water permeability or the capillary-breaking effect in ToB. In contrast, use of recycling material from concrete road surfaces damaged by ASR is not recommended in HGT. The reason is the adhesion of RC-ASR material to the cement stone matrix which is damaged by subsequent ASR impact and which may cause local stress concentration which in turn causes failure of the total cross-section in case of flexural stress. This paper discusses opportunities and limits resulting from the diagnosis, breaking-up and processing as well as use of ASR-damaged concrete pavements.

Summary

Reuse of RC building materials from ASR damaged concrete pavements

1 Problems and objective

In the period prior to 2005/2006 aggregates were partly applied for the construction of concrete pavements within the German motorway network (BAB) which are sensitive to alkali. This has resulted in the problem of the development of ASR damage to a lesser or greater degree. It can be anticipated that more renewal work for sections damaged as a result of ASR will be required. When disassembly these sections, one negative impact is that resultant recycling material (RC ASR material) is unsuitable for the construction of new concrete pavements. Therefore, it has to be clarified as to whether, and under which conditions, the demolition material obtained during the removal process can be used as secondary raw material in base layers without binding agents (ToB) or hydraulically bound base layers (HGT).

2 Methodical approach

When utilizing ASR-damaged concrete pavements, a holistic assessment is required. The times before (diagnosis and breaking-up), during (processing) and after the breaking up the concrete pavement (utilization) have to be considered. Prior to breaking-up, concrete pavement is to be examined and assessed with regard to

- visual damage,
- concrete properties (compressive strength, elastic modulus, splitting tensile strength)
- and ASR-related residual damage potential.

RC-ASR material resulting from breaking-up and processing has a special feature with regard to utilization planned compared to RC material. Even after breaking-up and processing, conditions still exist which may lead to a subsequent alkali-silica reaction. The following conditions exist which need to be considered in examinations:

- Existence of an aggregate classified as alkali-sensitive
- Existence of new reactive fractured surfaces of the broken aggregate
- Alkalis in the cement stone matrix (from the binding agent)
- Alkali stored in the cement stone matrix (from input of de-icing salt during use)
- Moisture (stored via input when watering for compression of a ToB and drainage when using as ToB)
- De-icing salt input (via joints) when using as ToB or HGT

In addition to requirements included in rules and state-specific requirements for recycling material, the following should at least be identified after processing for RC ASR material:

- particle size distribution,
- determination of resistance to fragmentation,
- the CBR value
- and fatigue bending tensile strength for HGT application.

The time after processing is defined by requirements for bound and unbound base layers. Requirements of a ToB include bearing capacity, water permeability and capillary-breaking effect. A hydraulically bound base layer HGT should be sufficiently bearing and frost-resistant.

3 Testing program

3.1 Laboratory tests with RC-ASR material for ToB

When assessing an ASR-damaged concrete pavement and considering the respective construction, it can be assumed that the old concrete does not necessarily originate from the same old material. Different stiffnesses (e-modules) of the old concrete have to be assumed for ASR-damaged road surfaces which may deviate considerably within one concrete slab. Deviations of up to 50% have been recorded for the elastic modulus. Mends

and partially large asphalt surfaces from previous maintenance work must also be considered.

Examinations of the break-up material prepared with an impact crusher with downstream screening system to the RC ASR material showed that requirements resulting from technical rules and state-specific regulations could be observed. The scope of testing after processing includes definition of particle size distribution, material composition (e.g. share of asphalt granulate), fines, particle shape, purity, resistance to frost-de-icing change, volume stability, proctor density and ideal water content, environment-related properties as well as water permeability.

In addition to the scope of testing specified, two other tests have to be considered, which are of special significance in the context of damaging ASR. The damaging ASR reduces stiffness via dissolution processes and cracking in the alkali-sensitive aggregate (MIELICH et al. 2019). Two criteria which accurately record such impact after processing in an impact crusher are determination of resistance to fragmentation as well as a California-Bearing-Ratio test (CBR test), which describes the bearing capacity of base layers as a lab test.

In accordance with TL Gestein-StB 04/07, Annex E, determination of resistance to fragmentation is to be defined in the scope of application for layers without binding agents. In laboratory tests, determination of resistance to fragmentation occurred in accordance with DIN EN 1097-2. All impact test values identified in the lab for RC-ASR material, $SZ_{8/12.5}$, observe the requirements in accordance with TL Gestein-StB 04/07 as well as requirements of state-specific rules. This shows that ASR-caused cracking in the aggregate is negligible for the subsequent impact test by means of high-energy processing in the impact crusher.

In accordance with TL SoB-StB 04/07, the CBR test, in accordance with DIN EN 13286-47, is to be determined for construction material mixes 0/32 for crushed-stone base layers beneath concrete pavement after separation of a share of > 22mm at construction material mix 0/22 after 4h water immersion. However, as already explained, since damaging ASR reduces stiffness as a result of dissolving processes and cracking in the aggregate, the CBR test should also be executed in RC-ASR material if this has been included in an anti-frost layer. The limit of above 80% was reached for all samples examined in delivery status (after

processing) and after 24h water immersion so that using the material as a base layer without binding agent is possible due to the respective bearing capacity. In comparison, higher CBR values were reached with natural aggregate than with RC-ASR material. Finally, it can be also concluded for the CBR test that high bearing capacity characteristics can be achieved via high-energy processing despite ASR-caused loss of stiffness in the aggregate.

Both tests are therefore decisive for the assessment of RC-ASR material and must always be applied for the application of ToB (anti-frost layers and crushed-rock layers).

3.2 Laboratory tests with RC-ASR material for HGT

On account of its aggregate properties, RC-ASR material in principle has potential for use in a hydraulically bound base layers (HGT). Appropriate classification to observe or set characteristic values in accordance with standard is quite possible (HÜNGER & BÖRNER 2015).

As already established in examinations executed by HÜNGER & BÖRNER (2015), compressive strengths are achieved in HGTs with RC-ASR material which make the recycling material appear interesting for HGT application. A change in ambient conditions (increased temperatures up to 40 °C, high humidity up to 100%) does not affect the respective strengths. In fact, an increase in strength is recorded resulting from favourable temperature and humidity conditions via subsequent hydration. A similar behaviour was identified for the elastic modulus.

In contrast to examinations executed by HÜNGER & BÖRNER (2015), no restrictions result from length changes of HGT samples produced with RC-ASR material. The level of strain of ASR applied subsequently at temperatures up to 40 °C and humidity of up to 100% can be classified as low for hydraulically bound bases made with RC-ASR material using Portland cement with $Na_2O_{eq} \leq 0.76M.-%$.

According to LEYKAUF (1987), it is necessary to define the decisive strength property when executing fundamental examinations for the re-use of RC material, i.e. bending tensile strength. Since traffic loads occur as repeated loads, it is therefore necessary to define the fatigue bending tensile

strength (more than 2 million load changes are endured without fracture).

Bending beams with the dimensions 15 x 15 x 70 cm³ are suitable as specimens to define the fatigue bending tensile strength. Dynamic fatigue tests were carried out on these bending beams at an age of 60 days and storage in the 40 °C fog chamber (to exclude differing subsequent hardening). Load was applied via two linear loads of equal size in the third points at a span of 600 mm. The bending beams were protected from drying during the test by means of foil wrapping. Under frequency was selected at $\sigma_u = 0.10 \text{ N/mm}^2$ and test frequency at 3.33 Hz. Maximum tension σ_o was defined respectively at 50% of the static bending tensile strength (β_{BZvor}) at an age of 60 days. Fatigue tests were also carried out, with the same limiting conditions, on bending beams stored in the 40° C fog chamber for a period of 270 days.

Dynamic fatigue tests carried out in the lab showed that a large share of variants examined did not endure two million load changes without fracture. One possible cause could be that adhesive strength of the RC-ASR material (for new fractured surfaces) to the cement stone structure is reduced via ASR with subsequent effect. This hypothesis is supported in that gel-like products were found on the bending beams of 15 x 15 x 70 cm³. Due to the resultant point-by-point bonding, local stress concentrations are generated which lead to failure of the overall cross-section in case of a bending load.

It is also important whether a concrete road surface contains alkali-sensitive aggregate across the entire surface thickness or if this only exists in the top concrete layer or the bottom concrete layer. In cases where alkali-sensitive aggregate is to be found across the entire surface thickness, reduced adhesive strength of RC-ASR material with the cement stone can be assumed. If alkali-sensitive aggregate is only to be found in the top concrete layer (approx. 1/3 of the surface thickness), better adhesive strength can be assumed. Examinations into cases in which alkali-sensitive aggregate only exists in the bottom concrete layer (approx. 2/3 of the surface thickness) have not yet been executed.

3.3 Building project with RC-ASR material

Visual inspection of the surface of base layers applied without binding agents indicate that

separation of the RC material cannot be permanently avoided. However, separation was also identified for new construction work in which natural aggregates were applied. Results of bearing capacity measurements with static and dynamic plate load testers on top of crushed-rock layers as well as bearing capacity measurements with the Falling-Weight-Deflectometer on top of crushed-rock layers and on top of new concrete indicate that consistent bearing capacities in bases without binding agents can also be achieved using RC-ASR material.

The E_{v2} value of 150 MN/m² required ZTV SoB-StB 04/07 can be achieved with standard compacting machines. The limit for the ratio value $E_{v2}/E_{v1} \leq 2.2$ or for $E_{v1} \geq 0,6 \% \cdot E_{v2,target}$ (when $E_{v2}/E_{v1} \geq 2.2$) can also be observed. However, problems may arise in fulfilling such requirements if the layers beneath the ToB do not record sufficient bearing capacity values or if the base layer itself is not sufficiently compressed. However, such problems arise irrespective of whether building construction mixes originate from natural aggregate, recycling material of crushed concrete or from ASR-damaged concrete pavements.

Deformations which are unavoidable due to construction traffic prior to the placing of concrete should be levelled out or rolled. However, deformations occur irrespective of whether building construction mixes originate from natural aggregate, recycling material of crushed concrete or from ASR-damaged concrete pavements. Prior to placement of concrete it must be ensured that the ToB is not dry. Otherwise there is a risk that water will be removed from the lower section of the concrete placed.

3.4 Assessment of existing roads with RC-ASR material

In the new federal states, a base layer without binding agents made of recycling material from ASR-damaged road paving concrete was constructed for the first time on a motorway section of the BAB A24 in 1995/96, left lane km 136+655 to km 172+220. FWD measurements carried out in 2017 on this section revealed that the good bearing capacity of ToB when constructed led to an increase in bearing capacity after decades of service life. This can be explained by the subsequent hardening potential of RC material. Comparative field tests have shown that RC material records slightly

increased bearing capacity compared to natural aggregates. However, when RC material is used in base layers without binding agents, it can have a negative impact on water permeability. Damage resulting from a change in bearing conditions in the absence of erosion-resistant and frost-proof support, compacting defects or from insufficient drainage in the base were not identified on the motorway section on the A24 with crushed-stone base layers of RC-ASR material or on other motorway sections with RC material.

4 Summary

Application of recycling material from ASR-damaged concrete pavement in base layers without binding agents (ToB) and hydraulically bound base layers (HGT) in road construction can provide a considerable contribution to conservation of resources of natural aggregates. Therefore, an integral assessment is also required. This includes diagnosis, breaking-up, processing and utilization itself.

In addition to the impact from temperature and humidity, ASR-caused damaging processes can also have a negative effect on the longitudinal expansion development of concrete roads. This is the case when the damaging process takes effect across the entire concrete thickness or only in the bottom concrete layer. Damaging processes in the bottom concrete layer are not typified by colour changes in the joint areas as an indication of the onset of ASR, but by longitudinal cracks in roadway slabs and diamond-shaped cracking in joint areas which indicate potential collapse. Longitudinal expansion development also results in an overall stress condition in the concrete roads which has to be reduced by means of appropriate breaking-up. An impact crusher with downstream screening system is best suited for high-energy and targeted processing without subsequent treatment with properties which comply with requirements for recycling material.

The following results for the utilization of recycling material from ASR-damaged concrete pavement in base layers without binding agents (ToB) were derived in the lab, from tests on existing roads and from scientifically monitored new construction work:

- If subsequent ASR development in an unbound base layer can be excluded, utilization in a ToB has no negative impact on bearing capacity.
- In addition to the high bearing capacity resulting from the application of RC material of ASR-damaged concrete pavement, an increase in bearing capacity during service life can also be expected.
- If, after breaking-up and processing, state-specific requirements and requirements resulting from technical use for the recycling material are observed, use of recycling material of ASR-damaged road surface concrete is possible.
- Potential negative effects on water permeability or capillary-breaking effect on base layers without binding agents have to be considered.

The following can be derived from lab tests on the use of recycling material of ASR-damaged road surface concrete in hydraulically bound base layers (HGT):

- Gel-like reaction products were identified on some cylinders and bending beams produced.
- An impact on compressive strengths and elastic modules when storing at temperatures of 40 °C and humidity of 100% could not be identified.
- The level of strain of subsequent onset of ASR can be classified as low for hydraulically bound base layers examined with RC-ASR material using Portland cement $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aq}} \leq 0,76 \text{ M.-%}$
- However, if adhesive strength of the RC-ASR material to the cement stone structure is damaged by way of subsequent onset of ASR, the resultant increase of point-by-point bonding and local stress concentrations may cause failure to the entire cross-section in case of bending stress.
- Failure in a dynamic fatigue test was identified in samples with RC-ASR material from concrete pavement, for which the top layer of concrete as well as the bottom layer of concrete were classified as alkali-sensitive.

Results recorded up to now indicate that use of RC-ASR material for hydraulically bound base layers cannot be recommended.

5 Outlook

All characteristic values examined up to now are sample values which may change as a result of fluctuating, ASR-related damaging processes in the concrete road surface and production-related fluctuations. When applying recycling material of ASR-damaged road pavement concrete in base layers without binding agents, care and caution are required despite the potential mentioned above. Experience made in diagnosis, breaking-up, processing and utilization should be documented and collected for all future construction work and made accessible to builders and to contractors. The resultant database enables exploitation of all technical and economic opportunities without endangering construction by means of failures. The resultant database can facilitate process safe and reliable production of base layers with recycling material of ASR-damaged concrete road surfaces, which is currently one of the issues still unclarified.

Inhalt

Abkürzungen	12	3.3	Untersuchungen an Tragschichten ohne Bindemittel (ToB)	21
Symbole	12	3.3.1	Widerstand gegen Zertrümmerung an RC-AKR-Material	21
1 Einleitung	13	3.3.2	CBR-Wert an RC-AKR-Material	22
1.1 Probleme und Zielstellung	13	3.3.3	AKR-provozierende Lagerung an RC-AKR-Material	22
1.2 Methodisches Vorgehen	13	3.3.4	Korngrößenverteilung an RC-AKR-Material	22
2 Stand von Wissenschaft und Technik	14	3.3.5	Einaxialer Kompressionsversuch an RC-AKR-Material	22
2.1 Reaktionsmechanismus einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion	14	3.3.6	Begleitende Untersuchungen.....	23
2.2 Schädigungsmechanismus unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel.....	14	3.4	Untersuchungen an eingebauten Tragschichten ohne Bindemittel (ToB)	23
2.3 Dunkelverfärbung und Tausalzeintrag an Fahrbahndeckenbetonen	15	3.4.1	Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer	23
2.4 AKR unter kombinierten Bedingungen.....	16	3.4.2	Prüfungen zur Ermittlung von Verformungskenngrößen	24
2.5 Schadenskategorien und Schadensentwicklung einer AKR	17	3.5	Untersuchungen an hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT).....	24
2.6 AKR im Fahrbahndeckenbeton – Verwertung des geschädigten Betons	17	3.5.1	Herstellung und Lagerung von HGT-Probekörpern aus RC-AKR-Material	24
2.6.1 KRASS und WEINGART 1993.....	17	3.5.2	Längenänderung von HGT-Probekörpern aus RC-AKR-Material	25
2.6.2 HÜNGER 2013	18	3.5.3	Mechanische Eigenschaften von HGT-Probekörpern aus RC-AKR-Material	25
2.6.3 Fallbeispiele für die Anwendung in ToB	18	3.5.4	Dauerschwingversuch an HGT-Biegebalken aus RC-AKR-Material.....	25
2.6.4 Fallbeispiele für die Anwendung in HGT.....	19	4 AKR-geschädigte Fahrbahndeckenbetone		26
3 Untersuchungsprogramm und Versuchsbeschreibung	19	4.1	Streckenlos BAB A9 – km 24+650 bis km 23+243, RiFa Berlin (2016)	26
3.1 Allgemeines zum Untersuchungsprogramm	19	4.1.1	Ergebnisse	30
3.2 Untersuchungen am Fahrbahndeckenbeton	19	4.2	Streckenlos BAB A14 – km 143+500 bis km 144+200, RiFa Magdeburg (2016)	37
3.2.1 Mechanische Eigenschaften AKR-geschädigter Fahrbahndeckenbetone	19			
3.2.2 Nachdehnung AKR-geschädigter Fahrbahndeckenbetone	21			

4.2.1	Ergebnisse	41	7	Diskussion	72
4.3	Streckenlos BAB A9 – km 33+400 bis km 40+305, RiFa München (2017).....	47	7.1	AKR-geschädigte Fahrbahndeckenbetone	72
4.3.1	Ergebnisse	48	7.1.1	Mechanische Eigenschaften	72
4.4	Streckenlos BAB A9 – km 22+565 bis km 16+500, RiFa Berlin (2017)	55	7.1.2	Nachdehnung, bleibende Dehnung und verbleibende mechanische Eigenschaften	75
4.4.1	Ergebnisse	56	7.2	Tragschichten ohne Bindemittel.....	75
5	Neubaumaßnahmen mit und ohne RC-AKR-Material	62	7.2.1	Widerstand gegen Zertrümmerung	78
5.1	Streckenlos BAB A9 – km 33+400 bis km 40+305, RiFa München (2017).....	62	7.2.2	Korngrößenverteilung	79
5.1.1	Tragfähigkeitsmessungen am Streckenabschnitt bei km 36+100 bis km 36+200.....	62	7.2.3	CBR-Wert.....	79
5.1.2	Instrumentierung am Tagesansatz bei km 36+190	62	7.2.4	Einaxialer Kompressionsversuch vor und nach AKR-provozierender Lagerung	79
5.1.3	Ergebnisse	64	7.2.5	Tragfähigkeitsmessungen im Neubau.....	80
5.2	Streckenlos BAB A9 – km 19+242 bis km 16+500, RiFa Berlin (2017/2018).....	65	7.2.6	Tragfähigkeitsmessungen und Beobachtungen im Bestand.....	82
5.2.1	Tragfähigkeitsmessungen am Streckenabschnitt bei km 17+000 bis 16+900	65	7.3	Hydraulisch gebundene Tragschichten.....	83
5.2.2	Ergebnisse	66	7.3.1	AKR-provozierende Lagerung	83
5.3	Streckenlos BAB A14 – km 87+120 bis km 83+950, RiFa Dresden (2018).....	66	7.3.2	Dehnungspotenzial von HGT-Probekörpern.....	84
5.3.1	Tragfähigkeitsmessungen am Streckenabschnitt bei km 85+700 bis 85+600	66	7.3.3	Mechanische Eigenschaften von HGT-Probekörpern.....	84
5.3.2	Ergebnisse	67	7.3.4	Dauerschwingversuche.....	86
6	Bestandsstrecken mit RC-AKR-Material	68	7.3.5	Tausalzeintrag über die Fugen	86
6.1	Streckenlos BAB A24 – km 172+220 bis km 166+377, RiFa Hamburg	68	8	Schlussfolgerungen	86
6.1.1	Ergebnisse	68	8.1	Schadensdiagnose (Substanzbewertung).....	86
6.2	Streckenlos BAB A24 – km 158+593 bis km 153+567, RiFa Hamburg	70	8.1.1	Visuelle Schadensbegutachtung.....	87
6.2.1	Ergebnisse	71	8.1.2	Betoneigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit)	89
			8.1.3	AKR-bedingtes Restschädigungspotenzial	90
			8.2	Aufbruch von Betondecken.....	91
			8.2.1	Einflüsse auf den Aufbruch	91
			8.2.2	Aufbruchtechnologie im Betonstraßenbau	91

8.2.3	Aufbruchtechnologie – Besonderheiten bei AKR-geschädigten Betondecken	91
8.3	Aufbereitung.....	94
8.3.1	Laborversuche mit RC-AKR Material für ToB	94
8.3.2	Laborversuche mit RC-AKR-Material für HGT	95
8.4	Verwertung.....	96
8.4.1	Neubaumaßnahmen mit RC-AKR Material	96
8.4.2	Bewertung von Bestandsstrecken	96
9	Zusammenfassung	96
10	Empfehlungen	98
11	Ausblick	99
	Literatur	100
	Normen, Richtlinien, Merkblätter	103
	Bilder	104
	Tabellen	109

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen
BASt-Archiv ELBA unter:
<https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

Abkürzungen

AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
BAB	Bundesautobahnabschnitt
Bk	Belastungsklasse
CBR	California bearing ratio
FSS	Frostschuttschicht
FWD	Falling-Weight-Deflectometer
HGT	hydraulisch gebundene Tragschicht
LFG	leichtes Fallgewichtsgesetz für den dynamischen Lastplatten-druckversuch
NK	40 °C Nebelkammerlagerung
O	oben
OB	Oberbeton
OK	Oberkante
PDV	statischer Plattendruckversuch
RC-AKR-Material	Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken
RC-AKR-ToB	Tragschicht ohne Bindemittel aus RC-AKR-Material
RC-ToB	Tragschicht ohne Bindemittel aus RC-Material
RC-Material	Recyclingmaterial aus Betonaufruch
RDO	Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung im Oberbau
RiFa	Richtungsfahrbahn
RStO	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus
SK	Schadenskategorie
STS	Schottertragschicht
STSuB	Schottertragschicht unter Beton
SZ	Schlagzertrümmerung
ToB	Tragschicht ohne Bindemittel
UB	Unterbeton
U	unten
V	vertikal
SS	Standspur

LS	Lastspur
1.ÜS	erste Überholspur
2.ÜS	zweite Überholspur
km	Betriebskilometer
n.e.	nicht ermittelt

Symbole

$E_{\text{Modul}_{\text{vor}}}$	statischer Elastizitätsmodul vor Klimalagerung
$E_{\text{Modul}_{\text{nach}}}$	statischer Elastizitätsmodul nach Klimalagerung
E_s	Steifemodul, ermittelt im einaxialen Kompressionsversuch
E_{vd}	Verformungsmodul (ermittelt mit dem LFG)
E_{v2}	Verformungsmodul (Erstbelastung)
E_{v2}	Verformungsmodul (Wiederbelastung)
$E_{\text{v2}}/E_{\text{v1}}$	Verhältniswert
$E_{\text{ä}}$	äquivalenter Verformungsmodul
E_0	Bettungsmodul
β_{BZvor}	statische Biegezugfestigkeit vor Dauerschwingversuch
β_{BZnach}	statische Biegezugfestigkeit nach Dauerschwingversuch
σ_u	Unterspannung im Dauerschwingversuch
σ_o	Oberspannung im Dauerschwingversuch
$\epsilon_{(40/100),280d}$	Nachdehnung nach 280 Tagen im Klima (40/100)
$\epsilon_{(20/65)}$	bleibende Dehnung im Klima (20/65) nach 280 Tagen im Klima (40/100)

1 Einleitung

1.1 Probleme und Zielstellung

Im Bereich des deutschen BAB-Netzes stellt sich derzeit das Problem dar, dass in den Jahren vor 2005/2006 zum Teil Gesteinskörnungen für den Bau von Betonfahrbahndecken verwendet wurden, die eine Alkaliempfindlichkeit aufweisen und dadurch heute mehr oder weniger ausgeprägte AKR-Schäden hervorrufen. Erkennbare Schäden, meist beginnend mit einer Graufärbung in den Quer- und Längsfugen, treten gewöhnlich nach 7 bis 15 Jahren Liegezeit auf, lange bevor die geplante Nutzungsdauer von 30 Jahren erreicht wird.

Bei 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 (WEISE et al., 2018a). Im Jahr 2016 ergaben Recherchen im Bundesland Brandenburg eine Mindestlänge sichtbar oder nachweislich AKR-geschädigter Betondecken aus den siebziger und achtziger Jahren von ca. 240 km Richtungsfahrbahn und von ca. 160 km Richtungsfahrbahn aus den neunziger Jahren. AKR-Verdachtsfälle an 138 km Richtungsfahrbahn bestätigten sich leider bis heute auf Streckenabschnitten von 72 km Länge, von denen ein Teil bereits saniert wurde (KLEE, 2018). Im Bundesland Sachsen-Anhalt sind bzw. waren rd. 240 km Richtungsfahrbahn von einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) betroffen, die in den nächsten Jahren zur Erneuerung anstehen (MARQUORDT & KRELLE, 2015). Es ist daher abzusehen, dass in den kommenden Jahren im gesamten Bereich des deutschen BAB-Netzes mit größeren Erneuerungsmaßnahmen AKR-geschädigter Streckenabschnitte zu rechnen ist.

Die Verwertung von Fahrbahndecken aus Beton, die durch eine AKR geschädigt sind, sind als Ausgangsbeton für Recyclingmaterial (RC-AKR-Material) zur Herstellung neuer Fahrbahndecken aus Beton ungeeignet (MERKBLATT, 1998). Der Einsatz von RC-AKR-Material in Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) und hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT) würde daher noch immer einen bedeutenden Beitrag zur Ressourcenschonung natürlicher Gesteinsvorkommen leisten. Bei der Verwertung von RC-AKR-Material in ToB oder HGT ist zu

beachten, welche Auswirkungen sich auf die Gesamtkonstruktion der Straße ergeben können. Es ist auch zu unterscheiden, welche negativen Auswirkungen sich aus der Verwertung eines RC-AKR-Materials ergeben und welche negativen Auswirkungen einem Recyclingmaterial aus Betonaufbruch (RC-Material) zuzuschreiben sind.

Im Vergleich zu RC-Material stellt das RC-AKR-Material eine Besonderheit dar.

Nach dem Deckenaufbruch sind im aufbereiteten Recyclingmaterial immer noch mögliche Voraussetzungen wie

- die Anwesenheit einer als alkaliempfindlich eingestuften Gesteinskörnung,
- das Vorhandensein von neuen reaktiven Bruchflächen der gebrochenen Gesteinskörnung,
- Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus dem Bindemittel),
- gespeicherte Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus Tausalzeintrag während der Nutzung),
- die Feuchtigkeit (gespeichert über den Eintrag bei Wässerung zur Verdichtung der ToB und Entwässerung während der Nutzung als ToB),
- oder der Tausalzeintrag (über Fugen) während der Nutzung als ToB oder HGT

gegeben, die zu einer nachträglich einsetzenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion führen könnten.

1.2 Methodisches Vorgehen

Bei der Verwertung AKR-geschädigter Fahrbahndeckenbetone ist eine ganzheitliche Bewertung erstrebenswert. Es sollten die Zeitpunkte vor (Diagnose und Aufbruch), während (Aufbereitung) und nach dem Fahrbahndeckenaufbruch (Verwertung) betrachtet werden.

Vor dem Aufbruch ist die Betonfahrbahn hinsichtlich

- dem visuellen Schadensbild,
- der Betoneigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit)
- und dem AKR-bedingten Restschädigungspotenzial

zu prüfen und zu beurteilen.

Das beim Aufbruch und der Aufbereitung anfallende RC-AKR-Material stellt verglichen mit RC-Material hinsichtlich der angestrebten Verwertung eine Besonderheit dar. Auch nach dem Aufbruch und der Aufbereitung sind immer noch Voraussetzungen gegeben, die zu einer nachträglich einsetzenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion führen könnten. Folgende Voraussetzungen sind gegeben, die in den Untersuchungen zu berücksichtigen sind:

- Anwesenheit einer als alkaliempfindlich eingestuftes Gesteinskörnung
- Vorhandensein von neuen reaktiven Bruchflächen der gebrochenen Gesteinskörnung
- Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus dem Bindemittel)
- gespeicherte Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus Tausalzeintrag während der Nutzung)
- Feuchtigkeit (gespeichert über Eintrag bei Wässerung zur Verdichtung einer ToB und Entwässerung während der Nutzung als ToB)
- Tausalzeintrag (über Fugen) während der Nutzung als ToB oder HGT

Neben den Anforderungen, die sich aus den Regelwerken und den länderspezifischen Anforderungen an Recyclingmaterial ergeben, sollten für RC-AKR-Material nach der Aufbereitung mindestens

- die Korngrößenverteilung,
- der Widerstand gegen Zertrümmerung (Schlagversuch),
- der CBR-Wert
- und die Dauer-Biegezugfestigkeit für den Anwendungsfall HGT

ermittelt werden. Der Zeitpunkt nach der Aufbereitung definiert Anforderungen an ungebundene und gebundene Tragschichten. Als Anforderung an eine ToB ist die Tragfähigkeit, die Wasserdurchlässigkeit und die kapillarbrechende Wirkung zu nennen. Eine hydraulisch gebundene Tragschicht HGT sollte ausreichend tragfähig und frostsicher sein.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Reaktionsmechanismus einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) handelt es sich grundsätzlich um eine chemische Reaktion, die im Beton zwischen der hochalkalischen ($\text{pH} \geq 13,5$) Porenlösung (OH^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} -Ionen), bestimmten SiO_2 -Modifikationen in Gesteinskörnungen und Wasser abläuft (z. B. STARK, 2008). Dabei bilden sich Alkali-Kieselsäure-Gele, die unter Wasseraufnahme quellen, dadurch Dehnungen hervorrufen und schließlich zu Rissen im Beton führen können.

Das sich bildende Alkali-Kieselsäure-Gel ist eine amorphe Substanz, welche aber neueren Untersuchungen zufolge nur am Rand einer Gesteinskörnung oder in der Zementsteinmatrix anzutreffen ist. Wo aber der Schadensprozess beginnt, nämlich im Innern eines Gesteinskorns, wird ein kristallines Reaktionsprodukt vorgefunden (LEEMANN & LURA, 2013). Einer Forschergruppe aus der Schweiz ist es gelungen (DÄHN et al., 2016), das Reaktionsprodukt mit einem Ring-Teilchen-Beschleuniger im Gesteinskorn genauer zu identifizieren. Die Forscher identifizierten im Innern des Gesteinskorns eine kristalline Substanz, die einen den Tonmineralien sehr ähnlichen schichtigen Aufbau besitzt, der durch Feuchtigkeitsschwankungen sein Volumen vergrößern kann und dadurch Dehnungen hervorruft, die schließlich zu Rissen im Beton führen.

Es ist zudem bekannt, dass die AKR eine Verschlechterung der mechanischen Betoneigenschaften wie Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul um bis zu 50 % bewirken kann. Diese Betoneigenschaften sind viel stärker betroffen als die Druckfestigkeit (PLEAU et al., 1989; MIELICH, 2010; SANCHEZ et al., 2017).

2.2 Schädigungsmechanismus unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel

Bei einer äußeren Zufuhr alkalihaltiger Enteisungsmittel, d. h. bei einem Eindringen von gelöstem NaCl in den bereits erhärteten Beton, kommt es nicht zu einem Anstieg des pH-Wertes in der Porenlösung (GIEBSON, 2013; DRESSLER, 2013). Das

SiO₂-Löseverhalten wird zunächst maßgeblich durch den ursprünglichen, d. h. zementbedingten pH-Wert gesteuert. Untersuchungen in (GIEBSON, 2013) deuten an, dass eine äußere NaCl-Zufuhr das SiO₂-Löseverhalten jedoch auch direkt beeinflussen kann. In (DRESSLER, 2013) wird von der möglichen Bildung eines Na-Kieselensäure-Komplexes ausgegangen. Unabhängig vom eigentlichen Mechanismus belegen Versuche in (REINHARDT & MIELICH, 2014), dass in Abhängigkeit vom alkalischen Milieu der Löseangriff auf SiO₂-Modifikationen und andere gesteinsbildende Minerale eine Entfestigung des Gesteinskorns zur Folge hat und im Ergebnis zu einem Absinken des E-Moduls der Gesteinskörnung führt.

Infolge des SiO₂-Lösevorgangs werden verbrauchte OH⁻-Ionen sowie für die Bildung von Reaktionsprodukten (AKR-Gel) benötigte Ca²⁺-Ionen aus dem Portlanditdepot (Ca(OH)₂) des Zementsteins nachgeliefert (GIEBSON, 2013). Durch den damit einhergehenden Verbrauch des Portlandits kann es zu einer Veränderung des Porenraums im erhärteten Beton kommen. Vor allem in den Übergangszonen zwischen Gesteinskörnern und Betonmatrix, in der sich Portlandit bevorzugt anlagert, kann das zu einer lokalen Erhöhung der Porosität führen (SCRIVENER et al., 2004).

MIELICH et al. (2015a) zeigten, dass unter Einwirkung von NaCl-Lösung die Druckfestigkeiten bei AKR-geschädigten Proben im Vergleich zu ungeschädigten Proben gleicher Zusammensetzung abnehmen. Dies wurde auf die AKR-bedingte Gefügeschädigung zurückgeführt. Unter der Annahme, dass sich die Porosität in der Übergangszone zwischen Gesteinskörnern und Betonmatrix erhöht (DRESSLER, 2013), wird deutlich, warum speziell die Druckfestigkeit feinkörniger Betone stärker abnimmt als die von grobkörnigen. Dies ist durch die größere Anzahl an Kontaktflächen bedingt. Gestützt wird die These dadurch, dass in der feinkörnigen Mischung bei lichtmikroskopischen Untersuchungen deutlich mehr Mikrorisse in der Übergangszone Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix gefunden wurden als in der grobkörnigen.

Der E-Modul des Betons wird durch die E-Moduln des Zementsteins und der Gesteinskörnung bestimmt. Unter Einwirkung von NaCl-Lösung kommt es in den Untersuchungen in (MIELICH et al., 2015a) zu einem deutlichen Abfall des E-Moduls, der maßgeblich durch die AKR-geschädigten Gesteinskörner verursacht wird. Demnach ist die Ab-

nahme des E-Moduls der Gesteinskörnung neben der AKR-bedingten Rissbildung auch auf eine Entfestigung des Gesteins infolge des Löseangriffs auf dessen Minerale zurückzuführen (MIELICH, 2010). Die mechanischen Eigenschaften einer Gesteinskörnung im Beton sind damit auch von dem umgebenden Milieu abhängig. Dies wird durch die Ergebnisse in (REINHARDT & MIELICH 2014) bestätigt. Die Ergebnisse in (MIELICH, 2010; MIELICH et al., 2015b) zeigten deutlich, dass der E-Modul des Zementsteins nur sehr wenig beeinflusst wird und die teils deutliche Abnahme der E-Moduln im Fall AKR-geschädigter Betone maßgeblich auf eine Schädigung der Gesteinskörner zurückzuführen ist.

Über den Einfluss der AKR-Schädigung auf das Kriechverhalten von Straßenbetonen nach AKR-provozierender Lagerung wird erstmalig in (MIELICH et al., 2019) berichtet. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die AKR-verursachte Rissbildung in der Gesteinskörnung sich in die Matrix fortsetzt und zwar häufiger bei größerem Matrixvolumen. Bei größerem Matrixvolumen und dadurch vermehrter Rissbildung wird das Kriechen vergrößert.

2.3 Dunkelfärbung und Tausalzeintrag an Fahrbahndeckenbetonen

In (WEISE et al., 2018a) wird erstmals mit zerstörungsfreier Prüftechnik bestätigt, dass eine erhöhte Durchfeuchtung für die Dunkelfärbung der Oberfläche der Betonfahrbahndecke im Fugenbereich verantwortlich ist. Die Ergebnisse stellen eine wertvolle Basis für Simulationsrechnungen zur Verifizierung des Einflusses einer ungleichmäßigen lokalen Durchfeuchtung der Betonfahrbahnplatten auf das Trag- und Verformungsverhalten des Plattensystems dar (WEISE et al., 2018a).

Der Frage, ob mit einem erhöhten Feuchteintrag auch ein erhöhter Tausalzeintrag einhergeht, wird in (WEISE et al., 2018b) nachgegangen. Das ist insoweit von Interesse, da beide Faktoren eine Grundvoraussetzung für eine schädigende AKR bilden. In den Untersuchungen wird mit der Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) an einem beprobten, einschichtig/zweilagig und 2004 hergestellten BAB-Abschnitt eine Mindesteindringtiefe für Natrium von ca. 1,5 cm festgestellt. Im Gegensatz dazu werden für Chlorid deutlich größere Eindringtiefen ermittelt. Als möglicher Erklärungsansatz dienen

die Untersuchungsergebnisse aus (WEISE, 2017) zum Einfluss der Tausalzkonzentration auf den Natrium- und Chlorideintrag in den Fahrbahndeckenbeton bei der FIB-Klimawechsellagerung. Demnach wird bei geringerer NaCl-Konzentration der aufsteigende Prüflösung (1%ige NaCl-Lösung) primär Chlorid eingetragen. Erst bei höherer NaCl-Konzentration (3,6%ige NaCl-Lösung) erfolgt auch ein signifikanter Natriumeintrag. Dieses Ergebnis ist auch in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen in (GIEBSON et al., 2017). Die Autoren gehen unter Berücksichtigung von Basiswerten der Referenzprobe bei ungeschädigten Probekörpern davon aus, dass das Natrium bei einer aufsteigenden Prüflösung (3,6%ige NaCl-Lösung) während der FIB-Klimawechsellagerung mindestens bis in eine Tiefe von 80 mm eindringt. Die Ausführungen belegen, dass für die Klimawechsellagerung als AKR-Performance Prüfung nach ARS 04/2013 das AKR-Potenzial von Fahrbahndeckenbetonen auch ohne eine gesonderte Berücksichtigung von Vorschäden durch eine zyklische Beanspruchung und möglichen Effekten des Einwalkens auf der sicheren Seite liegend beurteilt wird (GIEBSON et al. 2019).

Die Anreicherung des Alkaligehaltes im Zementstein von Betonfahrbahndecken wurde auch mit einem an der TU Hamburg-Harburg entwickelten Verfahren bestimmt (JEHN et al., 2012). Die ermittelten Alkaliprofile an Betonfahrbahndecken zeigten eine Anreicherung von Natrium durch Tausalzzufuhr nur an der obersten Schicht (0 bis 1 cm) und zwar unabhängig davon, ob es sich um eine Stelle in Fuggenähne oder Fahrbahnmitte handelte. Die Betone wurden in den Sommermonaten entnommen. Daher ist es möglich, dass die Anreicherung von Alkalien in Wintermonaten, in denen eine Tausalzzufuhr stattfindet, höher ist (JEHN et al., 2012).

2.4 AKR unter kombinierten Bedingungen

Betonfahrbahnen sind während ihrer Nutzung lastabhängigen und lastunabhängigen Beanspruchungen ausgesetzt, die zu einer Veränderung im Betongefüge führen. Mit steigender mikrostruktureller Schädigung nimmt das Eindringen durch flüssige Medien zu und kann durch den überrollenden Verkehr verstärkt werden. Unter bestimmten Voraussetzungen kann dann eine schädigende AKR begünstigt werden. Daher untersuchte die in 2011 eingerichtete DFG-Forscherguppe 1498 die Alkali-

Kieselsäure-Reaktion in Betonbauteilen bei gleichzeitiger zyklischer Beanspruchung und externer Alkalizufuhr. Schwerpunktmäßig wurden die grundlegenden Zusammenhänge zwischen Initiierung und Ausweitung von Vorschädigung des Betongefüges, des Transports der Alkalien in das Betongefüge sowie des Transports der Alkalien in ggf. vorgeschädigte Gesteinskörner hinein und die dann von innen heraus folgende AKR-Gelbildung im Korn selbst untersucht (BREITENBÜCHER 2015).

Untersuchungen zur Degradation des Betons durch zyklische Beanspruchung werden u. a. in (PRZONDZONIO et al. 2018) beschrieben. Demnach werden in einem Mehrfachprüfstand großformatige Betonprobekörper einer zyklischen Beanspruchung ausgesetzt. Variiert werden Anzahl an Lastzyklen und das Spannungsverhältnis der Oberspannung zu Biegezugfestigkeit. Die Auswirkungen einer Vorschädigung auf die Transportprozesse in den Beton hinein, werden mit einer Rundlaufanlage (PRZONDZONIO et al. 2015) erfasst. Mit dieser Anlage konnte die Anzahl von Überrollungen (zum Einwalken aufstehender Prüflösungen) variiert werden.

Daran anschließende Untersuchungen mit der FIB-Klimawechsellagerung zeigen (GIEBSON et al. 2019), dass das Einwalken (Überrollung bei gleichzeitiger Einwirkung von NaCl-Lösung) nicht zu einer signifikanten Verstärkung der AKR beiträgt. Im Gegensatz dazu begünstigt aber die mechanisch induzierte Vorschädigung die AKR infolge der verstärkten Aufnahme von NaCl-Lösung und Wasser. Die Autoren schlussfolgern, dass die rein kapillar aufgenommene Menge an NaCl-Lösung die AKR in den Untersuchungen beschleunigte.

In Ergänzung zu den Untersuchungen in (PRZONDZONIO et al. 2015), wurden prüftechnische Voraussetzungen für eine weitere Charakterisierung der Degradation bzw. Rissbildung im Fahrbahndeckenbeton durch die mechanisch induzierte Vorschädigung geschaffen (WEISE et al. 2015). So wurde dort zum Beispiel, ausgehend von einem gewählten Belastungsregime (Oberspannung σ_o von 50 % der Biegezugfestigkeit), ein maximaler Abfall des relativen dyn. E-Moduls von 8–10 %, welcher als Indiz für die mechanische Vorschädigung gilt, ermittelt (WEISE et al. 2018c). Wie bereits oben erwähnt, kommen auch diese Autoren zu dem Schluss, dass die mechanische Vorschädigung der Prüfkörper ausschließlich bei ihrer Beaufschlagung mit NaCl-Lösung während der FIB-Klimawechsellagerung zu einer moderaten Erhöhung der Dehnung führt. Ins-

gesamt kann festgehalten werden, dass durch die einseitige Tausalzbeaufschlagung der Prüfkörper während der FIB-Klimawechselagerung die Auswirkungen einer vorhandenen degradierten Betonrandzone am besten bewertet werden können. Abschließend soll nicht unerwähnt bleiben, dass unabhängig vom Alkalieintrag die mechanische Vorschädigung die bruchmechanischen Materialparameter zum Teil maßgebend verändert (WIEDMANN et al. 2017).

2.5 Schadenskategorien und Schadensentwicklung einer AKR

Im April 2012 wurde mit einem Rundschreiben des damaligen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung eine Empfehlung für die Schadensdiagnose und die bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen veröffentlicht (Rundschreiben, 2012). Darin sind verschiedene Schadenskategorien beschrieben, die von farblichen Veränderungen in den Fugenbereichen, Rissen sowie Verschotterung (beginnend in den Fugenkreuzen und Fugenbereichen) bis hin zum Substanzverlust reichen. Die Zuordnung eines vorliegenden AKR-Schadens erfolgt in vier Schadenskategorien.

Schadenskategorie 0:

- Vorhandensein einer als alkaliempfindlich eingestuftes Gesteinskörnung in einer vorhandenen Betondecke
- schädigende AKR ist auf Grund von Untersuchungen zu erwarten, aber noch keine äußeren AKR-Merkmale erkennbar

Schadenskategorie I:

- Verfärbung im Bereich der Querfugen / Fugenkreuzungen (i. A. beginnend im Fugenkreuz)
- keine über Schwindrisse hinausgehende Rissbildungen

Schadenskategorie II:

- ausgeprägte Verfärbung im Bereich der Fugen
- Rissbildungen in Fugenkreuzbereichen
- beginnende bis ausgeprägte Netzzrissbildung
- ggf. Längs- und Querrisse an den Querfugen
- ggf. zusätzliche Längsrissbildung in Rüttelgassen
- noch kein Substanzverlust.

Schadenskategorie III:

- ausgeprägte Verfärbungen im Bereich der Fugen sowie in den Fahrbahnplatten
- sehr ausgeprägte Rissbildungen (häufig mit Verfärbungen)
- Kantenschäden sowie Eckaus- und -abbrüche und/oder
- Substanzverlust, z. B. beginnende „Verschotterung“ im Quersfugenbereich

2.6 AKR im Fahrbahndeckenbeton – Verwertung des geschädigten Betons

In den 70iger Jahren wurden Fahrbahndecken aus Beton gebaut, an denen AKR Schädigungen in Form von Netzzissen und Abplatzungen vor allem im Bereich von Fugen festgestellt wurden. Zu nennen sind z. B. die Fahrbahndecken auf den Autobahnen Berliner Ring, Berlin – Rostock und Wittstock – Zarentin (DREßLER et al., 1994). Die Ursache war in der Verwendung von Grauwackesplitt als Gesteinskörnung zu suchen. Bereits in den 90igern stellte man sich daher die Frage, ob das bei der Sanierung der Autobahnen anfallende Recyclingmaterial eine Verwertung in eine ungebundene Bauweise finden kann.

Trotz dieser wichtigen Fragestellung konnten bis heute im Rahmen einer breit angelegten Literaturrecherche nur zwei Forschungsprojekte ausfindig gemacht werden, die sich mit der Eignung von AKR-geschädigtem Beton als Recycling-Baustoff für den Straßenbau befassten. Die beiden Forschungsprojekte von KRASS & WEINGART (1993) und HÜNGER (2013) werden in den folgenden Kapiteln 2.6.1 und 2.6.2 vorgestellt.

2.6.1 KRASS und WEINGART 1993

In dem AIF-Forschungsprojekt Nr. 306 D sollte die „Eignung von AKR-geschädigtem Beton als Recycling-Baustoff für den Straßenbau“ untersucht werden (KRASS & WEINGART, 1993). Zum damaligen Zeitpunkt lagen keine langjährigen Erfahrungen vor. Bereits damals wurde aber erkannt, dass Untersuchungen zur Verwendbarkeit solcher RC-Baustoffe notwendig sind, um die anfallenden Mengen an RC-Baustoffen am Ausbauort und ohne längere Transportwege verwerten zu kön-

nen. Die Autoren wollten zum einen klären, ob es sich bei den Betonschäden der Fahrbahnplatten in den neuen Bundesländern tatsächlich um AKR-Schäden handelt, und zum anderen, ob sich derartige Material im aufbereiteten Zustand als RC-Baustoff z. B. als Tragschicht ohne Bindemittel oder als Mineralstoff für Asphalttragschichten verwenden lässt. Neben materialtechnischen Eigenschaften am RC-Gemisch, welches aus geschädigten Fahrbahnplatten des Berliner Ringes (BAB A10) gewonnen wurde, sind auch Untersuchungen am RC-Gemisch im Hinblick auf den Einsatz als Tragschicht ohne Bindemittel durchgeführt worden. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse kamen die Autoren zu dem Schluss, dass der Einsatz des RC-Baustoffes aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen für die Verwendung in Tragschichten ohne Bindemittel möglich ist.

2.6.2 HÜNGER 2013

20 Jahre später wurde in einem von der BAST finanzierten Forschungsprojekt Nr. 84.0109/2009 die „Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten“ untersucht (HÜNGER, 2013). Die durchgeführten Formänderungsuntersuchungen an HGT-Probekörpern mit der 40 °C Nebelkammer, mittels 60 °C Betonversuch und mithilfe einer AKR-Performance-Prüfung ergaben deutliche Unterschiede von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken im Vergleich zu Referenzgemischen. Es deutete sich an, dass es zu weiteren Reaktionen kommt, die zu deutlich höheren Dehnungen gegenüber den Referenzgemischen führten. Der Autor führt dieses Verhalten darauf zurück, dass sich die

im Beton gespeicherten Alkalien bemerkbar machen, die wieder freigesetzt werden können und bei Anwesenheit von Feuchte zu einem quellfähigen Gel reagieren. Nachgewiesen wurde auch Ettringit, welches ebenfalls Treibreaktionen verursachen kann. Als mechanischer Kennwert wurde die Druckfestigkeit vor und nach den genannten Lagerungsbedingungen bestimmt. Anhand dieses Kennwertes konnte kein signifikant messbarer Einfluss einer Vorschädigung durch eine in der Fahrbahndecke aus Beton stattgefundenen AKR festgestellt werden. Auch eine Verschärfung der Lagerungsbedingungen (Nebelkammer + Alkalizufuhr von außen bei 40 °C) ergaben keine deutlich abnehmenden Festigkeiten. Insgesamt kommt der Autor zu dem Schluss, dass aufgrund der stellenweise doch deutlich messbaren Dehnungen auf Basis der Untersuchungsergebnisse ein Einsatz eines AKR-geschädigten Betonaufbruchs als Komponente für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) gesondert bewertet werden muss.

2.6.3 Fallbeispiele für die Anwendung in ToB

Ausgehend von Untersuchungen im Jahr 1995/96 (KRASS & WEINGART, 1993), wurde erstmalig in einem Autobahnabschnitt in den neuen Bundesländern auf der BAB A24, km 136+655 bis km 172+220, linke Richtungsfahrbahn, in der Tragschicht ohne Bindemittel RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton verwendet. Zu der damaligen Zeit war man sich somit sicher, dass die sinnvolle in situ Verwertung von AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton zu 100 % möglich ist (PFEIFFER, 1996). Auch mehr als zwanzig Jahre nach dem Bau dieses Autobahnabschnittes sind keine

Erster grundhafter Ausbau AKR-geschädigte Betondecke [Jahr]	Herstellungs- zeitraum [Neubau]	BAB	Abschnitt [km]	Verwertung Ausbruch als STS unter Betondecke
1994 – 1996	1981/1982	A24 ¹⁾	136-172 linke RF, aufgeteilt auf 6 Baulose	ja, in zwei Baulosen ohne Zulieferung
2006	1991	A10	66-69 linke RF	ja
2015/2016	1996	A2	10-14 beide RF	ja
2016	1998	A9 ²⁾	23-24 linke RF	ja
2016	2001	A12	48,5-51 rechte RF	ja
2017	1998	A2	0,5-5 beide RF	ja
2017	1996/1997	A2	15-18 rechte RF	ja
2017	1998	A9 ²⁾	16-22 linke RF	ja
2017	1998	A9 ²⁾	33-40 rechte RF	ja

1) Untersucht im Rahmen des Forschungsprojektes FE 06.0111/2015/FRB
2) Baumaßnahme wissenschaftlich begleitet im Rahmen des Forschungsprojektes FE 06.0111/2015/FRB

Tab. 2-1: Aufbruch AKR-geschädigter Betondecken (KLEE, 2018).

Schäden ausgehend von der Schottertragschicht bekannt, wobei diese bis heute auch noch nicht wissenschaftlich untersucht wurde. In der Zwischenzeit wurde die damals eingebaute Betondecke aufgrund einer weiteren AKR-Schädigung teilweise durch einen Asphaltoberbau ersetzt.

Parallel zum Forschungsvorhaben wird seit mehreren Jahren RC-AKR-Material im Bundesland Brandenburg verwertet. Eine Aufstellung der Streckenabschnitte zeigt Tabelle 2-1, welche aus KLEE (2018) entnommen wurde.

2.6.4 Fallbeispiele für die Anwendung in HGT

Es sind bisher keine BAB-Abschnitte bekannt, bei denen Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen (RC-AKR-Material) für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) verwendet wurden. Im Gegensatz dazu ist der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen aus alten Betondecken mit und ohne Asphaltanteil für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) Stand der Technik (EHRlich & HENSEL, 2010). Bereits in den 80igern gab es in Deutschland Bestrebungen, für die Herstellung von HGT ein Mineralstoffgemisch zu verwenden, das aus einem Aufbruch einer alten Betonfahrbahn gewonnen wird. Die dabei gewonnenen Erfahrungen waren dabei durchweg positiv (MOSS, 1985). Auch die Untersuchungen in (LEYKAUF, 1987) zeigten, dass keine besonderen Probleme bei der Herstellung einer HGT mit einem Mineralstoffgemisch aus gebrochenem RC-Material bestehen.

3 Untersuchungsprogramm und Versuchsbeschreibung

3.1 Allgemeines zum Untersuchungsprogramm

Wie im Kapitel 1.2 erwähnt, ist bei der Verwertung AKR-geschädigter Fahrbahndeckenbetone eine ganzheitliche Bewertung erstrebenswert. Es sollten die Zeitpunkte vor (Diagnose und Aufbruch), während (Aufbereitung) und nach dem Fahrbahndeckenaufbruch (Verwertung) betrachtet werden.

Für die Untersuchungen an AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen (Diagnose, Aufbruch und Aufbereitung) wurden insgesamt vier Streckenlose ausgewählt (Kapitel 4). Zwei Streckenlose wurden

2016 und zwei Streckenlose 2017 untersucht. Diese unterscheiden sich in der Bauweise, der Betonzusammensetzung und in den AKR-bedingten Schadenskategorien.

In den Jahren 2017 und 2018 wurden drei Erneuerungsmaßnahmen (Verwertung) begleitet (Kapitel 5). Bei zwei Erneuerungsmaßnahmen wurde die Schottertragschicht mit RC-Material ausgeführt, welches aus dem AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbeton gewonnen und entsprechend aufbereitet wurde. Bei einer Erneuerungsmaßnahme eines AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetons wurde die Schottertragschicht mit einem Baustoffgemisch aus natürlicher Gesteinskörnung und Natursand ausgeführt.

Zwei sich im Bestand befindliche Streckenlose wurden 2017 untersucht (Kapitel 6). Die Besonderheit dieser Lose ist, dass die Tragschicht ohne Bindemittel in den 90iger Jahren mit RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton (RC-AKR-ToB) gebaut wurde.

3.2 Untersuchungen am Fahrbahndeckenbeton

Aus den AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen wurden Bohrkerne mit einem Durchmesser von 350 mm gewonnen. Diese wurden in Abhängigkeit der Schadenskategorie nahe des Fugenkreuzes (Abstand Bohrlochmitte zur Quer- und Längsfuge 50 cm) als auch aus zugehöriger Plattenmitte entnommen. Eine Übersicht über die Probenkennzeichnung und die Bohrkernentnahmestellen sind bei den jeweiligen Streckenlosen zusammengestellt.

3.2.1 Mechanische Eigenschaften AKR-geschädigter Fahrbahndeckenbetone

Als mechanische Betoneigenschaft wurde der statische E-Modul ermittelt. Dafür wurden prismatische Probekörper aus den Bohrkernen herausgearbeitet. Die nachfolgende Vorgehensweise bezieht sich auf die zweischichtigen Streckenlose, die im Jahr 2016 untersucht wurden: Die Bohrkerne wurden zunächst parallel zur Oberfläche halbiert, um bei den zweischichtigen Streckenlosen Ober- und Unterbeton separat prüfen zu können. Aus den beiden so erhaltenen Platten wurden dann jeweils zwei Probekörper unter Berücksichtigung der Fahrtrichtung mit

den Abmessungen $10 \times 10 \times 28 \text{ cm}^3$ herausgearbeitet (Bild 3-1). Für den Oberbeton blieb dadurch die ursprüngliche Fahrbahnoberfläche erhalten. Zu berücksichtigen ist, dass im Fall einer Oberbetondicke $< 100 \text{ mm}$ auch ein Teil des Unterbetons in den Oberbetonproben enthalten ist.

Folgende Vorgehensweise wurde für die einschichtigen Streckenlose gewählt, die im Jahr 2017 untersucht wurden: Die Bohrkern wurden zunächst längs zur Fahrtrichtung halbiert. Aus den beiden so erhaltenen Platten wurden dann jeweils zwei Probekörper mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 28 \text{ cm}^3$ längs zur Fahrbahnoberfläche (horizontale Richtung) und zwei Probekörper senkrecht zur Fahrbahnoberfläche (vertikale Richtung) herausgearbeitet (Bild 3-2).

Aufgrund der späteren Belastung im Druckversuch zur Ermittlung des statischen E-Moduls wurden die Stirnseiten aller Probekörper planparallel geschliffen. Aufgrund einer Vielzahl von Untersuchungen an Betonprobekörpern und den sehr guten Erfahrungswerten bezüglich Prüfstreuungen, wurde die

Ermittlung des statischen E-Moduls nach DIN 1048-5:1991-06 und nicht nach der seit Juni 2014 eingeführten DIN EN 12390-13:2014-06 durchgeführt. Der statische E-Modul wurde nach zweimaliger Be- und Entlastung als Sekantenmodul zwischen den Spannungswerten $0,5 \text{ MPa}$ und 10 MPa bestimmt. Die Erfassung der Dehnung erfolgte an zwei gegenüberliegenden Messstrecken mit induktiven Messwertaufnehmern über eine Messlänge von 100 mm . Die induktiven Messwertaufnehmer waren an den seitlichen Flächen der Prüfkörper angebracht. Zu beachten ist, dass bei den Probekörpern die in horizontaler Richtung aus dem Oberbeton herausgearbeitet wurden, eine Messstrecke derart angebracht wurde, dass die Fahrbahnoberfläche berücksichtigt wird. Bei den Probekörpern, die in horizontaler Richtung aus dem Unterbeton herausgearbeitet wurden, wurde eine Messstrecke in Richtung der Fahrbahnoberfläche angebracht.



Bild 3-1: Prinzip zur Gewinnung von Probekörpern aus Bohrkernen (Durchmesser 350 mm).



Bild 3-2: Prinzip zur Gewinnung von Probekörpern aus Bohrkernen.

3.2.2 Nachdehnung AKR-geschädigter Fahrbahndeckenbetone

Nach der Ermittlung des statischen E-Moduls wurde an ausgewählten Probekörpern eine mögliche AKR-bedingte Nachdehnung ermittelt. Dazu wurden zunächst Messzapfen an den Stirnflächen der Probekörper zentrisch in vorgebohrte Löcher eingesetzt und mit einem zwei Komponenten Klebstoff (X60 der Firma HBM) eingeklebt. Die so vorbereiteten Probekörper wurden im Klima bei 20 °C und 65 % rel. F. (20/65) vorgelagert. Anschließend wurden die ausgewählten Probekörper über einem Wasserbad in einem verschlossenen Edelstahlbehälter in einer Klimakammer bei (40 ± 2) °C und einer Luftfeuchtigkeit von nahezu 100 % (Klima 40/100) über einen Zeitraum von 280 Tagen gelagert (Bild 3-3).

Die Längenänderung der Probekörper wurde mit einer Messeinrichtung nach Graf-Kaufmann gemäß DIN 52450:1985-08 bestimmt. Die Dehnungen wurden über einen Zeitraum von 280 Tagen (9 Monate) ermittelt und enthalten neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung (Summe aus Temperaturdehnung durch Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C und Quelldehnung durch Wasseraufnahme). Nach Beendigung der 40 °C Feuchtlagerung wurden die Proben im Klima (20/65) bis zur Massenkonstanz gelagert (Anmerkung: Massekonstanz gilt als erreicht, wenn zwei in einem

Abstand von 24 h durchgeführte Wägungen einen Massenunterschied von weniger als 0,1 % aufweisen). Nach Erreichen der Massenkonstanz erfolgte eine abschließende Längenmessung, die die Ermittlung der bleibenden Dehnung ermöglichte.

3.3 Untersuchungen an Tragschichten ohne Bindemittel (ToB)

3.3.1 Widerstand gegen Zertrümmerung an RC-AKR-Material

Bei langsam reagierenden, alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen hat die AKR-bedingte Rissbildung ihren Ursprung im Gesteinskorn und setzt sich dann in der Matrix weiter fort. Ob diese Rissbildung bei einer energiereichen Aufbereitung in einem Prallbrecher abgebaut wird, ist nachzuweisen. Ein wichtiges Kriterium bei der Beurteilung von RC-Material stellt daher der Widerstand gegen mechanische Einwirkungen dar. An dem gewonnenen RC-AKR-Material wurde der im Straßenbau zur Beurteilung der Tauglichkeit von mineralischen Stoffen als Baumaterial angewandte Widerstand gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch nach DIN EN 1097-2:2010-07 ermittelt.



Bild 3-3: Schleichinger Truhe zur Bestimmung der Nachdehnung (links), angepasste Edelstahlbehälter für die prismatischen Prüfkörper mit den Abmessungen 10 x 10 x 28 cm³ (rechts).

3.3.2 CBR-Wert an RC-AKR-Material

Mit einer AKR geht eine Entfestigung der Gesteinskörnung durch den Löseangriff auf SiO_2 -Modifikationen und andere gesteinsbildende Mineralien einher (REINHARDT & MIELICH 2014). Ob dadurch die Tragfähigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel beeinträchtigt wird, ist nachzuweisen. Der California-Bearing-Ratio-Versuch (CBR-Versuch) ist ein Laborversuch, der die Tragfähigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel beschreibt. Der CBR-Wert wird aus dem Verhältnis des Eindringwiderstands eines zu prüfenden Materials zum Eindringwiderstand in ein Standardmaterial aus verdichtetem Standardboden bestimmt. Der CBR-Wert wurde an Proben bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung ermittelt. Die Versuchsdurchführung erfolgte dabei nach DIN EN 13286-47:2012-07.

3.3.3 AKR-provozierende Lagerung an RC-AKR-Material

Im RC-AKR-Material sind immer noch Alkalien in der Zementsteinmatrix aus dem Bindemittel vorhanden oder auch in der Zementsteinmatrix durch den Tausalzeintrag während der Nutzung als Fahrbahndeckenbeton gespeichert.

In einer Tragschicht wird von einem Temperaturbereich von -10 °C bis $+30\text{ °C}$ ausgegangen (LEYKAUF & MOSS, 1987). Da die Reaktionskinetik einer AKR sehr stark temperatur- und feuchteabhängig ist, wurde als AKR-provozierende Lagerung für die Untersuchungen am RC-AKR-Material für ungebundene Tragschichten eine Temperatur von 40 °C und eine Luftfeuchte von 100% gewählt (Klima 40/100).

Das RC-AKR-Material wurde für die Lagerung im Klima (40/100) in einem Eimer mit so viel Wasser befeuchtet, wie es zur Einstellung des optimalen Wassergehaltes benötigt wird (Bild 3-4). Anschließend wurden die Eimer luftdicht verschlossen und im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 3, 6 und 9 Monaten gelagert.

3.3.4 Korngrößenverteilung an RC-AKR-Material

Die Korngrößenverteilung wurde nach DIN EN 933-1:2012-03 bestimmt. Das RC-AKR-Material wurde gemäß den Empfehlungen der DIN EN 1097-2:2010-07 bei $(40 \pm 5)\text{ °C}$ bis zur Massenkonstanz schonend getrocknet. Die Korngrößenverteilung



Bild 3-4: Über den Prüfzeitraum im Eimer befeuchtetes RC-AKR-Material für die AKR-provozierende Lagerung im Klima (40/100).

wurde im Anschluss an die Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (vgl. Kapitel 3.3.5) sowie nach der AKR-provozierenden Lagerung (vgl. Kapitel 3.3.3) ermittelt.

3.3.5 Einaxialer Kompressionsversuch an RC-AKR-Material

Bei einer schädigenden AKR kommt es teils zu einem deutlichen Abfall des Betonelastizitätsmoduls, der maßgeblich durch die AKR-geschädigten Gesteinskörner verursacht wird. Ob eine AKR auch den Steifemodul einer ungebundenen Tragschicht aus RC-AKR-Material nachteilig beeinträchtigt, ist durch einen geeigneten Versuch nachzuweisen. Dafür wurde der einaxiale Kompressionsversuch (Ödometerversuch) gewählt, der nach DIN 18135:2012-04 durchgeführt wurde. Der Versuch dient der Ermittlung von Verformungen bei Belastung und Entlastung einer zylindrischen Probe in Richtung ihrer Achse, wobei radiale Verformungen durch einen Ring verhindert werden. Der für die Versuche verwendete Ödometertopf hat einen Durchmesser von 255 mm und eine Höhe von 197 mm. Das Material wurde vor dem Einbau schonend bei 40 °C im Ofen getrocknet. Das RC-AKR-Material wurde lagenweise, schlagend verdichtet, eingebaut (Bild 3-5, unten). Die Proben wurden stufenweise bis zur Höchstlast von 100 kN/m^2 belastet, dann jeweils stufenweise entlastet, bis 100 kN/m^2 wiederbelastet und von 100 kN/m^3 bis 400 kN/m^2 erstbelastet. Anschließend erfolgte eine Entlastung auf 200 kN/m^2 .

Der Steifemodul E_s kann dann bei eindimensionaler Zusammendrückung für ein bestimmtes Spannungsintervall aus der Sekante der Druck-Verformungslinie ermittelt werden. Der einaxiale Kompressionsversuch wurde am RC-AKR-Material nach der Aufbereitung im Prallbrecher und nach der AKR-provozierenden Lagerung (vgl. Kapitel 3.3.3) durchgeführt.



Bild 3-5: Versuchsaufbau einaxialer Kompressionsversuch (oben) und gefüllter Ödometertopf (unten).

3.3.6 Begleitende Untersuchungen

Begleitend zur Bestimmung der Korngrößenverteilung, des Widerstands gegen Zertrümmerung und des CBR-Wertes, wurden für den Anwendungsbereich Tragschichten ohne Bindemittel weitere Eigenschaften am RC-AKR-Material und an einem Baustoffgemisch mit natürlicher Gesteinskörnung bestimmt. Nach TL Gestein-StB 04/07, Anhang E, gehören hierzu die Kornform und der Widerstand gegen Frostbeanspruchung. Die Kornform wurde als Kornformkennzahl nach DIN EN 933-4:2015-01 und der Widerstand gegen Frostbeanspruchung nach DIN EN 1367-1:2007-06 ermittelt.

3.4 Untersuchungen an eingebauten Tragschichten ohne Bindemittel (ToB)

3.4.1 Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer

Mithilfe von Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer, die sich sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern zweckmäßig erwiesen hat, kann die gesamte Struktur der Konstruktion erfasst werden (KARCHER, 2011). Zur Erreichung einer hohen Aussagekraft der Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer, wird die Messung während der Bauphase bereits nach dem Verdichten auf der Oberfläche der ToB durchgeführt (Bild 3-6, links). Dadurch lassen sich die Messergebnisse auf dem Fahrbahndeckenbeton (Bild 3-6, rechts) später auch für Langzeituntersuchungen (Monitoring) besser bewerten. Die Gerätebeschreibung und die

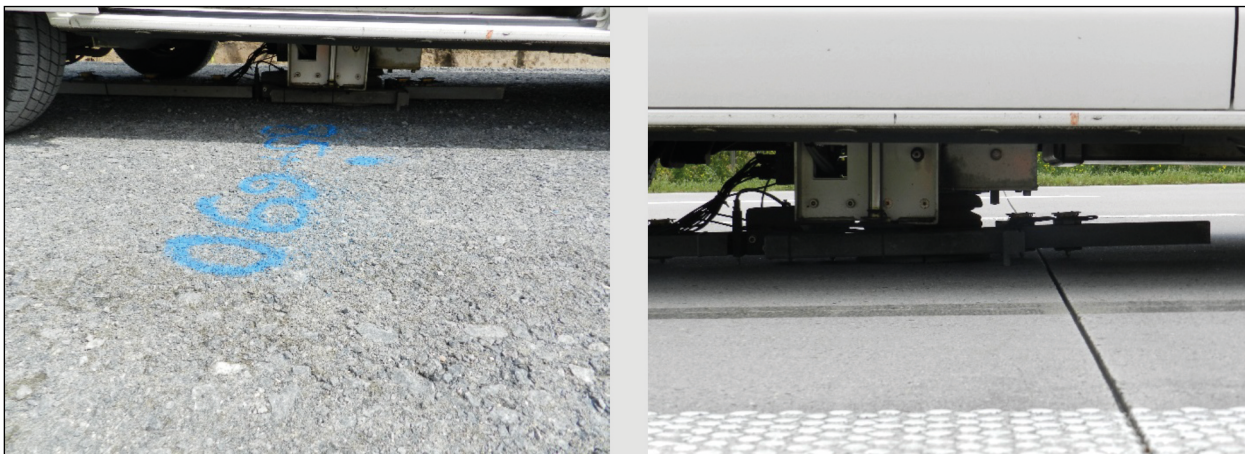


Bild 3-6: Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf der Oberfläche der verdichteten ToB (links) und auf dem Fahrbahndeckenbeton (rechts).

Messdurchführung sind im Arbeitspapier AP TRAG Teil B 2.2 beschrieben.

3.4.2 Prüfungen zur Ermittlung von Verformungskenngrößen

Der statische Plattendruckversuch ist ein Grundwert für die Dimensionierung und den Aufbau standardisierter Bauweisen nach RStO 12. Der Versuch wird nach dem in DIN 18134:2012-04 beschriebenen Prüfverfahren auf verschiedenen Oberflächen ungebundener Tragschichten ausgeführt (Bild 3-7, links). Der im Versuch ermittelte Verlauf der Drucksetzungslinien gibt Hinweise auf die Verformbarkeit bzw. das Tragverhalten ungebundener Tragschichten. Zudem wird der ermittelte Verlauf genutzt, um daraus den Verformungsmodul E_{v1} (Verformbarkeit der ungebundenen Tragschicht bei Erstbelastung) und E_{v2} (Verformbarkeit der ungebundenen Tragschicht bei Zweitbelastung) als charakteristische Kenngrößen zu ermitteln.

Im Gegensatz zum statischen Plattendruckversuch ist der dynamische Plattendruckversuch ein Schnellprüfverfahren. Der Versuch wurde eingeführt, um die Tragfähigkeit und Verdichtung von Oberflächen ungebundener Tragschichten in rascher Folge überprüfen zu können. Die Funktionsweise ist u. a. in (FLOSS, 2011) beschrieben. Der Versuch eignet sich auch für die Prüfung in engen Arbeitsräumen. Es ist z. B. möglich, eine ungebundene Tragschicht unter Betondecke im Bestand zu prüfen, wenn diese ungebundene Tragschicht in einem ersten Schritt durch eine Bohrkernentnahme im Fahrbahndeckenbeton freigelegt wird (Bild 3-7, rechts).

3.5 Untersuchungen an hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT)

3.5.1 Herstellung und Lagerung von HGT-Probekörpern aus RC-AKR-Material

Unter Verwendung des RC-Materials aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen und Zugabe eines Portlandzements CEM I 42,5 N (WS-Prüfzement 02/2015) mit einem Na_2O -Äquivalent von 0,76 M.-%, wurden HGT-Probekörper für die Laboruntersuchungen hergestellt. Die Mischungen wurden mit 10 M.-% Zement hergestellt. Die Bindemittelmenge wurde auf 100 M.-% des trockenen RC-Baustoffes bezogen. Im Proctorversuch wurden nach DIN 18127:2012-09 die Proctordichte und der optimale Wassergehalt ermittelt. Die Ergebnisse aus den Proctorversuchen sind im Anhang zusammengestellt.

Es ist zu erwarten, dass mit der gewählten Bindemittelmenge deutlich höhere Druckfestigkeiten als die geforderten 15 MPa unter einer Betondecke erzielt werden. Ziel ist aber, mit einer hohen Bindemittelmenge vergleichsweise viele Alkalien in die HGT einzutragen.

Die Herstellung und Verdichtung der Probekörper erfolgte lagenweise durch schlagende Verdichtung und wurde solange durchgeführt, bis die 100%ige Proctordichte erreicht wurde. Für eine Dauer von (24 ± 2) h nach Herstellung wurden die Probekörper in der Form bei (20 ± 2) °C im Feuchtraum belassen. Nach dem Ausformen lagerten die Probekörper bis zum jeweiligen Prüftermin in einem in den



Bild 3-7: Statische Plattendruckversuch auf einer ungebundenen Tragschicht (links) und dynamischer Plattendruckversuch im Bohrloch auf einer ungebundenen Tragschicht (rechts).

folgenden Kapiteln 3.5.2, 3.5.3 und 3.5.4 beschriebenen Klima.

3.5.2 Längenänderung von HGT-Probekörpern aus RC-AKR-Material

Mögliche AKR-bedingte Treiberscheinungen an hydraulisch gebundenen Tragschichten aus RC-AKR-Material sollten durch die Ermittlung der Längenänderung bestimmt werden. Zur Bestimmung der Längenänderung wurden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm (150/300) hergestellt. Nach dem Ausformen wurden an den Stirnflächen der Probekörper Messzapfen zentrisch in vorgebohrte Löcher eingesetzt und mit einem zwei Komponenten Klebstoff (X60 der Firma HBM) eingeklebt. Die Nullmessung erfolgte im feuchten Zustand im Alter von zwei Tagen bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ unmittelbar vor dem Einbringen in die Klimakammer. Die Probekörper wurden über einem temperierten Wasserbad bei $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ und 100 % relativer Luftfeuchte in einer Klimakammer gelagert (40/100). Weitere Messungen der Längenänderung erfolgten über einen Zeitraum von 280 Tagen. Die Messung der Längenänderung erfolgte mit einer Messeinrichtung nach Graf-Kaufmann gemäß DIN 52450:1985-08.

3.5.3 Mechanische Eigenschaften von HGT-Probekörpern aus RC-AKR-Material

Es ist bekannt, dass die AKR eine Verschlechterung der mechanischen Betoneigenschaften bewirken kann. Ob die mechanischen Eigenschaften einer hydraulisch gebundenen Tragschicht aus RC-AKR-Material ebenfalls verschlechtert werden, muss durch entsprechende Versuche nachgewiesen werden. Hierfür eignet sich die Ermittlung des statischen E-Moduls. Zunächst lagerten die Probekörper nach dem Ausformen bis zum jeweiligen Prüftermin in der 40°C Nebelkammer nach DAfStb-Richtlinie „vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ (ALKALI-RICHTLINIE, 2013). Der E-Modul wurde dann an drei Zylindern (150/300) gemäß DIN 10485:1991-06 nach zweimaliger Be- und Entlastung als Sekantenmodul zwischen den Spannungswerten 0,5 MPa und 5 MPa bestimmt. Die Erfassung der Dehnung erfolgte mit drei gleichmäßig angebrachten Messstrecken mit induktiven Messwertaufnehmern über eine Länge von 150 mm. Im Anschluss an die E-Modul Prüfung wurde der zylind-

rische Probekörper bis zum Bruch geprüft und die Druckfestigkeit bestimmt.

3.5.4 Dauerschwingversuch an HGT-Biegebalken aus RC-AKR-Material

Wie aus früheren Grundsatzuntersuchungen zur Verwertung alternativer Mineralstoffgemische bekannt (LEYKAUF, 1987), ist es auch bei der Verwertung von RC-Material aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen erforderlich, die in der Straßenkonstruktion maßgebende Festigkeitseigenschaft zu bestimmen, d. h. die Biegezugfestigkeit. Da Verkehrslasten als wiederholte Belastung auftreten ist es notwendig, die Dauer-Biegezugfestigkeit (mehr als 2 Mio. Lastwechsel werden ohne Bruch ertragen) bzw. die Zeit-Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit von den aufgetragenen Lastwiederholungen zu bestimmen. Als Prüfkörper zur Bestimmung der Dauer-Biegezugfestigkeit eignen sich Biegebalken mit den Abmessungen $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$. An diesen Biegebalken wurden im Alter von 60 Tagen nach Lagerung in der 40°C Nebelkammer (zur Ausschließung unterschiedlicher Nachhärtung) Dauerschwingversuche durchgeführt. Die Belastung erfolgte durch zwei gleich große Linienlasten in den Drittelpunkten bei einer Stützweite von 600 mm. Die Biegebalken wurden durch Folienumhüllung während der Versuchsdurchführung gegen Austrocknung geschützt (Bild 3-8).

Die Unterspannung wurde zu $\sigma_u = 0,10 \text{ N/mm}^2$ und die Prüffrequenz zu 3,33 Hz gewählt. Als Oberspannung σ_o wurden jeweils 50 % der statischen Biegezugfestigkeit (β_{BZvor}) im Alter von 60 Tagen festgelegt. Falls ein Biegebalken die Grenzlastspielzahl ohne Bruch ertrug, wurde im Anschluss an den

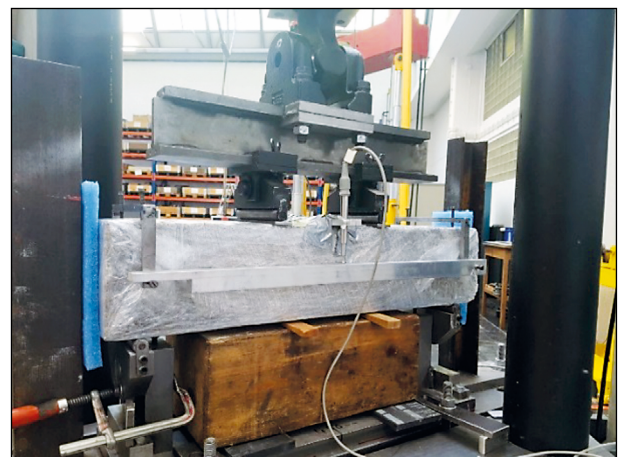


Bild 3-8: Versuchsanordnung eines Biegebalkens mit Folienumhüllung während des Dauerschwingversuchs.

Dauerschwingversuch der Biegebalken statisch bis zum Bruch belastet (β_{BZnach}). Mit gleichen Randbedingungen wurden Dauerschwingversuche an Biegebalken durchgeführt, die über einen Zeitraum von 270 Tagen in der 40 °C Nebelkammer lagerten.

4 AKR-geschädigte Fahrbahn-deckenbetone

4.1 Streckenlos BAB A9 – km 24+650 bis km 23+243, RiFa Berlin (2016)

Beim ersten untersuchten Streckenlos handelt es sich um eine AKR-geschädigte Betonfahrbahndecke der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 24+650 bis km 23+243, zwischen den Anschlussstellen Niemeck und Brück im Bundesland Brandenburg. Der BAB-Abschnitt wurde erstmalig 1998 für den Verkehr freigegeben und in zweischichtiger Bauweise ausgeführt. Im Rahmen der grundhaften Erneuerung war es möglich, Betonabruch aus der geschädigten Betondecke zu

gewinnen. Folgender Deckenaufbau wurde festgestellt:

- ca. 29 cm Betondecke (zweischichtig/zweilagige Bauweise ca. 8/21 cm)
- auf HGT mit Vliesstoff

Im Unterbeton wurde angabegemäß Elbekies 2/32 (Mühlberg) und Sand 0/2 (Kieswerk Linthe) verwendet. Als Zement wurde ein Portlandzement CEM I 32,5 R (Coswig Wülfrat) eingesetzt. Im Oberbeton wurde Elbekies (Mühlberg) der Fraktion 2/8 und Splitt der Fraktion 8/22 (SQW Röcknitz, Werk Lüpitz) verwendet.

Auf dem gesamten Streckenlos wurden die Schadenskategorien (SK) 0 bis III vorgefunden, während aber nur sehr wenige Fugenkreuz instandgesetzt wurden.

In Abhängigkeit der visuell festgelegten Schadenskategorie (0 – keine sichtbaren Schäden an der Oberfläche, I – Verfärbung im Bereich von Fugenkreuzen, II – beginnende bis ausgeprägte Risse, III – Substanzverlust, Verschotterung) wurden vier



Bild 4-1: BAB A9, RF Berlin, km 24+650 (links) und km 23+243 (rechts), Übersichtsaufnahme.

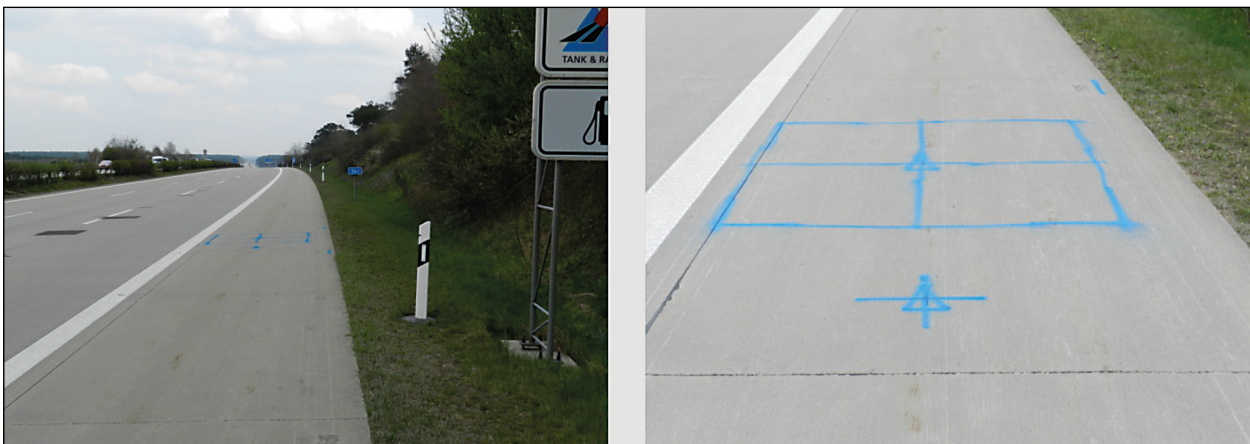


Bild 4-2: BAB A9, Standspur, Schadenskategorie 0, an der Oberfläche keine Schäden sichtbar.



Bild 4-3: BAB A9, vier Ausbaustücke (links) und Ausbaustück mit Horizontalrissbildung (rechts).



Bild 4-4: BAB A9, 1.ÜS/2.ÜS, Schadenskategorie I, Dunkelverfärbung im Bereich des Fugenkreuzes.



Bild 4-5: BAB A9, Ausbaustück (links) und bereits ausgeprägte Horizontalrissbildung (rechts).

Flächen mit den Abmessungen 2 m x 2 m zur Gewinnung des RC-AKR-Materials festgelegt. Die ausgewählten Flächen wurden nochmals in vier gleich große, transportable Stücke geteilt (4 x 1 m x 1 m), um ein reibungsloses Herausheben der Betonteile mittels Schwerlastankern und Mobilbagger zu gewährleisten. Die Herstellung der Trennschnitte bis zur Tragschicht (HGT mit Vliesstoff) erfolgte mit einem Fugenschneider.

Bild 4-1 zeigt zunächst eine Übersichtsaufnahme bei km 24+650 und km 23+243. Zu erkennen sind die bereits in sehr großer Anzahl erneuerten Fugenkreuze. Bild 4-2 zeigt die Entnahmestelle A9-0 auf der Standspur. Die Betonoberfläche zeigte in diesem Bereich keine äußeren AKR-Merkmale (Schadenskategorie 0). In Bild 4-3 (links) sind die vier Ausbaustücke mit den Abmessungen 1 m x 1 m zu erkennen. Im rechten Bild ist der Querschnitt eines



Bild 4-6: BAB A9, LS/1.ÜS, Schadenskategorie II, beginnende Rissbildung im Bereich der Fugenkreuze.



Bild 4-7: BAB A9, Ausbaustück (links) und deutlich ausgeprägte Horizontalrissbildung (rechts).



Bild 4-8: BAB A9, LS/1.ÜS, Schadenskategorie III, beginnende Verschotterung.

Ausbaustückes dargestellt. Auffällig ist der horizontal verlaufende Riss (Bild 4-3, rechts). Die zweite Entnahmestelle A9-1 wurde im Bereich des Fugenkreuzes der 1.ÜS/2.ÜS festgelegt. Die Oberfläche im Bereich des Fugenkreuzes wies eine deutliche Verfärbung auf (Bild 4-4). Die Entnahmestelle wurde deshalb der Schadenskategorie I zugeordnet. Im Vergleich zu Bild 4-3 ist der horizontal verlaufende Riss deutlich ausgeprägter und verläuft überwie-

gend in Plattenmitte (Bild 4-5). Die Entnahmestelle A9-2 zeigte bereits erste Rissbildungen und wurde der Schadenskategorie II zugeordnet (Bild 4-6). Der horizontale Riss verlief in etwa dem Übergang zwischen Ober- und Unterbeton und war deutlich ausgeprägter als bei den vorherigen Entnahmestellen. Die letzte Entnahmestelle A9-3 wurde der Schadenskategorie III zugeordnet (Bild 4-8). Der horizontal verlaufende Riss war bei dieser Entnahme-



Bild 4-9: BAB A9, Ausbaustück (links) und Horizontalrissbildung mit Ausbruchstück (rechts).

Fahrspur	Entnahmebereich	Kennzeichnung	Abmessungen	Farbe	Verwendung
SS	Plattenmitte/ Längsfuge LS	A9-0 (SK 0)	2 x 2 m ²	blau	recyclen 0/32
2.ÜS/1.ÜS	Fugenkreuz	A9-1 (SK I)	2 x 2 m ²	grün	recyclen 0/32
LS/1.ÜS	Fugenkreuz	A9-2 (SK II)	2 x 2 m ²	gelb	recyclen 0/32
LS/1.ÜS	Fugenkreuz	A9-3 (SK III)	2 x 2 m ²	rot	recyclen 0/32
entfällt	global	A9-Global (SK 0-III)	entfällt	rot/blau	RC-AKR-Material
SS	Fuge	A9-D1 (SK 0)	Ø = 35 cm l = 29 cm	blau	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
SS	Plattenmitte	A9-D2 (SK 0)	Ø = 35 cm l = 29 cm	blau	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
2.ÜS	Fuge	A9-D3 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	grün	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
2.ÜS	Plattenmitte	A9-D4 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	grün	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS	Fuge	A9-D5 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	gelb	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS	Plattenmitte	A9-D6 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	gelb	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS	Fuge	A9-D7 (SK III)	Ø = 35 cm l = 29 cm	rot	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS	Plattenmitte	A9-D8 (SK III)	Ø = 35 cm l = 29 cm	rot	Nachdehnung und mech.Eigenschaften

SS = Standspur, LS = Lastspur, 1.ÜS = 1.Überholspur, 2.ÜS = 2.Überholspur, SK = Schadenskategorie

Tab. 4-1: Übersicht der Ausbaustücke (A9-0 bis A9-3), auf dem Streckenlos entnommenes RC-AKR-Material (A9-Global) und Bohrkern (A9-D1 bis A9-D8) der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 24+650 bis km 23+243

stelle am deutlichsten ausgeprägt. Zusätzlich sind größere Betonstücke aus der entnommenen Platte herausgebrochen (Bild 4-9, rechts).

Für alle Untersuchungen wurden die zur Gewinnung des RC-AKR-Materials ausgewählten Ausbaustücke auf ein Korngemisch 0/32 gebrochen. Die Aufbereitung der Ausbaustücke (Varianten A9-0 bis -3) erfolgte in einem Raupenmobilen Prallbrecher MOBIREX MR110 EVO 2 der Firma Kleemann ohne nachgeschaltete Siebanlage. Die

zertrümmerte Betondecke (Variante A9-Global) wurde im mobilen Prallbrecher MOBIREX MR 130 Z EVO mit nachgeschalteter Siebanlage aufbereitet. Die Prallbrecher unterscheiden sich im Wesentlichen in der maximal möglichen Aufgabegröße, der Geometrie des Brechereinflaues sowie der Aufgabelleistung. Die Verstellung des Brechspalts erfolgt bei beiden Anlagen vollhydraulisch und wurde zum Zeitpunkt der Aufbereitung zu 35 bis 38 mm (Varianten A9-0 bis -3) und zu 48 bis 50 mm (Variante A9-Global) gewählt. Die Rotordrehzahl betrug bei bei-

den Anlagen 1.700 Umdrehungen/Minute. Die Trennung der enthaltenen Dübel und Anker erfolgte über einen Magnetabscheider und die Beseitigung von Vliestoffstücken manuell an der Anlage durch einen Baustellenmitarbeiter.

Die Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht über die gewonnenen Ausbaustücke, entnommenes RC-AKR-Material und der entnommenen Bohrkerne im Streckenlos zwischen km 24+650 bis km 23+243.





4.1.1 Ergebnisse

Die folgende Tabelle 4-2 ist eine Lesehilfe, wie die Ergebnisse in Tabelle 4-3 bis Tabelle 4-6 zusammengestellt sind. An ausgewählten und horizontal gewonnenen, prismatischen Prüfkörpern, wurde der statische Elastizitätsmodul (E-Modul_{vor}) vor der Lagerung im Klima (40/100) ermittelt. An diesen Prüfkörpern wurde dann die Längenänderung über einen Zeitraum von 280 Tagen im Klima (40/100) gemessen ($\epsilon_{(40/100),280d}$), die bleibende Dehnung bei Massenkonzanz im Klima (20/65) bestimmt und zum Abschluss der E-Modul und die Druckfestigkeit ermittelt (E-Modul_{nach}, Druckfestigkeit). Dies erfolgte an Prismen mit den Abmessungen 10 x 10 x 20 cm³, nachdem die sich an den Stirnseiten befindenden Messmarken entfernt wurden. An den rest-



lichen Prüfkörpern wurde nur der E-Modul und die Druckfestigkeit ermittelt. Die Druckfestigkeit wurde im Mittel aus zwei Würfeln mit den Kantenlängen von 10 cm bestimmt, welche aus dem vorderen und hinteren Drittel des horizontalen Prüfkörpers herausgesägt wurden.

Bild 4-10 und Bild 4-11 zeigen die Dehnungen der Varianten A9-D1 bis -D8 im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 280 Tagen. Die Dehnungen enthalten neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung (Summe aus Temperaturdehnung durch Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C und Quelldehnung durch Wasseraufnahme). Nach 280 Tagen wurden für alle Varianten Dehnungen im Bereich von 0,5 bis 0,7 mm/m gemessen. Die bleibende Dehnung der Varianten im Laborklima (20/65) wurden zu 0,036 bis 0,243 mm/m ermittelt.



Die Aufbereitung der Varianten A9-0, A9-1, A9-2, A9-3 erfolgte im mobilen Prallbrecher MOBIREX MR110 EVO 2 ohne nachgeschaltete Siebanlage. Die Variante A9-Global wurde baustellenseits im mobilen Prallbrecher MOBIREX MR 130 Z EVO mit nachgeschalteter Siebanlage aufbereitet. Nach der Aufbereitung erfolgte die Ermittlung der Korngrößenverteilung. Diese wird in Abhängigkeit der Vari-

Streckenlos Bundesautobahnabschnitt, Richtungsfahrbahn					
festgestellte Schadenskategorie					
	Fuge (Abstand Bohrlochmitte zur Längs- und Querfuge 50 cm)			Plattenmitte	
Prüfkörper oben / unten (horizontal)		Prüfkörper oben / unten (horizontal)	Prüfkörper oben / unten (horizontal)		Prüfkörper oben / unten (horizontal)
E-Modul _{vor} $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ E-Modul _{nach} Druckfestigkeit	Beispiel 	E-Modul Druckfestigkeit	E-Modul _{vor} $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ E-Modul _{nach}	Beispiel 	E-Modul Druckfestigkeit
E-Modul _{vor} $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ E-Modul _{nach} Druckfestigkeit		E-Modul Druckfestigkeit	E-Modul _{vor} $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ E-Modul _{nach}		E-Modul Druckfestigkeit



Tab. 4-2: Lesehilfe über die Zusammenstellung der Ergebnisse.

Streckenlos BAB A9 – km 24+650 bis km 23+243, RiFa Berlin					
Schadenskategorie 0					
	A9 – D1 (Fuge)			A9 – D2 (Plattenmitte)	
O1 / U1		O2 / U2	O1 / U1		O2 / U2
39.341 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 40.322 MPa 62,2 MPa		39.504 MPa 61,2 MPa	39.374 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 37.829 MPa 56,2 MPa		39.408 MPa 61,2 MPa
44.034 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 42.332 MPa 70,7 MPa		47.300 MPa 83,2 MPa	43.981 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 41.467 MPa 78,0 MPa		47.386 MPa 81,3 MPa



Tab. 4-3: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (D1) und der Plattenmitte (D2).

Streckenlos BAB A9 – km 24+650 bis km 23+243, RiFa Berlin					
Schadenskategorie I (1)					
	A9 – D3 (Fuge)			A9 – D4 (Plattenmitte)	
O1 / U1		O2 / U2	O1 / U1		O2 / U2
41.087 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 39.821 MPa 63,9 MPa		41.175 MPa 62,8 MPa	39.481 MPa 62,8 MPa		43.183 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 39.308 MPa 62,2 MPa
44.020 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 40.707 MPa 70,7 MPa		44.913 MPa 72,7 MPa	45.037 MPa 72,7 MPa		44.989 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 40.503 MPa 80,0 MPa

Tab. 4-4: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (D3) und der Plattenmitte (D4).

Streckenlos BAB A9 – km 24+650 bis km 23+243, RiFa Berlin					
Schadenskategorie II (2)					
	A9 – D5 (Fuge)			A9 – D6 (Plattenmitte)	
O1 / U1		O2 / U2	O1 / U1		O2 / U2
34.396 MPa 62,3 MPa		34.415 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 35.264 MPa 61,4 MPa	41.055 MPa 62,6 MPa		42.070 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 42.325 MPa 56,8 MPa
44.116 MPa 82,5 MPa		39.380 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 41.019 MPa 75,6 MPa	45.121 MPa 86,1 MPa		44.114 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 42.946 MPa 79,8 MPa

Tab. 4-5: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (D5) und der Plattenmitte (D6).

Streckenlos BAB A9 – km 24+650 bis km 23+243, RiFa Berlin					
Schadenskategorie III (3)					
O1 / U1	A9 – D7 (Fuge)	O2 / U2	O1 / U1	A9 – D8 (Plattenmitte)	O2 / U2
40.237 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ 39.137 MPa 63,8 MPa		40.349 MPa 57,4 MPa	41.993 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ 37.298 MPa 61,6 MPa		39.455 MPa 63,4 MPa
47.291 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ 45.234 MPa 83,6 MPa		48.421 MPa 73,7 MPa	44.995 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ 43.302 MPa 41,6 MPa		43.078 MPa 79,7 MPa

Tab. 4-6: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (D7) und der Plattenmitte (D8).

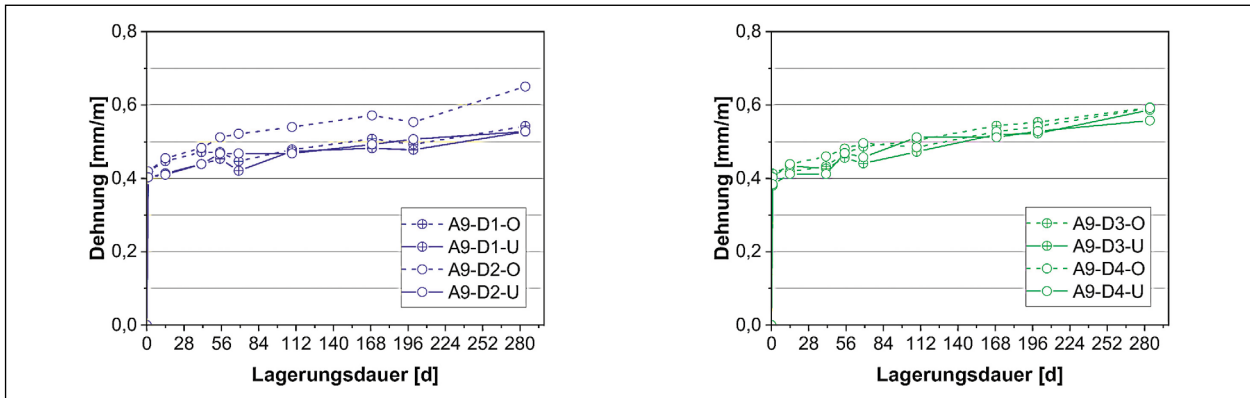


Bild 4-10: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Schadenskategorie 0 und I (1), während der Lagerung im Klima (40/100).

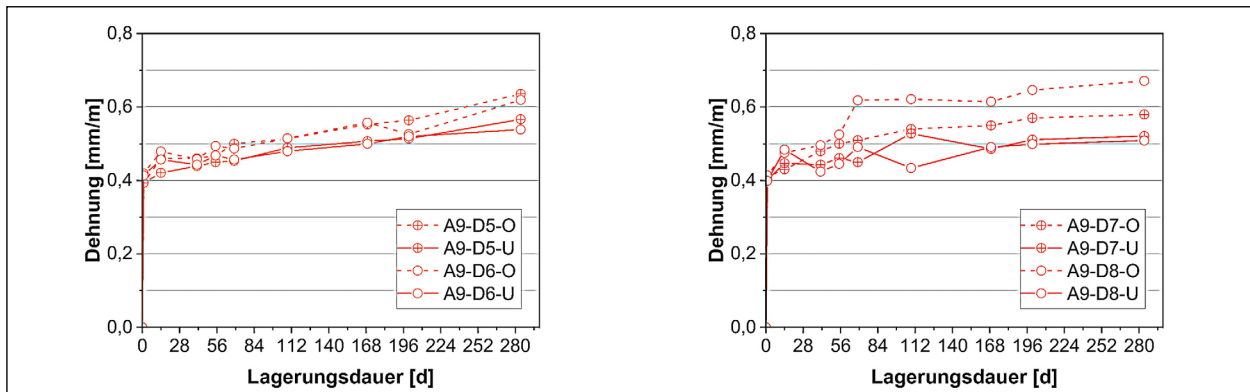


Bild 4-11: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Schadenskategorie II (2) und III (3), während der Lagerung im Klima (40/100).

anten (A9-0, A9-1, A9-2, A9-3 und A9-Global) im Bild 4-12 bis Bild 4-13 mit dem Sieblinienbereich für Schottertragschichten unter Betondecke 0/32 nach TL SoB-StB 04/07 verglichen. Die ermittelten Sieblinien zeigen, dass die Aufbereitung in Abhängigkeit der visuell erfassten Schadenskategorie keinen wesentlichen Einfluss hat.

Bild 4-15 zeigt die Mittelwerte (n=3) des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch für RC-AKR-Material in Abhängigkeit der Varianten A9-0, A9-1, A9-2, A9-3 und A9-Global. Alle ermittelten Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ liegen in einem Bereich zwischen 22 und 26 M.-%. Der Schlagzertrümmerungswert der Probe A9-Glo-

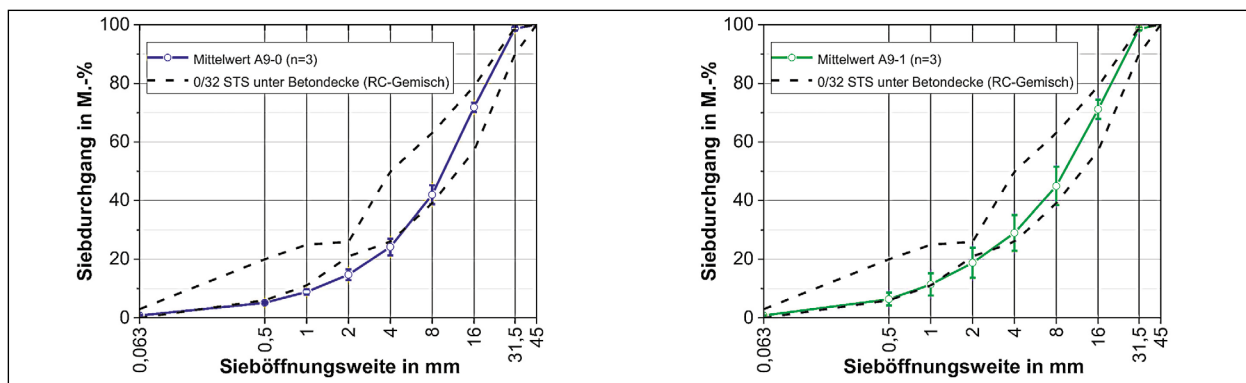


Bild 4-12: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A9-0 (links) und A9-1 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.

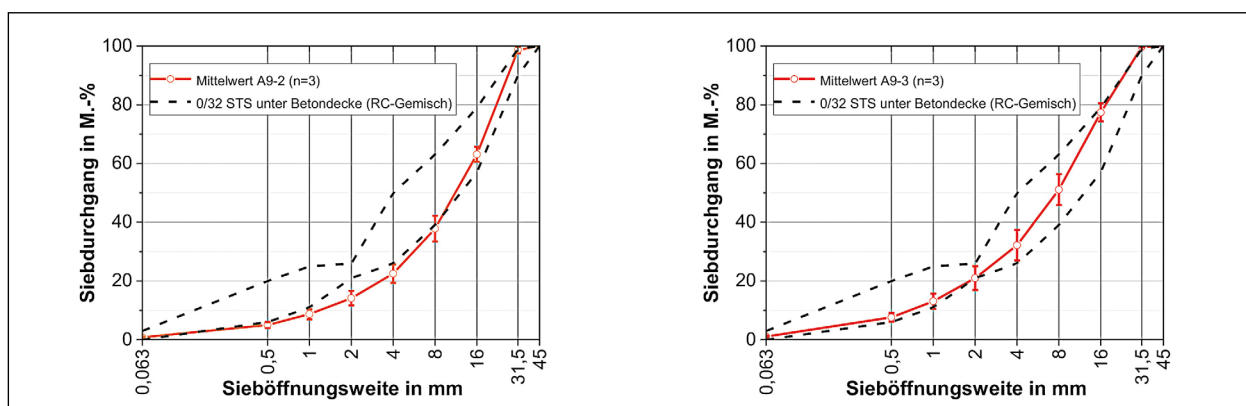


Bild 4-13: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A9-2 (links) und A9-3 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.

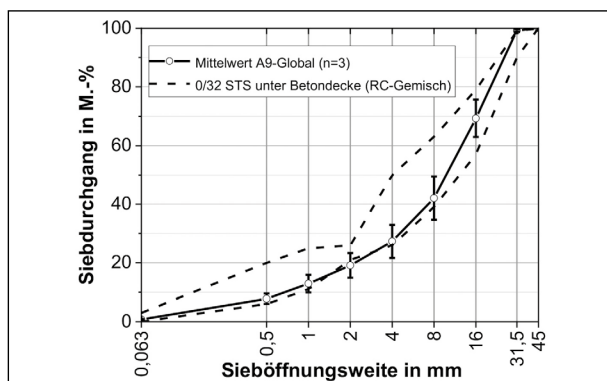


Bild 4-14: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A9-Global, Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.

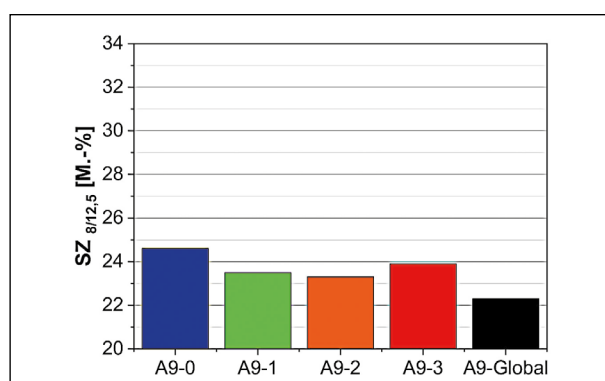


Bild 4-15: Mittelwerte des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch (SZ_{8/12,5}) für RC-AKR-Material in Abhängigkeit der Varianten A9-0 bis -3 und A9-Global.

bal ist im Mittel niedriger als die Schlagzertrümmerungswerte der Proben A9-0 bis A9-3. Alle Varianten halten die Anforderung bis max. 28 M.-% Absplittlung an die Widerstandsfähigkeit gegenüber Schlag für Schottertragschichten der Bk 100 bis Bk 3,2 nach der BTR RC-StB (2014) ein.

Tabelle 4-7 zeigt, dass alle CBR-Werte sowohl beim optimalen Wassergehalt als auch nach 24 h Wasserlagerung über 90 % liegen. Bereits bei einem

CBR-Wert von ≥ 80 % ist eine Verwendung von RC-Material in der Tragschicht möglich. Zudem zeigt die Tabelle, dass die wassergesättigten Proben mit einer Ausnahme höhere CBR-Werte erwarten lassen als bei der Prüfung bei optimalem Wassergehalt. Die höchste Tragfähigkeit wurde bei den Varianten A9-1 und A9-0 erreicht, die auch am Fahrbahndeckenbeton visuell die geringste Schädigung aufwiesen. Die Probe A9-Global, welche das Ge-

samtmittel über das Streckenlos repräsentiert, bestätigt die hohe Tragfähigkeit des RC-Materials aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton.

Bild 4-16 bis Bild 4-18 zeigen die Korngrößenverteilungen jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung. Die Korngrößenverteilungen nach AKR-provozierender Lagerung über einen Zeitraum von 3 und 6 Monaten sind im Anhang aufgeführt. Die Korngrößenverteilungen wurden mit der Sieblinie nach der Aufbereitung verglichen. Aus allen geprüften Varianten kann abgeleitet werden, dass eine mechanische Einwirkung (einaxialer Kompressi-

onsversuch) als auch eine AKR-provozierende Lagerung (chemische Reaktion) keinen signifikanten Einfluss auf die Sieblinien hat. Für alle Varianten gilt, dass die festgestellten Abweichungen größenordnungsmäßig im üblichen Streubereich von Korngrößenverteilungen bei Wiederholungsprüfungen liegen.

Die Einbaudichte im Ödometertopf vor und nach AKR-provozierender Lagerung, lag für das RC-AKR-Material in den Grenzen zwischen 1,595 t/m³ und 1,662 t/m³ (Schwankungsbreite $\rho_{min}/\rho_{max} = 4,0 \%$). Die Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A9, vor und nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100), sind in Tabelle 4-8 und Tabelle 4-9 zusammengestellt. Die Ergebnisse vor und nach 3-monatiger und 6-monatiger Lagerung im Klima (40/100) sowie alle zugehörigen Druck-Zusammendrückungskurven im linearen Maßstab sind im Anhang zusammengestellt. Auf eine Bewertung der Messergebnisse wird auf Kapitel 7.2.4 verwiesen.

Entnahmestelle	A9-0	A9-1	A9-2	A9-3	A9-Global
CBR-Prüfung bei optimalem Wassergehalt					
CBR-Wert [%]	114	110	91	99	101
CBR-Prüfung nach 24 h Wasserlagerung					
CBR-Wert [%]	112	126	105	105	114

Tab. 4-7: CBR-Werte bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit der Varianten A9-0 bis -3.

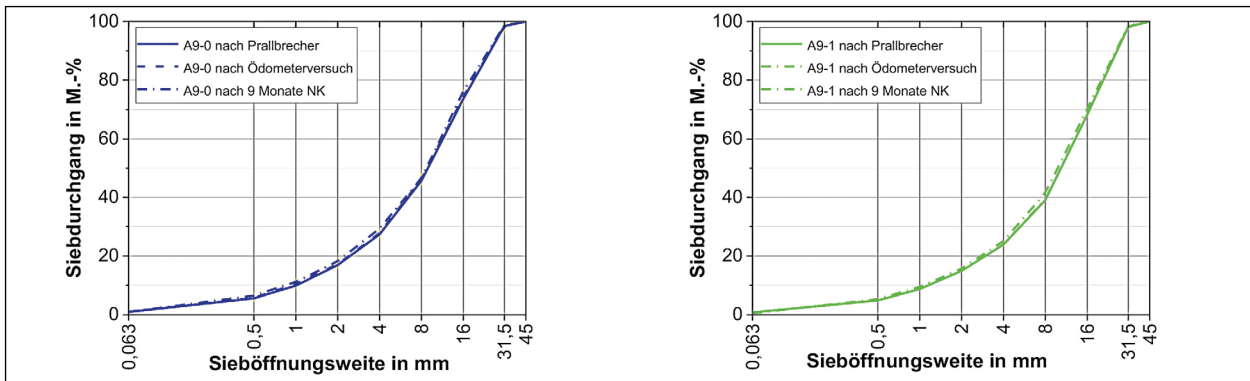


Bild 4-16: Korngrößenverteilung A9-0 (links) und A9-1 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.

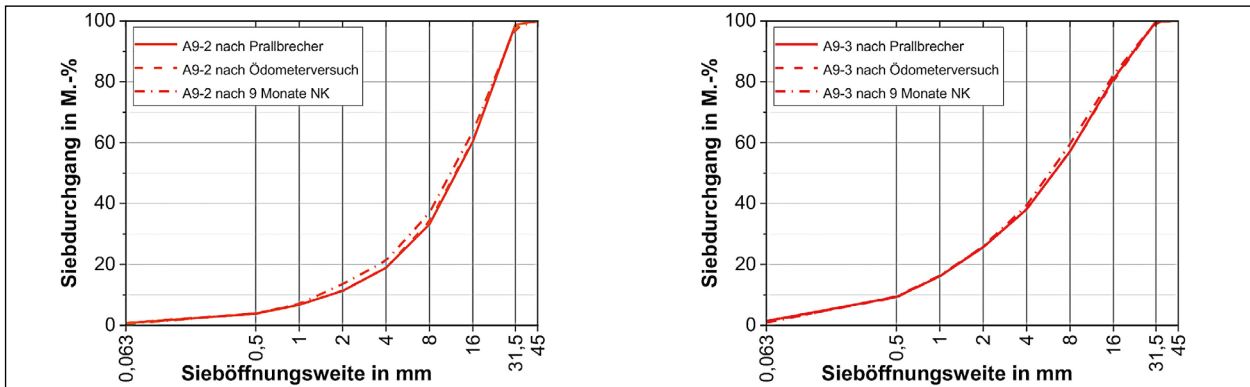


Bild 4-17: Korngrößenverteilung A9-2 (links) und A9-3 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.

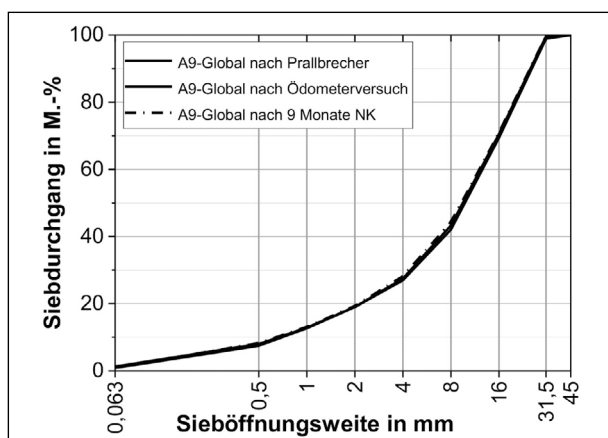


Bild 4-18: Korngrößenverteilung A9-Global jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.

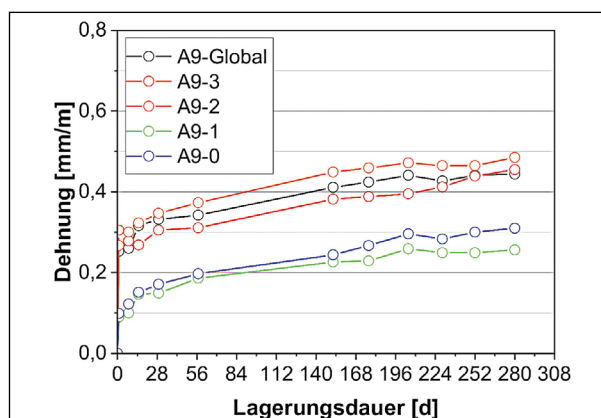


Bild 4-19: Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300 mm) der Varianten A9-0 bis -3 und A9-Global während der Lagerung im Klima (40/100).

Spannungsintervall [kN/m ²]	Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul in MN/m ² Streckenabschnitt/Schädigungsgrad (Rohdichte)				
	A9-0 ($\rho = 1,595 \text{ g/cm}^3$)	A9-1 ($\rho = 1,610 \text{ g/cm}^3$)	A9-2 ($\rho = 1,612 \text{ g/cm}^3$)	A9-3 ($\rho = 1,657 \text{ g/cm}^3$)	A9-Global ($\rho = 1,654 \text{ g/cm}^3$)
50 - 100 (Erstbelastung)	30,8	24,0	30,8	25,3	21,0
100 - 50 (Entlastung)	123,1	109,4	82,1	98,5	109,4
50 - 100 (Wiederbelastung)	65,7	57,9	65,7	61,6	57,9
100 - 200 (Erstbelastung)	35,2	31,3	30,8	33,4	29,4
200 - 400 (Erstbelastung)	41,0	36,1	42,4	37,9	34,3
400 - 200 (Entlastung)	171,3	157,6	164,2	187,6	197,0

Tab. 4-8: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A9 vor 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Spannungsintervall [kN/m ²]	Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul in MN/m ² Streckenabschnitt/Schädigungsgrad (Rohdichte)				
	A9-0 ($\rho = 1,606 \text{ g/cm}^3$)	A9-1 ($\rho = 1,606 \text{ g/cm}^3$)	A9-2 ($\rho = 1,602 \text{ g/cm}^3$)	A9-3 ($\rho = 1,644 \text{ g/cm}^3$)	A9-Global ($\rho = 1,662 \text{ g/cm}^3$)
50 - 100 (Erstbelastung)	31,8	34,0	32,8	25,9	30,8
100 - 50 (Entlastung)	123,1	246,3	98,5	109,4	123,1
50 - 100 (Wiederbelastung)	57,9	54,7	65,7	54,7	65,7
100 - 200 (Erstbelastung)	37,9	45,8	49,3	31,3	41,9
200 - 400 (Erstbelastung)	46,4	51,2	50,5	33,1	45,3
400 - 200 (Entlastung)	207,4	187,6	197,0	187,6	231,8

Tab. 4-9: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A9 nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Eigenschaft	Prüfnorm	Einheit	Ergebnis		Soll	Beurteilung
Kornform	DIN EN 933-4	M.-%	Anteil ungünstig geformter Körner	7,4	≤ 50	TL Gesteins-StB
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	DIN EN 1367-1	M.-%	Absplitterung gesamt	3,6	≤ 4	TL SoB-StB 04/07

Tab. 4-10: Kornform und Widerstand gegen Frostbeanspruchung für das RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher.

HGT	statischer E-Modul in N/mm ² , (%)			
	28 Tage (Referenz)	3 Monate NK	6 Monate NK	9 Monate NK
A9-0	21.121 (100)	25.613 (121)	19.855 (94)	20.989 (99)
A9-1	24.184 (100)	24.237 (100)	20.990 (87)	25.591 (106)
A9-2	27.150 (100)	28.178 (104)	23.592 (87)	30.298 (112)
A9-3	24.712 (100)	25.549 (103)	21.571 (87)	25.364 (103)
A9-Global	21.912 (100)	26.270 (120)	21.909 (100)	25.816 (118)

Tab. 4-11: Mittelwert des statischen E-Moduls der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

HGT	Druckfestigkeit in MPa, (%)			
	28 Tage (Referenz)	3 Monate NK	6 Monate NK	9 Monate NK
A9-0	18,6 (100)	26,9 (145)	23,5 (127)	22,7 (122)
A9-1	22,1 (100)	24,8 (112)	26,3 (119)	27,2 (123)
A9-2	24,5 (100)	30,3 (124)	33,2 (135)	43,0 (175)
A9-3	22,1 (100)	28,2 (127)	31,2 (141)	30,1 (136)
A9-Global	18,9 (100)	25,6 (136)	25,1 (133)	32,7 (173)

Tab. 4-12: Mittelwert der Druckfestigkeit der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

Probe	A9-0		A9-3	
	60	270	60	270
Biegezugfestigkeit β_{BZvor} [MPa]	3,3 MPa		2,9 MPa	3,3 MPa
Biegezugfestigkeit β_{BZnach} [MPa]	gerissen, Grenzlastspielzahl nicht erreicht		n.e.	n.e.

Tab. 4-13: Statische Biegezugfestigkeit vor (β_{BZvor}) und nach (β_{BZnach}) dem Dauerschwingversuch in Abhängigkeit der Schadensskategorie (0 bzw. 3) und des Probenalters (60 bzw. 270 Tage Lagerung in der 40 °C Nebelkammer).

Begleitend wurden für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel die Kornform und der Widerstand gegen Frostbeanspruchung am RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher bestimmt. In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Bild 4-19 zeigt die Dehnung von HGT-Probekörper (150/300) der Varianten A9-0 bis -3 und A9-Global im Klima (40/100). Die ermittelte Dehnung enthält neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung die sich aus der Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C ergibt. Eine Quellung durch Wasseraufnahme ist bei diesen Probekörpern zu vernachlässigen, da die Probekörper vor der Lagerung in der Klimakammer im Feuchtraum lagerten und die Ausgangsmessung im feuchten Zustand erfolgte. Die Varianten A9-2 und -3 sowie A9-Global erreichten Dehnungen nach 280

Tagen im Mittel von 0,4 bis 0,5 mm/m. Im Gegensatz dazu erreichten die Varianten A9-0 und A9-1 im Mittel Dehnungen zwischen 0,2 und 0,3 mm/m. Alle Varianten nähern sich asymptotisch langsam einem Endwert an.

Die folgenden Tabellen zeigen die Entwicklung des statischen E-Moduls (Tab. 4-11) und der Druckfestigkeit (Tab. 4-12) der Varianten A9-0 bis -3 und A9-Global nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

Die Elastizitätswerte in Tabelle 4-11 zeigen, dass alle hergestellten Varianten der nach 3 Monaten Lagerung im Klima (40/100) zwischen 100 bis 121 % der E-Moduln im Alter von 28 Tagen erreicht haben. Es fällt auf, dass nach 6 Monaten Lagerung die Elastizitätswerte absinken und nach 9 Monaten La-

gerung wieder zunehmen. Vergleichend mit dem E-Modul im Alter von 28 Tagen als Referenzwert erreichen alle Varianten nach 9 Monaten Lagerung im Klima (40/100) zwischen 99 bis 118 %.

In Tabelle 4-12 fällt auf, dass die Druckfestigkeiten untereinander sehr stark streuen. Nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung nehmen die Druckfestigkeiten im Vergleich zum Referenzwert nach 28 Tagen um 22-75% zu. Die zugehörigen Mantelflächen und Stirnflächen der Zylinder, die einen Überblick über die Verdichtung geben, sind im Anhang dargestellt.

In Tabelle 4-13 sind die statischen Biegezugfestigkeiten der Varianten A9-0 und A9-3 im Probenalter von 60 und 270 Tagen nach Lagerung in der 40 °C Nebelkammer zusammengestellt. Zudem gibt die Tabelle an, dass die im Labor durchgeführten Dauerschwingversuche der Variante A9-0 im Probenalter von 60 und 270 Tagen zwei Millionen Lastwechsel nicht ertragen. Der Dauerschwingversuch an der Variante A9-3 wurde durch das festgestellte Versagen der Variante A9-0 nicht mehr durchgeführt.

4.2 Streckenlos BAB A14 – km 143+500 bis km 144+200, RiFa Magdeburg (2016)

Das zweite Streckenlos ist eine AKR-geschädigte Betonfahrbahndecke der BAB A14, Leipzig – Magdeburg, Richtungsfahrbahn Magdeburg, km 143+500 bis km 144+200, zwischen den Anschlussstellen Könnern und Plötzkau im Bundesland Sachsen-Anhalt. Im Rahmen der Erneuerung der AKR-geschädigten Betondecke war es möglich, Betonplatten aus dem geschädigten Streckenabschnitt zur weiteren Aufbereitung für RC-AKR-Material zu gewinnen. Der Streckenabschnitt wurde im Jahre 2000 durch die ARGE TBU gebaut. Folgender Deckenaufbau wurde festgestellt:

- ca. 31 - 34 cm Betondecke (zweischichtig/zweilagige Bauweise ca. 8/23 cm)
- auf STSuB

Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass alkaliempfindliche Gesteinskörnung im Ober- und im Unterbeton vorhanden ist (Quarzporphyr [Schwarz] / mitteldeutscher Kies [Beesenlaublingen]). Angaben zu Erstprüfungen, zu Betonzusammensetzungen

und zum Aufbau der Fahrbahndecke liegen im Archiv der Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt nicht mehr vor.

Auf dem gesamten Streckenlos wurden die Schadenskategorien 0 bis III vorgefunden, während aber nur sehr wenige Fugenkreuze instandgesetzt wurden.

Auf dem Streckenlos wurden in Abhängigkeit der visuell festgelegten Schadenskategorie (0 – keine sichtbaren Schäden an der Oberfläche, I – Verfärbung im Bereich von Fugenkreuzen, II – beginnende bis ausgeprägte Risse, III – Substanzverlust, Verschotterung) vier Flächen mit den Abmessungen 2 m x 2 m zur Gewinnung des RC-AKR-Materials festgelegt. Die ausgewählten Flächen wurden nochmals in vier gleich große, transportable Stücke geteilt (4 x 1 m x 1 m), um ein reibungsloses Herausheben der Betonteile mittels Schwerlastankern und Mobilbagger zu gewährleisten. Die Herstellung der Trennschnitte bis zur Tragschicht (STSuB) erfolgte mit einem Fugenschneider.

Bild 4-20 zeigt zunächst eine Übersichtsaufnahme von km 143+500 bis km 144+200. Bild 4-21 zeigt die Entnahmestelle A14-0 (LS/1.ÜS). Die Betonoberfläche zeigte in diesem Bereich keine Anzeichen von AKR-Merkmalen (Schadenskategorie 0). In Bild 4-22 (links) sind die vier Ausbaustücke zu erkennen. Im rechten Bild ist der Querschnitt eines Ausbaustückes mit einem in Plattenmitte horizontal verlaufenden Riss dargestellt (Bild 4-22, rechts). Die zweite Entnahmestelle A14-1 wurde im Bereich des Fugenkreuzes der LS/1.ÜS festgelegt. Die Oberfläche im Bereich des Fugenkreuzes wies eine deutliche Verfärbung auf (Bild 4-23). Die Entnahmestelle wurde deshalb der Schadenskategorie I zugeordnet. Im Vergleich zu Bild 4-22 ist der horizontal verlaufende Riss deutlich ausgeprägter (Bild 4-24, rechts). Die Entnahmestelle A14-2 (Bild 4-25) zeigt bereits erste Rissbildungen (Schadenskategorie II). Der horizontale Riss verläuft in etwa des Überganges zwischen Ober- und Unterbeton und ist deutlich ausgeprägter als bei den vorherigen Entnahmestellen (Bild 4-26, rechts). Die letzte Entnahmestelle A14-3 wurde der Schadenskategorie III zugeordnet (Bild 4-27). Der horizontal verlaufende Riss war bei dieser Entnahmestelle am deutlichsten ausgeprägt. Zusätzlich sind größere Betonstücke aus der entnommenen Platte herausgebrochen (Bild 4-28, rechts).



Bild 4-20: BAB A14, RF Magdeburg, km 143+500 (links) und km 144+200 (rechts), Übersichtsaufnahme.



Bild 4-21: BAB A14, LS/1.ÜS, Schadenskategorie 0, an der Oberfläche keine Schäden sichtbar.



Bild 4-22: BAB A9, vier Ausbaustücke (links) und Ausbaustück mit Horizontalrissbildung (rechts).



Bild 4-23: BAB A14, LS/1.ÜS, Schadenskategorie I, Dunkelverfärbung im Bereich des Fugenkreuzes.



Bild 4-24: BAB A14, Ausbaustücke (links) und bereits ausgeprägte Horizontalrissbildung (rechts).



Bild 4-25: BAB A14, LS/1.ÜS, Schadenskategorie II, beginnende Rissbildung im Fugenkreuz.



Bild 4-26: BAB A14, Ausbaustücke (links) und deutlich ausgeprägte Horizontalrissbildung (rechts).



Bild 4-27: BAB A14, LS/1.ÜS, Schadenskategorie III, beginnende Verschotterung.



Bild 4-28: BAB A14, Ausbaustücke (links) und Horizontalrissbildung mit Ausbruchstücken (rechts).

Fahrspur	Entnahmebereich	Kennzeichnung	Abmessungen	Farbe	Verwendung
1.ÜS/LS	Fuge	A14-0 (SK 0)	2 x 2 m ²	blau	recyceln 0/32
1.ÜS/LS	Fuge	A14-1 (SK I)	2 x 2 m ²	grün	recyceln 0/32
1.ÜS/LS	Fuge	A14-2 (SK II)	2 x 2 m ²	gelb	recyceln 0/32
1.ÜS/LS	Fuge	A14-3 (SK III)	2 x 2 m ²	rot	recyceln 0/32
1.ÜS	Fuge	A14-D1 (SK 0)	Ø = 35 cm l = 32 cm	blau	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
1.ÜS	Plattenmitte	A14-D2 (SK 0)	Ø = 35 cm l = 32 cm	blau	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS	Fuge	A14-D3 (SK I)	Ø = 35 cm l = 32 cm	grün	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS	Plattenmitte	A14-D4 (SK I)	Ø = 35 cm l = 32 cm	grün	Nachdehnung und mech.Eigen- schaften
LS	Fuge	A14-D5 (SK II)	Ø = 35 cm l = 32 cm	gelb	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS	Plattenmitte	A14-D6 (SK II)	Ø = 35 cm l = 32 cm	gelb	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
1.ÜS	Fuge	A14-D7 (SK III)	Ø = 35 cm l = 32 cm	rot	Nachdehnung und mech.Eigen- schaften
1.ÜS	Plattenmitte	A14-D8 (SK III)	Ø = 35 cm l = 32 cm	rot	Nachdehnung und mech.Eigenschaften

LS = Lastspur, 1.ÜS = 1.Überholspur, SK = Schadenskategorie

Tab. 4-14: Übersicht der Ausbaustücke (A14-0 bis A14-3) und der Bohrkerne (A14-D1 bis A14-D8) der BAB A14, Leipzig – Magdeburg, Richtungsfahrbahn Magdeburg, km 143+500 bis km 144+200

Für alle Untersuchungen wurden die zur Gewinnung des RC-AKR-Materials ausgewählten Ausbaustücke auf ein Korngemisch 0/32 gebrochen. Die Aufbereitung der Ausbaustücke (Varianten A14-0 bis -3 erfolgte in einem Raupenmobilen Prallbrecher MOBIREX MR110 EVO 2 der Firma Kleemann ohne nachgeschaltete Siebanlage. Die Einstellung des Brechspalts erfolgt bei der Anlage vollhydraulisch und wurde zum Zeitpunkt der Wiederaufbereitung zu 35 bis 38 mm gewählt. Die Rotordrehzahl betrug 1.700 Umdrehungen/Minute. Die Trennung der enthaltenen Dübel und Anker erfolgte über einen Magnetabscheider.



Die Tabelle 4-14 gibt eine Übersicht über die gewonnenen Ausbaustücke und der entnommenen Bohrkerne im Streckenlos zwischen km 143+500 bis km 144+200.

4.2.1 Ergebnisse



In Tabelle 4-15 bis Tabelle 4-18 sind die Ergebnisse und weiterführenden Untersuchungen an horizontal gewonnenen, prismatischen Prüfkörpern zusammengestellt.

Bild 4-29 und Bild 4-30 zeigen die Dehnungen der Varianten A14-D1 bis -D8 im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 280 Tagen. Die Dehnungen enthalten neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung (Summe aus Temperaturdehnung durch Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C und Quelldehnung durch Wasseraufnahme). Nach 280 Tagen wurden für alle Varianten Dehnungen im Bereich von 0,5 bis 0,75 mm/m gemessen. Es deutet sich aber an, dass für alle Varianten die Dehnungszunahme noch nicht abgeschlossen ist. Die bleibende Dehnung der Varianten bei Laborklima (20/65) wurde zwischen 0,021 und 0,151 mm/m ermittelt.



Die Aufbereitung der Varianten A14-0 bis A14-3 erfolgte im mobilen Prallbrecher MOBIREX MR110 EVO 2 ohne nachgeschaltete Siebanlage. Nach der Aufbereitung erfolgte die Ermittlung der Korngrößenverteilung. Diese werden in Abhängigkeit der Varianten im Bild 4-21 und Bild 4-22 mit dem Sieblinienbereich für Schottertragschichten unter Betondecke 0/32 nach TL SoB-StB verglichen. Die ermittelten Sieblinien zeigen, dass die Aufbereitung

Streckenlos BAB A14 – km 143+500 bis km 144+200, RiFa Magdeburg					
Schadenskategorie 0					
	A14 – D1 (Fuge)			A14 – D2 (Plattenmitte)	
O1 / U1		O2 /U2	O1 / U1		O2 /U2
42.157 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 45.377 MPa 75,7 MPa		43.131 MPa 80,4 MPa	45.049 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 43.280 MPa 47,0 MPa		41.189 MPa 71,0 MPa
44.999 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 41.830 MPa 81,7 MPa		40.203 MPa 86,2 MPa	43.013 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 42.020 MPa 73,6 MPa		48.561 MPa 89,4 MPa



Tab. 4-15: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A14 aus dem Fugenbereich (D1) und der Plattenmitte (D2).

Streckenlos BAB A14 – km 143+500 bis km 144+200, RiFa Magdeburg					
Schadenskategorie I (1)					
	A14 – D3 (Fuge)			A14 – D4 (Plattenmitte)	
O1 / U1		O2 /U2	O1 / U1		O2 /U2
34.605 MPa 51,5 MPa		32.605 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 34.566 MPa 45,0 MPa	40.288 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 41.219 MPa 53,8 MPa		43.010 MPa 73,2 MPa
43.176 MPa 80,5 MPa		40.672 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 42.248 MPa 80,3 MPa	45.082 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 45.059 MPa 80,5 MPa		48.985 MPa 90,3 MPa

Tab. 4-16: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A14 aus dem Fugenbereich (D3) und der Plattenmitte (D4).

Streckenlos BAB A14 – km 143+500 bis km 144+200, RiFa Magdeburg					
Schadenskategorie II (2)					
	A14 – D5 (Fuge)			A14 – D6 (Plattenmitte)	
O1 / U1		O2 /U2	O1 / U1		O2 /U2
37.312 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 38.148 MPa 68,3 MPa		40.220 MPa 70,6 MPa	44.023 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 40.747 MPa 60,3 MPa		42.109 MPa 77,6 MPa
37.219 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 38.148 MPa 68,3 MPa		41.131 MPa 77,4 MPa	44.099 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 44.402 MPa 61,9 MPa		39.439 MPa 82,2 MPa

Tab. 4-17: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A14 aus dem Fugenbereich (D5) und der Plattenmitte (D6).

Streckenlos BAB A14 – km 143+500 bis km 144+200, RiFa Magdeburg					
Schadenskategorie III (3)					
	A14 – D7 (Fuge)			A14 – D8 (Plattenmitte)	
O1 / U1		O2 / U2	O1 / U1		O2 / U2
38.647 MPa 71,5 MPa		42.992 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 40.919 MPa 62,8 MPa	42.143 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 41.858 MPa 68,5 MPa		45.163 MPa 76,5 MPa
37.307 MPa 77,6 MPa		42.177 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 40.077 MPa 70,3 MPa	41.206 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ 42.290 MPa 65,3 MPa		42.875 MPa 78,2 MPa

Tab. 4-18: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A14 aus dem Fugenbereich (D7) und der Plattenmitte (D8).

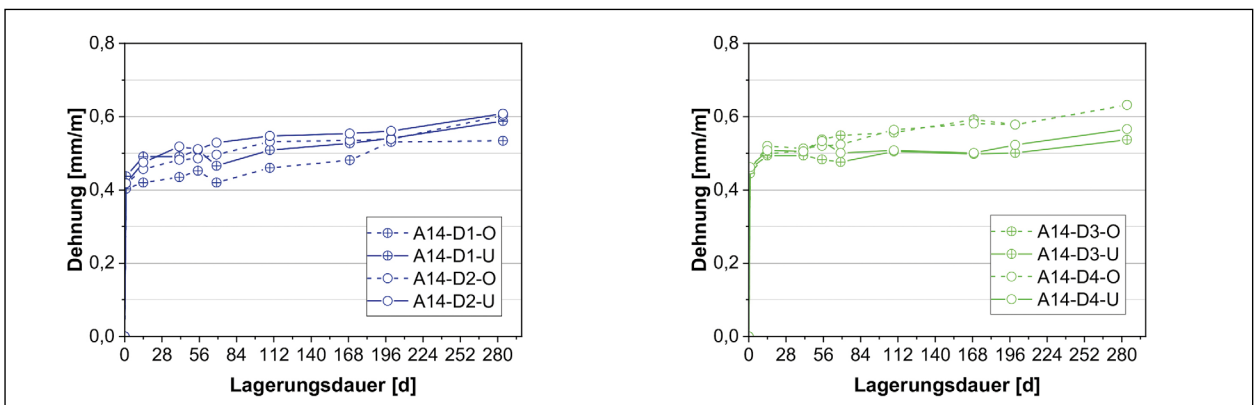


Bild 4-29: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Schadenskategorie 0 und I (1), während der Lagerung im Klima (40/100).

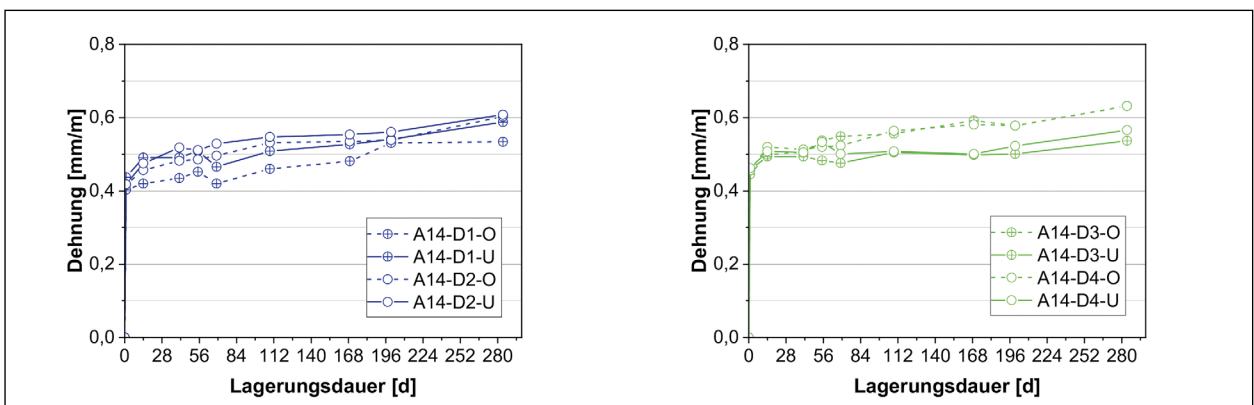


Bild 4-30: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Schadenskategorie II (2) und III (3), während der Lagerung im Klima (40/100).

in Abhängigkeit der visuell erfassten Schadenskategorie keinen wesentlichen Einfluss hat.

Bild 4-33 zeigt die Mittelwerte (n=3) des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch für RC-Material der BAB A14 in Abhängigkeit der Varianten A14-0, A14-1, A14-2 und A14-3. Alle ermittelten Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ liegen in einem Bereich zwischen 23 und 26 M.-%.

Die Schlagzertrümmerungswerte der Varianten A14-1 und A14-2 sind mit 23,5 M.-% geringer als die der Varianten A14-0 und A14-3. Alle Varianten halten die Grenzwerte an die Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ von 32 M.-% für Frostschuttschichten und 28 M.-% für Schottertragschichten nach RILI SA (2005) ein.

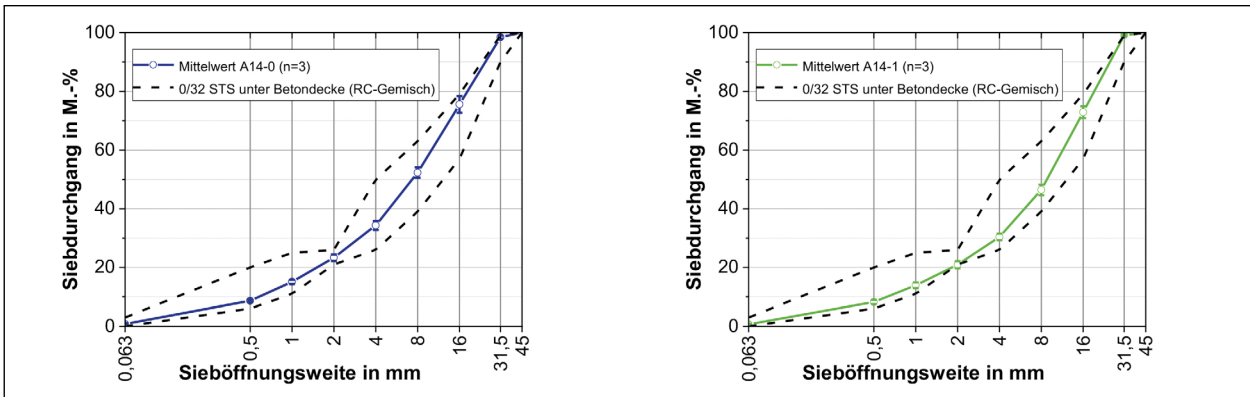


Bild 4-31: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A14-0 (links) und A14-1 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.

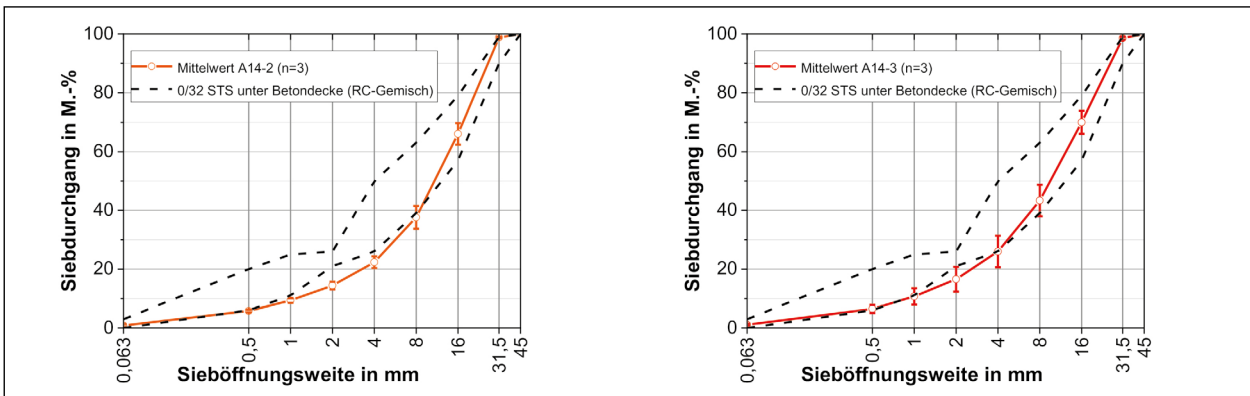


Bild 4-32: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A14-2 (links) und A14-3 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.

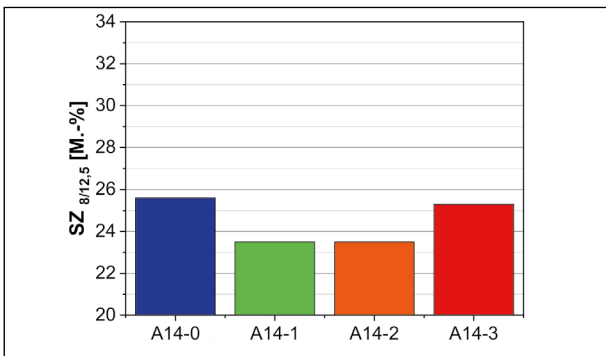


Bild 4-33: Mittelwerte des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch ($SZ_{8/12,5}$) für RC-Material der BAB A14 in Abhängigkeit der Varianten A14-0 bis -3.

Entnahmestelle	A14-0	A14-1	A14-2	A14-3
CBR-Prüfung bei optimalem Wassergehalt				
CBR-Wert [%]	107	110	101	94
CBR-Prüfung nach 24 h Wasserlagerung				
CBR-Wert [%]	122	151	76	85

Tab. 4-19: CBR-Werte bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit der Varianten A14-0 bis -3.

Aus Tabelle 4-19 ist zu erkennen, dass die CBR-Werte sowohl bei optimalem Wassergehalt als auch nach 24 h Wasserlagerung einer großen Streuung unterliegen. Die CBR-Werte lagen mit einer Ausnahme (A14-2, nach Wasserlagerung) über 80 %. Bereits bei einem CBR-Wert von ≥ 80 % ist eine Verwendung von RC-Material in der Tragschicht möglich. Die wassergesättigten Varianten A14-2 und A14-3 weisen die geringste Tragfähigkeit auf. Die höchste Tragfähigkeit wurde bei den Varianten

A14-1 und A14-0 erreicht, die auch im Fahrbahndeckenbeton die geringste Schädigung aufwiesen.

Bild 4-34 und Bild 4-35 zeigen die Korngrößenverteilungen jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung. Die Korngrößenverteilungen nach AKR-provozierender Lagerung über einen Zeitraum von 3 und 6 Monaten sind im Anhang aufgeführt. Die Korngrößenverteilungen wurden mit der Sieblinie nach der Aufbereitung verglichen. Aus allen geprüften Varianten kann abgeleitet werden, dass eine mechanische Einwirkung (einaxialer Kompressionsversuch) als auch eine AKR-provozierende Lagerung (chemische Reaktion) keinen signifikanten Einfluss auf die

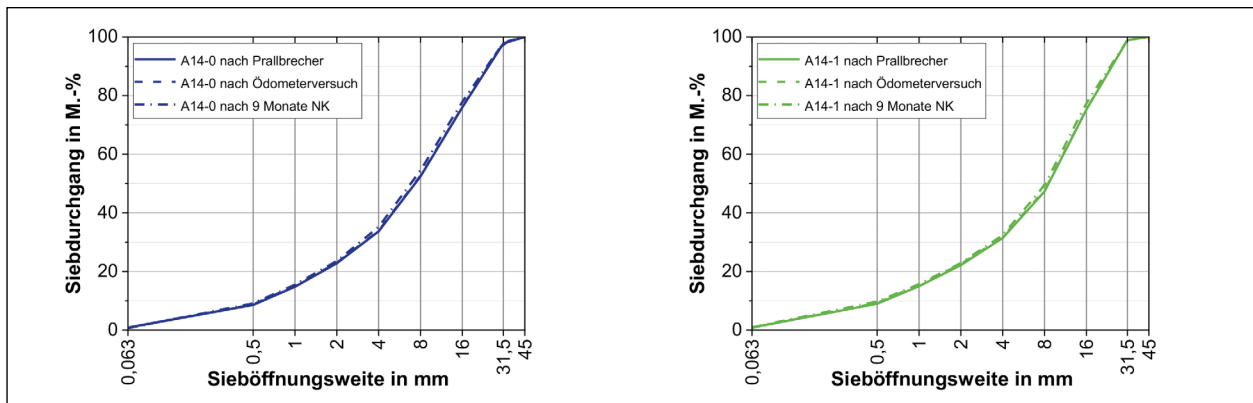


Bild 4-34: Korngrößenverteilung A14-0 (links) und A14-1 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.

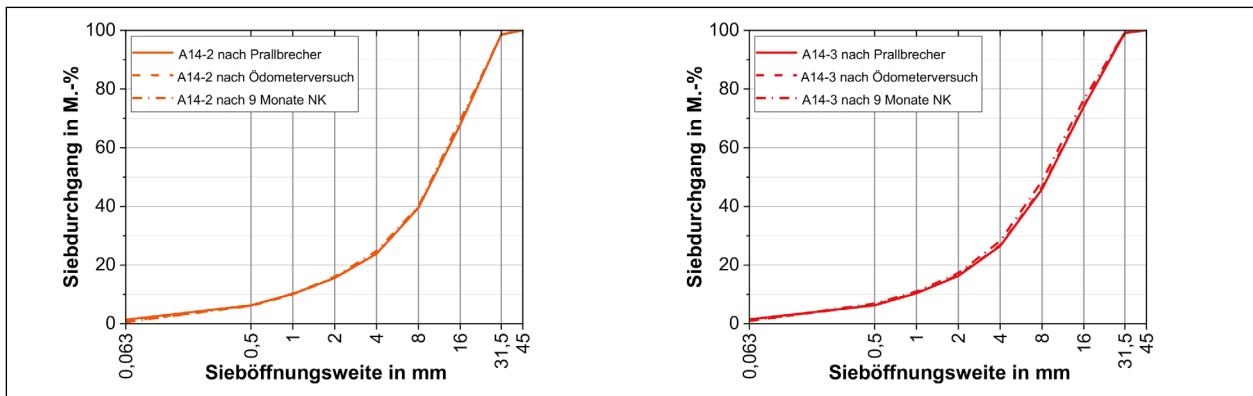


Bild 4-35: Korngrößenverteilung A14-2 (links) und A14-3 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.

Spannungsintervall [kN/m ²]	Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in MN/m ² Streckenabschnitt/Schädigungsgrad (Rohdichte)			
	A14-0 ($\rho = 1,649 \text{ g/cm}^3$)	A14-1 ($\rho = 1,665 \text{ g/cm}^3$)	A14-2 ($\rho = 1,584 \text{ g/cm}^3$)	A14-3 ($\rho = 1,586 \text{ g/cm}^3$)
50 - 100 (Erstbelastung)	25,3	25,3	32,8	25,3
100 - 50 (Entlastung)	109,4	123,1	109,4	98,5
50 - 100 (Wiederbelastung)	82,1	61,6	54,7	98,5
100 - 200 (Erstbelastung)	33,4	29,8	34,6	30,8
200 - 400 (Erstbelastung)	42,8	34,3	41,9	41,9
400 - 200 (Entlastung)	207,4	151,5	187,6	207,4

Tab. 4-20: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A14 vor 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Sieblinien hat. Für alle Varianten gilt, dass die festgestellten Abweichungen größenordnungsmäßig im üblichen Streubereich von Korngrößenverteilungen bei Wiederholungsprüfungen liegen.

Die Einbaudichte im Ödometertopf vor und nach AKR-provozierender Lagerung, lag für das RC-AKR-Material in den Grenzen zwischen $1,573 \text{ t/m}^3$

und $1,665 \text{ t/m}^3$ (Schwankungsbreite $\rho_{\min}/\rho_{\max} = 5,5 \%$). Die Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A14, vor und nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100), sind in Tabelle 4-20 und Tabelle 4-21 zusammengestellt. Die Ergebnisse vor und nach

Spannungsintervall [kN/m²]	Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul in MN/m² Streckenabschnitt/Schädigungsgrad (Rohdichte)			
	A14-0 ($\rho = 1,642 \text{ g/cm}^3$)	A14-1 ($\rho = 1,635 \text{ g/cm}^3$)	A14-2 ($\rho = 1,573 \text{ g/cm}^3$)	A14-3 ($\rho = 1,590 \text{ g/cm}^3$)
50 - 100 (Erstbelastung)	36,5	31,8	22,9	30,8
100 – 50 (Entlastung)	98,5	89,5	98,5	109,4
50 - 100 (Wiederbelastung)	49,3	57,9	51,8	70,4
100 - 200 (Erstbelastung)	32,3	37,2	32,3	37,9
200 - 400 (Erstbelastung)	41,9	45,8	36,5	43,8
400 – 200 (Entlastung)	197,0	207,4	197,0	207,4

Tab. 4-21: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmodul in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A14 nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Eigenschaft	Prüfnorm	Einheit	Ergebnis	Soll	Beurteilung	
Kornform	DIN EN 933-4	M.-%	Anteil ungünstig geformter Körner	11,0	≤ 50	TL Gesteins-StB
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	DIN EN 1367-1	M.-%	Absplitterung gesamt	1,3	≤ 4	TL SoB-StB 04/07

Tab. 4-22: Kornform und Widerstand gegen Frostbeanspruchung für das RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher.

3-monatiger und 6-monatiger Lagerung im Klima (40/100) sowie alle zugehörigen Druck-Zusammendruckkurven im linearen Maßstab sind im Anhang zusammengestellt. Auf eine Bewertung der Messergebnisse wird auf Kapitel 7.2.4 verwiesen.

Begleitend wurden für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel die Kornform und der Widerstand gegen Frostbeanspruchung am RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher bestimmt. In der Tabelle 4-22 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Bild 4-36 zeigt die Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300) der Varianten A14-0 bis -3 im Klima (40/100). Die ermittelte Dehnung enthält neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung die sich aus der Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C ergibt. Eine Quelldehnung durch Wasseraufnahme ist bei diesen Probekörpern zu vernachlässigen, da die Probekörper vor der Lagerung in der Klimakammer im Feuchtraum lagerten und die Ausgangsmessung im feuchten Zustand erfolgte. Die Varianten A9-0, -2 und -3 erreichen Dehnungen nach 280 Tagen im Mittel von rd. 0,4 bis rd. 0,5 mm/m. Im Gegensatz dazu erreicht die Variante A14-1 im Mittel eine Dehnung von rd. 0,25 mm/m. Alle Varianten nähern sich asymptotisch langsam einem Endwert an.

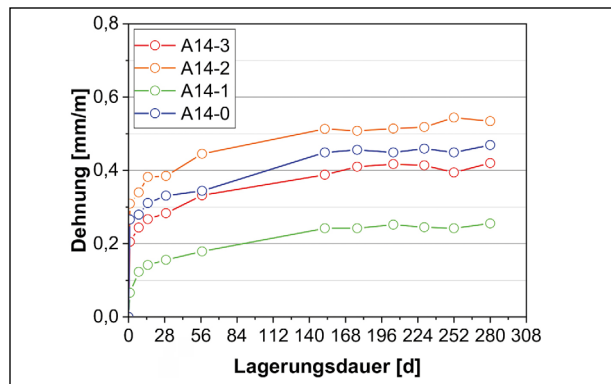


Bild 4-36: Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300 mm) der Varianten A14-0 bis -3 während der Lagerung im Klima (40/100).

Die folgenden Tabellen zeigen die Entwicklung des statischen E-Moduls (Tabelle 4-23) und der Druckfestigkeit (Tabelle 4-24) der Varianten A14-0 bis -3 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen Lagerung in der 40 °C Nebelkammer. Die Elastizitätswerte zeigen, dass die hergestellten Varianten nach 3 Monaten und 6 Monaten zum Teil kleinere Elastizitätsmoduln im Vergleich zum Referenzwert nach 28 Tagen erreichen. Erst nach 9 Monaten nehmen alle Elastizitätsmoduln im Vergleich zum Referenzwert im Bereich von 6-12 % zu.

HGT	statischer E-Modul in N/mm ² , (%)			
	28 Tage (Referenz)	3 Monate NK	6 Monate NK	9 Monate NK
A14-0	20.991 (100)	21.903 (104)	19.116 (91)	22.164 (106)
A14-1	23.340 (100)	22.540 (97)	20.907 (90)	25.089 (107)
A14-2	22.692 (100)	20.655 (91)	25.458 (112)	25.458 (112)
A14-3	23.039 (100)	26.056 (113)	21.571 (94)	25.292 (110)

Tab. 4-23: Mittelwerte des statischen E-Moduls der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

HGT	Druckfestigkeit in MPa, (%)			
	28 Tage (Referenz)	3 Monate NK	6 Monate NK	9 Monate NK
A14-0	18,5 (100)	19,8 (107)	24,3 (132)	23,2 (126)
A14-1	22,3 (100)	21,6 (97)	25,2 (113)	30,1 (135)
A14-2	21,5 (100)	22,8 (106)	34,4 (160)	34,4 (160)
A14-3	22,1 (100)	29,2 (132)	27,9 (126)	30,3 (137)

Tab. 4-24: Mittelwerte der Druckfestigkeit der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 280 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

Probe	A14-0		A14-3	
	60	270	60	270
Biegezugfestigkeit β_{BZvor} [MPa]	3,0	3,4	3,2	3,0
Biegezugfestigkeit β_{BZnach} [MPa]	3,8	3,1	4,8	3,4

Tab. 4-25: Statische Biegezugfestigkeit vor (β_{BZvor}) und nach (β_{BZnach}) dem Dauerschwingversuch für die Varianten A14-0 und A14-3 sowie in Abhängigkeit des Probenalters (60 bzw. 270 Tage Lagerung in der 40 °C Nebelkammer).

Vergleicht man die Druckfestigkeiten in Tabelle 4-24 untereinander, so stellt man fest, dass diese Werte erheblich streuen. Nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung nehmen die Druckfestigkeiten im Vergleich zum Referenzwert nach 28 Tagen um 26-60 % zu. Die zugehörigen Mantelflächen und Stirnflächen der Zylinder, die einen Überblick über die Verdichtung geben, sind im Anhang dargestellt.

Tabelle 4-25 zeigt die statische Biegezugfestigkeit vor (β_{BZvor}) und nach (β_{BZnach}) dem Dauerschwingversuch für die Varianten A14-0 und A14-3 im Probenalter von 60 bzw. 270 Tage nach Lagerung in der 40 °C Nebelkammer. Alle Varianten ertragen die Grenzlastspielzahl von 2 Mio. Lastwechsel ohne Bruch. Zusätzlich zeigt sich, dass die an einem Durchläufer bestimmte statische Biegezugfestigkeit (β_{BZnach}) höher ist als die an unbelasteten Biegebalken ermittelte statische Biegezugfestigkeit (β_{BZvor}) oder sich zumindest nicht signifikant voneinander unterscheidet.

4.3 Streckenlos BAB A9 – km 33+400 bis km 40+305, RiFa München (2017)

Der untersuchte Streckenabschnitt wurde sechsstreifig und zweibahnig ausgebaut und als Regelquerschnitt RQ 35,5 ausgeführt. Dem Verkehr stehen pro Richtung drei Fahrbahnen zur Verfügung. Der BAB-Abschnitt wurde erstmalig 1998 für den Verkehr freigegeben und in einschichtige/zweilagiger Bauweise ausgeführt. Angaben zur Betonzusammensetzung lagen nicht mehr vor. Auf dem gesamten Streckenlos wurden die Schadenskategorien 0 bis III vorgefunden. Es wurden bereits sehr viele Fugenkreuze instandgesetzt. Folgender Deckenaufbau wurde festgestellt bzw. geht aus Bestandsunterlagen hervor:

- i.M. 29 cm Betondecke (einschichtig/zweilagige Bauweise) auf Geotextilvlies
- i.M. 20 cm hydraulisch gebundene Tragschicht
- i.M. 21 cm frostunempfindliches Material

Bild 4-37 und Bild 4-38 zeigt Übersichtsaufnahmen des untersuchten Streckenloses der BAB A9 bei km 34+000, km 36+000, km 36+500 und km 39+000.



Bild 4-37: BAB A9, RF Leipzig, km 34+000 (links) und km 36+000 (rechts), Übersichtsaufnahme.



Bild 4-38: BAB A9, RF Leipzig, km 36+500 (links) und km 39+000 (rechts), Übersichtsaufnahme.

Bohrkerne für die begleitenden Untersuchungen wurden im Standstreifen, in der Lastspur sowie in der ersten und zweiten Überholspur entnommen. Das Bild 4-39 zeigt die Bohrkernentnahmestellen bei km 36+068. Im Gegensatz zu den ersten beiden Streckenlosen (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2) wurde bei dieser Erneuerungsmaßnahme RC-AKR-Material an zwei verschiedenen Stellen während der Aufbereitung bei km 34+000 und km 39+000 gewonnen. Die Aufbereitung der zertrümmerten Betondecke erfolgte bauseits mit mobilen Prallbrechern mit nachgeschalteter Siebanlage. Die Trennung der enthaltenen Dübel und Anker erfolgte über einen Magnetabscheider. Die Beseitigung von Vliestoffstücken erfolgte manuell an der Anlage durch einen Baustellenmitarbeiter. Weitere Angaben zu den mobilen Prallbrechern lagen nicht vor. Das aufbereitete RC-AKR-Material wurde für die Untersuchungen in Big Bags abgefüllt.

Tabelle 4-26 gibt einen Überblick über das entnommene RC-AKR-Material und der entnommenen Bohrkerne im Streckenlos zwischen km 33+400 bis km 40+305.

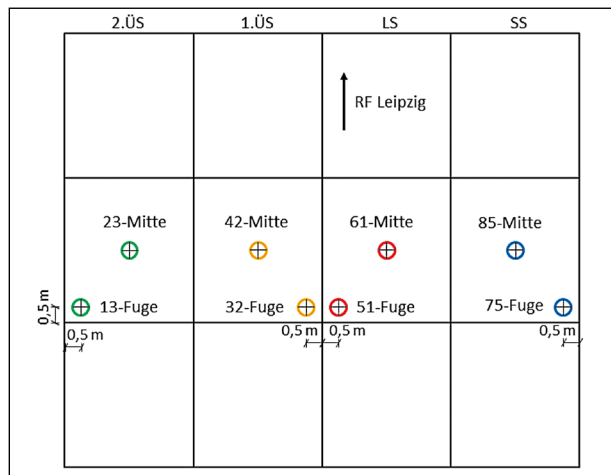


Bild 4-39: Bohrkernentnahmestellen BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 36+038.

4.3.1 Ergebnisse





Die folgende Tabelle 4-27 ist eine Lesehilfe, wie die Ergebnisse in Tabelle 4-28 bis Tabelle 4-31 zusammengestellt sind.

An ausgewählten und horizontal gewonnenen, prismatischen Prüfkörpern, wurde der statische Elastizitätsmodul ($E\text{-Modul}_{\text{vor}}$) vor der Lagerung im Klima

Fahrspur	Entnahmebereich	Kennzeichnung	Abmessungen	Farbe	Verwendung
entfällt	km 34+000	A9-34+000 (SK I-III)	entfällt	rot	RC-AKR-Material
entfällt	km 39+000	A9-39+000 (SK I-III)	entfällt	blau	RC-AKR-Material
SS (km 36+068)	Fuge	75 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	blau	Nachdehnung und mech. Eigenschaften
SS (km 36+068)	Plattenmitte	85 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	blau	Nachdehnung und mech. Eigenschaften
LS (km 36+068)	Fuge	51 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	rot	Nachdehnung und mech. Eigenschaften
LS (km 36+068)	Plattenmitte	61 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	rot	Nachdehnung und mech. Eigenschaften
1.ÜS (km 36+068)	Fuge	32 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	gelb	Nachdehnung und mech. Eigenschaften
1.ÜS (km 36+068)	Plattenmitte	42 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	gelb	Nachdehnung und mech. Eigenschaften
2.ÜS (km 36+068)	Fuge	13 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	grün	Nachdehnung und mech. Eigenschaften
2.ÜS (km 36+068)	Plattenmitte	23 (SK II)	Ø = 35 cm l = 29 cm	grün	Nachdehnung und mech. Eigenschaften

SS = Standspur, LS = Lastspur, 1.ÜS = 1.Überholspur, 2.ÜS = 2.Überholspur, SK = Schadenskategorie



Tab. 4-26: Übersicht von entnommenem RC-AKR-Material und Bohrkernen aus der Fahrbahndecke der BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 33+400 bis km 40+305.

Streckenlos Bundesautobahnabschnitt, Richtungsfahrbahn					
festgestellte Schadenskategorie					
	Fuge (Abstand Bohrlochmitte zur Längs- und Querruge 50 cm)			Plattenmitte	
Prüfkörper oben / unten (horizontal)		Prüfkörper vertikal 1 / 2	Prüfkörper oben / unten (horizontal)		Prüfkörper vertikal 1 / 2
E-Modul _{vor} $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ E-Modul _{nach} Druckfestigkeit	Beispiel 	E-Modul Druckfestigkeit	E-Modul _{vor} $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ E-Modul _{nach}	Beispiel 	E-Modul Druckfestigkeit
E-Modul _{vor} $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ E-Modul _{nach} Druckfestigkeit		E-Modul Druckfestigkeit	E-Modul _{vor} $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ E-Modul _{nach}		E-Modul Druckfestigkeit



Tab. 4-27: Lesehilfe über die Zusammenstellung der Ergebnisse.

(40/100) ermittelt. An diesen Prüfkörpern wurde dann die Längenänderung über einen Zeitraum von 280 Tagen im Klima (40/100) gemessen ($\epsilon_{(40/100),280d}$), die bleibende Dehnung bei Massenkonstanz im Klima (20/65) bestimmt und zum Abschluss der E-Modul und die Druckfestigkeit ermittelt (E-Modul_{nach}, Druckfestigkeit). Dies erfolgte an Prismen mit den


Abmessungen 10 x 10 x 20 cm³, nachdem die sich an den Stirnseiten befindenden Messmarken entfernt wurden. An den vertikal gewonnenen, prismatischen Prüfkörpern wurde nur der E-Modul und die Druckfestigkeit ermittelt. Die Druckfestigkeiten wurden an Würfeln mit den Kantenlängen von 10 cm bestimmt, die aus dem nicht bis zum Bruch geprüft

Streckenlos BAB A9 – km 33,400 bis 40,305 RiFa München km 36+068 / Standspur (SS)					
Schadenskategorie II (2)					
	75 (Fuge)			85 (Plattenmitte)	
O / U		V1 / V2	O / U		V1 / V2
35.905 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		32.165 MPa 75,8 / 79,1 MPa	41.723 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		42.364 MPa 72,1 / 85,5 MPa
36.365 MPa 52,2 MPa			40.610 MPa 53,2 MPa		
43.133 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		21.291 MPa 60,6 / 68,6 MPa	48.504 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		42.294 MPa 73,6 / 85,8 MPa
44.028 MPa 65,9 MPa			46.815 MPa 68,2 MPa		



Tab. 4-28: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (75-Fuge) und Plattenmitte (85-Mitte).

Streckenlos BAB A9 – km 33,400 bis 40,305 RiFa München km 36+068 / Lastspur (LS)					
Schadenskategorie II (2)					
	51 (Fuge)			61 (Plattenmitte)	
O / U		V1 / V2	O / U		V1 / V2
43.137 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		25.681 MPa 85,8 / 98,7 MPa	41.844 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		44.522 MPa 72,9 / 88,6 MPa
40.956 MPa 58,1 MPa			39.316 MPa 62,2 MPa		
45.093 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		35.729 MPa 52,3 / 92,2 MPa	47.202 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		46.072 MPa 78,2 / 83,8 MPa
44.536 MPa 71,7 MPa			46.232 MPa 65,1 MPa		

Tab. 4-29: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (51-Fuge) und Plattenmitte (61-Mitte).

Streckenlos BAB A9 – km 33,400 bis 40,305 RiFa München km 36+068 / 1.Überholspur (1.ÜS)					
Schadenskategorie II (2)					
	32 (Fuge)			42 (Plattenmitte)	
O / U		V1 / V2	O / U		V1 / V2
40.686 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		21.425 MPa 78,0 / 97,3 MPa	41.835 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$	ohne Bild	45.086 MPa 75,9 / 76,9 MPa
39.592 MPa 58,7 MPa			36.770 MPa 61,7 MPa		
45.537 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		33.052 MPa 88,8 / 95,7 MPa	46.084 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		43.386 MPa 42,5 / 75,1 MPa
43.680 MPa 71,9 MPa			46.221 MPa 65,7 MPa		

Tab. 4-30: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (32-Fuge) und Plattenmitte (42-Mitte).

Streckenlos BAB A9 – km 33,400 bis 40,305 RiFa München km 36+068 / 2.Überholspur (2.ÜS)					
Schadenskategorie II (2)					
	13 (Fuge)			23 (Plattenmitte)	
O / U		V1 / V2	O / U		V1 / V2
42.100 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		36.688 MPa 81,2 / 86,0 MPa	43.965 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$ n.E. n.E.		40.989 MPa 60,3 / 80,3 MPa
41.700 MPa 52,3 MPa					
48.309 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		40.919 MPa 62,6 / 78,7 MPa	45.278 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		33.351 MPa 60,5 / 79,9 MPa
44.343 MPa 66,3 MPa			43.766 MPa 68,9 MPa		

Tab. 4-31: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (13-Fuge) und Plattenmitte (23-Mitte).

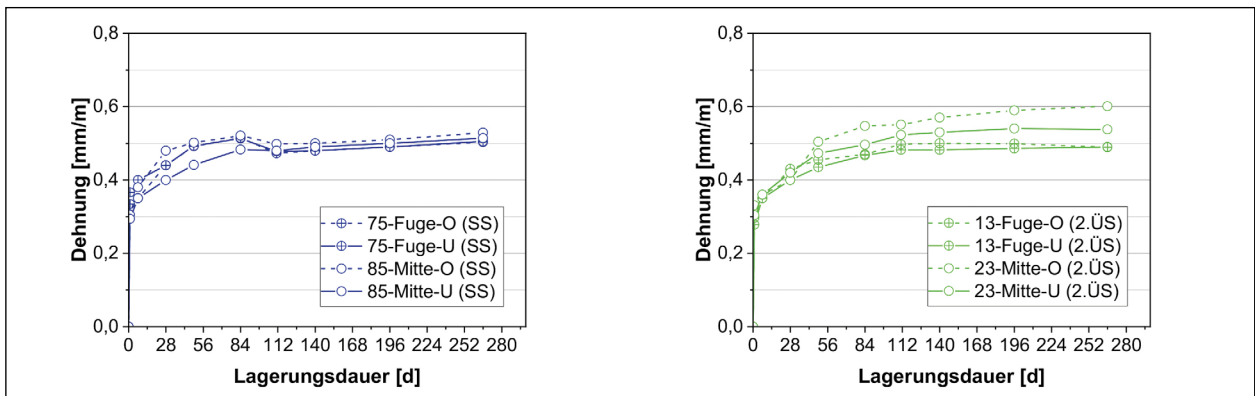


Bild 4-40: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 36+068 (links Standspur (SS), rechts 2.Überholspur (2.ÜS)) während der Lagerung im Klima (40/100).

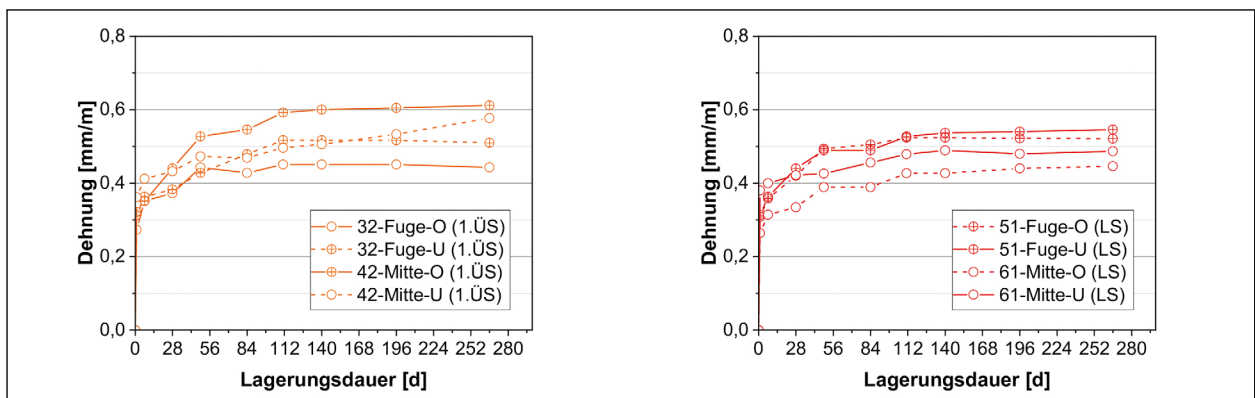


Bild 4-41: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 36+068 (links 1.Überholspur (1.ÜS), rechts Lastspur (LS)) während der Lagerung im Klima (40/100).

ten oberen und unteren Drittel der vertikalen Prüfkörper nach der E-Modulprüfung herausgesägt wurden.

Bild 4-40 und Bild 4-41 zeigen die Dehnungen in Abhängigkeit der Entnahmestelle im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 280 Tagen. Die Dehnungen enthalten neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung (Summe aus

Temperaturdehnung durch Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C und Quilldehnung durch Wasseraufnahme). Nach 280 Tagen wurden für alle Varianten Dehnungen im Bereich von rd. 0,45 bis 0,65 mm/m gemessen. Es deutet sich an, dass für alle Varianten die Dehnungszunahme abgeschlossen ist. Die bleibende Dehnung der Varianten bei Labor-klima (20/65) wurde im Bereich von 0,089 bis 0,289 mm/m ermittelt.

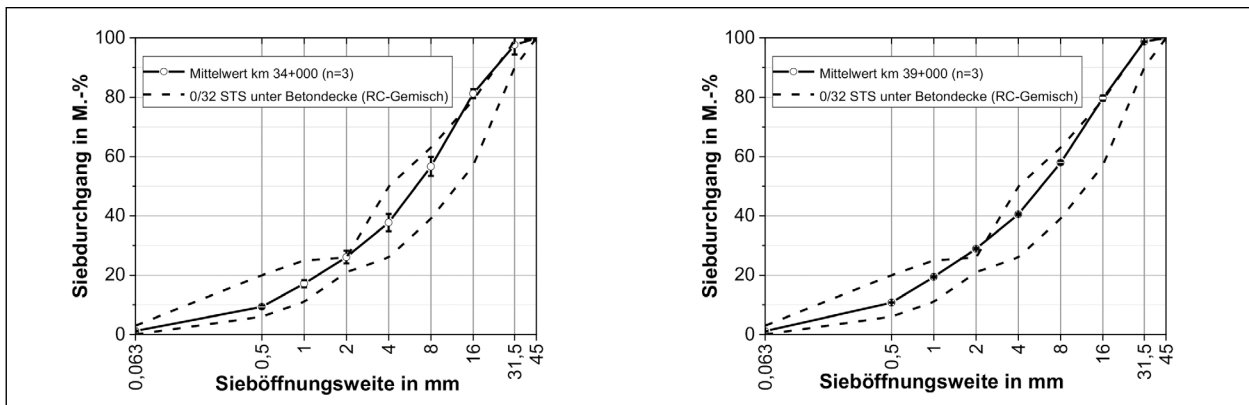


Bild 4-42: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmestellen bei km 34+000 (links) und km 39+000 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.

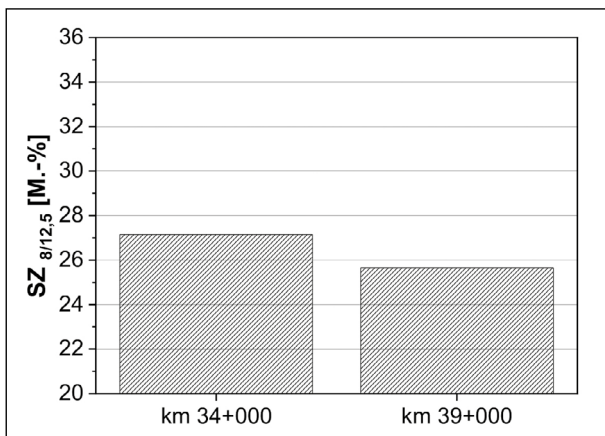


Bild 4-43: Mittelwerte des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch ($SZ_{8/12,5}$) für RC-AKR-Material der BAB A9 in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 34+000 und km 39+000.

Die Aufbereitung des RC-AKR-Materials bei den Entnahmestellen km 34+000 und km 39+000 erfolgte im mobilen Prallbrecher mit nachgeschalteter Siebanlage. Nach der Aufbereitung erfolgte die Ermittlung der Korngrößenverteilung. Diese wird in Abhängigkeit der Entnahmestellen (km 34+000 und km 39+000) im Bild 4-42 mit dem Sieblinienbereich für Schottertragschichten unter Betondecke 0/32 nach TL SoB-StB 04/07 verglichen.

Bild 4-43 zeigt die Mittelwerte (n=3) des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch für RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen km 34+000 und km 39+000. Die ermittelten Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ liegen bei 27 und 26 M.-%. Sowohl das RC-AKR-Material bei Entnahmestelle km 34+000 als auch bei km 39+000 halten die Anforderung bis max. 28 M.-% Absplitterung an die Widerstandsfähigkeit gegenüber Schlag für Schottertragschichten der Bk 100 bis Bk 3,2 nach der BTR RC-StB (2014) ein.

Entnahmestelle	km 34+000	km 39+000
CBR-Prüfung bei optimalem Wassergehalt		
CBR-Wert [%]	106	99
CBR-Prüfung nach 24 h Wasserlagerung		
CBR-Wert [%]	106	93

Tab. 4-32: CBR-Werte bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 34+000 und km 39+000.

Tabelle 4-32 zeigt, dass alle CBR-Werte sowohl beim optimalen Wassergehalt als auch nach 24 h Wasserlagerung deutlich über 80 % liegen. Bereits bei einem CBR-Wert von ≥ 80 % ist eine Verwendung von RC-Material in der Tragschicht möglich.

Das linke und rechte Bild 4-44 zeigen die Korngrößenverteilungen jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung. Die Korngrößenverteilungen nach AKR-provozierender Lagerung über einen Zeitraum von 3 und 6 Monaten sind im Anhang aufgeführt. Die Korngrößenverteilungen wurden mit der Sieblinie nach der Aufbereitung verglichen. Aus allen geprüften Varianten kann abgeleitet werden, dass eine mechanische Einwirkung (einaxialer Kompressionsversuch) als auch eine AKR-provozierende Lagerung (chemische Reaktion) keinen signifikanten Einfluss auf die Sieblinien hat. Für alle Varianten gilt, dass die festgestellten Abweichungen größenordnungsmäßig im üblichen Streubereich von Korngrößenverteilungen bei Wiederholungsprüfungen liegen.

Die Einbaudichte im Ödometertopf, vor und nach AKR-provozierender Lagerung, lag für das RC-AKR-Material in den Grenzen zwischen $1,600 \text{ t/m}^3$ und $1,623 \text{ t/m}^3$ (Schwankungsbreite $\rho_{\min}/\rho_{\max} = 1,5$ %). Die Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom

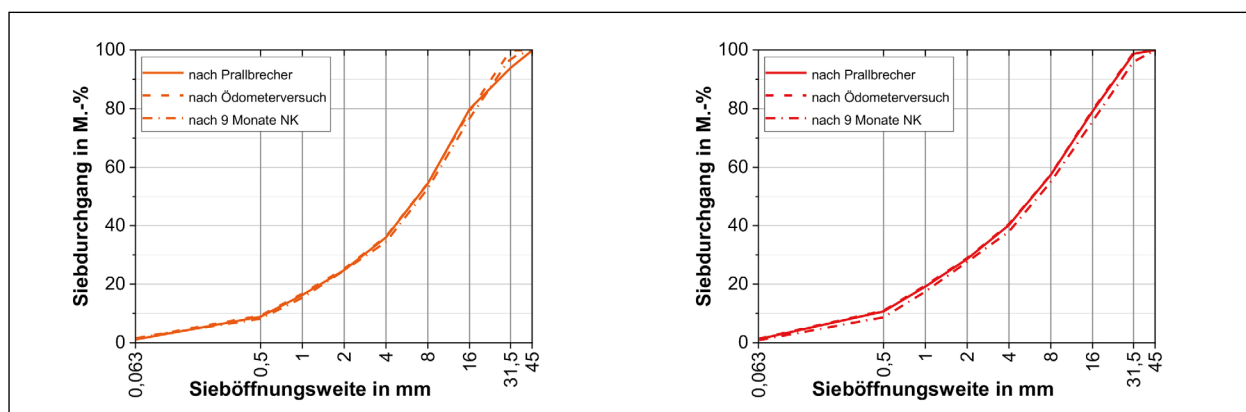


Bild 4-44: Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 34+000 (links) und km 39+000 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.

Spannungsintervall [kN/m ²]	Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in MN/m ² Streckenabschnitt (Rohdichte)	
	km 34+000 ($\rho = 1,600 \text{ g/cm}^3$)	km 39+000 ($\rho = 1,615 \text{ g/cm}^3$)
50 - 100 (Erstbelastung)	28,1	29,8
100 - 50 (Entlastung)	140,7	123,1
50 - 100 (Wiederbelastung)	59,4	57,9
100 - 200 (Erstbelastung)	45,8	41,0
200 - 400 (Erstbelastung)	36,8	43,8
400 - 200 (Entlastung)	171,3	262,7

Tab. 4-33: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen bei km 34+000 und km 39+000 vor 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Spannungsintervall [kN/m ²]	Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in MN/m ² Streckenabschnitt (Rohdichte)	
	km 34+000 ($\rho = 1,623 \text{ g/cm}^3$)	km 39+000 ($\rho = 1,616 \text{ g/cm}^3$)
50 - 100 (Erstbelastung)	24,0	21,0
100 - 50 (Entlastung)	98,5	61,6
50 - 100 (Wiederbelastung)	49,3	37,9
100 - 200 (Erstbelastung)	30,3	29,8
200 - 400 (Erstbelastung)	36,5	33,4
400 - 200 (Entlastung)	187,6	187,6

Tab. 4-34: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen km 34+000 und km 39+000 nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Eigenschaft	Prüfnorm	Einheit	Ergebnis		Soll	Beurteilung
Kornform	DIN EN 933-4	M.-%	Anteil ungünstig geformter Körner	5	≤ 50	TL Gesteins-StB
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	DIN EN 1367-1	M.-%	Absplitterung gesamt	2,0	≤ 4	TL SoB-StB 04/07

Tab. 4-35: Kornform und Widerstand gegen Frostbeanspruchung für das RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher.

Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A9, vor und nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100), sind in Tabelle 4-33 und Tabelle 4-34 zusammengestellt. Die Ergebnisse vor und nach 3-monatiger und 6-monatiger Lagerung im Klima (40/100) sowie alle zugehörigen Druck-Zusammendrückungskurven im linearen Maßstab sind im Anhang zusammengestellt. Auf eine Bewertung der Messergebnisse wird auf Kapitel 7.2.4 verwiesen.

Begleitend wurden für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel die Kornform und der Widerstand gegen Frostbeanspruchung am RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher bestimmt. In Tabelle 4-35 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Bild 4-45 zeigt die Dehnung von HGT-Probekörper (150/300) mit RC-AKR-Material von km 34+000 und km 39+000 im Klima (40/100). Die ermittelte Deh-

nung enthält neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung die sich aus der Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C ergibt. Eine Quelldehnung durch Wasseraufnahme ist bei diesen Probekörpern zu vernachlässigen, da die Probekörper vor der Lagerung in der Klimakammer im Feuchtraum lagerten und die Ausgangsmessung im feuchten Zustand erfolgte. Beide Varianten erreichten nach 280 Tagen Lagerung im Mittel eine Dehnung von rd. 0,42 mm/m. Weiter ist auffällig, dass sich beide Varianten asymptotisch einem Endwert nähern und somit eine weitere Dehnung ausgeschlossen werden kann.

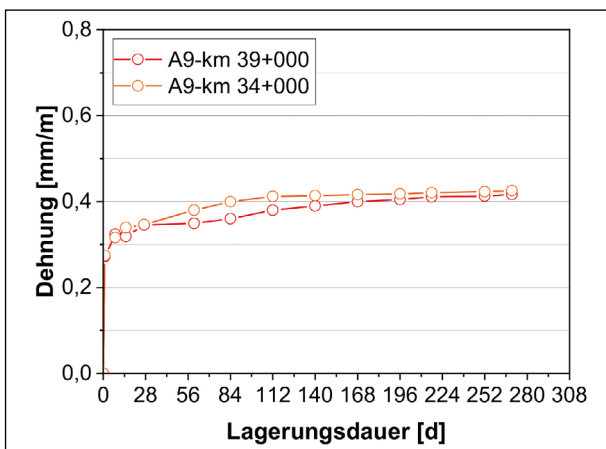


Bild 4-45: Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300 mm) mit RC-AKR-Material von km 34+000 und km 39+000 während der Lagerung im Klima (40/100).

Die folgenden Tabellen zeigen die Entwicklung des statischen E-Moduls (Tabelle 4-36) und der Druckfestigkeit (Tabelle 4-37) der Varianten km 34+000 und km 39+000 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen Lagerung in der 40 °C Nebelkammer. Die Elastizitätswerte zeigen, dass die hergestellten Varianten nach 3 Monaten kleinere Werte annehmen als im Vergleich zum Referenzwert. Bereits nach 6 Monaten nehmen die Elastizitätsmoduln zu und erreichen einen Zuwachs von 125 % und 153 % im Vergleich zum Referenzwert.

Auch die Druckfestigkeiten nach 3 Monaten Nebelkammerlagerung erreichen nicht die Druckfestigkeiten des zugehörigen Referenzwertes nach 28 Tagen (Tabelle 4-37). Eine Zunahme der Druckfestigkeit ist nach 6 Monaten Nebelkammerlagerung feststellbar. Nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung erreichen die Varianten Werte von 136 % und 188 % im Vergleich zum Referenzwert.

In Tabelle 4-38 sind die statischen Biegezugfestigkeiten der HGT-Prüfkörper mit RC-AKR-Material von km 34+000 und km 39+000 im Probenalter von 60 und 270 Tagen nach Lagerung in der 40 °C Nebelkammer zusammengestellt. Zudem gibt die Tabelle an, dass die im Labor durchgeführten Dauerschwingversuche mit Ausnahme der Variante km

HGT	statischer E-Modul in N/mm ² , (%)			
	28 Tage (Referenz)	3 Monate NK	6 Monate NK	9 Monate NK
km 34+000	22.159 (100)	20.714 (94)	27.550 (124)	27.791 (125)
km 39+000	17.941 (100)	16.890 (94)	22.988 (128)	27.505 (153)

Tab. 4-36: Mittelwerte des statischen E-Moduls der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

HGT	Druckfestigkeit in MPa, (%)			
	28 Tage (Referenz)	3 Monate NK	6 Monate NK	9 Monate NK
km 34+000	20,3 (100)	18,0 (89)	21,7 (107)	27,7 (136)
km 39+000	15,1 (100)	14,5 (96)	27,0 (178)	28,5 (188)

Tab. 4-37: Mittelwerte der Druckfestigkeit der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 280 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

Probe	km 34+000		km 39+000	
	60	270	60	270
Biegezugfestigkeit β_{BZvor} [MPa]	2,47	2,95	2,10	3,43
Biegezugfestigkeit β_{BZnach} [MPa]	2,51	gerissen, Grenzlastspielzahl nicht erreicht	gerissen, Grenzlastspielzahl nicht erreicht	gerissen, Grenzlastspielzahl nicht erreicht

Tab. 4-38: Statische Biegezugfestigkeit vor (β_{BZvor}) und nach (β_{BZnach}) dem Dauerschwingversuch für die Varianten km 34+000 und km 39+000 sowie in Abhängigkeit des Probenalters (60 bzw. 270 Tage Lagerung in der 40 °C Nebelkammer).

34+000 und einem Probenalter von 60 Tagen zwei Millionen Lastwechsel nicht ertragen.

4.4 Streckenlos BAB A9 – km 22+565 bis km 16+500, RiFa Berlin (2017)

Der untersuchte Streckenabschnitt wurde sechsstreifig und zweibahnig ausgebaut und als Regelquerschnitt RQ 35,5 ausgeführt. Dem Verkehr stehen pro Richtung drei Fahrbahnen zur Verfügung. Der BAB-Abschnitt wurde erstmalig 1998 für den Verkehr freigegeben und in einschichtige/zweilagiger Bauweise ausgeführt. Angaben zur Betonzusammensetzung lagen nicht mehr vor. Auf dem gesamten Streckenlos wurden die Schadenskategorien 0 bis III vorgefunden. Stellenweise wurden Fugenkreuze instandgesetzt. Folgender Deckenaufbau wurde festgestellt bzw. geht aus Bestandsunterlagen hervor:

- i.M. 29 cm Betondecke (einschichtig/zweilagige Bauweise) auf Geotextilvlies

- i.M. 20 cm hydraulisch gebundene Tragschicht
- i.M. 21 cm frostunempfindliches Material

Bild 4-46 und Bild 4-47 zeigen Übersichtsaufnahmen des untersuchten Streckenloses der BAB A9 bei km 22+400, km 21+000, km 19+200 und km 17+800. Bohrkern für die begleitenden Untersuchungen wurden im Standstreifen, in der Lastspur sowie in der ersten und zweiten Überholspur entnommen. Das Bild 4-48 zeigt die Bohrkernentnahmestellen bei km 21+000. Im Gegensatz zu den ersten beiden Streckenlosen (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2) wurde bei dieser Erneuerungsmaßnahme RC-AKR-Material an zwei verschiedenen Stellen der Erneuerungsmaßnahme bei km 17+800 und km 19+200 gewonnen. Die Aufbereitung der zertrümmerten Betondecke erfolgte bauseits mit mobilen Prallbrechern mit nachgeschalteter Siebanlage. Die Trennung der enthaltenen Dübel und Anker erfolgte über einen Magnetabscheider. Die Beseitigung von Vliestoffstücken erfolgte manuell an der Anlage durch einen Baustellenmitarbeiter. Weitere Angaben zu den mobilen Prallbrechern lagen nicht vor.



Bild 4-46: BAB A9, RF Berlin, km 22+400 (links) und km 21+000 (rechts), Übersichtsaufnahme.



Bild 4-47: BAB A9, RF Berlin, km 19+200 (links) und km 17+800 (rechts), Übersichtsaufnahme.

Fahrspur	Entnahmebereich	Kennzeichnung	Abmessungen	Farbe	Verwendung
entfällt	km 17+800	A9-17+800 (SK I)	entfällt	rot	RC-AKR-Material
entfällt	km 19+200	A9-19+200 (SK I-III)	entfällt	gelb	RC-AKR-Material
SS (km 21+000)	Fuge	75 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	blau	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
SS (km 21+000)	Plattenmitte	85 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	blau	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS (km 21+000)	Fuge	51 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	rot	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
LS (km 21+000)	Plattenmitte	61 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	rot	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
1.ÜS (km 21+000)	Fuge	32 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	gelb	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
1.ÜS (km 21+000)	Plattenmitte	42 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	gelb	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
2.ÜS (km 21+000)	Fuge	13 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	grün	Nachdehnung und mech.Eigenschaften
2.ÜS (km 21+000)	Plattenmitte	23 (SK I)	Ø = 35 cm l = 29 cm	grün	Nachdehnung und mech.Eigenschaften

SS = Standspur, LS = Lastspur, 1.ÜS = 1.Überholspur, 2.ÜS = 2.Überholspur, SK = Schadenskategorie

Tab. 4-39: Übersicht von entnommenem RC-AKR-Material und Bohrkernen aus der Fahrbahndecke der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 22+565 bis km 16+500

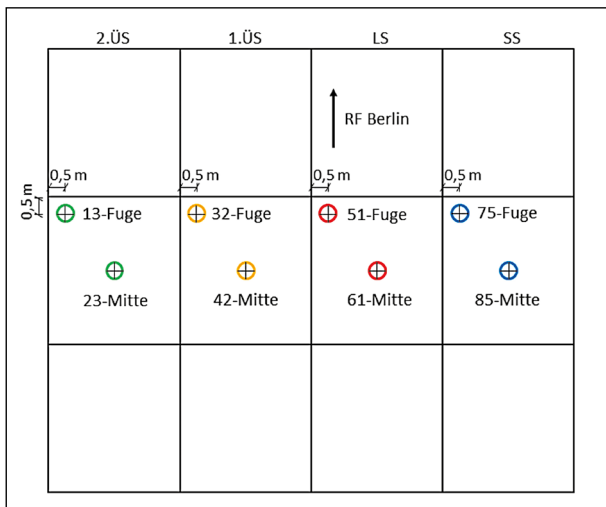


Bild 4-48: Bohrkernentnahmestellen BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 21+000.



Das aufbereitete RC-Material wurde für die Untersuchungen in Big Bags abgefüllt. Die Tabelle 4-39 gibt einen Überblick über das entnommene RC-AKR-Material und der entnommenen Bohrkern im Streckenlos zwischen km 22+565 bis km 16+500.

4.4.1 Ergebnisse



In Tabelle 4-40 bis Tabelle 4-43 sind die Ergebnisse und weiterführenden Untersuchungen an horizontal und vertikal gewonnenen, prismatischen Prüfkörpern, zusammengestellt. An ausgewählten und horizontal gewonnenen, prismatischen Prüfkörpern,

wurde der statische Elastizitätsmodul ($E\text{-Modul}_{\text{vor}}$) vor der Lagerung im Klima (40/100) ermittelt. An diesen Prüfkörpern wurde dann die Längenänderung über einen Zeitraum von 280 Tagen im Klima (40/100) gemessen ($\epsilon_{(40/100),280d}$), die bleibende Dehnung bei Massenkonstanz im Klima (20/65) bestimmt und zum Abschluss der E-Modul und die Druckfestigkeit ermittelt ($E\text{-Modul}_{\text{nach}}$, Druckfestigkeit). Dies erfolgte an Prismen mit den Abmessungen $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$, nachdem die sich an den Stirnseiten befindenden Messmarken entfernt wurden. An den vertikal gewonnenen, prismatischen Prüfkörpern wurde nur der E-Modul und die Druckfestigkeit ermittelt. Die Druckfestigkeiten wurden an Würfeln mit den Kantenlängen von 10 cm bestimmt, die aus dem nicht bis zum Bruch geprüften oberen und unteren Drittel der vertikalen Prüfkörper nach der E-Modulprüfung herausgesägt wurden.



Bild 4-49 und Bild 4-50 zeigen die Dehnungen in Abhängigkeit der Entnahmestelle im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 280 Tagen. Die Dehnungen enthalten neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung (Summe aus Temperaturdehnung durch Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C und Quelldehnung durch Wasseraufnahme). Nach 280 Tagen wurden für alle Varianten Dehnungen im Bereich von rund 0,5 bis 0,7 mm/m gemessen. Es deutet sich an, dass für alle Varianten die Dehnungszunahme abgeschlossen

Streckenlos BAB A9 – km 22,565 bis 16,500 RiFa Berlin km 21+000 / Standspur (SS)					
Schadenskategorie I (1)					
	75 (Fuge)	V1 / V2		85 (Plattenmitte)	V1 / V2
O / U			O / U		
38.232 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		23.403 MPa 67,3 / 82,1 MPa	38.306 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		36.656 MPa 64,4 / 69,9 MPa
37.627 MPa 48,0 MPa			36.431 MPa 47,1 MPa		36.276 MPa 60,2 / 71,4 MPa
42.694 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		30.380 MPa 67,0 / 84,3 MPa	42.820 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		
41.716 MPa 60,9			41.533 MPa 56,4 MPa		



Tab. 4-40: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (75-Fuge) und Plattenmitte (85-Mitte).

Streckenlos BAB A9 – km 22,565 bis 16,500 RiFa Berlin km 21+000 / Lastspur (LS)					
Schadenskategorie I (1)					
	51 (Fuge)	V1 / V2		61 (Plattenmitte)	V1 / V2
O / U			O / U		
40.650 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		38.989 MPa 64,5 / 86,1 MPa	40.965 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		39.635 MPa 56,8 / 86,2 MPa
37.469 MPa 50,4 MPa			40.150 MPa 52,7 MPa		41.431 MPa 67,6 / 86,6 MPa
43.850 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		33.210 MPa 49,2 / 75,3 MPa	45.944 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		
44.319 MPa 70,9 MPa			44.340 MPa 73,0 MPa		

Tab. 4-41: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (51-Fuge) und Plattenmitte (61-Mitte).

Streckenlos BAB A9 – km 22,565 bis 16,500 RiFa Berlin km 21+000 / 1.Überholspur (1.ÜS)					
Schadenskategorie I (1)					
	32 (Fuge)	V1 / V2		42 (Plattenmitte)	V1 / V2
O / U			O / U		
32.426 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		36.294 MPa 57,3 / 64,0 MPa	41.122 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		40.637 MPa 75,8 / 89,0 MPa
30.492 MPa 63,8 MPa			40.541 MPa 53,1 MPa		42.563 MPa 71,0 / 72,6 MPa
40.063 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		29.800 MPa 62,6 / 92,2 MPa	45.885 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		
37.384 MPa 65,1 MPa			45.885 MPa 76,0 MPa		

Tab. 4-42: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (32-Fuge) und Plattenmitte (42-Mitte).

Streckenlos BAB A9 – km 22,565 bis 16,500 RiFa Berlin km 21+000 / 2.Überholspur (2.ÜS)					
Schadenskategorie I (1)					
O / U	13 (Fuge)	V1 / V2	O / U	23 (Plattenmitte)	V1 / V2
35.851 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		39.491 MPa 51,4 / 78,5 MPa	36.077 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		39.937 MPa 65,7 / 76,0 MPa
36.351 MPa 38,9 MPa			37.312 MPa 46,6 MPa		
47.104 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		33.988 MPa 54,0 / 82,6 MPa	47.104 MPa $\epsilon_{(40/100),280d}$ $\epsilon_{(20/65)}$		39.276 MPa 64,7 / 86,1 MPa
43.095 MPa 58,9 MPa			47.205 MPa 65,3 MPa		

Tab. 4-43: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (13-Fuge) und Plattenmitte (23-Mitte).

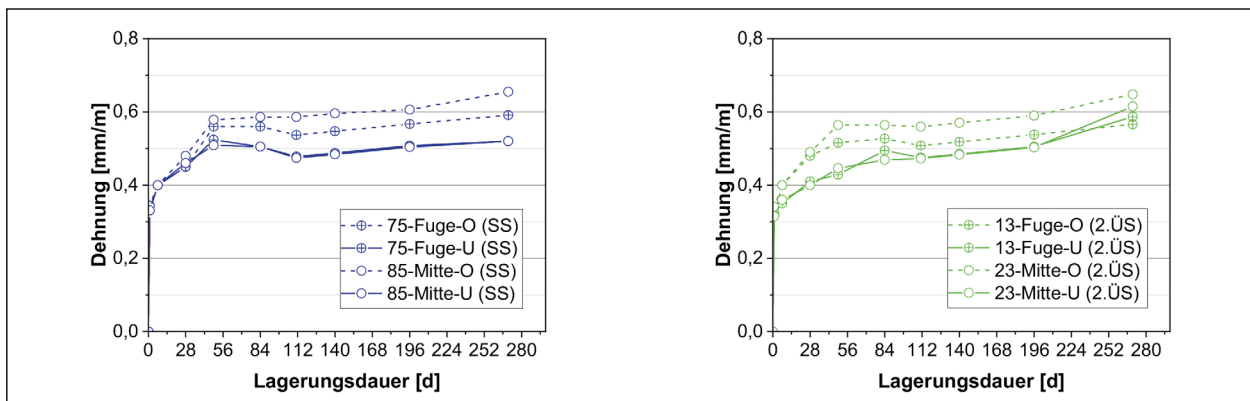


Bild 4-49: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 21+000 (links Standspur (SS), rechts 2.Überholspur (2.ÜS)) während der Lagerung im Klima (40/100).

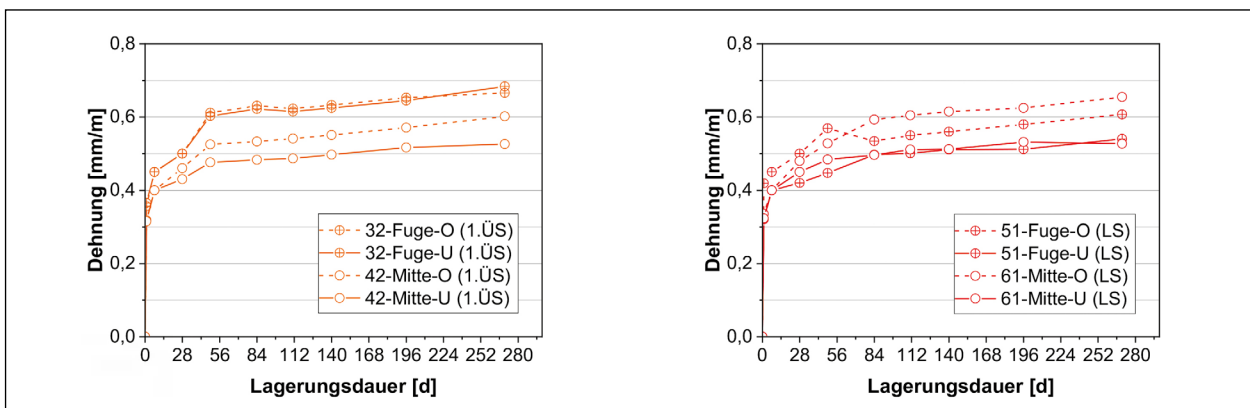


Bild 4-50: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 21+000 (links 1.Überholspur (1.ÜS), rechts Lastspur (LS)) während der Lagerung im Klima (40/100).

ist. Die bleibende Dehnung der Varianten bei Labor-klima (20/65) wurde zwischen 0,096 und 0,231 mm/m ermittelt.

Die Aufbereitung des RC-AKR-Materials bei den Entnahmestellen km 17+800 und km 19+200 erfolgte im mobilen Prallbrecher mit nachgeschalteter Siebanlage. Nach der Aufbereitung erfolgte die Ermittlung der Korngrößenverteilung. Diese wird in

Abhängigkeit der Entnahmestellen (km 17+800 und km 19+200) im Bild 4-51 mit dem Sieblinienbereich für Schottertragschichten unter Betondecke 0/32 nach TL SoB-StB 04/07 verglichen.

Bild 4-52 zeigt die Mittelwerte (n=3) des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch für RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen km 17+800 und km 19+200. Die ermittelten Schlag-

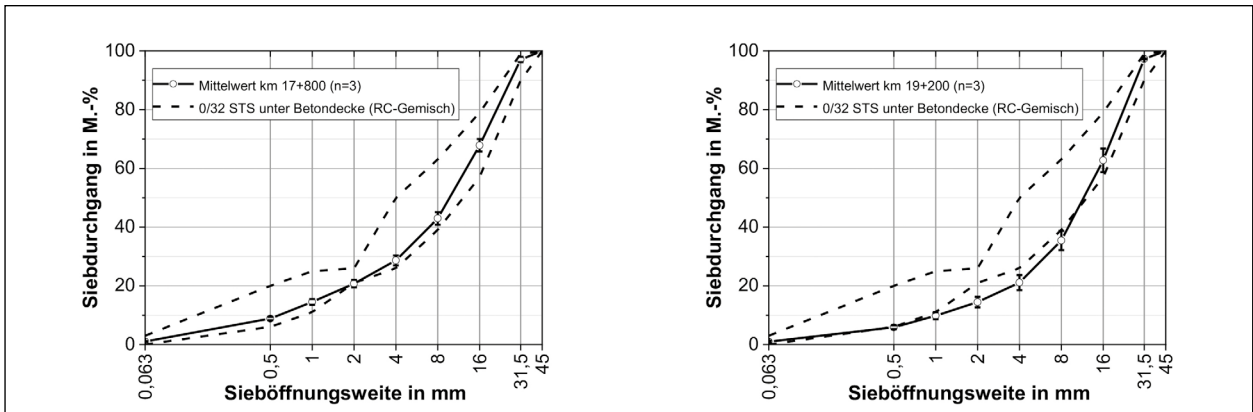


Bild 4-51: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 17+800 (links) und km 19+200 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.

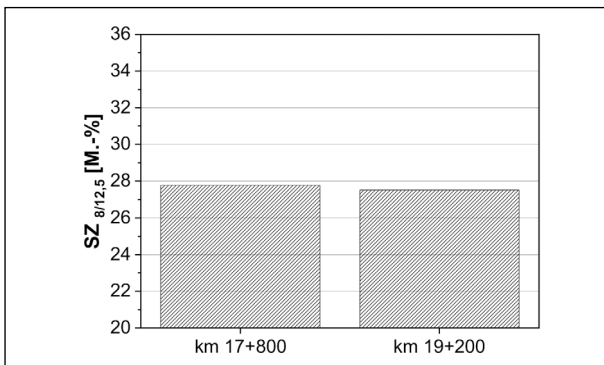


Bild 4-52: Mittelwerte des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch (SZ8/12,5) für RC-Material der BAB A9 in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 17+800 und km 19+200.

Entnahmestelle	km 17+800	km 19+200
CBR-Prüfung bei optimalem Wassergehalt		
CBR-Wert [%]	114	95
CBR-Prüfung nach 24 h Wasserlagerung		
CBR-Wert [%]	127	130

Tab. 4-44: CBR-Werte bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 17+800 und km 19+200.

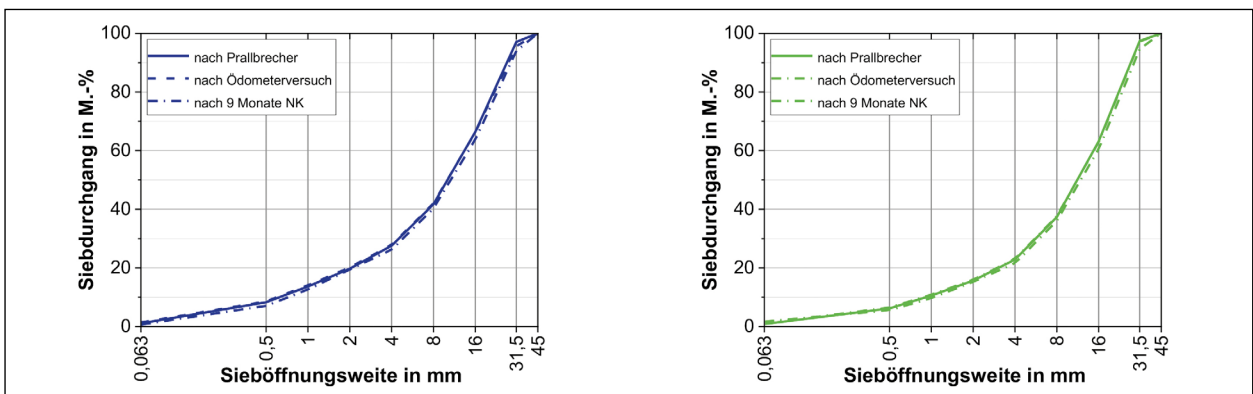


Bild 4-53: Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 17+800 (links) und km 19+200 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.

zertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ liegen bei 27,7 M.-% und 27,5 M.-%. Sowohl das RC-AKR-Material bei Entnahmestelle km 17+800 und km 19+200 halten die Anforderung bis max. 28 M.-% Absplitterung an die Widerstandsfähigkeit gegenüber Schlag für Schottertragschichten der Bk 100 bis Bk 3,2 nach der BTR RC-StB (2014), wenn auch knapp, ein.

Tabelle 4-44 zeigt, dass alle CBR-Werte sowohl beim optimalen Wassergehalt als auch nach 24 h

Wasserlagerung deutlich über 80 % liegen. Bereits bei einem CBR-Wert von ≥ 80 % ist eine Verwendung von RC-Material in der Tragschicht möglich.

Das linke und rechte Bild 4-53 zeigen die Korngrößenverteilungen jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung über einen Zeitraum von 9 Monaten im Klima (40/100). Die Korngrößenverteilungen

Spannungsintervall [kN/m ²]	Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in MN/m ² Streckenabschnitt (Rohdichte)	
	km 17+800 ($\rho = 1,640 \text{ g/cm}^3$)	km 19+200 ($\rho = 1,618 \text{ g/cm}^3$)
50 - 100 (Erstbelastung)	34,0	37,9
100 - 50 (Entlastung)	140,7	140,7
50 - 100 (Wiederbelastung)	70,4	70,4
100 - 200 (Erstbelastung)	38,6	34,6
200 - 400 (Erstbelastung)	40,6	44,8
400 - 200 (Entlastung)	246,3	187,6

Tab. 4-45: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen bei km 17+800 und km 19+200 vor 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Spannungsintervall [kN/m ²]	Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in MN/m ² Streckenabschnitt (Rohdichte)	
	km 17+800 ($\rho = 1,622 \text{ g/cm}^3$)	km 19+200 ($\rho = 1,618 \text{ g/cm}^3$)
50 - 100 (Erstbelastung)	17,3	31,8
100 - 50 (Entlastung)	65,7	164,2
50 - 100 (Wiederbelastung)	36,5	70,4
100 - 200 (Erstbelastung)	27,0	34,0
200 - 400 (Erstbelastung)	32,0	38,0
400 - 200 (Entlastung)	145,9	164,2

Tab. 4-46: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen bei km 17+800 und km 19+200 nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Eigenschaft	Prüfnorm	Einheit	Ergebnis		Soll	Beurteilung
Kornform	DIN EN 933-4	M.-%	Anteil ungünstig geformter Körner	6	≤ 50	TL Gesteins-StB
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	DIN EN 1367-1	M.-%	Absplitterung gesamt	1,9	≤ 4	TL SoB-StB 04/07

Tab. 4-47: Kornform und Widerstand gegen Frostbeanspruchung für das RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher.

nach AKR-provozierender Lagerung über einen Zeitraum von 3 und 6 Monaten sind im Anhang aufgeführt. Die Korngrößenverteilungen wurden mit der Sieblinie nach der Aufbereitung verglichen. Aus allen geprüften Varianten kann abgeleitet werden, dass eine mechanische Einwirkung (einaxialer Kompressionsversuch) als auch eine AKR-provozierende Lagerung (chemische Reaktion) keinen signifikanten Einfluss auf die Sieblinien hat. Für alle Varianten gilt, dass die festgestellten Abweichungen größenordnungsmäßig im üblichen Streubreich von Korngrößenverteilungen bei Wiederholungsprüfungen liegen.

Die Einbaudichte im Ödometertopf, vor und nach AKR-provozierender Lagerung, lag für das RC-AKR-Material in den Grenzen zwischen $1,618 \text{ t/m}^3$ und $1,640 \text{ t/m}^3$ (Schwankungsbreite $\rho_{\min}/\rho_{\max} = 1,3 \%$). Die Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A9, vor und nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100), sind in Tabelle 4-45 und Tabelle 4-46 zusammengestellt. Die Ergebnisse vor und nach 3-monatiger und 6-monatiger Lagerung im Klima (40/100) sowie alle zugehör-

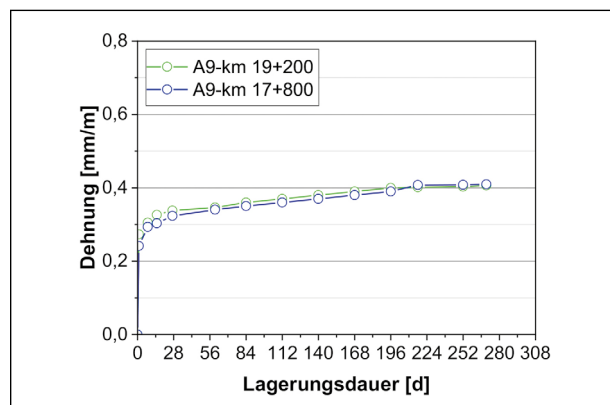


Bild 4-54: Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300 mm) mit RC-AKR-Material von km 17+800 und km 19+200 während der Lagerung im Klima (40/100).

rigen Druck-Zusammendrückungskurven im linearen Maßstab sind im Anhang zusammengestellt. Auf eine Bewertung der Messergebnisse wird auf Kapitel 7.2.4 verwiesen.

Begleitend wurden für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel die Kornform und der Widerstand gegen Frostbeanspruchung am RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher bestimmt. In Tabelle 4-47 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

HGT	statischer E-Modul in N/mm ² , (%)			
	28 Tage (Referenz)	3 Monate NK	6 Monate NK	9 Monate NK
km 17+800	15.129 (100)	14.569 (96)	18.171 (120)	20.701 (137)
km 19+200	21.740 (100)	14.441 (66)	18.637 (85)	20.738 (95)

Tab. 4-48: Mittelwerte des statischen E-Moduls der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

HGT	Druckfestigkeit in MPa, (%)			
	28 Tage (Referenz)	3 Monate NK	6 Monate NK	9 Monate NK
km 17+800	11,6 (100)	11,8 (102)	14,1 (122)	16,4 (141)
km 19+200	16,2 (100)	12,1 (75)	16,4 (101)	17,2 (106)

Tab. 4-49: Mittelwerte der Druckfestigkeit der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.

Probe	km 17+800		km 19+200	
	60	270	60	270
Biegezugfestigkeit β_{BZvor} [MPa]	1,04	2,32	2,29	2,53
Biegezugfestigkeit β_{BZnach} [MPa]	gerissen, Grenzlastspielzahl nicht erreicht	gerissen, Grenzlastspielzahl nicht erreicht	2,26	gerissen, Grenzlastspielzahl nicht erreicht

Tab. 4-50: Statische Biegezugfestigkeit vor (β_{BZvor}) und nach (β_{BZnach}) dem Dauerschwingversuch für die Varianten km 17+800 und km 19+200 sowie in Abhängigkeit des Probenalters (60 bzw. 270 Tage Lagerung in der 40 °C Nebelkammer).

Bild 4-54 zeigt die Dehnung von HGT-Probekörper (150/300) mit RC-AKR-Material von km 17+800 und km 19+200 im Klima (40/100). Die ermittelte Dehnung enthält neben einer möglichen AKR-bedingten Dehnung eine Anfangsdehnung die sich aus der Temperaturerhöhung von 20 °C auf 40 °C ergibt. Eine Quelldehnung durch Wasseraufnahme ist bei diesen Probekörpern zu vernachlässigen, da die Probekörper vor der Lagerung in der Klimakammer im Feuchtraum lagerten und die Ausgangsmessung im feuchten Zustand erfolgte. Beide Varianten erreichten nach 280 Tagen Lagerung im Mittel eine Dehnung von rd. 0,41 mm/m. Weiter ist auffällig, dass sich beide Varianten asymptotisch einem Endwert nähern und somit eine weitere Dehnung ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 4-48 zeigt die Entwicklung des statischen E-Moduls, Tabelle 4-49 die der Druckfestigkeit der Varianten km 17+800 und km 19+200 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen Lagerung in der 40 °C Nebelkammer. Auffällig ist, dass der E-Modul der Variante km 19+200 nach 3 Monaten Nebelkammerlagerung mit 34 % deutlich abfällt und nach 9 Monaten nur 95 % des Referenzwertes nach 28 Tagen erreicht. Im Gegensatz dazu nimmt die Variante bei km 17+800 nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung um 37 % gegenüber dem Referenzwert zu.

Bei Variante km 19+200 fällt auch die Druckfestigkeit nach 3 Monaten Nebelkammerlagerung ab. Nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung ist ein Zuwachs von 6 % gegenüber dem Referenzwert feststellbar. Dieser fällt aber im Gegensatz zur Variante km 17+800 mit einem Zuwachs von 41 % deutlich geringer aus. Die zugehörigen Mantelflächen und Stirnflächen der Zylinder, die einen Überblick über die Verdichtung geben, sind im Anhang dargestellt.

In Tabelle 4-50 sind die statischen Biegezugfestigkeiten der HGT-Prüfkörper mit RC-AKR-Material von km 17+800 und km 19+200 im Probenalter von 60 und 270 Tagen nach Lagerung in der 40 °C Nebelkammer zusammengestellt. Zudem gibt die Tabelle an, dass die im Labor durchgeführten Dauerschwingversuche mit Ausnahme der Variante km 19+200 und einem Probenalter von 60 Tagen zwei Millionen Lastwechsel nicht ertragen.

5 Neubaumaßnahmen mit und ohne RC-AKR-Material

5.1 Streckenlos BAB A9 – km 33+400 bis km 40+305, RiFa München (2017)

Bei der Erneuerungsmaßnahme des Streckenloses BAB A9, km 33+400 bis km 40+305, RiFa München, wurde eine neue Schottertragschicht direkt unter die Betondecke (STSuB) eingebaut. Hierfür wurde das zuvor aufbereitete RC-AKR-Material aus dem AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbeton verwendet (vgl. Kapitel 4.3). Folgender Oberbau (Schichten oberhalb des Planums) wurde ausgeführt:

- 29 cm Betondecke (zweischichtig aus Ober- und Unterbeton hergestellt, Oberfläche mit Waschbetonstruktur)
- 30 cm STS 0/32 (RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton)
- vorhandenes, frostunempfindliches Material

5.1.1 Tragfähigkeitsmessungen am Streckenabschnitt bei km 36+100 bis km 36+200

Auf einem 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 36+100 bis km 36+200 wurden auf der Oberkante Schottertragschicht (OK STS) 11 Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer sowie vier Messungen mit dem statischen und 33 Messungen mit dem dynamischen Plattendruckgerät durchgeführt. Die Messungen auf der OK STS wurden am 07.08.2017 vorgenommen. Die Messungen erfolgten rund 5 m vom rech-

ten Rand entfernt (spätere Lastspur). Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen 22,4 °C und 25,1 °C. Die Oberflächentemperaturen, gemessen mit einem Infrarotthermometer, lagen zwischen 21,0 °C und 22,5 °C.

Am 29.09.2017 wurden im Betonalter von 28 Tagen auf der Oberkante Beton (OK Neubau) Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer durchgeführt. Es erfolgten jeweils 11 Messungen in Plattenmitte, an den Querfugen und an den Plattenecken auf der Hauptfahrspur. Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen 15,0 °C und 21,1 °C. Die Oberflächentemperaturen, gemessen mit einem Infrarotthermometer, lagen zwischen 14,3 °C und 17,0 °C.

Bild 5-1 zeigt eine Übersichtsaufnahme über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 36+100 und km 36+200 vor (links) und nach (rechts) dem Einbau der Fahrbahndecke.

5.1.2 Instrumentierung am Tagesansatz bei km 36+190

Klimatische Randbedingungen haben einen erheblichen Einfluss auf Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer. Zusätzlich stellen Quer- und Längsfugen sowie Fugenkreuze Stör- und Schwachstellen hinsichtlich Eintritt von Feuchtigkeit und Taumittel dar. Die Erfassung der Temperatur- und Feuchtezustände erfolgt mit an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Referat Bauwerksüberwachung und ZfP, entwickelten Sensorstäben. Diese bestehen aus einem NTC 10kΩ (Bild 5-2, links) und Bauteilen für eine Impedanzmessung, welche in einem CFK U-Profil mit Epoxid-



Bild 5-1: Übersichtsaufnahme über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 36+100 und km 36+200 vor (links) und nach (rechts) dem Einbau der Fahrbahndecke.

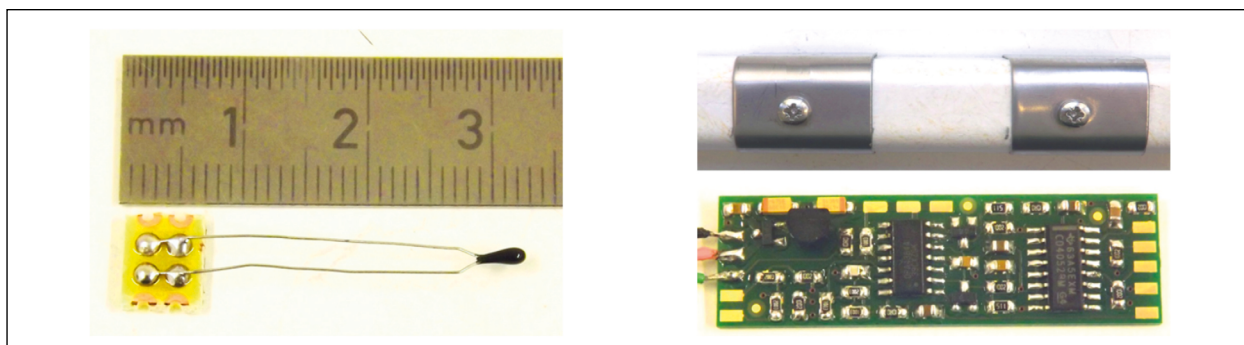


Bild 5-2: NTC 10k Ω (Temperaturmessung, links) und Bauteil für die Impedanzmessung (Feuchtigkeitsmessung, rechts) sowie der an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart entwickelte Sensorstab (CFK U-Profil, rechts).

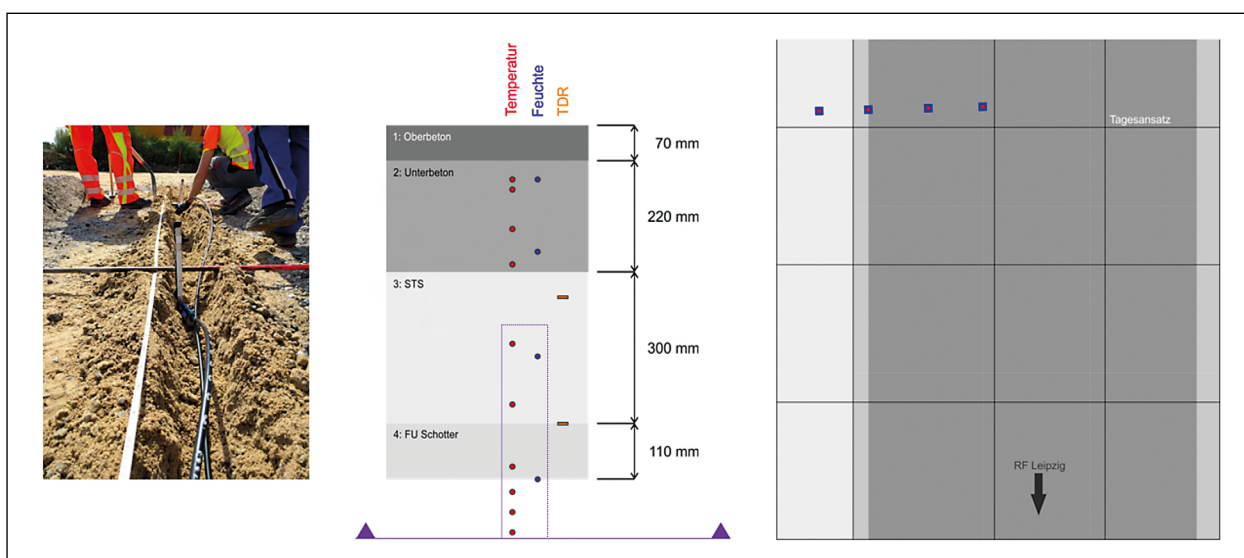


Bild 5-3: Lage der Sensorstäbe in der Schottertragschicht (STS) und im frostunempfindlichen Material (FU).



Bild 5-4: Lage der Sensorstäbe am Tagesansatz (spätere Pressfuge) bei km 36+190.

harz vergossen wurden (Bild 5-2, rechts). Die Sensorstäbe wurden während der Bauphase in verschiedenen Tiefen im frostunempfindlichen Material und der STS verlegt und am Tagesansatz (Querfuge später als Pressfuge ausgebildet) angebracht (Bild 5-3, Bild 5-4, Bild 5-5). Alle für die Instrumentierung notwendigen Kabel wurden über die Schottertragschicht und das Bankett nach außen geführt und in einem Gerätekasten zusammengeführt (Bild 5-6).

Die Stromversorgung zur Aufzeichnung der Temperatur- und Feuchtezustände erfolgt über Solarpaneele, die am Geräteschrank angebracht sind. Optional ist der Geräteschrank für eine 220 V Stromversorgung vorgesehen. Die Messwertaufzeichnung erfolgt digital in einem zweistündlichen Intervall. Der Geräteschrank wurde mit einem Modem ausgestattet, so dass die Datenauslesung über das Mobilfunknetz erfolgt. Zusätzlich werden die Daten vor Ort auf einem Speichermedium abgelegt, wel-

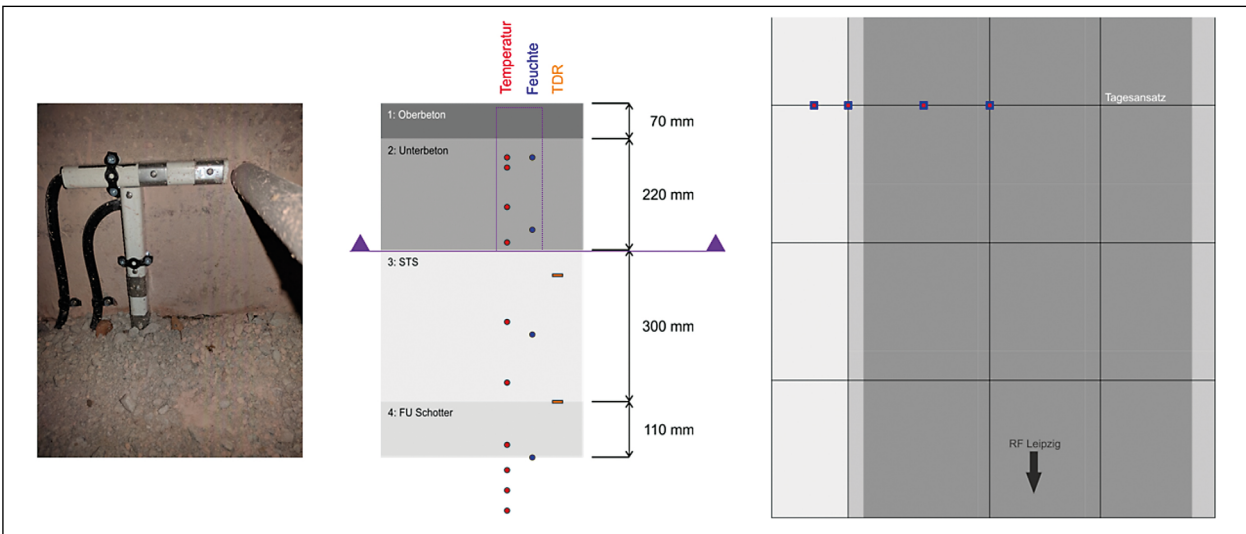


Bild 5-5: Lage der Sensorstäbe am Tagesansatz (Querfuge als Pressfuge ausgebildet) bei km 36+190.



Bild 5-6: Fertiggestellter Gerätekasten bei km 36+190.

che jederzeit mit einem Laptop ausgelesen werden können. Eine erste Zusammenstellung der Messwertaufzeichnung befindet sich im Anhang.

Der Gerätekasten hat einen geforderten Abstand von 4 m zur festen Fahrbahnkante und einen Abstand von 2 m (Schutzbereich) zu einem bereits verlegten Telekommunikationskabel (Bild 5-6: Fertiggestellter Gerätekasten bei km 36+190., links). Die temporäre Errichtung einer Messstation mit Gerätekasten erforderte den Abschluss eines Nutzungsvertrages mit dem Land Brandenburg. In dem Nutzungsvertrag zwischen dem Land Brandenburg und der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart wurde festgelegt, dass die Anlage beim genannten Betriebskilometer vorerst bis zum 30.04.2020 aufgestellt werden darf. Wird der Nutzungsvertrag nicht verlängert, ist die Anlage nach Ende des Vertragsverhältnisses abzubauen.

5.1.3 Ergebnisse

In Tabelle 5-1 sind die Verformungsmoduln auf der OK STS und OK Neubau, ermittelt mit dem Falling Weight Deflectometer, mit dem leichten Fallgewichtsgerät und dem statischen Plattendruckver-

	Plattenmitte	Querfuge	Ecke Fugenkreuz
FWD (OK STS): E_a [MN/m ²]	235 (8)		
FWD (OK Neubau): E_0 [MN/m ²]	249 (3)	244 (4)	243 (3)
LFG (OK STS): E_{vd}	78,1 (10)		
PDV (OK STS): E_{v2}	212 (12)		
E_{v2}/E_{v1}	2,0		

Tab. 5-1: Verformungsmoduln auf der OK STS und OK Neubau, ermittelt mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD), mit dem leichten Fallgewichtsgerät (LFG) und dem statischen Plattendruckversuch (PDV) auf dem Streckenabschnitt zwischen km 36+100 bis km 36+200.

such auf dem Streckenabschnitt zwischen km 36+100 bis km 36+200 zusammengestellt. Die Klammerwerte geben den dazugehörigen Variationskoeffizienten an.

Auf der OK STS wurde im Mittel ein äquivalenter Verformungsmodul von 235 MN/m² und ein E_{vd} von 78 MN/m² gemessen. Die Messergebnisse weisen mit 8 und 10 % einen sehr geringen Variationskoeffizienten auf. Das deutet auf eine sehr gleichmäßige Tragfähigkeit im untersuchten Streckenabschnitt hin. Der auf OK Neubau ermittelte Bettungsmodul E_0 entspricht dem äquivalenten Verformungsmodul E_a ermittelt auf OK STS. Beide Werte zeigen eine gute Übereinstimmung. Das Ergebnis deutet auf eine gleichmäßige Bettung der Fahrbahndecke hin.

Der statische Verformungsmodul E_{v2} wurde im Mittel zu 212 MN/m² ermittelt und liegt deutlich über dem Anforderungswert von 150 MN/m² nach RStO 12. Der Bettungsmodul in Plattenmitte (249) liegt über dem im Arbeitspapier AP TRAG Teil C 2.2 angegebenen Orientierungswert für die Belastungskategorie Bk 100 von 165 MN/m².

5.2 Streckenlos BAB A9 – km 19+242 bis km 16+500, RiFa Berlin (2017/2018)

Bei der Erneuerungsmaßnahme des Streckenloses BAB A9, km 19+242 bis km 16+500, RiFa Berlin, wurde eine neue Schottertragschicht direkt unter die Betondecke (STS_uB) eingebaut. Hierfür wurde das zuvor aufbereitete RC-AKR-Material aus dem AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbeton verwendet (vgl. Kapitel 4.4). Folgender Oberbau (Schichten oberhalb des Planums) wurde ausgeführt:

- 29 cm Betondecke (zweischichtig mit Ober- und Unterbeton hergestellt, Oberfläche mit Waschbetonstruktur)
- 30 cm STS 0/32 (RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton)
- 15-19 cm vorhandene, frostunempfindliche, grobkörnige Sandschicht

5.2.1 Tragfähigkeitsmessungen am Streckenabschnitt bei km 17+000 bis 16+900

Auf einem 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 17+000 bis km 16+900 wurden auf der Oberkante Schottertragschicht (OK STS) 11 Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer sowie 4 Messungen mit dem statischen und 33 Messungen mit dem dynamischen Plattendruckgerät durchgeführt. Die Messungen auf der OK STS wurden am 25.10.2017 vorgenommen. Die Messungen erfolgten rd. 5 m vom rechten Rand entfernt (spätere Lastspur). Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt Messungen bei rd. 15,4 °C. Die Oberflächentemperaturen, gemessen mit einem Infrarotthermometer, lagen zwischen 15,7 °C und 17,9 °C.

Am 04.01.2018 wurden auf der Oberkante Beton (OK Neubau) Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer durchgeführt. Es erfolgten jeweils 11 Messungen in Plattenmitte, an den Querfugen und an den Plattenecken auf der Hauptfahrspur. Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen 8,1 °C und 9,9 °C. Die Oberflächentemperaturen, gemessen mit einem Infrarotthermometer, lagen zwischen 5,9 °C und 7,4 °C.



Bild 5-7: Übersichtsaufnahme über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 17+000 und km 16+900 vor (links) und nach (rechts) dem Einbau der Fahrbahndecke.

Bild 5-7 zeigt eine Übersichtsaufnahme über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 17+000 und km 16+900 vor (links) und nach (rechts) dem Einbau der Fahrbahndecke.

5.2.2 Ergebnisse

In Tabelle 5-2 sind die Verformungsmoduln auf der OK STS und OK Neubau, ermittelt mit dem Falling Weight Deflectometer, mit dem leichten Fallgewichtsgesetz und dem statischen Plattendruckversuch auf dem Streckenabschnitt zwischen km 36+100 bis km 36+200 zusammengestellt. Die Klammerwerte geben den dazugehörigen Variationskoeffizienten an.

Auf der OK STS wurde im Mittel ein äquivalenter Verformungsmodul von 221 MN/m² und ein E_{vd} von 59,5 MN/m² gemessen. Die Messergebnisse weisen mit 6 % einen sehr geringen Variationskoeffizienten auf. Das deutet auf eine sehr gleichmäßige Tragfähigkeit im untersuchten Streckenabschnitt hin. Der auf OK Neubau ermittelte Bettungsmodul E_0 entspricht dem äquivalenten Verformungsmodul E_a ermittelt auf OK STS. Beide Werte zeigen in der Größenordnung eine gute Übereinstimmung. Das Ergebnis deutet auf eine gleichmäßige Bettung der Fahrbahndecke hin.

Der statische Verformungsmodul E_{v2} wurde im Mittel zu 192 MN/m² ermittelt und liegt deutlich über dem Anforderungswert von 150 MN/m² nach RStO 12. Der Bettungsmodul in Plattenmitte (272 MN/m²) liegt über dem im Arbeitspapier AP TRAG Teil C 2.2 angegebenen Orientierungswert für die Belastungsklasse Bk 100 von 165 MN/m².

5.3 Streckenlos BAB A14 – km 87+120 bis km 83+950, RiFa Dresden (2018)

Bei der Erneuerungsmaßnahme des Streckenloses BAB A14, km 87+120 bis km 83+950, RiFa Dresden, wurde eine neue Schottertragschicht direkt unter der Betondecke (STSuB) eingebaut. Hierfür wurde ein Baustoffgemisch aus natürlicher Gesteinskörnung (Rhyolith) und Natursand verwendet (Anmerkung: Dieses Baustoffgemisch wird im Folgenden als Naturschotter bezeichnet). Im gesamten Streckenlos kamen insgesamt drei verschiedene Oberbauvarianten (Schichten oberhalb des Planums) zur Ausführung. Im untersuchten Abschnitt

	Plattenmitte	Querfuge	Ecke Fugenkreuz
FWD (OK STS): E_a [MN/m ²]	221 (6)		
FWD (OK Neubau): E_0 [MN/m ²]	272 (5)	260 (2)	250 (3)
LFG (OK STS): E_{vd}	59,5 (6)		
PDV (OK STS): E_{v2}	192 (8)		
E_{v2}/E_{v1}	2,7		

Tab. 5-2: Verformungsmodul, ermittelt auf der OK STS und OK Neubau mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD), mit dem leichten Fallgewichtsgesetz (LFG) und dem statischen Plattendruckversuch (PDV) auf dem Streckenabschnitt zwischen km 17+000 bis km 16+900.

zwischen km 85+700 bis km 85+600 wurde folgende Variante ausgeführt:

- 29 cm Betondecke C30/37 (zweischichtig mit Ober- und Unterbeton hergestellt, Oberfläche mit Waschbetonstruktur)
- 20 cm STS 0/32 (Baustoffgemisch aus natürlicher Gesteinskörnung und Natursand) auf vorhandener Frostschutzschicht

5.3.1 Tragfähigkeitsmessungen am Streckenabschnitt bei km 85+700 bis 85+600

Auf einem 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 85+700 bis km 85+600 wurden auf der Oberkante Schottertragschicht (OK STS) 11 Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer sowie 5 Messungen mit dem statischen und 11 Messungen mit dem dynamischen Plattendruckgerät durchgeführt. Die Messungen auf der OK STS wurden am 10.08.2018 vorgenommen. Die Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer erfolgten im Abstand von 2,5 m vom linken Rand (spätere Überholfahrspur). Die Versuche mit dem statischen und dynamischen Plattendruckgerät erfolgten im Abstand von 3,5 m vom linken Rand. Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen 24 °C und 27 °C. Die Oberflächentemperaturen, gemessen mit einem Infrarotthermometer, lagen zwischen 23 °C und 29 °C.

Bild 5-8 zeigt eine Übersichtsaufnahme über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 85+700 und km 85+600 sowie eine Detailaufnahme der Oberfläche bei km 85+620 nach dem Einbau der Schottertragschicht.



Bild 5-8: Übersichtsaufnahme (links) über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 85+700 und km 85+600 und Oberfläche der Schottertragschicht (rechts) nach dem Verdichten bei km 85+620.

FWD (OK STS): E_a [MN/m ²]	234 (7)
LFG (OK STS): E_{vd}	50,0 (7)
PDV (OK STS): E_{v2}	201 (13)
E_{v2}/E_{v1}	3,1

Tab. 5-3: Verformungsmodul, ermittelt auf der OK STS mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD), mit dem leichten Fallgewichtsgesetzgerät (LFG) und dem statischen Plattendruckversuch (PDV) auf dem Streckenabschnitt zwischen km 85+700 bis km 85+600.

Eigenschaft	Prüfnorm	Einheit	Ergebnis		Soll	Beurteilung
Widerstand gegen Zertrümmerung	DIN EN 1097-2	M.-%	20,0		≤ 22	TL Gesteins-StB 04/07
Tragfähigkeit	DIN EN 13286-47	%	150 ¹⁾		≥ 80	TL SoB-StB 04/07
Kornform	DIN EN 933-4	M.-%	Anteil ungünstig geformter Körner	23	≤ 50	TL Gesteins-StB 04/07
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	DIN EN 1367-1	M.-%	Absplitterung gesamt	0,2	≤ 4	TL SoB-StB 04/07

¹⁾ bestimmt nach 24 h Wasserlagerung

Tab. 5-4: Begleitende Untersuchungen am Naturschotter für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel.

5.3.2 Ergebnisse

In Tabelle 5-3 sind die Verformungsmoduln auf der OK STS, ermittelt mit dem Falling Weight Deflectometer, mit dem leichten Fallgewichtsgesetzgerät und dem statischen Plattendruckversuch auf dem Streckenabschnitt zwischen km 85+700 bis km 85+600 zusammengestellt. Die Klammerwerte geben den dazugehörigen Variationskoeffizienten an.

Auf der OK STS wurde im Mittel ein äquivalentes Verformungsmodul von 234 MN/m² und ein E_{vd} von 50,0 MN/m² gemessen. Die Messergebnisse weisen mit 7 % einen sehr geringen Variationskoeffizienten auf. Das deutet auf eine sehr gleichmäßige Tragfähigkeit im untersuchten Streckenabschnitt hin. Der statische Verformungsmodul E_{v2} wurde im Mittel zu 201 MN/m² ermittelt und liegt deutlich über

dem Anforderungswert von 150 MN/m² nach RStO 12. Der Verhältniswert E_{v2}/E_{v1} wurde zu 3,1 ermittelt.

Begleitend wurden für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel der Widerstand gegen Zertrümmerung, der CBR-Wert (Beurteilung der Tragfähigkeit), die Kornform und der Widerstand gegen Frostbeanspruchung am Naturschotter bestimmt. In der Tabelle 5-4 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

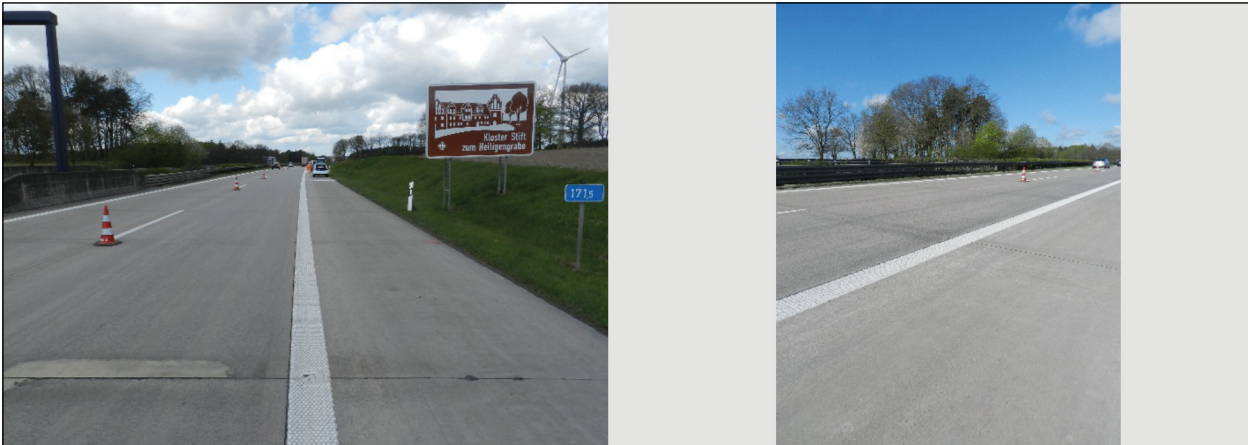


Bild 6-1: Übersichtsaufnahme (links) und Dunkelverfärbung im Bereich von Quer- und Längsfugen (rechts) bei km 171+500.

6 Bestandsstrecken mit RC-AKR-Material

6.1 Streckenlos BAB A24 – km 172+220 bis km 166+377, RiFa Hamburg

Der Streckenabschnitt wurde 1996 in Betonbauweise gebaut. Als Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) wurde RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton mit Grauwacke als Gesteinskörnung eingesetzt. Aus Bestandsunterlagen geht hervor, dass bis 2017 am Fahrbahndeckenbeton keine Erhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden mussten.

Folgender Deckenaufbau wurde festgestellt bzw. ging aus Bestandsunterlagen hervor:

- ca. 30 cm Betondecke (einschichtige Bauweise)
- ca. 30 cm ToB 0/45 (RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton)
- 25 cm Frostschuttschicht 0/32 (aus Bestandsunterlagen)

Folgende Untersuchungen wurden auf einer Länge von 50 m bei km 171+500 durchgeführt:

- Visuelle Begutachtung der Betonoberfläche
- Durchführung von Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer bei Stoßbelastungen von 50 kN, 75 kN und 100 kN in Plattenmitte, an den Querfugen und den Plattenecken auf OK Beton auf der Hauptfahrspur.
- Entnahme von drei Bohrkernen (Durchmesser 350 mm) in der Standspur.
- Durchführung von Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer

	Plattenmitte	Querfuge	Ecke Fugenkreuz
Mittelwert E_a [MN/m ²]	3.896 (9)	3.232 (8)	2.771 (9)
Mittelwert E_0 [MN/m ²]	351 (12)	345 (13)	308 (21)
Anzahl Messpunkte	10	10	10
E_a Orientierungswerte für Belastungsklasse Bk 100 nach AP Trag Teil C 2.2	≥ 1.500	≥ 2.200	-

Tab. 6-1: Äquivalenter Verformungsmodul E_a , Bettungsmodul E_0 und Anzahl der Messpunkte, ermittelt auf OK Beton in Plattenmitte, Querfuge und Fugenkreuz mit Angabe des Variationskoeffizienten (Klammerwert).

- bei Stoßbelastungen von 35 kN und 50 kN im Bohrloch auf OK der RC-ToB.
- Ermittlung des dynamischen E-Moduls E_{vd} mit dem leichten Fallgewichtsgesetz im Bohrloch auf der RC-ToB.
- Entnahme von RC-ToB aus dem Bohrloch zur nachträglichen Ermittlung der Kornverteilung

6.1.1 Ergebnisse

Beim untersuchten Streckenlos wurde hauptsächlich die Schadenskategorie I vorgefunden (Dunkelverfärbung im Bereich von Quer- und Längsfugen). Auf dem gesamten Streckenlos sind sehr wenige Querfugen bzw. Fugenkreuze instandgesetzt. Augenscheinlich wurde am Fahrbahndeckenbeton bei km 171+500 im Hauptfahrstreifen und in der 1. Überholspur ein Grinding vorgenommen. Schadensbilder die sich aus veränderten Auflagerungsbedingungen bei nichtvorhandensein einer frostsicheren und erosionsfesten Auflage, Verdichtungsmängel oder auch aus unzureichender Entwässerung in der Unterlage ergeben würden (EHRlich & HENSEL, 2010), wurden im Streckenlos nicht festgestellt. Bild

6-1 zeigt eine Übersichtsaufnahme bei km 171+500 (links) und die Dunkelverfärbung im Bereich der Quer- und Längsfugen.

Die Tabelle 6-1 zeigt die ermittelten äquivalenten Verformungsmoduln E_a und Bettungsmoduln E_0 in Plattenmitte, Querfuge und Ecke Fugenkreuz auf dem 50 m langen Streckenabschnitt bei km 171+500. Die Tabelle zeigt, dass die Werte deutlich über den im Arbeitspapier „Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen“ (AP Trag Teil C 2.2) vorgeschlagenen Orientierungswerten liegen. Für die Moduln wurden Variationskoeffizienten bei je 10 Messpunkten (Klammerwerte) von 8-21 % ermittelt. Der Variationskoeffizient für den Bettungsmodul ist in der Ecke Fugenkreuz mit 21 % am größten. Der Wirksamkeitsindex der Querkraftübertragung wurde zu 99,3 % bzw. 98,4 % und die Relativdeflexionen benachbarter Platten zu 0,0007 mm bzw. 0,0018 mm ermittelt. Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt Messungen zwischen 7,3 °C und 11,9 °C. Die Oberflächentemperaturen, gemessen mit einem Infrarotthermometer, lagen zwischen 8,8 °C und 12,9 °C.

Im Anschluss an die FWD-Messungen auf OK Fahrbahndeckenbeton wurden an 3 ausgewählten Stellen im Standstreifen Bohrkern mit einem Durchmesser von 350 mm entnommen. Nach der Entnahme der Bohrkern wurde überschüssiges Bohrwasser (Bild 6-2, links) aus dem Bohrloch entfernt. Augenscheinlich war die unter der Fahrbahndecke befindliche RC-AKR-ToB durch Nacherhärtung verfestigt (Bild 6-2, rechts). Im Bohrloch auf OK RC-AKR-ToB wurde ein äquivalenter Verformungsmodul E_a im Mittel zu 384 MN/m² ermittelt. Der dynamische Verformungsmodul E_{vd} betrug im Mittel 155 MN/m².

RC-AKR-ToB konnte mit einer Kelle erst nach mechanischer Auflockerung mit einem Bohrhammer entnommen werden. Für die Korngrößenermittlung wurden aus jedem Bohrloch rd. 14 bis 15 kg RC-AKR-ToB entnommen. Bild 6-3 (links) zeigt RC-AKR-ToB nach Entnahme aus dem Bohrloch 1.

Bild 6-3 (rechts) zeigt die Korngrößenverteilungen der RC-AKR-ToB 0/32, welche aus den Bohrlöchern 1, 2 und 3 bei km 171+500 entnommen wurden. Zudem zeigt das Bild die Anforderung an RC-Gemische



Bild 6-2: Bohrloch nach Bohrkernentnahme (links) und nach dem Entfernen von überschüssigem Bohrwasser.

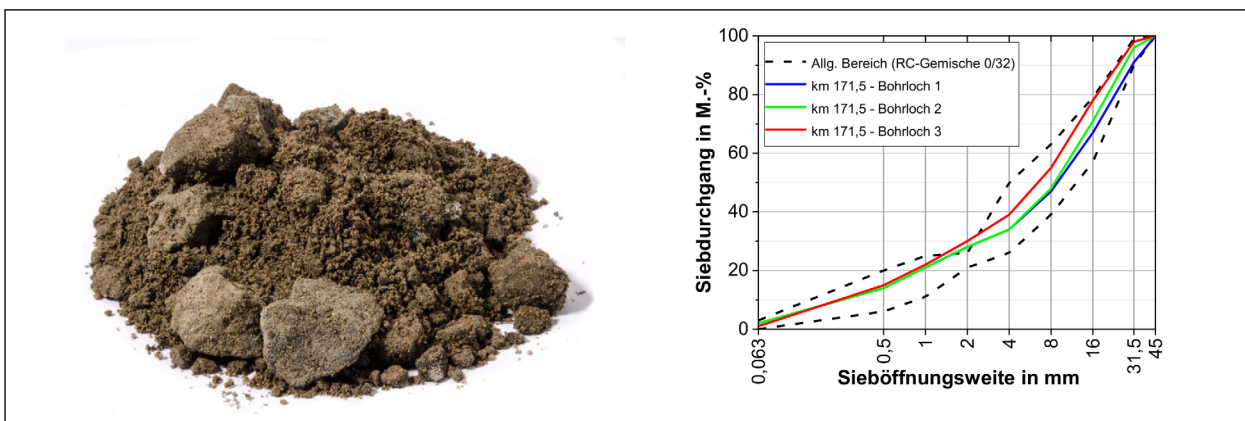


Bild 6-3: RC-AKR-ToB aus Bohrloch 1 und Korngrößenverteilungen an RC-AKR-ToB 0/32, welche aus drei Bohrlöchern bei km 171+500 entnommen wurde.



Bild 6-4: Übersichtsaufnahme bei km 155+000 in (links) und gegen (rechts) die Fahrtrichtung.



Bild 6-5: Bohrkern 1 (links) und RC-ToB im Bohrloch 1 (rechts) nach Bohrkernentnahme

sche 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecken (gestrichelte Linien) nach TL SoB-StB 04/07. Es ist zu erkennen, dass die Anforderung von 21-26 M.-% an RC-Gemische bei einer Sieböffnungsweite von 2 mm leicht überschritten wird.

6.2 Streckenlos BAB A24 – km 158+593 bis km 153+567, RiFa Hamburg

Der Streckenabschnitt wurde 1995 in Betonbauweise gebaut. Als Tragschicht ohne Bindemittel wurde RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton mit Grauwacke als Gesteinskörnung eingesetzt. Bereits nach 7 Jahren wurden erneut Schäden am Fahrbahndeckenbeton festgestellt, die einer betonschädigenden AKR zugeordnet werden konnten. Nach 10 Jahren wurde der Streckenabschnitt saniert. Die vorhandene ToB aus RC-Material wurde neu profiliert. Hierzu wurde vor dem Aufbringen der Fehlmengende die vorhandene ToB bis in eine Tiefe von 15 cm aufgelockert. Aus Bestands-

unterlagen geht hervor, dass die letzte Erhaltungsmaßnahme 2015 an der im Jahr 2005 gebauten Asphaltdecke durchgeführt wurde.

Folgender Deckenaufbau wurde festgestellt bzw. ging aus Bestandsunterlagen hervor:

- ca. 4 cm Deckschicht SMA 0/115
- ca. 8 cm Binderschicht Abi 0/22S
- 30 cm TOB 0/32 und 0/45 (RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton)
- 15 cm Frostschuttschicht aus Brechkorn (aus Bestandsunterlagen)

Folgende Untersuchungen wurden auf einer Länge von 100 m bei km 155,0 durchgeführt:

- Durchführung von Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer bei einer Stoßbelastung von 50 kN in der Rollspur rechtes Rad auf OK Asphalt auf der Hauptfahrspur.
- Entnahme von zwei Bohrkernen in der Standspur.

- Durchführung von Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer bei einer Stoßbelastung von 25 kN und 50 kN sowie mit dem leichten Fallgewichtgerät im Bohrloch der Asphaltdeckschicht auf OK der RC-AKR-ToB.
- Entnahme von RC-AKR-ToB aus dem Bohrloch zur nachträglichen Ermittlung der Kornverteilung.

6.2.1 Ergebnisse

Auf der Asphaltdecke im untersuchten Streckenlos wurden keine Schäden festgestellt. Bild 6-4 zeigt eine Übersichtsaufnahme in (links) und gegen (rechts) Fahrtrichtung bei km 155+000.

Auf dem 100 m langen Streckenabschnitt bei km 155+000 wurde im Mittel ein äquivalenter Verformungsmodul $E_a = 3.420 \text{ MN/m}^2$ und ein Bettungsmodul $E_0 = 522 \text{ MN/m}^2$ ermittelt. Die Lufttemperaturen lagen zum Zeitpunkt der Messungen zwischen $12,7 \text{ }^\circ\text{C}$ und $15,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Oberflächentemperaturen,

gemessen mit einem Infrarotthermometer, lagen zwischen $15,8 \text{ }^\circ\text{C}$ und $17,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Die auf $20 \text{ }^\circ\text{C}$ umgerechneten Moduln liegen bei 3.020 MN/m^2 und 516 MN/m^2 .

Im Anschluss an die FWD-Messungen auf OK Asphalt wurden an zwei ausgewählten Stellen im Standstreifen Bohrkerne mit einem Durchmesser von 350 mm entnommen. Bild 6-5 (links) zeigt den Bohrkern 1 mit anhaftender RC-AKR-ToB. Das rechte Bild zeigt eine optisch nicht verfestigte RC-AKR-ToB im Bohrloch 1.

Im ersten und zweiten Bohrloch wurde auf OK RC-ToB der äquivalente Verformungsmodul $E_a = 597 \text{ MN/m}^2$ und $E_a = 298 \text{ MN/m}^2$ festgestellt. Der dynamische Verformungsmodul E_{vd} betrug im ersten Bohrloch 116 MN/m^2 und im zweiten Bohrloch 110 MN/m^2 .

Im Anschluss an die Messungen im Bohrloch wurde RC-ToB entnommen. Die nicht verfestigte, reprofilierte RC-ToB (Bild 6-6, links) konnte mit einer Kelle



Bild 6-6: Reprofilierter RC-ToB im Bohrloch 2 (links) und verfestigte RC-AKR-ToB im Bohrloch 2 nach Entfernen der rd. 15 cm starken reprofilierten RC-ToB (rechts).

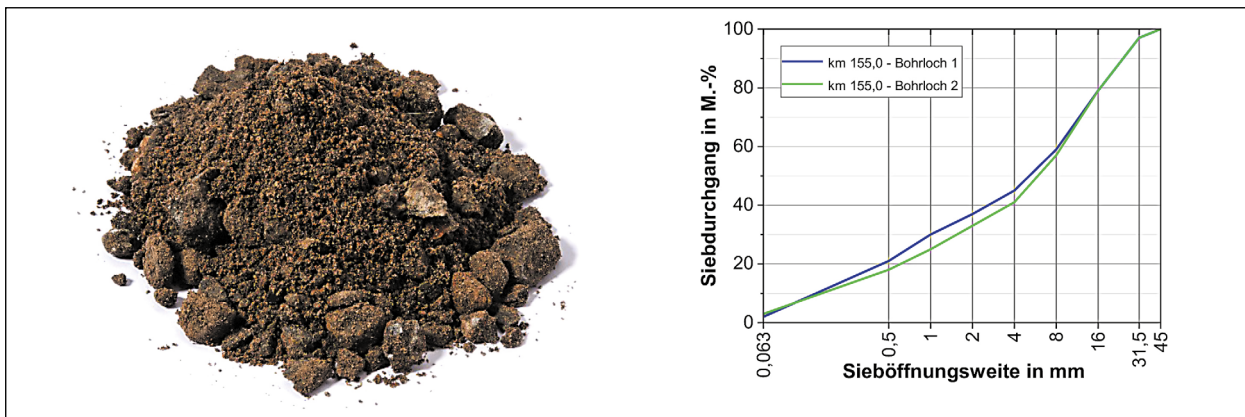


Bild 6-7: RC-ToB aus Bohrloch 2 bei km 155+000 und Korngrößenverteilung an RC-ToB 0/32, welches aus den zwei Bohrlochern bei km 155+000 entnommen wurde.

ohne mechanische Auflockerung bis in eine Tiefe von 15 cm entnommen werden. Anschließend wurde eine deutlich verfestigte RC-AKR-ToB festgestellt (Bild 6-6, rechts), die mit einer Kelle nicht entnommen werden konnte. Die verfestigte RC-AKR-ToB unterschied sich auch farblich von der nicht verfestigten, reprofilierten RC-ToB. Die verfestigte RC-AKR-ToB wurde für weitere Versuche nicht entnommen. Für die Korngrößenermittlung wurden aus jedem Bohrloch rd. 14 bis 15 kg RC-ToB entnommen. Bild 6-7 (links) zeigt RC-ToB nach Entnahme aus dem Bohrloch 2 und (rechts) die Korngrößenverteilung die am RC-ToB 0/32, entnommen aus den Bohrlöchern 1 und 2 bei km 155+000, ermittelt wurden.

7 Diskussion

7.1 AKR-geschädigte Fahrbahndeckenbetone

7.1.1 Mechanische Eigenschaften

Betonfahrbahnen sind während ihrer Nutzung zyklisch auftretenden lastabhängigen und lastunabhängigen Beanspruchungen ausgesetzt, die zu einer Veränderung im Betongefüge führen. Mit steigender mikrostruktureller Schädigung nimmt das Eindringen durch flüssige Medien zu und kann durch den überrollenden Verkehr verstärkt werden. Unter bestimmten Voraussetzungen kann dann eine schädigende AKR begünstigt werden. Die Materialermüdung spielt daher eine zentrale Rolle bei der Substanzbewertung von AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen. Bisher stehen zur Substanzbewertung aber nur die Materialparameter

Druckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit zur Verfügung. Die Druckfestigkeit ist bei einem AKR-bedingten Schadensprozess jedoch nur nebensächlich. Die Löseprozesse und Rissbildungen in der Gesteinskörnung setzen die Steifigkeit (E-Modul) herab, nicht jedoch die Druckfestigkeit (MIELICH 2010). Laboruntersuchungen an Straßenbetonen bestätigen (MIELICH et al., 2015a; MIELICH et al., 2019), dass der statische E-Modul zur Beschreibung des AKR-bedingten Schadensprozesses den zielführenden Materialparameter darstellt. Da bereits allein die mechanische Vorschädigung die bruchmechanischen Materialparameter zum Teil maßgebend verändert (WIEDMANN et al., 2017), ist daher davon auszugehen, dass mit einer überlagerten AKR die Materialparameter noch deutlicher verschlechtert werden. In diesem Zusammenhang wird auf die DFG-Forschergruppe 1498 verwiesen, die sich in den letzten Jahren intensiv mit der Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Betonbauteilen bei gleichzeitiger zyklischer Beanspruchung und externer Alkalizufuhr befasste. Inwieweit die im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf real geschädigte Fahrbahndeckenbetone übertragen werden können, gehört immer noch zu den offenen, wissenschaftlichen Fragestellungen.

Im Folgenden werden daher die Ergebnisse so aufbereitet um die Frage zu beantworten, inwieweit die zyklische Beanspruchung und der externe Alkalieintrag die Materialermüdung innerhalb einer Fahrbahndecke fördern. Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 geben die Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der Richtung und unter Angabe der Anzahl der ermittelten Werte, der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten wieder. Zunächst fällt auf, dass die längs zur Fahrbahnoberfläche ermittelten E-Moduln

	$H_{\text{oben/Mitte}}$	$H_{\text{oben/Fuge}}$	H_{unten}	Mitte	Fuge	Neubau
E-Modul Mittelwert [MPa]	40.752	38.813	44.886	-	-	-
Stabw. [MPa]	1426,6	2615,9	2054,3	-	-	-
Varianz [%]	3,5	6,7	4,6	-	-	-
Anzahl [-]	8	8	16	-	-	-
$H_{\text{oben/Mitte}}/H_{\text{unten}}$ [-]	-	-	-	0,91	-	1,0
$H_{\text{oben/Fuge}}/H_{\text{unten}}$ [-]	-	-	-	-	0,86	1,0

Tab. 7-1: Auswertung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der Entnahmerichtung der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 24+650 bis km 23+243.

	$H_{\text{oben/Mitte}}$	$H_{\text{oben/Fuge}}$	H_{unten}	Mitte	Fuge	Neubau
E-Modul Mittelwert [MPa]	42.872	38.959	42.509	-	-	-
Stabw. [MPa]	1656,5	3667,9	3275,2	-	-	-
Varianz [%]	3,9	9,4	7,7	-	-	-
Anzahl [-]	8	8	16	-	-	-
$H_{\text{oben/Mitte}}/H_{\text{unten}}$ [-]	-	-	-	1,01	-	1,0
$H_{\text{oben/Fuge}}/H_{\text{unten}}$ [-]	-	-	-	-	0,92	1,0

Tab. 7-2: Auswertung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der Entnahmerichtung der BAB A14, Leipzig – Magdeburg, Richtungsfahrbahn Magdeburg, km 143+500 bis km 144+200.

im unteren Bereich einer Fahrbahndecke (H_{unten}) eine hohe Gleichmäßigkeit zeigen, was durch den geringen Variationskoeffizienten von 4,6 und 7,7 % bestätigt wird. Auch die E-Moduln die im oberen Bereich in Abhängigkeit vom Entnahmeort ermittelt wurden ($H_{\text{oben/Mitte}}$ und $H_{\text{oben/Fuge}}$), weisen eine hohe Gleichmäßigkeit auf. Insgesamt lässt sich festhalten, dass sehr hohe E-Moduln längs zur Fahrbahnoberfläche ermittelt wurden. Dies ist sicher auch der langen Liegedauer und der Nachhydratation des Betons geschuldet. Im nächsten Schritt wurden Verhältniswerte zwischen den oberen und unteren E-Moduln und in Abhängigkeit von Plattenmitte ($H_{\text{oben/Mitte}}/H_{\text{unten}}$) und Ecke Fugenkreuz ($H_{\text{oben/Fuge}}/H_{\text{unten}}$) ermittelt. Diese Werte wurden mit einer neugebauten, 28 Tage alten Betonfahrbahndecke verglichen, die noch nicht unter Verkehr lag. Aus Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 werden folgende Merkmale deutlich:

1. Beim Neubau spielt die mechanische Vorschädigung keine Rolle, da diese noch nicht unter Verkehr lag ($H_{\text{oben/Mitte}}/H_{\text{unten}}$ und $H_{\text{oben/Fuge}}/H_{\text{unten}} = 1,0$)
2. Vergleicht man bei zweischichtig/zweilagig hergestellten Fahrbahndeckenbetonen (Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2) die Verhältniswerte $H_{\text{oben/Mitte}}/H_{\text{unten}}$ und $H_{\text{oben/Fuge}}/H_{\text{unten}}$ miteinander, so stellt man fest, dass eine Fahrbahndecke im fugennahen Bereich stärker geschädigt ist als in Plattenmitte (0,86 zu 0,91 und 0,92 zu 1,01).
3. Wird nur der längs zur Fahrbahnoberfläche ermittelte Elastizitätsmodul als Materialparameter betrachtet, kommt man zu dem Schluss, dass der Alkalieintrag und die mechanische Schädigung

nur einen moderaten Einfluss auf die Ermüdung der Fahrbahndecke haben können.

Die in Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 festgestellten moderaten Verhältniswerte zwischen den längs zur Fahrbahnoberfläche ermittelten E-Moduln, stimmen aber mit den visuell festgestellten Schadensbildern an der Fahrbahnoberfläche nicht überein. Ob eine Abnahme des E-Moduls von 14 % ($H_{\text{oben/Fuge}}/H_{\text{unten}}$, Tabelle 7-1) zu einem Versagen einer Fahrbahndecke führt, darf bezweifelt werden. Deshalb wurden bei der BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 36+038 (Tabelle 7-3) und BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 21+000 (Tabelle 7-4) die E-Moduln sowohl längs zur Fahrbahnoberfläche als auch senkrecht zur Fahrbahnoberfläche (vertikal) ermittelt. Beide Streckenabschnitte wurden einschichtig/zweilagig hergestellt. Bis auf die E-Moduln die in vertikaler Richtung im fugennahen Bereich ermittelt wurden, lässt sich eine hohe Gleichmäßigkeit, ausgedrückt durch die niedrigen Variationskoeffizienten bis rd. 9 %, vermuten. Sowohl die E-Moduln längs zur Fahrbahnoberfläche (H_{oben} , H_{unten}) als auch senkrecht zur Fahrbahnoberfläche (V_{Mitte}) weisen sehr hohe E-Moduln auf. Dies ist sicher auch der langen Liegedauer und der Nachhydratation des Betons geschuldet. Aus Tabelle 7-3 und Tabelle 7-4 werden folgende Merkmale deutlich:

1. Beim Neubau liegt der Verhältniswert V/H_{unten} bei 0,94.
2. Der Verhältniswert V/H_{unten} in Plattenmitte liegt bei beiden Streckenabschnitten bei 0,92. Ein Einfluss der Ermüdung, der sich aus zyklischer Beanspruchung und AKR ergibt, ist marginal.

3. Die Betrachtung des E-Moduls längs zur Fahr-
bahnoberfläche lässt vermuten, dass der Alkali-
eintrag und die mechanische Schädigung nur
einen moderaten Einfluss auf die Ermüdung der
Fahrbahndecke haben.
4. Bei vertikaler Betrachtung des E-Moduls (senk-
recht zur Fahrbahnoberfläche) hat der Alkaliein-
trag und die mechanische Schädigung einen
großen Einfluss auf die Ermüdung der Fahr-
bahndecke im fugennahen Bereich (27 % in Ta-
belle 7-3 und 18 % in Tabelle 7-4)
5. Vergleicht man die Verhältniswerte V/H_{unten} in
Plattenmitte als Referenzwert mit dem fugenna-
hen Bereich, so stellt man fest, dass um 27 %
(Tabelle 7-3) und 17 % (Tabelle 7-4) niedrigere
Werte ermittelt werden.

Das Merkmal 3 ist in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der DFG Forschergruppe 1498. So wurden dort im Labor prüftechnische Voraussetzungen für eine Degradation bzw. Rissbildung im Fahrbahndeckenbeton geschaffen (WEISE et al. 2015). Ausgehend von dem dort gewählten Belastungsregime (Oberspannung σ_o von 50 % der Biegezugfestigkeit) wurde ein maximaler Abfall des relativen dyn. E-Moduls von 8–10 %, welcher als Indiz für die mechanische Vorschädigung gilt, ermittelt (WEISE et al. 2018c). Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die mechanische Vorschädigung der Prüfkörper ausschließlich bei ihrer Beaufschlagung mit NaCl-Lösung während der FIB-Klimawechsella-
gerung zu einer moderaten Erhöhung der Dehnung führt und somit auch nur zu einer moderaten Ermü-
dung des Fahrbahndeckenbetons. In den Laborver-
suchen wurde aber nur die Längsrichtung der Fahr-

	H_{oben}	H_{unten}	V_{Mitte}	V_{Fuge}	Mitte	Fuge	Neubau
E-Modul Mittelwert [MPa]	41.399	46.141	42.259	30.869	-	-	-
Stabw. [MPa]	2271,6	1683,9	3705,9	6826,1	-	-	-
Varianz [%]	5,5	3,6	8,8	22,1	-	-	-
Anzahl [-]	8	8	8	8	-	-	-
V [MPa]					42.259 (100)	30.869 (73)	
V/H_{unten} [-]	-	-	-	-	0,92 (100)	0,67 (73)	0,94
$H_{\text{oben}}/H_{\text{unten}}$ [-]	-	-	-	-	0,90		1,0

Tab. 7-3: Auswertung der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Entnahmerichtung BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 36+038.

	H_{oben}	H_{unten}	V_{Mitte}	V_{Fuge}	Mitte	Fuge	Neubau
E-Modul Mittelwert [MPa]	37.954	43.932	40.336	33.194	-	-	-
Stabw. [MPa]	2852,0	2132,2	1078,5	4985,0	-	-	-
Varianz [%]	7,5	4,9	2,7	15	-	-	-
Anzahl [-]	8	8	8	8	-	-	-
V [MPa]					40.336 (100)	33.194 (82)	
V/H_{unten} [-]	-	-	-	-	0,92 (100)	0,76 (83)	0,94
$H_{\text{oben}}/H_{\text{unten}}$ [-]	-	-	-	-	0,86		1,0

Tab. 7-4: Auswertung der Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der Entnahmerichtung BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 21+000.

bahn (horizontale Ausrichtung der Probekörper) berücksichtigt. Die vertikale Ausrichtung (senkrecht zur Fahrbahnoberfläche), wie am realen Fahrbahndeckenbeton (Merkmal 4) ermittelt, blieb in den Laborversuchen unberücksichtigt.

Die Feststellungen der Merkmale 4 und 5 sind in guter Übereinstimmung mit den Erkenntnissen von MIELICH (2019b). Dort wurde in einem systematisch durchgeführten Untersuchungsprogramm der Einfluss einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion auf eine reale Betonfahrbahndecke untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass zyklisch auftretende last- und lastunabhängige Beanspruchungen bei gleichzeitiger AKR über den Gesamtquerschnitt (senkrecht zur Fahrbahnoberfläche) eine höhere Gefügestörung bewirken als längs zur Fahrbahnoberfläche. Der senkrecht zur Fahrbahnoberfläche ermittelte E-Modul ist dann kleiner als der längs zur Fahrbahnoberfläche ermittelte.

Natürlich sind die alle bisher untersuchten Kennwerte nur Stichprobenwerte, die sich infolge schwankender, AKR-bedingter Schadensprozesse in der Betonfahrbahndecke ändern können. Die Merkmale in Tabelle 7-3 und Tabelle 7-4 haben aber deutlich gezeigt, dass das Verhältnis V/H_{unten} den Ermüdungsprozess in der Fahrbahndecke, bedingt durch zyklische Beanspruchung und AKR, sehr gut beschreibt und mit visuellen Beobachtungen sehr gut übereinstimmt. Die Ergebnisse zeigen auch, dass bei den hier untersuchten Fahrbahndecken die Plattenmitte weitestgehend intakt ist und die maximale Ermüdung im Fugenkreuz anzutreffen ist (vgl. auch: MIELICH, 2019b)

7.1.2 Nachdehnung, bleibende Dehnung und verbleibende mechanische Eigenschaften

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls ($E\text{-Modul}_{\text{vor}}$), der Nachdehnung im Klima (40/100), der bleibenden Dehnung im Klima (20/65), des Elastizitätsmoduls nach Klimalagerung ($E\text{-Modul}_{\text{nach}}$) sowie der Druckfestigkeit nach Klimalagerung, sollte eine Aussage ermöglichen, inwieweit Alkalien in der Zementsteinmatrix aus dem Bindemittel und gespeicherte Alkalien in der Zementsteinmatrix aus dem Tausalzeintrag eine nachträgliche AKR-begünstigen. Die bleibenden Dehnungen von $\geq 0,1$ mm/m im Klima (20/65) sind sicher ein Indiz dafür, dass ein geringes AKR-Restpotenzial vorhanden ist (DAfStb, 2015). Die Abweichungen zum Referenzelastizi-

tätsmodul ($E\text{-Modul}_{\text{vor}}$) sind als Prozentwerte in der Klammer angegeben.

Die Fehler, die bei der Ermittlung des statischen E-Moduls auftreten können, sind von der Last- und Verformungsmessung abhängig. Durch die Wahl einer Druckprüfmaschine der Klasse 1 ist gewährleistet, dass der Fehler des jeweiligen Anzeigewertes im Anwendungsbereich nicht größer als ± 1 % ist. Nach LUSCHE (1971) wird der Fehler im Wesentlichen von der Verformungsmessung bestimmt, die überwiegend von den Stoff- und Gefügeeigenschaften des Betons abhängig ist. Daher sind Streuungen an sonst gleichen Probekörpern in der Größenordnung von rd. ± 10 % möglich. Nach BRAMESHUBER & BROCKMANN (2012) sind Abweichungen in der Größenordnung bis ± 15 % auf den Streubereich von Labormessungen zurückzuführen.

Aus den Tabellen 7-5 bis 7-8 werden folgende Merkmale deutlich:

1. Die bleibenden Dehnungen von $\geq 0,1$ mm/m im Klima (20/65) sind sicher ein Indiz dafür, dass ein geringes AKR-Restpotenzial (Alkalien aus dem Bindemittel bzw. gespeicherte Alkalien über den Tausalzeintrag während der Nutzung) vorhanden ist.
2. Das AKR-Restpotenzial macht sich auf den längs zur Fahrbahnoberfläche ermittelten Elastizitätsmodul nur gering bemerkbar. Bis auf zwei Ausnahmen liegen die Abweichungen des Elastizitätsmoduls nach Klimalagerung zum Referenzmodul vor Klimalagerung in der Größenordnung von rd. ± 10 %.
3. Legt man zugrunde, dass die eingebauten Betone einer Festigkeitsklasse C 30/37 (ehemals B35) entsprachen, hat die Druckfestigkeit durch die lange Liegedauer der Fahrbahnplatten und durch die Lagerung der Prüfkörper im Klima 40/100 zugenommen. In einigen Fällen entsprechen die längs zur Fahrbahnoberfläche ermittelten Druckfestigkeiten die eines hochfesten Normalbetons.

7.2 Tragschichten ohne Bindemittel

Eine Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) ist eine lastverteilende Schicht zwischen Decke bzw. Tragschicht und Planum, die im verdichteten Zustand ausreichend tragfähig und ausreichend wasser-

Kennzeichnung	E-Modul _{vor} [MPa]	Nachdehnung im Klima (40/100) [mm/m]	bleibende Deh- nung Klima (20/65) [mm/m]	Schädigungs- potenzial > 0,1 mm/m [-]	E-Modul _{nach} [MPa]	Druckfes- tigkeit _{nach} [MPa]
A9-D1-O1	39.341 (100)	0,543	0,092	nein	40.322 (102)	62,2
A9-D1-U1	44.036 (100)	0,528	0,036	nein	42.332 (96)	70,0
A9-D2-O1	39.374 (100)	0,650	0,163	ja	37.829 (96)	56,2
A9-D2-U1	43.981 (100)	0,528	0,039	nein	41.467 (94)	78,0
A9-D3-O1	41.087 (100)	0,593	0,149	ja	39.821 (97)	63,9
A9-D3-U1	44.020 (100)	0,587	0,078	nein	40.707(92)	71,7
A9-D4-O2	43.183 (100)	0,592	0,146	ja	39.308 (91)	58,0
A9-D4-U2	44.989 (100)	0,558	0,053	nein	40.503 (90)	77,3
A9-D5-O2	34.415 (100)	0,635	0,182	ja	35.264 (102)	61,4
A9-D5-U2	39.380 (100)	0,567	0,071	nein	41.019 (104)	75,6
A9-D6-O2	42.070 (100)	0,619	0,165	ja	42.325 (101)	56,8
A9-D6-U2	44.114 (100)	0,539	0,036	nein	42.946 (97)	79,8
A9-D7-O1	40.237 (100)	0,590	0,039	nein	39.137 (97)	63,8
A9-D7-U1	47.291 (100)	0,521	0,064	nein	45.234 (96)	83,6
A9-D8-O1	41.993 (100)	0,671	0,243	ja	37.298 (89)	61,6
A9-D8-U1	44.995 (100)	0,509	0,043	nein	43.302 (96)	41,6

Tab. 7-5: Elastizitätsmodul vor und nach (E-Modul_{vor}, E-Modul_{nach}) sowie Druckfestigkeit nach der Bestimmung der Nachdehnung im Klima (40/100) und der verbleibenden Dehnung im Klima (20/65) der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 24+650 bis km 23+243 (Klammerwerte in %).

Kennzeichnung	E-Modul _{vor} [MPa]	Nachdehnung im Klima (40/100) [mm/m]	bleibende Deh- nung Klima (20/65) [mm/m]	Schädigungs- potenzial > 0,1 mm/m [-]	E-Modul _{nach} [MPa]	Druckfes- tigkeit _{nach} [MPa]
A14-D1-O1	42.157 (100)	0,534	0,096	nein	45.377 (108)	75,7
A14-D1-U1	44.999 (100)	0,588	0,061	nein	41.830 (93)	81,7
A14-D2-O1	45.049 (100)	0,603	0,093	nein	43.280 (96)	47,0
A14-D2-U1	43.013 (100)	0,608	0,061	nein	42.020 (98)	73,6
A14-D3-O2	32.605 (100)	0,632	0,147	ja	34.566 (106)	45,0
A14-D3-U2	40.672 (100)	0,537	0,021	nein	42.248 (104)	80,3
A14-D4-O1	40.288 (100)	0,632	0,151	ja	41.219 (102)	53,8
A14-D4-U1	45.082 (100)	0,566	0,061	nein	45.059 (100)	80,5
A14-D5-O1	37.312 (100)	0,726	0,143	ja	36.847 (99)	51,1
A14-D5-U1	37.219 (100)	0,695	0,054	nein	38.148 (102)	68,3
A14-D6-O1	44.023 (100)	0,635	0,089	nein	40.747 (93)	60,3
A14-D6-U1	44.099 (100)	0,575	0,050	nein	44.402 (101)	61,9
A14-D7-O2	42.992 (100)	0,700	0,118	ja	40.919 (95)	62,8
A14-D7-U2	42.177 (100)	0,607	0,032	nein	41.077 (97)	70,3
A14-D8-O1	42.143 (100)	0,751	0,143	ja	41.858 (99)	68,5
A14-D8-U1	41.206 (100)	0,648	0,057	nein	42.290 (103)	65,3

Tab. 7-6: Elastizitätsmodul vor und nach (E-Modul_{vor}, E-Modul_{nach}) sowie Druckfestigkeit nach der Bestimmung der Nachdehnung im Klima (40/100) und der verbleibenden Dehnung im Klima (20/65) der BAB A14, Leipzig – Magdeburg, Richtungsfahrbahn Magdeburg, km 143+500 bis km 144+200 (Klammerwerte in %).

durchlässig ist. Eine Frostschutzschicht soll Frostschäden im (Straßen-) Oberbau vermeiden und aus frostunempfindlichen Baustoffgemischen und/oder Böden bestehen. Schichten aus frostunempfindlichem Material müssen auch im verdichteten Zu-

stand ausreichend wasserdurchlässig sein. Eine Schottertragschicht besteht überwiegend aus einem korngestuftem Baustoffgemisch aus überwiegend gebrochenen Gesteinskörnungen. Für die Frostsicherheit spielt die Sieblinie für Schichten

Kennzeichnung	E-Modul _{vor}	Nachdehnung im Klima (40/100) [mm/m]	bleibende Dehnung Klima (20/65) [mm/m]	Schädigungspotenzial > 0,1 mm/m [-]	E-Modul _{nach}	Druckfestigkeit _{nach} [MPa]
	[MPa]				[MPa]	
51-O	43.137 (100)	0,521	0,150	ja	40.956 (95)	58,1
51-U	45.093 (100)	0,546	0,183	ja	44.536 (99)	71,7
61-O	41.844 (100)	0,446	0,170	ja	39.316 (94)	62,2
61-U	47.202 (100)	0,487	0,138	ja	46.232 (98)	65,1
32-O	40.686 (100)	0,443	0,089	nein	39.592 (97)	58,7
32-U	45.537 (100)	0,510	0,127	ja	43.680 (96)	71,9
42-O	41.835 (100)	0,612	0,287	ja	36.770 (88)	61,7
42-U	46.084 (100)	0,577	0,031	nein	46.221(100)	65,7
13-O	42.100 (100)	0,489	0,154	ja	41.700 (99)	52,3
13-U	48.309 (100)	0,490	0,129	ja	44.343 (92)	66,3
23-O	43.965 (100)	0,601	0,227	ja	n.E.	n.E.
23-U	45.271 (100)	0,538	0,196	ja	43.766 (97)	68,9
75-O	35.905 (100)	0,503	0,150	ja	36.365 (101)	52,2
75-U	43.133 (100)	0,505	0,154	ja	44.028 (102)	65,9
85-O	41.723 (100)	0,529	0,201	ja	40.610 (97)	53,2
85-U	48.504 (100)	0,514	0,190	ja	46.815(97)	68,2

Tab. 7-7: Elastizitätsmodul vor und nach (E-Modul_{vor}, E-Modul_{nach}) sowie Druckfestigkeit nach der Bestimmung der Nachdehnung im Klima (40/100) und der verbleibenden Dehnung im Klima (20/65) der BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 36+038 (Klammerwerte in %).

Kennzeichnung	E-Modul _{vor}	Nachdehnung im Klima (40/100) [mm/m]	bleibende Dehnung Klima (20/65) [mm/m]	Schädigungspotenzial > 0,1 mm/m [-]	E-Modul _{nach}	Druckfestigkeit _{nach} [MPa]
	[MPa]				[MPa]	
51-O	40.650 (100)	0,607	0,192	ja	37.469 (92)	50,4
51-U	43.850 (100)	0,540	0,116	ja	44.319 (101)	70,9
61-O	40.965 (100)	0,655	0,216	ja	40.150 (98)	52,7
61-U	45.944 (100)	0,527	0,119	ja	44.340 (97)	73,0
32-O	32.426 (100)	0,666	0,201	ja	30.492 (94)	63,8
32-U	40.063 (100)	0,684	0,211	ja	37.384 (93)	65,1
42-O	41.122 (100)	0,602	0,207	ja	40.541 (99)	53,1
42-U	45.885 (100)	0,526	0,119	ja	46.880 (102)	76,0
13-O	35.851 (100)	0,566	0,165	ja	36.351 (101)	38,9
13-U	43.095 (100)	0,587	0,165	ja	42.548 (99)	58,9
23-O	36.077 (100)	0,648	0,199	ja	37.312 (103)	46,6
23-U	47.104 (100)	0,615	0,096	nein	47.205 (100)	65,3
75-O	38.232 (100)	0,591	0,178	ja	37.627 (98)	48,0
75-U	42.694 (100)	0,520	0,108	ja	41.716 (98)	60,9
85-O	38.306 (100)	0,655	0,231	ja	36.431 (95)	47,1
85-U	42.820 (100)	0,520	0,108	ja	41.533 (97)	56,4

Tab. 7-8: Elastizitätsmodul vor und nach (E-Modul_{vor}, E-Modul_{nach}) sowie Druckfestigkeit nach der Bestimmung der Nachdehnung im Klima (40/100) und der verbleibenden Dehnung im Klima (20/65) der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 21+000 (Klammerwerte in %).

ohne Bindemittel eine wesentliche Rolle. Insbesondere die Frostschuttschicht muss im verdichteten Zustand ausreichend wasserdurchlässig und zudem kapillARBrechend sein um stehendes Wasser, dessen Gefrieren im Oberbau und daraus folgende

Schäden zu verhindern. In der TL SoB-StB 04/07 wird davon ausgegangen, dass bei Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzen der Korngrößenverteilung für Tragschichten die erforderliche Tragfähigkeit und Wasserdurchlässigkeit gegeben ist.

Material Anforderungen an eine ToB (FSS, STS)	Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinskörnungen	RC-Material aus Betonaufbruch (RC-Material)	RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndecketon (RC-AKR-Material)
Tragfähigkeit	+	++	++
Wasserdurchlässigkeit	+	o	o
kapillarbrechende Wirkung	+	o	o
+ = positiver Einfluss, o = möglicher, negativer Einfluss, - = negativer Einfluss			

Tab. 7-9: Einfluss auf die Anforderungen einer ToB (Frostschuttschicht FSS, Schottertragschicht STS) von Baustoffgemischen aus natürlichen Gesteinskörnungen, RC-Material aus Betonaufbruch und RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton.

Beim Einsatz von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen (RC-AKR-Material) in ToB ist zu beachten, welche Auswirkungen sich auf die Gesamtkonstruktion der Straße ergeben. Dabei ist zu unterscheiden, ob sich negative Auswirkungen einer nachträglich einsetzenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ergeben und welche Auswirkungen allgemein einem RC-Material aus Betonaufbruch zugeschrieben werden müssen (Tabelle 7-9).

Über die Anforderungen an Baustoffgemische für eine ToB (Frostschuttschicht und Schottertragschicht) hinaus, werden an RC-Baustoffe besondere Anforderungen gemäß den Regelwerken an die stoffliche Zusammensetzung, umweltrelevante Merkmale, den Widerstand gegen Frostbeanspruchung und den Widerstand gegen Kornzertrümmerung gestellt. Als Regelwerke werden die TL Gesteins-StB, die TL SoB-StB, den ZTV-SoB-StB und das Merkblatt über die Verwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoff im Straßenbau angeführt.

7.2.1 Widerstand gegen Zertrümmerung

In früheren Jahren wurde in Zweifelsfällen die Aussagekraft von Ergebnissen aus Schlagversuchen an Recycling-Baustoffen immer wieder in Frage gestellt. Ringversuche zeigten aber, dass der Schlagversuch gut brauchbare Ergebnisse für RC-Baustoffe liefert (HINRICHS, 1998) und das obwohl der RC-Baustoff üblicherweise wenig homogen ist. Dieser Umstand dürfte bei RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken eher noch zunehmen, da eine Betonfahrbahndecke nicht in allen Bereichen gleichermaßen durch eine AKR geschädigt wird. Dennoch stellt der Schlagversuch an RC-Material ein wichtiges Kriterium bei der Beurteilung des Widerstands gegen mechanische Einwirkung dar. Niedrige Schlagzertrümmerungswerte bedeu-

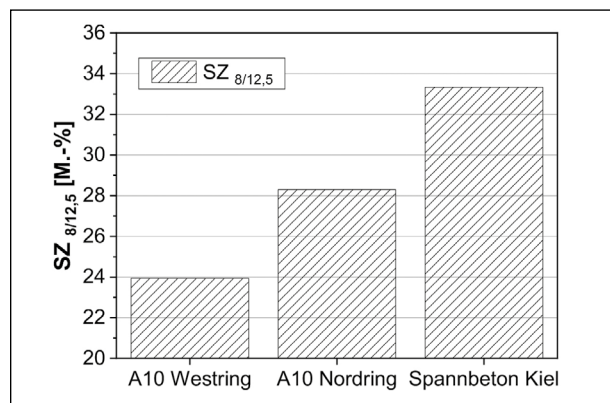


Bild 7-1: Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ aus DREßLER et al. (1994).

ten immer eine höhere Festigkeit und damit eine Qualitätszunahme des Materials.

Die RC-Materialien aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen der BAB A9 erfüllen die Anforderungen an die Schlagzertrümmerung (BTR RC-StB 14, 2014) für Schottertragschichten der Belastungsklasse Bk100 bis Bk3,2 und für hydraulisch gebundene Tragschichten von 28 M.-%. Auch die ermittelten Schlagzertrümmerungswerte der BAB A14 halten die Grenzwerte gemäß Richtlinie zur Verwertung mineralischer Abfälle im Straßenbau in Sachsen-Anhalt (RILI SA, 2005) an den Schlagzertrümmerungswert $SZ_{8/12,5}$ für Frostschuttschichten (32 M.-%) und Schottertragschichten (28 M.-%) ein. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ der BAB A9 und A14 in einer für Betonaufbruch typischen Größenordnung liegen (HINRICHS, 1998).

Als Vergleich werden auch Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ aus der Arbeit von DREßLER et al. (1994) angeführt. Die Autoren verwendeten Aufbruchmaterial aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken der BAB A10 und Aufbruchmaterial von Spannbetonfertigteilepfählen des Marinearsenals Kiel. In den Betonfahrbahndecken wurde lang-

Entnahmestelle	km 17+800	km 19+200	km 34+000	km 39+000	Naturschotter
CBR-Prüfung bei optimalem Wassergehalt					
CBR-Wert [%]	114	95	106	99	131
CBR-Prüfung nach 24 h Wasserlagerung					
CBR-Wert [%]	127	130	106	93	150

Tab. 7-10: CBR-Werte am RC-AKR-Material vs. Naturschotter.

sam reagierende, alkaliempfindliche Grauwacke und in den Spannbetonteilen schnell reagierende opal- und flinthalige Gesteinskörnung festgestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse fällt der sehr hohe Schlagzertrümmerungswert $SZ_{8/12,5}$ von 33,3 M.-% des RC-Materials aus dem Spannbeton auf (Bild 7-1). Die Schlagzertrümmerungswerte sind darauf zurückzuführen, dass bei Opalen und Flinten eine schädigende AKR von der Oberfläche ausgeht. Dadurch wird die Haftung zwischen Zementstein und Gesteinskörnung herabgesetzt. Dies führt zu höheren Absplitterungen bei mechanischer Einwirkung. Im Gegensatz dazu geht die Schädigung bei langsam reagierenden Gesteinskörnungen vom Korninnern aus und ist daher deutlich unempfindlicher gegenüber mechanischen Einwirkungen im Schlagversuch.

7.2.2 Korngrößenverteilung

Die nach dem einaxialen Kompressionsversuch (mechanische Einwirkung) und der AKR-provozierenden Lagerung (chemische Einwirkung) ermittelten Korngrößenverteilungen zeigten keine nennenswerten Abweichungen zu den nach der Aufbereitung im Prallbrecher ermittelten Sieblinien. Für alle Varianten gilt, dass die festgestellten Abweichungen größenordnungsmäßig im üblichen Streubereich von Korngrößenverteilungen liegen. Varianten, die die Anforderungen des Sieblinienbereichs für eine Schottertragschicht 0/32 unter Betondecke (RC-Gemisch) nicht eingehalten haben, wurden aus einem Prallbrecher ohne nachgeschaltete Siebanlage entnommen. Für eine zielgerichtete Aufbereitung ohne weitere Nachbearbeitung mit anforderungsgemäßen Eigenschaften an das Recyclingmaterial eignet sich daher ein Prallbrecher mit nachgeschalteter Siebanlage am besten. Aufgrund der Sieblinie müssen keine Einschränkungen gemacht werden.

7.2.3 CBR-Wert

Alle gemessenen CBR-Werte lagen so hoch, dass man das RC-AKR-Material für eine Tragschicht

ohne Bindemittel verwenden könnte. Es ist zu erwarten, dass es bei einer Wasserzufuhr zu einer Nacherhärtung des RC-AKR-Materials kommt und die CBR-Werte und somit auch die Tragfähigkeit tendenziell zunehmen werden. Die vorliegenden Ergebnisse sind in guter Übereinstimmung mit den durch DREßLER et al. (1994) gemachten Bewertungen zum CBR-Wert von RC-AKR-Material. Ermittelte CBR-Werte an einem Naturschotter zeigen aber, dass es im Vergleich zu den in dieser Arbeit untersuchten Varianten an RC-AKR-Material durchaus möglich ist, noch höhere CBR-Werte zu erreichen (Tabelle 7-10).

7.2.4 Einaxialer Kompressionsversuch vor und nach AKR-provozierender Lagerung

Neben den AKR-bedingten Treiberscheinungen hat die Reaktion eine Entfestigung der Gesteinskörnung und ein Absinken des E-Moduls der Gesteinskörnung (REINHARDT & MIELICH, 2014) durch den Löseangriff auf SiO_2 -Modifikationen und andere gesteinsbildende Mineralien zur Folge, was im Resultat zu einer Verringerung des Betonelastizitätsmoduls führt. Die AKR-verursachte Rissbildung in der Gesteinskörnung und in der Matrix wird bei einer energiereichen Aufbereitung im Prallbrecher abgebaut, was die Ergebnisse bei der Bestimmung des Widerstands gegen Zertrümmerung bestätigen. Zurück bleibt aber ein verminderter E-Modul der Gesteinskörnung. Um den Einfluss dieser Entfestigung auch bei ungebundenen Baustoffgemischen zu untersuchen, wurde der einaxiale Kompressionsversuch als Untersuchungsmethode ausgewählt und der Steifemodul E_s aus der Spannungs-Verformungsbeziehung berechnet.

Für eine Bewertung der Messergebnisse müssen zunächst die Prüfstreuungen aus dem einaxialen Kompressionsversuch bekannt sein. Die Tabelle 7-11 zeigt, dass Streuungen an sonst gleichen Proben nach Aufbereitung im Prallbrecher und im Spannungsintervall von 200-400 kN/m² in der Größenordnung von 7,9 % bis 10 % möglich sind. Auffällig sind die Mittelwerte der Steifemoduln E_s im betrachteten Spannungsintervall von 37,9-40,5 MN/m².

Streckenlos	BAB A9 km 24+650 – 23+243	BAB A14 km 143+500 – 144+200	BAB A9 km 33+400 – 40+305	BAB A9 km 22+565 – 16+500
Bauweise	zweischichtig/zweilagig	zweischichtig/zweilagig	einschichtig/zweilagig	einschichtig/zweilagig
Anzahl Messwerte	15	12	6	6
E_s als Mittelwert im Spannungsintervall 200 – 400 kN/m ²	38,0 MN/m ² (100)	39,8 MN/m ² (100)	40,5 MN/m ² (100)	37,9 MN/m ² (100)
Standardabweichung	3,8 MN/m ²	3,5 MN/m ²	3,2 MN/m ²	3,1 MN/m ²
Variationskoeffizient	10,0 %	8,8 %	7,9 %	8,1 %

Tab. 7-11: Einaxialer Kompressionsversuch nach der Aufbereitung im Prallbrecher.

Streckenlos	BAB A9 km 24+650 – 23+243	BAB A14 km 143+500 – 144+200	BAB A9 km 33+400 – 40+305	BAB A9 km 22+565 – 16+500
Bauweise	zweischichtig/zweilagig	zweischichtig/zweilagig	einschichtig/zweilagig	einschichtig/zweilagig
Anzahl Messwerte	5	4	2	2
E_s als Mittelwert im Spannungsintervall 200 – 400 kN/m ²	45,3 MN/m ² (119)	42,0 MN/m ² (106)	35,0 MN/m ² (86)	35,0 MN/m ² (92)
Standardabweichung	6,5 MN/m ²	3,5 MN/m ²	3,0 MN/m ²	1,6 MN/m ²
Variationskoeffizient	14,3 %	8,2 %	8,6 %	4,4 %

Tab. 7-12: Einaxialer Kompressionsversuch nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

Berücksichtigt man die unterschiedlichen Schadenszustände und die Bauweise der Fahrbahndecken (zweischichtig/zweilagig bzw. einschichtig/zweilagig), ist die Gleichmäßigkeit der Ergebnisse sehr beachtlich.




Die Prüfstreuungen aus dem einaxialen Kompressionsversuch nach Lagerung der Proben im Klima (40/100) sind in Tabelle 7-12 dargestellt. Dabei reichen die Prüfstreuungen im Spannungsintervall von 200-400 kN/m² von 4,4 % bis 14,3 %. Es fällt auf, dass die Mittelwerte der Spannungsmoduln E_s bei den Streckenlosen mit zweischichtig/zweilagiger Bauweise im Vergleich zum Referenzwert nach Aufbereitung im Prallbrecher um 6 und 19 % zunehmen (Klammerwert in Tabelle 7-12). Dagegen nehmen die Spannungsmoduln der Streckenlose mit einschichtig/zweilagiger Bauweise im Vergleich zum Referenzwert um 8 und 14 % ab. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung zeigt sich aber, dass die Messergebnisse immer noch innerhalb der Prüfstreuungen für den einaxialen Kompressionsversuch liegen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein Fortschreiten der Reaktion durch Alkalien in der anhaftenden Zementsteinmatrix oder gespeicherte Alkalien aus dem Tausalzeintrag während der Nutzung als Fahrbahndeckenbeton und sich ein daraus resultierender Einfluss auf die Tragfähigkeit an den untersuchten Proben nicht feststellen lässt.



7.2.5 Tragfähigkeitsmessungen im Neubau

Visuelle Beobachtungen an der Oberfläche der verdichteten Schottertragschicht lassen vermuten, dass sich etwaige Entmischungen des RC-Materials nicht verhindern lassen. Entmischungen werden aber auch an Baustoffgemischen aus natürlichen Gesteinskörnungen beobachtet. Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer (FWD) sowie dem statischen (PDV) und dynamischen Plattendruckgerät (LFG) mit den dazugehörigen Variationskoeffizienten auf der OK Schottertragschicht (Wert in Klammer) weisen auf eine sehr gleichmäßige Tragfähigkeit der neuen Schottertragschicht aus RC-AKR-Material hin (Tabelle 7-13).

Der in der ZTV SoB-StB 04/07 geforderte E_{v2} -Wert von 150 MN/m² kann unter Erfüllung der Anforderungen an die Sieblinie bei Neubaumaßnahmen mit den üblichen Verdichtungsgeräten erreicht werden (Tabelle 7-13). Ebenfalls kann die Grenze für den Verhältniswert $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$ bzw. für $E_{v1} \geq 0,6 \% \cdot E_{v2, \text{Soll}}$ (wenn $E_{v2}/E_{v1} \geq 2,2$) eingehalten werden. Es können aber Probleme mit der Erfüllung dieser Anforderungen auftreten, wenn die Schichten unter der ToB keine ausreichenden Tragfähigkeitswerte aufweisen oder wenn die Tragschicht selbst nicht ausreichend verdichtet ist. Die Probleme dafür treten aber unabhängig davon auf, ob Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinsvorkom-

	RC-AKR-Material	RC-AKR-Material	Naturschotter
Streckenlos	BAB A9 km 17+000 – 16+900	BAB A9 km 36+100 – 36+200	BAB A14 km 85-700 – 85+600
			
Kennwerte	Ergebnis (v in %)	Ergebnis (v in %)	Ergebnis (v in %)
FWD: $E_{\bar{a}}$ [MN/m ²]	221 (6)	235 (8)	234 (7)
LFG: E_{vd} [MN/m ²]	59,5 (6)	78,1 (10)	50 (7)
PDV: E_{v2} [MN/m ²]	192 (8)	212 (12)	201 (13)
E_{v2}/E_{v1}	2,7	2,0	3,1

Tab. 7-13: Schottertragschichten aus RC-AKR-Material vs. Baustoffgemisch aus natürlichen Gesteinsvorkommen.

Streckenlos	BAB A9 km 36+100 – 36+200	
	OK Fahrbahndecke mit 30 cm STS aus RC-AKR-Material (28 Tage ohne Verkehr) Messung am 28.09.2017	OK Fahrbahndecke mit 30 cm STS aus RC-AKR-Material (1,6 Jahre unter Verkehr) Messung am 09.04.2019
		
	E_0 (v in %)	E_0 (v in %)
Plattenmitte	249 (3)	204 (6)
Querfuge	244 (4)	214 (6)
Ecke Fugenkreuz	243 (3)	181 (7)

Tab. 7-14: Tragfähigkeitsmessungen auf OK Fahrbahndeckenbeton mit Schottertragschicht aus RC-AKR-Material im Alter von 28 Tagen ohne Verkehr und 1,6 Jahre unter Verkehrslast.

men, Recyclingmaterial aus Betonaufbruch oder aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken stammen (Tabelle 7-13).

Die Tabelle 7-14 enthält die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer auf Oberkante (OK) Fahrbahndeckenbeton und der daraus ermittelte Bettungsmodul E_0 der sich für die Schottertragschicht ergibt. Gegenübergestellt sind die Bettungsmoduln für Plattenmitte, Querfuge und Ecke Fugenkreuz der Neubaumaßnahme im Alter von 28 Tagen ohne Verkehr und nach 1,6 Jahre unter Verkehr.

Die folgende Bewertung der Ergebnisse in Tabelle 7-14 bezieht sich auf Erfahrungen, die Herr Prof. Weingart von der Hochschule Anhalt dem Autor mitgeteilt hat. Grundsätzlich hat das FWD eine große Tiefenwirkung. Aus diesem Grund resultiert der größte Teil der Deflexion aus der Bettungstragfähigkeit, die jedoch bekanntlich jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt. Die größten jahreszeitlichen Schwankungen treten bei ungünstigen hydrologischen Bedingungen und bei frostempfindlichem Untergrund auf.

Normalerweise ist die Bettungstragfähigkeit im Frühjahr, vor allem in der Tauperiode, immer am ge-

ringsten (hier Messung am 09.04.2019) Im Herbst liegt meist eine höhere Bettungstragfähigkeit vor (hier Messung am 28.09.2017). Die höchste Bettungstragfähigkeit wird in der Regel im Sommer gemessen, wenn nicht gerade infolge Aufwölbung in Betonplattenmitte eine geringere Bettungstragfähigkeit vorgetäuscht wird.

Im vorliegenden Fall (Tabelle 7-14) liegt also nur eine relativ geringe jahreszeitliche Schwankung vor, da der Unterschied zwischen den Bettungsmoduln E_0 am 28.9.2017 in Plattenmitte (249 MN/m^2), in der Querfuge (244 MN/m^2) und in Ecke Fugenkreuz (204 MN/m^2) zu den Bettungsmoduln E_0 am 9.4.2019 in Plattenmitte (204 MN/m^2), in der Querfuge (214 MN/m^2) und in Ecke Fugenkreuz (181 MN/m^2) gering ist.

7.2.6 Tragfähigkeitsmessungen und Beobachtungen im Bestand

Wie die Ergebnisse in Kapitel 6.1.1 und 6.2.1 gezeigt haben, wirkt sich die Verwendung von RC-AKR-Material in Schichten ohne Bindemittel (ToB) positiv auf die Tragfähigkeit aus. Messungen im Bestand haben gezeigt, dass die bereits gute Tragfähigkeit der ToB im Einbauzustand mit jahrzehntelanger Liegedauer zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit führt. Dies lässt sich mit dem Nacherhärtungspotenzial des verwendeten RC-Materials begründen. Diese Erkenntnis wurde bereits durch AURSTAD & HOFF (2002) und SAGARIO & PHILLIP (2011) festgestellt. Labor- als auch Feldversuche an Betonbruch haben zusätzlich gezeigt, dass gegenüber Naturschotter leicht erhöhte Tragfähigkeiten festgestellt wurden.




Zur Absicherung der Erkenntnisse wurden vergleichend Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer (FWD) und dem leichten Fallgewichtsgeschütz auf verschiedenen Streckenabschnitten durchgeführt. Tabelle 7-15 zeigt die maßgebenden Tragfähigkeitskennwerte E_a und E_{vd} im Bohrloch in Abhängigkeit der Bauweise. Aus der Tabelle kann abgeleitet werden, dass die Tragfähigkeit in der Reihenfolge Beton/STS aus natürlichen Gesteinskörnungen – Beton/RC-AKR-ToB – Beton/HGT zunimmt.

Zu berücksichtigen sind auch die systematischen Untersuchungen von VASSILIOU (1989), die gezeigt haben, dass Betonbruch beim Einsatz in Schichten ohne Bindemittel sich negativ auf die Wasserdurchlässigkeit auswirken kann. Dieses Verhalten wird durch die Beobachtungen der Bestandsstrecke gestützt, da das verwendete Wasser bei der Bohrkernentnahme von der ToB zurückgehalten wurde und nicht versickerte.

Die Tabelle 7-16 enthält die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf Oberkante (OK) Fahrbahndeckenbeton und der daraus ermittelte Bettungsmodul E_0 der sich für die Schottertragschicht ergibt. Gegenübergestellt sind die Bettungsmoduln für Plattenmitte, Querfuge und Ecke Fugenkreuz der Neubaumaßnahmen und der 21 Jahre alten Bestandsstrecke. Die Klammerwerte geben die ermittelten Variationskoeffizienten an. Die Ergebnisse bestätigen die gewonnenen Erkenntnisse, dass mit zunehmender Liegedauer die Tragfähigkeit bei Verwendung von RC-AKR-Material zunimmt.

Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer (FWD) und mit dem leichten Fallgewichtsgeschütz im Bohrloch auf STS, RC-AKR-ToB und HGT					
Bestand/ Streckenlos	BAB A14 km 85+725 RiFa Magdeburg	BAB A24 km 171+500 RiFa Hamburg	BAB A24 km 155+000 RiFa Hamburg	BAB A9 km 21+000 RiFa Berlin	BAB A14 km 86+450 RiFa Magdeburg
Oberbau	Beton/STS	Beton/ RC-AKR-ToB	Asphalt/ RC-AKR-ToB	Beton/HGT	Beton/HGT
E_a [MN/m ²]	303 (244, 313, 353)	384 (446, 375, 331)	448 (597, 298)	746 (639, 853)	529 (458, 599)
E_{vd} [MN/m ²]	60 (58, 55, 66)	155 (132, 184, 149)	113 (116, 110)	321 (301, 341)	nicht bestimmt

Tab. 7-15: Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer (FWD) und mit dem leichten Fallgewichtsgeschütz auf den Bestandsstrecken der BAB A14, A24 und A9 jeweils im Bohrloch auf STS, RC-STS und HGT.

	OK Fahrbahndecke mit 30 cm STS aus RC-AKR-Material (Neubau)	OK Fahrbahndecke mit 30 cm STS aus RC-AKR-Material (Neubau)	OK Fahrbahndecke mit 30 cm STS aus RC-AKR-Material (21 Jahre alt)
Streckenlos	BAB A9 km 36+100 – 36+200	BAB A9 km 17+000 – 16+900	BAB A24 km 171+500
			
	E_0 (v in %)	E_0 (v in %)	E_0 (v in %)
Plattenmitte	249 (3)	272 (5)	351 (12)
Querfuge	244 (4)	260 (2)	345 (13)
Ecke Fugenkreuz	243 (3)	250 (3)	308 (21)

Tab. 7-16: Tragfähigkeitsmessungen auf OK Fahrbahndeckenbeton mit Schottertragschichten aus RC-AKR-Material (Neubau) vs. Schottertragschichten aus RC-AKR-Material an einer 21 Jahre alten Bestandsstrecke.

7.3 Hydraulisch gebundene Tragschichten

Der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen aus alten Betondecken mit und ohne Asphaltanteil ist für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT) Stand der Technik (EHRlich & HENSEL, 2010). Bereits in den 80igern gab es in Deutschland Bestrebungen, für die Herstellung von HGT ein Mineralstoffgemisch zu verwenden, das aus einem Aufbruch einer alten Betonfahrbahn gewonnen wird. Die dabei gewonnenen Erfahrungen waren dabei durchweg positiv (MOSS, 1985). Auch die Untersuchungen in (LEYKAUF, 1987) zeigten, dass keine besonderen Probleme bei der Herstellung einer HGT mit einem Mineralstoffgemisch aus gebrochenem RC-Material bestehen.

Im Gegensatz dazu stellt RC-Material aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen (RC-AKR-Material) bei der Verwendung in einer HGT eine Besonderheit dar:

- Entstehung neuer reaktiver Bruchflächen bei der Aufbereitung vor allem bei Betonen mit Kies als Gesteinskörnung
- Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus dem Bindemittel)
- gespeicherte Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus Tausalzeintrag während der Nutzung)
- Alkalien des hydraulischen Bindemittels zur Herstellung einer HGT

- Tausalzeintrag (über Fugen) während der Nutzung als HGT

7.3.1 AKR-provozierende Lagerung

Grundsätzlich eignen sich die am FIB in Weimar (STARK et al., 2006; SEYFARTH et al., 2009) sowie am Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf (SIEBEL et al., 2006; MÜLLER et al., 2008) entwickelten Performance-Prüfungen für AKR-provozierende Lagerungen. Beide Prüfverfahren wurden in der Zwischenzeit in die Technische Prüfvorschrift TP B-StB – Teil 1.1.10 (Klimawechselagerung) und TP B-StB – Teil 1.1.09 (60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr) überführt. Die am Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf entwickelte Performance-Prüfung verwendet eine Probengeometrie von 7,5 x 7,5 x 28 cm³. Zur Bestimmung mechanischer Eigenschaften hydraulisch gebundener Tragschichten mit einem Größtkorn > 32 mm eignet sich dieser Versuch aber daher nicht. Die am FIB in Weimar entwickelte AKR-Performance-Prüfung fand ebenfalls keine Anwendung, da die klimatischen Bedingungen bei der Prüfung von teilweise -20 °C bis +60 °C nicht dem in der Praxis vorkommenden Temperaturbereich in einer Tragschicht von -10 °C bis +30 °C (LEYKAUF & MOSS, 1987) entsprechen. Es wurde daher befürchtet, dass sich aus den Lagerungsbedingungen Effekte aus dem Temperaturbereich ergeben, die die mechanischen Eigenschaften sowie die Dauer-Biegezugfestigkeit einer HGT negativ beeinflussen.

Da die Reaktionskinetik einer AKR aber auch sehr stark temperatur- und feuchteabhängig ist, wurde für die Untersuchungen an den hydraulisch gebundenen Tragschichten eine gleichmäßige Temperatur bei 40 °C verwendet. Diese konnte in einer Klimakammer zusammen mit einer gleichmäßig verteilten Luftfeuchte von 100 % realisiert werden.

7.3.2 Dehnungspotenzial von HGT-Probekörpern

Anders als in den Untersuchungen von HÜNGER & BÖRNER (2015) ergeben sich keine Einschränkungen aus dem Formänderungsverhalten der mit dem RC-AKR-Material hergestellten HGT-Proben. Das Dehnungsniveau einer nachträglich einsetzenden AKR bei Temperaturen bis 40 °C und Luftfeuchten bis 100 %, ist bei den bisher mit RC-AKR-Material unter Verwendung eines für den Straßenbau zugelassenen Portlandzements ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq.}} \leq 0,76 \text{ M.-%}$) hergestellten hydraulisch gebundenen Tragschichten mit $\leq 0,6 \text{ mm/m}$ als eher gering einzustufen. An den Zylindern (150/300) wurden bei Lagerung im

Klima (40/100) an einigen Stellen gelartige Produkte gefunden. Diese können Neubildungen als auch originale AKR-Reaktionsprodukte sein. Insgesamt korrelieren aber die geringen Mengen mit dem geringen Dehnungsniveau für alle Varianten.

7.3.3 Mechanische Eigenschaften von HGT-Probekörpern

Für eine bessere Bewertung werden die Mittelwerte der Elastizitätsmessungen und der Druckfestigkeitsprüfungen, ermittelt an Zylindern (150/300), für alle Varianten A9-0 bis -3, A14-0 bis -3, km 39+000 / km 34+000 sowie für km 19+200 / km 17+800 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100) zusammengefasst (Bild 7-2, Bild 7-3, Bild 7-4, Bild 7-5).

Die ermittelten Variationskoeffizienten von bis zu 20 % liegen im üblichen Rahmen für Materialprüfungen zur Ermittlung mechanischer Kennwerte (BRAMESHUBER & BROCKMANN, 2003). Aus ei-

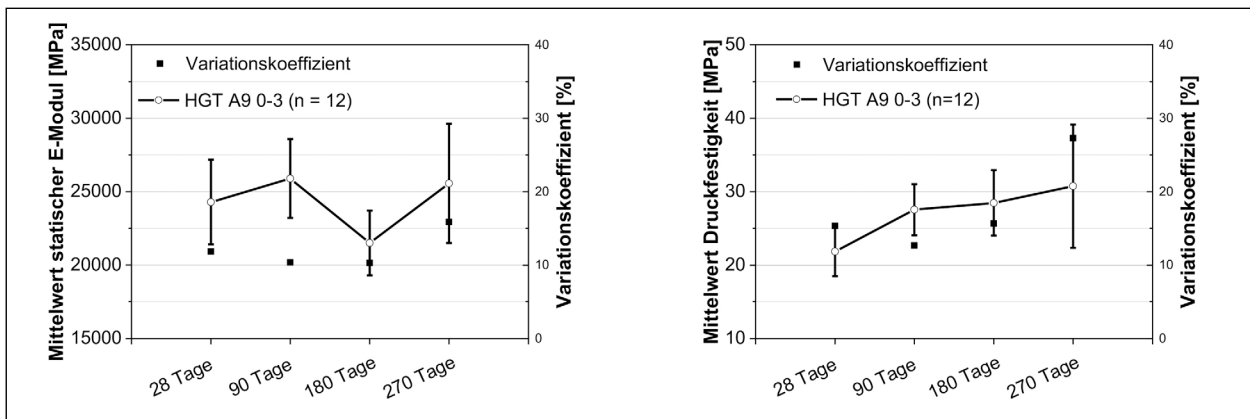


Bild 7-2: Mittelwerte (n = 12) des statischen E-Moduls (links) und der Druckfestigkeit (rechts), ermittelt an Zylindern (150/300), zusammengefasst für alle Varianten A9-0 bis -3 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100).

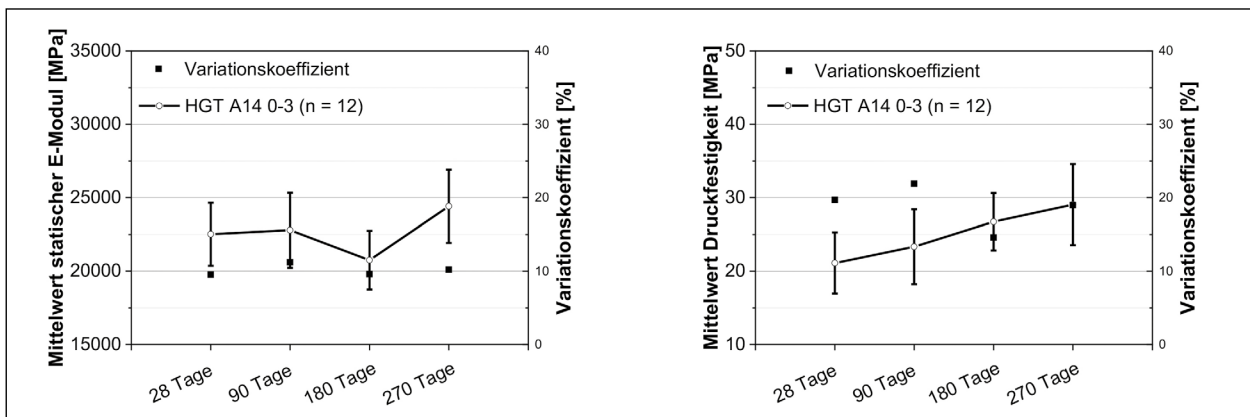


Bild 7-3: Mittelwerte (n = 12) des statischen E-Moduls (links) und der Druckfestigkeit (rechts), ermittelt an Zylindern (150/300), zusammengefasst für alle Varianten A14-0 bis -3 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100).

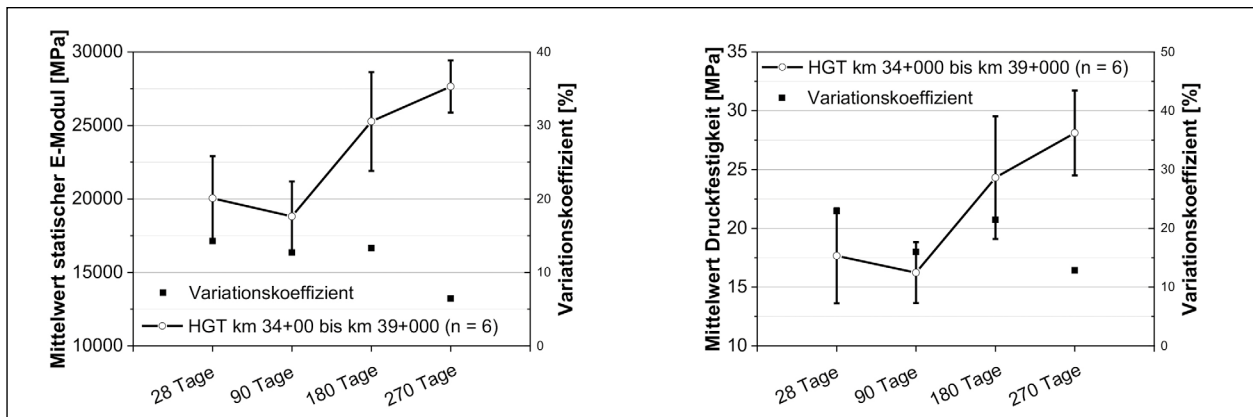


Bild 7-4: Mittelwerte (n = 6) des statischen E-Moduls (links) und der Druckfestigkeit (rechts), ermittelt an Zylindern (150/300), zusammengefasst für die Varianten km 39+000 / km 34+000 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100).

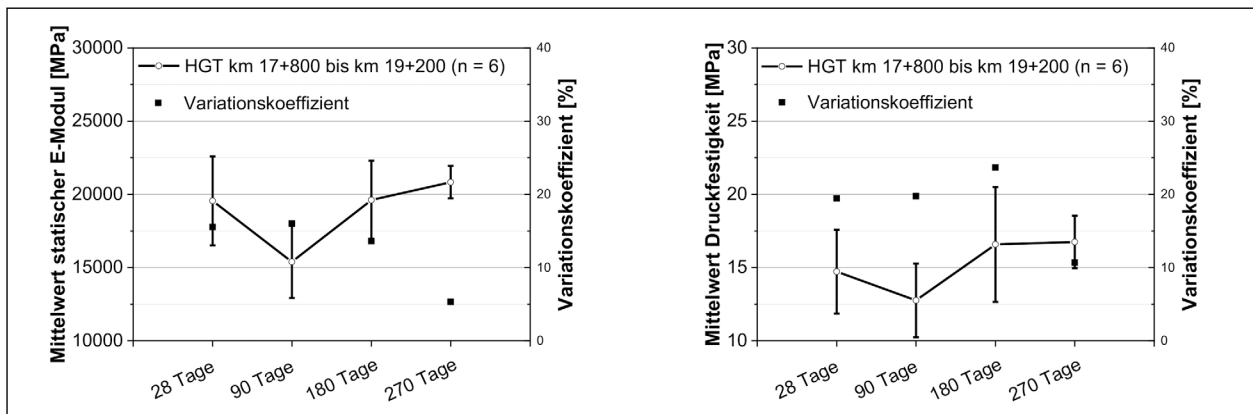


Bild 7-5: Mittelwerte (n = 6) des statischen E-Moduls (links) und der Druckfestigkeit (rechts), ermittelt an Zylindern (150/300), zusammengefasst für die Varianten km 19+200 / km 17+800 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100).

ner Vielzahl eigener Untersuchungen sind Variationskoeffizienten deutlich unter 10 % bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls an Betonen möglich. Werte zwischen 10 % und 20 % bei der Ermittlung des Elastizitätsmoduls an HGT Probekörpern sind sicherlich der ungleichmäßigen Verdichtung im Labor geschuldet. Variationskoeffizienten bei der Ermittlung der Druckfestigkeit von über 20 % sind sicherlich deutlich zu hoch.

Wie bereits in den Untersuchungen von HÜNGER & BÖRNER (2015) festgestellt, werden Druckfestigkeiten an HGTs mit RC-AKR Material erreicht, welches das Recyclingmaterial für den Anwendungsfall HGT interessant erscheinen lässt. Alle hergestellten Zylinder (150/300) erreichten Druckfestigkeiten die zum Teil deutlich über 10 MPa der Druckfestigkeit im Rahmen der Erstprüfung im Alter von 28 Tagen liegen (ZTV Beton-StB 07). Die Druckfestigkeiten sind der hohen gewählten Bindemittelmenge von 10 M.-% geschuldet. An den Festigkeiten ändert sich auch nichts bei Veränderung der Umgebungs-

bedingungen (erhöhte Temperaturen bis 40 °C, hohe Luftfeuchten bis 100 %). Es wird sogar ein weiterer Festigkeitszuwachs festgestellt, der sich aus den günstigen Temperatur- und Feuchtebedingungen durch Nachhydratation ergibt. Mit dem Festigkeitszuwachs geht auch ein Zuwachs der Elastizitätsmoduln einher (Anmerkung: Warum bei den Elastizitätsmoduln der Varianten A9-0 bis -3, A14-0 bis -3 nach 180 Tagen und der Varianten km 39+000 / km 34+000 sowie für km 19+200 / km 17+800 nach 90 Tagen, jeweils bezogen auf den Referenzwert bei 28 Tagen, zunächst ein Abfall im Elastizitätsmodul festgestellt wurde, konnte bisher nicht geklärt werden).

Vergleichend zu den hier genannten Ergebnissen, wurden auch Elastizitätsmoduln an einer fast 20 Jahre alten und unter einer AKR-geschädigten Betonfahrbahndecke liegenden, hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT) ermittelt. Die an sechs Prismen (10 x 10 x 26 cm³) ermittelten Elastizitätsmoduln liegen im Mittel bei rund 33.000 MPa sogar

noch höher, als die bei den im Labor unter günstigen Temperatur- und Feuchtebedingungen ermittelten Moduln. Im Gegensatz zu den Variationskoeffizienten von 5-15 % bei den Laboruntersuchungen, lässt der berechnete Variationskoeffizient von 3 % an der hydraulisch gebundenen Tragschicht aus dem Bestand auf einen gleichmäßigen Einbau schließen. Unterlagen zu den Eignungsprüfungen der eingebauten hydraulisch gebundenen Tragschicht im Bestand lagen leider nicht mehr vor.

7.3.4 Dauerschwingversuche

Bei Grundsatzuntersuchungen zur Verwertung von RC-Material ist es nach LEYKAUF (1987) erforderlich, die in der Straßenkonstruktion maßgebende Festigkeitseigenschaft zu bestimmen, d. h. die Biegezugfestigkeit. Da Verkehrslasten als wiederholte Belastung auftreten, ist es daher notwendig, die Dauer-Biegezugfestigkeit (mehr als 2 Mio. Lastwechsel werden ohne Bruch ertragen) zu bestimmen.

Die im Labor durchgeführten Dauerschwingversuche zeigten, dass ein Großteil der untersuchten Varianten zwei Millionen Lastwechsel nicht ohne Bruch ertragen. Eine mögliche Ursache ist, dass die Haftung des RC-AKR-Materials (bei neuen Bruchflächen) zum Zementsteingerüst durch eine nachträglich einsetzende AKR herabgesetzt wird. Gestützt wird diese Hypothese dadurch, dass an den Biegebalken 15 x 15 x 70 cm³ gelartige Produkte gefunden wurden. Aufgrund der dann vorliegenden mehr punktwisen Bindung werden örtlich Spannungskonzentrationen bewirkt, die dann bei einer Biegebeanspruchung zum Versagen des Gesamtquerschnittes führen.

Eine Rolle spielt dabei sicher auch, ob eine Betonfahrbahndecke über die gesamte Deckendicke alkaliempfindliche Gesteinskörnung enthält oder ob diese nur im Oberbeton oder Unterbeton anzutreffen ist. Legt man Bild 8-1 zugrunde, befindet sich im Fall 3a und 3b die alkaliempfindliche Gesteinskörnung hauptsächlich im Oberbeton (rd. 1/3 der Deckendicke). Im Gegensatz dazu ist alkaliempfindliche Gesteinskörnung für die Fälle 1a, 1b, 2a und 2b über die gesamte Deckendicke anzutreffen. In diesen Fällen entsteht eher eine verminderte Haftung des RC-AKR-Materials zum Zementstein, welche das Versagen im Dauerschwingversuch der Varianten 1a, 1b, 2a, 2b im Vergleich zu den Varianten 3a und 3b erklären würde. Der Fall 4, bei dem sich alkaliempfindliche Gesteinskörnung nur im Unterbe-

ton befindet (rd. 2/3 der Deckendicke) wurde bisher nicht untersucht.

7.3.5 Tausalzeintrag über die Fugen

Untersuchungen von WEISE et al. (2018b) haben gezeigt, dass im Bereich der Querscheinfuge und in der Nähe des Fugenkreuzes sowohl über dem gewollten Riss unterhalb der Fugenkammer als auch über dem Vliesstoff Chloride in den Fahrbahndeckenbeton seitlich bzw. von unten eingetragen werden. Selbst in der Plattenmitte ist ein Chlorideintrag von unten über den Vliesstoff erkennbar. Dies ist jedoch nicht mit einem erhöhten Natriumeintrag verbunden (WEISE et al., 2018b). Vermutlich kann in der unter der Fahrbahndecke liegenden hydraulisch gebundenen Tragschicht von einem deutlich geringeren Zutritt von Tausalzen ausgegangen werden als bei direkt beaufschlagter Fahrbahndecke. Zur Feststellung besteht noch weiterer Untersuchungsbedarf.

8 Schlussfolgerungen

Die folgenden Schlussfolgerungen zeigen zusammenfassend Möglichkeiten und Grenzen auf, welche sich bei der Diagnose, dem Aufbruch, der Aufbereitung sowie bei der Verwertung von AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen ergeben. Dabei kommt es durchaus zu Wiederholungen aus den vorangegangenen Kapiteln. Für eine gesamtheitliche Bewertung und Empfehlung für Bauherren und Auftragnehmer im Umgang mit AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen ist dies aber unerlässlich. In die Schlussfolgerungen sind daher nicht nur die hier vorliegenden Untersuchungsergebnisse eingeflossen, sondern auch zahlreiche Hinweise und Feststellungen, die über die Projektlaufzeit von den einzelnen Landestraßenbaubehörden aus Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen dem Autor zugetragen wurden.

8.1 Schadensdiagnose (Substanzbewertung)

Oftmals liegen von AKR-verdächtigen Streckenabschnitten keine Bestandsunterlagen mehr vor. Deshalb kommt der Schadensdiagnose im Hinblick auf die Substanzbewertung und Abschätzung der Restnutzungsdauer sowie der Verwertung AKR-geschä-

digter Fahrhandeckenbetone eine besondere Bedeutung zu. Die visuelle Schadensbegutachtung, die Ermittlung von Festigkeits- und Verformungseigenschaften, die Bestimmung des Restschädigungspotenzials und die Ermittlung des Spannungszustands sind Möglichkeiten, die Substanz der geschädigten Betonfahrbahnen zielgerichtet zu bewerten.

8.1.1 Visuelle Schadensbegutachtung

Aus einer Vielzahl von Befahrungen folgert MIELICH (2019a), dass unter Berücksichtigung der Bauweise (z. B. zweischichtig/zweilagig) eine AKR auch unter bestimmten Voraussetzungen im Unterbeton entstehen kann. In diesem Fall sind nicht farbliche Veränderungen in Fugenbereichen kennzeichnend für eine beginnende AKR, sondern Längsrisse in den Fahrbahnplatten sowie rautenförmige Rissbildungen an Fugenbereichen, die auf ein mögliches Einbrechen schließen lassen. Bei MIELICH (2019a) werden 7 Fälle erläutert (vgl. Bild

8-1), die bei einer visuellen Schadensbegutachtung die Bauweise berücksichtigen.

Fall 1a: einschichtig/einlagig oder zweilagig (Betonrezeptur alkaliempfindlich)

- Betonrezeptur alkaliempfindlich
- externe Alkalien dringen in den Beton ein
- beginnende AKR ist gekennzeichnet durch farbliche Veränderungen von Querfugen und Fugenkreuzen
- rautenförmige Rissbildungen im Fugenbereich
- Eckabbrüche aus Horizontalrissbildung

Fall 1b: einschichtig/einlagig oder zweilagig (Betonrezeptur alkaliempfindlich)

- Betonrezeptur alkaliempfindlich
- interne und externe Alkalien für Schadensprozess verantwortlich

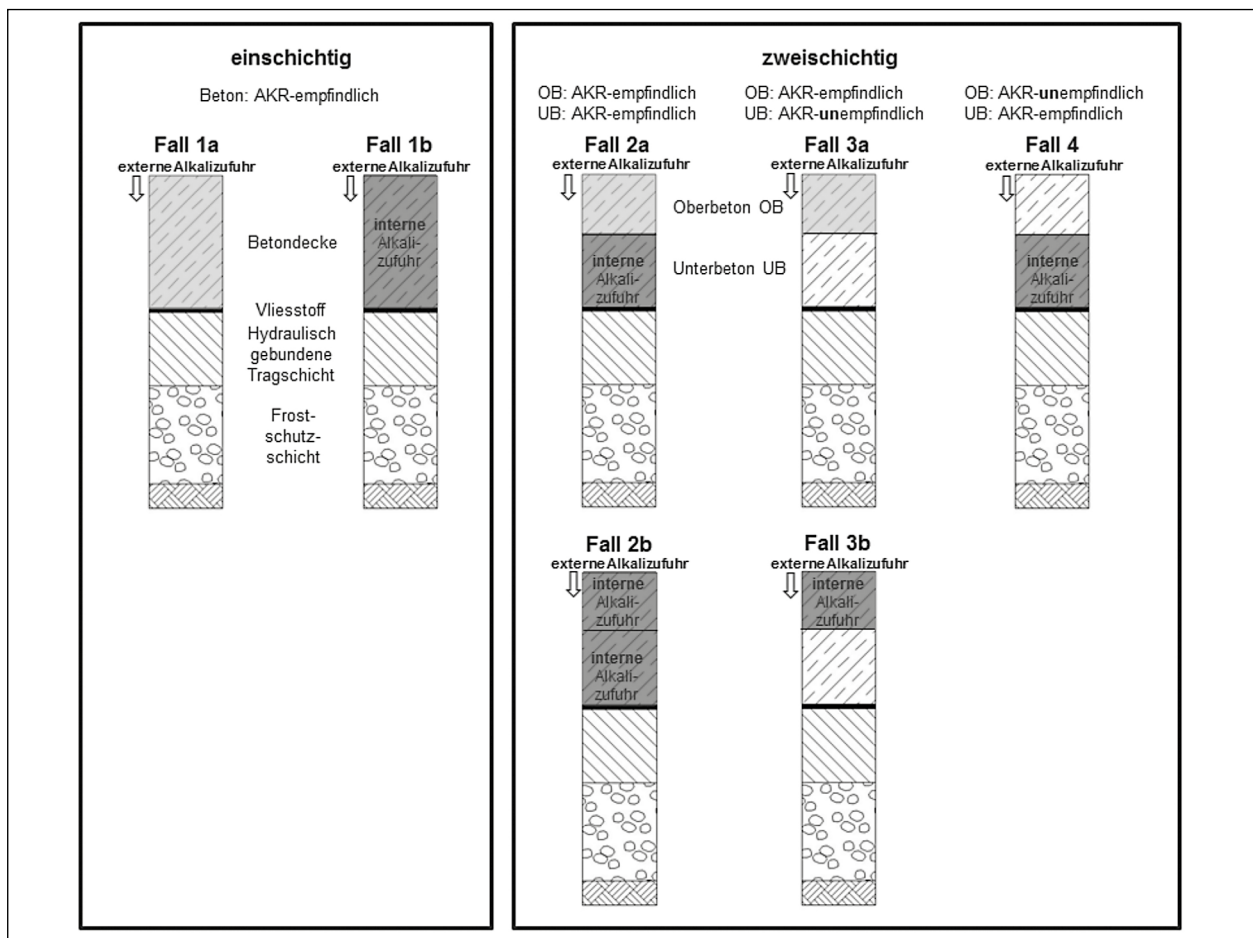


Bild 8-1: Berücksichtigung der Bauweisen (einschichtig oder zweischichtig) mit AKR-empfindlichen und -unempfindlichen Betonzusammensetzungen sowie internen und externen Alkaliquellen (aus: MIELICH, 2019a).

- beginnende AKR ist gekennzeichnet durch farbliche Veränderungen von Querfugen und Fugenkreuzen
- rautenförmige Rissbildungen im Fugenbereich
- Eckabbrüche aus Horizontalrissbildung
- neben den Spannungen, die aus der Bauteiltemperatur und -feuchtigkeit sowie dem Verschmutzungsgrad der Fugen resultieren, trägt die AKR im unteren Bereich der Fahrbahndecke zum Gesamtspannungszustand bei
- sichtbare Längsrisse an der Fahrbahnoberfläche können die Folge sein

Fall 2a: zweischichtig (Ober- und Unterbeton alkaliempfindlich)

- Rezeptur Oberbeton alkaliempfindlich
- für Oberbeton sind externe Alkalien für den Schadensprozess verantwortlich
- Rezeptur Unterbeton alkaliempfindlich
- für Unterbeton sind interne Alkalien für den Schadensprozess verantwortlich
- beginnende AKR gekennzeichnet durch farbliche Veränderungen von Querfugen und Fugenkreuzen
- rautenförmige Rissbildungen im Fugenbereich
- Eckabbrüche aus Horizontalrissbildung
- neben den Spannungen, die aus der Bauteiltemperatur und -feuchtigkeit sowie dem Verschmutzungsgrad der Fugen resultieren, trägt die AKR im unteren Bereich der Fahrbahndecke zum Gesamtspannungszustand bei
- sichtbare Längsrisse an der Fahrbahnoberfläche können die Folge sein

Fall 2b: zweischichtig (Ober- und Unterbeton alkaliempfindlich)

- Rezeptur Oberbeton alkaliempfindlich
- für Oberbeton sind interne und externe Alkalien für den Schadensprozess verantwortlich
- Rezeptur Unterbeton alkaliempfindlich
- für Unterbeton sind interne Alkalien für den Schadensprozess verantwortlich
- beginnende AKR gekennzeichnet durch farbliche Veränderungen von Querfugen und Fugenkreuzen

- rautenförmige Rissbildungen im Fugenbereich
- Eckabbrüche aus Horizontalrissbildung
- neben den Spannungen, die aus der Bauteiltemperatur und -feuchtigkeit sowie dem Verschmutzungsgrad der Fugen resultieren, trägt die AKR im unteren Bereich der Fahrbahndecke zum Gesamtspannungszustand bei
- sichtbare Längsrisse an der Fahrbahnoberfläche können die Folge sein

Anmerkung zu den Fällen 2a und 2b:

Wenn der AKR-bedingte Schadensprozess im Oberbeton langsamer stattfindet als im Unterbeton, sind anstatt der farblichen Veränderungen an Querfugen und Fugenkreuzen beginnende rautenförmige Rissbildungen und Eckabbrüche aus Horizontalrissbildung sowie Längsrisse an der Fahrbahnoberfläche kennzeichnend (vgl. Fall 4).

Fall 3a: zweischichtig (Oberbeton alkaliempfindlich, Unterbeton alkaliunempfindlich)

- Rezeptur Oberbeton alkaliempfindlich
- für Oberbeton sind externe Alkalien für den Schadensprozess verantwortlich
- Rezeptur Unterbeton alkaliunempfindlich
- beginnende AKR gekennzeichnet durch farbliche Veränderungen von Querfugen und Fugenkreuzen
- rautenförmige Rissbildungen im Fugenbereich
- Eckabbrüche aus Horizontalrissbildung

Fall 3b: zweischichtig (Oberbeton alkaliempfindlich, Unterbeton alkaliunempfindlich)

- Rezeptur Oberbeton alkaliempfindlich
- für Oberbeton sind interne und externe Alkalien für den Schadensprozess verantwortlich
- Rezeptur Unterbeton alkaliunempfindlich
- beginnende AKR gekennzeichnet durch farbliche Veränderungen von Querfugen und Fugenkreuzen
- rautenförmige Rissbildungen im Fugenbereich
- Eckabbrüche aus Horizontalrissbildung

Fall 4: zweischichtig (Oberbeton alkaliunempfindlich, Unterbeton alkaliempfindlich)

- Rezeptur Oberbeton alkaliunempfindlich
- Rezeptur Unterbeton alkaliempfindlich

- für Unterbeton sind interne Alkalien für den Schadensprozess verantwortlich
- beginnende AKR gekennzeichnet durch Eckabbrüche aus Horizontalrissbildung
- neben den Spannungen, die aus der Bauteiltemperatur und -feuchtigkeit sowie dem Verschmutzungsgrad der Fugen resultieren, trägt die AKR im unteren Bereich der Fahrbahndecke zum Gesamtspannungszustand bei
- sichtbare Längsrisse an der Fahrbahnoberfläche können die Folge sein

8.1.2 Betoneigenschaften (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Zugfestigkeit)

Um den Verschleiß der Arbeitsgeräte und die voraussichtliche Arbeitsleistung beim Aufbrechen von Betonfahrbahndecken berücksichtigen zu können, wird einzig die Druckfestigkeit als Kenngröße des Betons zur Verfügung gestellt. Die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit, die bei der Dimensionierung nach RDO Beton 09 zur Herstellung neuer Fahrbahndecken eine entscheidende Bemessungsgröße darstellt und auch für die Qualitätsbewertung herangezogen wird, ist für die Substanzbewertung AKR-geschädigter Fahrbahndecken ungeeignet. Ausführliche Hinweise findet man dazu in MIELICH (2019b). In den Untersuchungen zeigte sich, dass zur Substanzbewertung AKR-geschädigter Fahrbahndeckenbetone sich die Bestimmung des Elastizitätsmoduls bewährt. Aus dem Ort der Probenahme sowie der Ausrichtung der Probekörper, vertikal (senkrecht zur Fahrbahnoberfläche) bzw. horizontal (Längsrichtung der Fahrbahn), können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

Aussagen, die sich in Abhängigkeit aus dem Ort der Probenahme ergeben:

Bei der visuellen Schadensbegutachtung lassen rautenförmige Rissbildungen an Fugenbereichen auf ein mögliches Einbrechen schließen. Deshalb ist die Frage zu klären, auf welche Ursache das Einbrechen (Eckabbrüche) zurückzuführen ist. Ursächlich für Eckabbrüche können z. B. veränderte Auflagebedingungen der Betondecke sein, wenn keine frostsichere und erosionsfeste Auflage oder Verdichtungsmängel in der Unterlage vorhanden sind. Beide Ursachen spielen allerdings nur noch eine untergeordnete Rolle (EHRlich & HENSEL, 2010). Eine weitere Möglichkeit sind Änderungen in den Auflagebedingungen, bedingt durch eine unzureichende Entwässerung der Unterlage. Dabei gelangt zunächst Oberflächenwasser durch schadhaft gefugte Fugen auf die Unterlage, welches nicht wirksam abgeführt werden kann. Die Unterlage wird dann unter Verkehrsbeanspruchung zersetzt und gelockert. Als Ergebnis liegt dann die Platte an der Eindringstelle des Wassers hohl und bricht später infolge einer Überbelastung ein (EHRlich & HENSEL, 2010).

Eine weitere Ursache von Eckabbrüchen ist, wenn Hohllagen in der Fahrbahndecke selbst zu finden sind. Bild 8-2, links, zeigt eine entsprechende Horizontalrissbildung bei einer Bohrkernentnahme. An dem Bohrkern mit einem Abstand der Bohrlochwandung zur Fuge (Fugenkreuz) von rd. 3 cm, ist die Horizontalrissbildung im oberen Drittel der Fahrbahndecke als auch auf Dübelhöhe deutlich zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist der Bohrkern mit einem Abstand von rd. 21 cm von Bohrlochwandung zur Fuge und in Plattenmitte vollständig intakt. Ver-



Bild 8-2: Links: Bohrkern mit und ohne Horizontalriss nahe Fugenkreuz (Abstand Bohrlochwandung zur Fuge rd. 3 und 21 cm) Rechts: Bohrkern ohne Horizontalriss an einer rd. 1,5 Jahre alten Betondecke (aus: MIELICH, 2019a).

gleichend dazu zeigt Bild 8-2, rechts, Bohrkern aus einer rd. 1,5 Jahre alten Fahrbahndecke, die auf einen völlig intakten Fahrbahnquerschnitt schließen lässt.

Aussagen, die sich aus der Ausrichtung der Probekörper ergeben:

Die DFG Forschergruppe 1498 hat gezeigt, dass es im Labor an zyklisch vorgeschädigten Fahrbahnplatten und längs der Fahrbahnplatten entnommenen Probekörper zu einer moderaten Erhöhung der Dehnung bei Beaufschlagung mit NaCl-Lösung während der Klimawechsellagerung kommt. Im Gegensatz dazu zeigen die vorliegenden Ergebnisse an realen Fahrbahndeckenbetonen und die die Ergebnisse von MIELICH (2019b), dass der Beton im fugennahen Bereich durch eine einsetzende AKR und zyklische Beanspruchung senkrecht zur Fahrbahnoberfläche (vertikal) eine größere Ermüdung erfährt als in Fahrbahnlängsrichtung (horizontal). Bei Untersuchungen zur Substanzbewertung mit dem statischen E-Modul, eignen sich bei einschichtig hergestellten Fahrbahndecken (Fall 1a und 1b, Bild 8-1) Bohrkern die mit einem Abstand der Bohrlochwandung zur Fuge von rd. 3 und 21 cm sowie in Plattenmitte entnommen wurden. Bisher durchgeführte Untersuchungen lassen vermuten, dass für die Versuche ein Durchmesser der Bohrkern von 100 mm ausreichend ist. An diesen Bohrkernen wird, wenn möglich (vgl. Bild 8-2 links), der statische E-Modul bestimmt. Bezugsgröße ist der statische E-Modul aus Plattenmitte, da hier der Beton die geringste Ermüdung (senkrecht zur Fahrbahnoberfläche) erfährt, wie die Untersuchungen gezeigt haben. Gegenwärtig wird an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart der Frage nachgegangen, ob sich die Erkenntnisse auch auf zweischichtig/zweilagig hergestellten Fahrbahndeckenbetone (Fall 2a, 2b, 3a, 3b und 4, Bild 8-1) übertragen

lassen. Auch wird geprüft, welche Abweichung des statischen E-Moduls an Bohrkernen aus dem fugennahen Bereich zu denen aus Plattenmitte der Ermüdung aus Verkehr und welche dem AKR-Schadensprozess zuzuschreiben sind. Erste Ergebnisse lassen vermuten, dass Abweichungen bis zu 10 % rein auf die Ermüdung aus Verkehr zurückzuführen sind.

8.1.3 AKR-bedingtes Restschädigungspotenzial

Die Bestimmung des Restschädigungspotenzials gibt einen Hinweis darauf, ob bei der späteren Verwendung als Recyclingmaterial in einer Tragschicht noch ein Schadensrisiko hinsichtlich Fortsetzung der schädigenden AKR durch

- die Anwesenheit einer als alkaliempfindlich eingestuftes Gesteinskörnung,
- den Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus dem Bindemittel),
- und den gespeicherten Alkalien in der Zementsteinmatrix (aus dem Tausalzeintrag während der Nutzung als Fahrbahndeckenbeton)

zu befürchten ist. Für die Bewertung als Recyclingmaterial in einer Tragschicht wurde der 40 °C Betonversuch (ohne Alkalizufuhr, vgl. Kapitel 3.3.3) ausgewählt, da dieses Temperaturregime einer Tragschicht am nächsten kommt, ohne negative Effekte aus den Lagerungsbedingungen der FIB-Klimawechsellagerung (TP B-StB – Teil 1.1.10) und dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (TP B-StB – Teil 1.1.09) befürchten zu müssen.

Bei einer Bewertung des AKR-bedingten Restschädigungspotenzials einer Fahrbahndecke eignen sich dagegen prinzipiell die FIB-Klimawechsellagerung (TP B-StB – Teil 1.1.10) sowie der 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr (TP B-StB – Teil 1.1.09).



Bild 8-3: Prinzip zur Gewinnung von Probekörpern aus Bohrkernen mit Durchmesser 350 mm aus Plattenmitte.

Neueren Untersuchungen zur Folge, bewertet aber die FIB-Klimawechsellagerung die Auswirkungen einer vorhandenen degradierten Betonrandzone am besten (WEISE et al. 2018c).

Bei der Bestimmung des Restschädigungspotenzials mit der FIB-Klimawechsellagerung eignen sich zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 350 mm die aus Plattenmitte entnommen werden. Aus jedem Bohrkern (Bild 8-3, links) werden dann je zwei Probekörper senkrecht zur Fahrbahnoberfläche und je zwei Probekörper in Längsrichtung der Fahrbahn entnommen (Bild 8-3, rechts). Die so gewonnenen Probekörper werden dann sowohl unter Einwirkung mit Wasser als auch mit NaCl-Lösung der Klimawechsellagerung unterzogen. Vor und nach der Klimawechsellagerung bietet es sich an, den statischen E-Modul für eine zusätzliche Bewertung zur Längenänderung zu bestimmen.

8.2 Aufbruch von Betondecken

8.2.1 Einflüsse auf den Aufbruch

Nach KLEE (2018) bestimmen eine ganze Reihe von Einflüssen den Aufbruch. Zu nennen sind

- die Dicke der aufzubrechenden Betondecke, welche die zu bewältigende Aufbruchmenge ergibt,
- die Festigkeit, welche den Verschleiß der Arbeitsgeräte und die Arbeitsleistung beeinflusst,

sowie die Art der Unterlage und deren Verbundsituation.

8.2.2 Aufbruchtechnologie im Betonstraßenbau

Die Aufbruchtechnologie hängt von der Bauweise des Oberbaus ab und der Frage, ob es sich um eine Grundhafte Erneuerung des Oberbaus oder nur um eine Erneuerung der Betondecke handelt. Nach KLEE (2018) ergeben sich daraus folgende Fragestellungen und Antworten:

- Ist unter der aufzubrechenden Betondecke eine hydraulisch gebundene Tragschicht mit direktem Verbund zur Betondecke oder mit Vlieszwischen-schicht vorhanden?
- Gibt es eine Schottertragschicht aus RC-Material, die sich eventuell durch Nachhydratation verfestigt hat?

- Gibt es eine Asphaltzwischen-schicht, die an der Betondecke anhaftet?
- Sind nahe Bebauungen oder Bauwerke zu beachten? Um Schäden an Bauwerken oder auch Tragschichten unter der Betondecke zu vermeiden, muss eine erschütterungsarme Aufbruch-technologie gewählt werden.
- Wie ist die für den Aufbruch verfügbare Zeit? Enge Bauzeitvorgaben verbieten eine aufwändi-gere Aufbruchtechnologie. Wenn es schnell gehen muss, geht das u. a. zu Lasten der Qualität des Aufbruchguts. Außerdem können die Mög-lichkeiten der Verwertung eingeschränkt werden.

In welchem Spannungszustand steht die Betondecke? Infolge Erwärmung der Betondecke und Abnahme der Nullspannungstemperatur mit zunehmender Verschmutzung der Fugen (PFEIFFER, 1997; VILLARET, 2014; FREUDENSTEIN & EGER, 2017), stellt sich bei jeder Betondecke zum Aufbruchzeitpunkt ein bestimmter Spannungszustand ein. Die Spannungen sind umso größer, je höher die Bauteiltemperatur der Betondecke und der Verschmutzungsgrad der Fugen ist. Auch Temperaturgradienten zwischen der Deckenoberfläche und der Deckenunterseite sind spannungsbildend.

8.2.3 Aufbruchtechnologie – Besonderheiten bei AKR-geschädigten Betondecken

Im Vorfeld von Erneuerungsmaßnahmen kommt es durch den AKR-bedingten Schadensprozess oftmals zu nicht ganz unerheblichen Erhaltungsmaßnahmen durch Flickstellen oder auch partiell größeren Flächen aus Asphalt. Art und Umfang der Flickstellen und Asphaltflächen spielen insofern eine Rolle, als dass bei Verwertung des AKR-geschädigten Betons in einer Tragschicht aus Recyclingmaterial möglicherweise begrenzende Anforderungen an den Asphaltanteil bestehen.

Der Aufbruch AKR-geschädigter Betondecken stellt im Kontext mit dem in der Betondecke ablaufenden Schadensprozess eine Besonderheit dar. Das Längsdehnungsbestreben der Betonfahrbahnen, welches durch den Schadensprozess verstärkt wird, trägt zusätzlich zu einem höheren Gesamtspannungszustand bei. Eine im Unterbeton ablaufende AKR (Fälle 1b, 2a, 2b, 4) und der damit einhergehenden Ausdehnung der Fahrbahndecke, führt zu einer weiteren Absenkung der Nullspannungstemperatur durch die behinderte Ausdehnung



Bild 8-4: Links: Oberfläche Fahrbahndecke nach dem Zertrümmern mit der Polygonalbandagenwalze. Rechts: Nach Zertrümmern ohne nennenswerte Rissbildung über die Deckenhöhe.



Bild 8-5: Links: Oberfläche Fahrbahndecke beim Rubblizing (Quelle: Dr. Rother). Rechts: Oberfläche nach dem Zertrümmern, ohne nennenswerte Tiefenwirkung (Quelle: Dr. Rother).

der Platten in Längsrichtung. Der Spannungszustand zum Aufbruchzeitpunkt, der sich bereits aus der Bauteiltemperatur und der Verschmutzung der Fugen ergibt, wird dadurch zusätzlich erhöht. Messungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer (FWD) bestätigten diese Hypothese.

Eine weitere Besonderheit ist, dass bei einer von der Fahrbahnoberseite beginnenden AKR die Betonsteifigkeit im Fall 1a und 1b von oben nach unten zunehmen kann ($E\text{-Modul}_{\text{oben}} < E\text{-Modul}_{\text{unten}}$). In Verbindung mit dem Gesamtspannungszustand einer Platte ist besonders bei Anhaftungen einer nachhydratisierten, ungebundenen Tragschicht aus Betonrecyclingmaterial oder einer Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel im direkten Verbund zur Betondecke der Wahl der Aufbruchtechnologie zukünftig große Aufmerksamkeit zu widmen.

Zwei Beispiele aus der jüngeren Vergangenheit belegen die angeführten Besonderheiten für die richti-

ge Wahl der Aufbruchtechnologie. Im ersten Fall wurde eine Polygonalbandagenwalze (Würfelwalze) zum Zertrümmern der Fahrbahndecke mit anschließendem Aufnehmen mittels Hydraulikbagger gewählt. Die Energie, die durch die Polygonalbandagenwalze in die Decke eingebracht wurde, reichte für eine ausreichende Vorzertrümmerung nicht aus. Die Energie dissipierte bereits an der Fahrbahnoberfläche (Bild 8-4). Das Aufnehmen der Fahrbahndecke war somit unmöglich. Um die Decke doch noch für eine weitere Verwertung aufnehmen zu können, musste sie aufwendig mit einem Meißel zertrümmert werden.

Im zweiten Fall sollte das zertrümmern der Fahrbahndecke durch Rubblizing und das Aufnehmen mit einem Hydraulikbagger erfolgen. Auch hier dissipierte die Energie an der Oberfläche, das Aufnehmen der Betondecke war nicht möglich (Bild 8-5). Letztendlich wurde die Decke mit einer Fräse ausgebaut. Eine Steuerung der Kornform war somit



Bild 8-6: Links: Polygonalbandagenwalze (Würfelwalze). Rechts: Fallschwert.



Bild 8-7: Links: Meißel (Quelle: Dr. Wieland). Rechts: Fräse.



Bild 8-8: Links: Aufbruchhammer Power Sledge (Quelle: Frau Klee). Rechts: Detail zum Aufbruchhammer.

nicht mehr möglich und eine Verwertung als Recyclingmaterial in Tragschichten im Oberbau ausgeschlossen.

In beiden Fällen ist der AKR-bedingte Gesamtspannungszustand und die Zunahme des E-Moduls vom Ober- zum Unterbeton zu vermuten. Im ersten Fall erschwerte zusätzlich die anhaftende hydraulisch gebundene Tragschicht an die Betondecke den Ausbau.

Abschließend sei erwähnt, dass die Wahl der Aufbruchtechnologie dem Auftragnehmer obliegt. Unter Beachtung aller Einflüsse und Randbedingungen, die sich aus einer betonschädigenden AKR sowie dem Ziel des Aufbruchs ergeben, kann der Auftragnehmer grundsätzlich eine Wahl treffen zwischen den üblichen Aufbruchmethoden wie Polygonalbandagenwalze (linkes Bild 8-6), Fallschwert (rechtes Bild 8-6), Meißel (linkes Bild 8-7), Fräse (rechtes Bild 8-7) und deren Kombination. Aber

auch andere Verfahren sind unter Umständen anwendbar wie Rubblizing (linkes Bild 8-5) und der Aufbruchhammer Power Sledge (Bild 8-8).

8.3 Aufbereitung

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sollte das Aufbruchgut auf der Baustelle mit mobilen Brechanlagen aufbereitet werden. Unter Berücksichtigung AKR-bedingter Schadensmechanismen (verringerte Steifigkeiten im Gesteinskorn durch Rissbildungen und Löseprozesse) wird eine energiereiche Aufbereitung empfohlen. Eine Aufbereitung des Ausbaubetons mittels Backenbrecher ist möglich, wenn in einem zweiten Brechvorgang der gebrochene Beton einem Prallbrecher zugeführt wird. Insgesamt lässt sich für eine energiereiche und zielgerichtete Aufbereitung ohne weitere Nachbearbeitung mit anforderungsgemäßen Eigenschaften an das Recyclingmaterial festhalten (KLEE, 2018), dass sich ein Prallbrecher mit nachgeschalteter Siebanlage am besten eignet. Mit einem Überbandmagnet können zusätzlich vorhandene Eisenanteile entfernt werden. Anhaftungen an der Oberseite der Betondecke (z. B. Asphaltflickstellen) müssen gegebenenfalls vor dem Aufbruch entfernt werden. Anhaftungen unter der Betondecke (z. B. Vliesstoff) können während des Aufnehmens des Aufbruchgutes und/oder im Aufbereitungsprozess separiert werden.

8.3.1 Laborversuche mit RC-AKR Material für ToB

Bei der Bewertung einer AKR-geschädigten Fahrbahndecke und Berücksichtigung der Bauweise, lässt sich vermuten, dass der aufzubereitende Altbeton nicht unbedingt aus einer gleichmäßigen Altsubstanz stammt. Bei AKR-geschädigten Fahrbahndecken ist mit unterschiedlichen Steifigkeiten (E-Moduln) des Altbetons zu rechnen, welche innerhalb einer Betonplatte stark schwanken können. Für den Elastizitätsmodul sind Schwankungen bis zu 50 % zu nennen. Aber auch Flickstellen oder partiell größere Asphaltflächen aus vorangegangenen Erhaltungsmaßnahmen dürfen nicht unberücksichtigt bleiben.

Untersuchungen am Aufbruchgut, welches mit einem Prallbrecher mit nachgeschalteter Siebanlage zu RC-AKR-Material aufbereitet wurde, zeigten, dass die Anforderungen an die technischen Regel-

werke und Anforderungen, die sich aus länderspezifischen Regelungen ergeben, eingehalten werden können. Zum Prüfumfang nach der Aufbereitung gehören die Bestimmung der Korngrößenverteilung, der stofflichen Zusammensetzung (z. B. Anteil Asphaltgranulat), der Feianteile, der Kornform, der Reinheit, des Widerstands gegen Frostbeanspruchung, der Raumbeständigkeit, der Proctordichte und des optimalen Wassergehalts, umweltrelevanter Eigenschaften sowie der Wasserdurchlässigkeit.

Zusätzlich zum aufgeführten Prüfumfang müssen zwei weitere Prüfungen genannt werden, die aber im Kontext mit einer schädigenden AKR besondere Erwähnung finden. Wie bereits bei den Schadensmechanismen erläutert, setzt die schädigende AKR durch Löseprozesse und Rissbildungen in der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung die Steifigkeit herab (MIELICH et al., 2019). Zwei Kriterien, die diesem Einfluss nach der Aufbereitung in einem Prallbrecher sehr gut Rechnung tragen, sind der Widerstand gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch sowie der California-Bearing-Ratio-Versuch (CBR-Versuch), der als Laborversuch die Tragfähigkeit von Tragschichten beschreibt.

Nach TL Gestein-StB 04/07, Anhang E, ist im Anwendungsbereich für Schichten ohne Bindemittel der Widerstand gegen Zertrümmerung zu bestimmen. In den Laborversuchen wurde der Widerstand gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch nach DIN EN 1097-2 ermittelt. Alle im Labor an RC-AKR-Material ermittelten Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5}$ halten die Anforderungen gemäß TL Gestein-StB 04/07 wie auch die Anforderungen länderspezifischer Regelungen ein. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass AKR-bedingte Rissbildungen im Gesteinskorn durch die energiereiche Aufbereitung im Prallbrecher beim späteren Schlagversuch vernachlässigbar sind.

Nach TL SoB-StB 04/07 ist der CBR-Versuch gemäß DIN EN 13286-47 bei Baustoffgemischen 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecke nach Abtrennung des Anteils > 22 mm am Baustoffgemisch 0/22 nach 4 h Wasserlagerung zu bestimmen. Da aber wie erläutert eine schädigende AKR durch Löseprozesse und Rissbildung in der Gesteinskörnung die Steifigkeit herabsetzt, sollte der CBR-Versuch an RC-AKR-Material durchgeführt werden, auch wenn es in einer Frostschutzschicht verbaut wird. Bei allen untersuchten Proben wurde im Anlieferungszustand (nach Aufbereitung) als auch nach 24 h Wasserlagerung der Grenzwert von

über 80 % stets erreicht, so dass aufgrund der Tragfähigkeit ein Einsatz des Materials als Tragschicht ohne Bindemittel möglich ist. Vergleichend ist anzuführen, dass mit Baustoffgemischen aus natürlichen Gesteinsvorkommen höhere CBR-Werte als mit RC-AKR-Material erreicht wurden. Abschließend lässt sich auch für den CBR-Versuch schlussfolgern, dass sich durch eine energiereiche Aufbereitung trotz AKR-bedingter Steifigkeitsverluste im Gesteinskorn hohe Tragfähigkeitskennwerte erreichen lassen.

Für eine Beurteilung von RC-AKR-Material sind daher beide Versuche entscheidend und sind daher stets für den Anwendungsfall ToB (Frostschuttschichten und Schottertragschichten) anzuwenden.

8.3.2 Laborversuche mit RC-AKR-Material für HGT

Grundsätzlich besitzt das RC-AKR-Material bezüglich seiner körnungsspezifischen Eigenschaften das Potenzial für eine Verwendung in einer hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT). Eine entsprechende Klassierung zum Erreichen bzw. Einstellen der nach Norm geforderten Kennwerte ist ohne weiteres möglich (HÜNGER & BÖRNER, 2015).

Wie bereits in den Untersuchungen von HÜNGER & BÖRNER (2015) festgestellt, werden Druckfestigkeiten an HGTs mit RC-AKR Material erreicht, welches das Recyclingmaterial für den Anwendungsfall HGT interessant erscheinen lässt. An den Festigkeiten ändert sich auch nichts bei Veränderung der Umgebungsbedingungen (erhöhte Temperaturen bis 40 °C, hohe Luftfeuchten bis 100 %). Es wird sogar ein weiterer Festigkeitszuwachs festgestellt, der sich aus den günstigen Temperatur- und Feuchtebedingungen durch Nachhydratation ergibt. Ein ähnliches Verhalten wurde auch für den Elastizitätsmodul festgestellt.

Anders als in den Untersuchungen von HÜNGER & BÖRNER (2015) ergeben sich keine Einschränkungen aus dem Formänderungsverhalten der mit dem RC-AKR-Material hergestellten HGT-Proben. Das Dehnungsniveau einer nachträglich einsetzenden AKR bei Temperaturen bis 40 °C und Luftfeuchten bis 100 %, ist bei den bisher mit RC-AKR-Material unter Verwendung eines für den Straßenbau zugelassenen Portlandzements ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äq.}} \leq 0,76 \text{ M.-%}$) hergestellten hydraulisch gebundenen Tragschichten als eher gering einzustufen.

Bei Grundsatzuntersuchungen zur Verwertung von RC-Material ist es nach LEYKAUF (1987) erforderlich, die in der Straßenkonstruktion maßgebende Festigkeitseigenschaft zu bestimmen, d. h. die Biegezugfestigkeit. Da Verkehrslasten als wiederholte Belastung auftreten, ist es daher notwendig, die Dauer-Biegezugfestigkeit (mehr als 2 Mio. Lastwechsel werden ohne Bruch ertragen) zu bestimmen.

Als Prüfkörper zur Bestimmung der Dauer-Biegezugfestigkeit eignen sich Biegebalken mit den Abmessungen 15 x 15 x 70 cm³. An diesen Biegebalken wurden im Alter von 60 Tagen und Lagerung in der 40 °C Nebelkammer (zur Ausschließung unterschiedlicher Nacherhärtung) Dauerschwingversuche durchgeführt. Die Belastung erfolgte durch zwei gleich große Linienlasten in den Drittelpunkten bei einer Stützweite von 600 mm. Die Biegebalken wurden durch Folienumhüllung während der Versuchsdurchführung gegen Austrocknung geschützt. Die Unterspannung wurde zu $\sigma_u = 0,10 \text{ N/mm}^2$ und die Prüffrequenz zu 3,33 Hz gewählt. Als Oberspannung σ_o wurden jeweils 50 % der statischen Biegezugfestigkeit (β_{BZvor}) im Alter von 60 Tagen festgelegt. Mit gleichen Randbedingungen wurden zusätzlich Dauerschwingversuche an Biegebalken durchgeführt, die über einen Zeitraum von 270 Tagen in der 40 °C Nebelkammer lagerten.

Die im Labor durchgeführten Dauerschwingversuche zeigten, dass ein Großteil der untersuchten Varianten zwei Millionen Lastwechsel nicht ohne Bruch ertragen. Eine mögliche Ursache ist, dass die Haftung des RC-AKR-Materials (bei neuen Bruchflächen) zum Zementsteingerüst durch eine nachträglich einsetzende AKR herabgesetzt wird. Gestützt wird diese Hypothese dadurch, dass an den Biegebalken 15 x 15 x 70 cm³ gelartige Produkte gefunden wurden. Aufgrund der dann vorliegenden mehr punktuellen Bindung werden örtlich Spanningskonzentrationen bewirkt, die dann bei einer Biegebeanspruchung zum Versagen des Gesamtquerschnittes führen.

Eine Rolle spielt dabei sicher auch, ob eine Betonfahrbahndecke über die gesamte Deckendicke alkaliempfindliche Gesteinskörnung enthält oder ob diese nur im Oberbeton oder Unterbeton anzutreffen ist. Legt man Bild 8-1 zugrunde, befindet sich im Fall 3a und 3b die alkaliempfindliche Gesteinskörnung hauptsächlich im Oberbeton (rund 1/3 der Deckendicke). Im Gegensatz dazu ist alkaliempfindliche Gesteinskörnung für die Fälle 1a, 1b, 2a und 2b

über die gesamte Deckendicke anzutreffen. In diesen Fällen entsteht eher eine verminderte Haftung des RC-AKR-Materials zum Zementstein, welche das Versagen im Dauerschwingversuch der Varianten 1a, 1b, 2a, 2b im Vergleich zu den Varianten 3a und 3b erklären würde. Der Fall 4, bei dem sich alkaliempfindliche Gesteinskörnung nur im Unterbeton befindet (rd. 2/3 der Deckendicke) wurde bisher nicht untersucht.

8.4 Verwertung

8.4.1 Neubaumaßnahmen mit RC-AKR Material

Die visuellen Beobachtungen an der Oberfläche eingebauter Tragschichten ohne Bindemittel lassen vermuten, dass sich Entmischungen des RC-Materials nicht dauerhaft verhindern lassen. Entmischungen wurden aber auch bei Neubaumaßnahmen festgestellt, bei denen Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinsvorkommen verwendet wurden. Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen mit dem statischen und dynamischen Plattendruckgerät auf OK Schottertragschicht sowie Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer auf OK Schottertragschicht und auf OK Neubeton weisen darauf hin, dass sich auch unter Verwendung von RC-AKR-Material sehr gleichmäßige Tragfähigkeiten in Tragschichten ohne Bindemittel erzielen lassen.

Der in der ZTV SoB-StB 04/07 geforderte E_{v2} -Wert von 150 MN/m^2 kann unter Erfüllung der Anforderungen an die Sieblinie bei Neubaumaßnahmen mit den üblichen Verdichtungsgeräten erreicht werden. Ebenfalls kann die Grenze für den Verhältniswert $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$ bzw. für $E_{v1} \geq 0,6 \% \cdot E_{v2, \text{Soll}}$ (wenn $E_{v2}/E_{v1} \geq 2,2$) eingehalten werden. Es können aber Probleme mit der Erfüllung dieser Anforderungen auftreten, wenn die Schichten unter der ToB keine ausreichenden Tragfähigkeitswerte aufweisen oder wenn die Tragschicht selbst nicht ausreichend verdichtet ist. Die Probleme dafür treten aber unabhängig davon auf, ob Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinsvorkommen, Recyclingmaterial aus Betonaufbruch oder aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken stammen.

Die vor dem Betoneinbau durch den Baustellenverkehr nicht ganz zu vermeidenden Verdrückungen sollten egalisiert oder angewalzt werden. Aber auch Verdrückungen treten unabhängig davon auf, ob Baustoffgemische aus natürlichen Gesteinsvorkom-

men, Recyclingmaterial aus Betonaufbruch oder aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken stammen. Vor dem Betoneinbau ist Sorge zu tragen, dass die ToB nicht trocken ist. Ansonsten besteht die Gefahr, dass der eingebauten Betondecke im unteren Bereich das Wasser entzogen wird.

8.4.2 Bewertung von Bestandsstrecken

In den neuen Bundesländern wurde 1995/96 erstmalig auf einem Autobahnabschnitt der BAB A24, km 136+655 bis km 172+220, linke Richtungsfahrbahn, eine Tragschicht ohne Bindemittel mit Recyclingmaterial aus einem AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbeton gebaut. Die 2017 durchgeführten FWD-Messungen auf diesem Streckenabschnitt haben gezeigt, dass die bereits gute Tragfähigkeit der ToB im Einbauzustand mit jahrzehntelanger Liegedauer zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit führt. Dies lässt sich mit dem Nacherhärtungspotenzial des RC-AKR-Materials begründen. Vergleichende Feldversuche haben gezeigt, dass RC-AKR-Material gegenüber Naturschotter leicht erhöhte Tragfähigkeiten aufweist. Zu beachten ist aber, dass sich RC-Material allgemein beim Einsatz in Tragschichten ohne Bindemittel negativ auf die Wasserdurchlässigkeit auswirken kann. Schadensbilder die sich aus veränderten Auflagerungsbedingungen bei nichtvorhandensein einer erosionsfesten und frostsicheren Auflage, Verdichtungsmängel oder auch aus unzureichender Entwässerung in der Unterlage ergeben, konnten weder an dem Autobahnabschnitt auf der A24 mit Schottertragschichten aus RC-AKR-Material als auch bei anderen Autobahnabschnitten mit RC-Material festgestellt werden.

9 Zusammenfassung

Der Einsatz von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen in Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) und hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT) im Straßenbau kann einen bedeutenden Beitrag zur Ressourcenschonung natürlicher Gesteinsvorkommen liefern. Daher wird auch eine ganzheitliche Bewertung gefordert. Diese umfasst die Diagnose, den Aufbruch, die Aufbereitung sowie die Verwertung selbst.

Zusätzlich zu den Einwirkungen aus Temperatur und Feuchte, können AKR-bedingte Schadensprozesse das Längsdehnungsbestreben von Betonfahrbahnen nachteilig fördern. Dies ist dann der

Fall, wenn der Schadensprozess über die gesamte Betondicke oder auch nur im Unterbeton stattfindet. Beim Schadensprozess aus dem Unterbeton sind nicht farbliche Veränderungen in Fugenbereichen kennzeichnend für eine beginnende AKR, sondern Längsrisse in Fahrbahnplatten sowie rautenförmige Rissbildungen an Fugenbereichen, die auf ein mögliches Einbrechen schließen lassen. Das Längsdehnungsbestreben führt zusammen mit anderen spannungsinduzierenden Vorgängen zudem zu einem Gesamtspannungszustand in den Betonfahrbahnen, welcher durch geeignete Maßnahmen beim Aufbruch abzubauen ist. Für eine energiereiche und zielgerichtete Aufbereitung ohne weitere Nachbearbeitung mit anforderungsgemäßen Eigenschaften an das Recyclingmaterial eignet sich ein Prallbrecher mit nachgeschalteter Siebanlage am besten.

Langsam reagierende alkaliempfindliche Gesteinskörnungen haben beim AKR-bedingten Schadensprozess den Ursprung der Rissbildung im Innern der Gesteinskörnung, welche sich dann in die Matrix weiter fortsetzt. Zudem geht mit der Reaktion ein Löseangriff auf SiO_2 -Modifikationen und andere gesteinsbildende Minerale einher, welcher eine Entfestigung des Gesteinskorns zur Folge hat und im Ergebnis zu einem Absinken des E-Moduls der Gesteinskörnung führt. Diese AKR-bedingten Schadensprozesse müssen in entsprechenden Versuchen berücksichtigt werden. Dafür sind, unabhängig von der Verwendung von RC-AKR-Material, folgende Prüfungen notwendig:

- Widerstand gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch nach DIN EN 1097-2
- CBR-Prüfung nach DIN EN 13286-47 in Verbindung mit TL SoB-StB 04/07

Nach TL SoB-StB 04/07 ist der CBR-Versuch gemäß DIN EN 13286-47 nach Abtrennung des Anteils > 22 mm am Baustoffgemisch 0/22 nach 4 h Wasserlagerung zu bestimmen.

Hierbei sind die in den TL Gestein-StB 04/07 und in den TL SoB-StB 04/07 aufgeführten, nachstehenden Grenzwerte ungeachtet der beabsichtigten Verwendung nachzuweisen:

- $SZ_{8/12,5} \leq 32 \text{ M.-%}$
- $\text{CBR} \geq 80 \text{ \%}$

Folgende Ergebnisse zur Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahnde-

ckenbetonen in Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) konnten im Labor, im Bestand und an drei wissenschaftlich begleiteten Neubaumaßnahmen abgeleitet werden:

- Kann eine nachträglich einsetzende AKR in einer ungebundenen Tragschicht ausgeschlossen werden, dann hat der Einsatz in einer ToB keinen negativen Einfluss auf die Tragfähigkeit.
- Neben den hohen Tragfähigkeiten, die sich beim Einbau von RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton ergeben, ist auch mit einer Zunahme der Tragfähigkeit während der Liegezeit zu rechnen.
- Werden nach dem Aufbruch und der Aufbereitung länderspezifische Anforderungen und Anforderungen, die sich aus technischen Regelwerken ergeben, an das Recyclingmaterial eingehalten, so ist eine Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen möglich.
- Zu berücksichtigen sind mögliche negative Auswirkungen auf die Wasserdurchlässigkeit bzw. kapillarbrechende Wirkung von Tragschichten ohne Bindemittel.

Aus den Laborergebnissen zur Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen in hydraulisch gebundenen Tragschichten (HGT) kann folgendes abgeleitet werden:

- An einigen hergestellten Zylindern und Biegebalken wurden gelartige Reaktionsprodukte festgestellt.
- Eine Auswirkung auf Druckfestigkeiten und Elastizitätsmoduln bei der Lagerung mit Temperaturen von $40 \text{ }^\circ\text{C}$ und Luftfeuchten von 100 \% , konnte nicht festgestellt werden.
- Das Dehnungsniveau einer nachträglich einsetzenden AKR ist bei den bisher untersuchten hydraulisch gebundenen Tragschichten mit RC-AKR-Material unter Verwendung eines für den Straßenbau zugelassenen Portlandzements ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{Aq.}} \leq 0,76 \text{ M.-%}$) als eher gering einzustufen.
- Wird aber die Haftung des RC-AKR-Materials zum Zementsteingerüst durch eine einsetzende AKR nachträglich gestört, können aufgrund der dann vorliegenden mehr punktuellen Bindungen örtliche Spannungskonzentrationen ein Versagen des Gesamtquerschnitts bei Biegebeanspruchung bewirken.

- Das Versagen im Dauerschwingversuch wurde an Proben mit RC-AKR-Material festgestellt, bei dem sowohl der Ober- als auch der Unterbeton als alkaliempfindlich eingestuft wurde.
- Aus den bisherigen Ergebnisse kann eine Verwendung von RC-AKR-Material für hydraulisch gebundene Tragschichten nicht empfohlen werden.

Anmerkung: Die Verwertung von Fahrbahndeckenbetonen kann nicht ohne weiteres auf die Verwertung von AKR-geschädigten Flugbetriebsflächen aus Beton übertragen werden, wenn dort zur Eisfreiheit Formiate und/oder Acetate verwendet wurden. Im Fall der Alkaliacetate/-formiate basiert der besonders stark AKR-fördernde Mechanismus nicht allein auf der Zufuhr von Alkalien (GIEBSON et al. 2016). Demnach bilden sich stabile Ca-Acetat- bzw. Ca-Formiatkomplexe, wodurch Portlandit verstärkt gelöst wird und zusätzlich OH--Ionen freigesetzt werden. Dadurch kommt es zu einem Anstieg des pH-Wertes und damit zu einem verstärkten, lösenden Angriff auf alkalireaktives SiO₂ in den Gesteinskörnungen. Der Löseangriff auf die SiO₂-Modifikationen und andere gesteinsbildende Mineralien hat dann eine Entfestigung der Gesteinskörnung und ein Absinken des E-Moduls der Gesteinskörnung (REINHARDT & MIELICH 2014) zur Folge, was im Resultat zu einer Verringerung des Betonelastizitätsmoduls führt. Inwieweit der Eintrag von Formiaten und/oder Acetaten in den Beton hinein eine spätere AKR in einer ToB fördert, muss einer gesonderten Untersuchung unterzogen werden.

10 Empfehlungen

Zumindest im Land Brandenburg hat sich die Bauweise Betondecke auf Schottertragschicht (STS) aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenaufbruch auf einer Schicht aus frostunempfindlichem Material seit über 20 Jahren bewährt. Es sind keine nachweislichen Schäden an der Betondecke aufgetreten, deren Ursache in den Eigenschaften der STS aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton zu suchen gewesen wäre. Auch Nachhydratationsprozesse in der STS, die zur Bildung einer quasi gebundenen Schicht unter der Betondecke führten, konnten aktuellen Schadensbildern nicht ursächlich zugeordnet werden. Außer Frage steht, dass eine wasserundurchlässige STS für eine Betondecke mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen eine eher reaktions- und damit ggf. schadensfördernde Unter-

lage für die Betondecke darstellt. Wieviel Wasser und Alkalien aber bis unter die Betondecke wirklich eindringen können, bedarf weiterer Untersuchungen.

Eine mögliche Alternative zur Anordnung einer STS direkt unter der Betondecke könnte in F2/F3-Bereichen die Bauweise Betondecke auf Asphalttragschicht und Frostschuttschicht nach Tafel 2 Zeile 2 der RStO 12 darstellen. Hierfür wird zunächst auf dem Planum ein Teil der Frostschuttschicht aus Naturschotter eingebaut. Diese Schicht übernimmt die kapillarbrechende Wirkung und die geforderte Wasserdurchlässigkeit dauerhaft. Anschließend wird bis zur geforderten Schichtdicke mit RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton aufgefüllt.

In F1-Bereichen kann bei frostunempfindlichem Planum eine Konstruktion grundsätzlich ebenfalls nach Tafel 2 Zeile 2, aber unter Beachtung des Kapitels 3.2.1 und Tabelle 8 der RStO 12 mit Betondecke auf einer Asphalttragschicht und einer STS aus dem RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton gewählt werden.

Stehen in einem Baulos sowohl F2/F3-Bereiche als auch F1-Bereiche an, sollte der AKR-geschädigte Fahrbahndeckenbeton im gesamten Baulos so aufbereitet werden, dass seine Sieblinie den Anforderungen an eine STS nach TL SoB-StB 04/07 entspricht.

Da diese Anforderungen deutlich schärfer sind als die für Frostschuttschichten (Bild 10-1), werden auch die Anforderungen der Kornverteilung an das RC-Gemisch 0/32 für Frostschuttschichten deutlich eingehalten. Der Brecher kann somit ohne Umrüstung durcharbeiten.

Aus der vorgeschlagenen Bauweise – Betondecke auf Asphalttragschicht und „modifizierter“ FSS (bzw. STS) – ergeben sich folgende Vorteile:

- Verwendung des aufgebrochenen und aufbereiteten AKR-geschädigten Betons als STS oder FSS möglich
- Aufbereitung direkt auf der Baustelle möglich, keine weitere Aufbereitung in Recyclinganlage außerhalb der Baustelle notwendig
- keine unnötigen Transporte und Verladeprozesse, es fallen keine Entsorgungskosten an

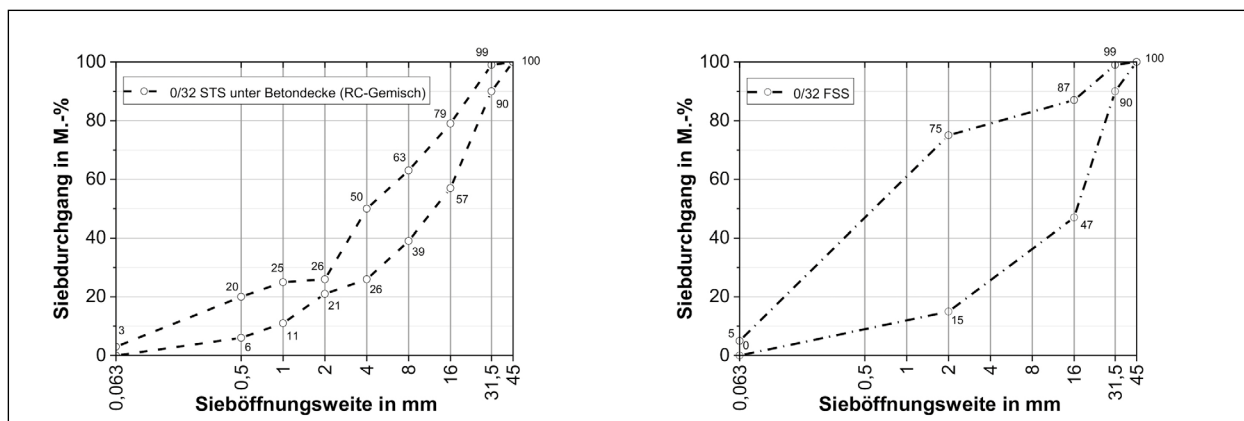


Bild 10-1: Sieblinienbereich für ein RC-Gemisch 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecke (links) und Baustoffgemisch 0/32 für Frostschutzschichten (rechts) nach TL SoB-StB 04/07.

- Bauweise liefert einen Beitrag zur Ressourcenschonung
- Wasserzutritt sowie Zutritt von Alkalien zur FSS bzw. STS von oben wird durch die Asphalttragschicht weitgehend verhindert
- keine schädigende Auswirkung auf die Konstruktion durch eventuelle Nachhydratation der ToB aus RC-Material durch die schützende Anordnung einer Asphalttragschicht (Wasserabfluss auf bzw. in der Asphalttragschicht)
- Homogenisierung der Trageigenschaften der STS bzw. FSS infolge von Entmischungen, Wassergehaltsschwankungen sowie Einflüssen aus dem Untergrund/Unterbau und Egalisierung von Unebenheiten der STS bzw. FSS durch die Asphalttragschicht
- Asphalttragschicht bietet ebene und flexible Unterlage für die Betondecke
- Im Falle der Erneuerung der Betondecke problemloser Ausbau bis OK Asphalttragschicht (keine Reprofilierung einer ToB nötig)

Bauweise ist regelkonform unter Beachtung des Kreislaufwirtschafts-Gesetzes, wirtschaftlicher Faktoren und technologischer Belange.

11 Ausblick

Alle bisher untersuchten Kennwerte sind Stichprobenwerte, die sich infolge schwankender, AKR-bedingter Schadensprozesse in der Betonfahrbahndecke und produktionsbedingter Schwankungen ändern können. Bei der Umsetzung der Verwertung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Fahrbahndeckenbetonen in Tragschichten ohne Binde-

mittel sollte trotz der aufgezeigten Möglichkeiten behutsam vorgegangen werden. Die Erfahrungen, die sich bei der Diagnose, dem Aufbruch, der Aufbereitung und der Verwertung ergeben, sollten für alle zukünftigen Baumaßnahmen dokumentiert und für Bauherren und Auftragnehmer zugänglich, gesammelt werden. Die sich daraus ergebende Datenbasis ermöglicht die Ausnutzung aller technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten, ohne die Bauweise durch Fehlschläge zu gefährden. Aus der somit gewonnenen Datenbasis ließe sich dann auch eine prozesssichere Herstellung von Tragschichten ohne Bindemittel mit Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken, welche noch zu den offenen Fragestellungen gehört, realisieren.

Im Jahr 2021 (angabegemäß Landesbetrieb Straßenwesen Brandenburg) wird auf der BAB A24 u. a. bei km 171+500, RiFa Hamburg, der dortige Fahrbahndeckenbeton erneuert. Der gesamte Oberbau lag dann zu diesem Zeitpunkt 25 Jahre unter Verkehr. Es wäre daher interessant zu wissen, welcher Verformungsmodul E_{v2} und welcher Verhältnisswert E_{v2}/E_{v1} unter zuvor sorgfältig aufgenommenen Betonplatten nachgewiesen werden kann. Bereiche direkt unter den Fugenkreuzen sind dabei besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Es ist nachzuweisen, ob die 1996 eingebaute RC-AKR-ToB zu veränderten Auflagerungsbedingungen durch das mögliche nichtvorhandensein einer erosionsfesten Auflage oder auch aus unzureichender Entwässerung der ToB geführt hat. Messungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer auf OK Beton und OK RC-AKR-ToB sowie die Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit der Tragschicht sollten in die Untersuchungen miteingeschlossen werden. Es wird

empfohlen, die Erneuerungsmaßnahme wissenschaftlich zu begleiten.

Für die Neubaumaßnahmen auf der BAB A9, km 36+100 bis km 36+200, RiFa Leipzig und km 17+000 bis km 16+900, RiFa Berlin, jeweils mit 30 cm Schottertragschicht aus RC-AKR-Material, wird ein 10-jähriger Beobachtungszeitraum vorgeschlagen. Innerhalb dieser 10 Jahre sollten zweimal jährlich nach der Frostperiode im Frühjahr und vor der Frostperiode im Herbst Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight-Deflectometer als Monitoringinstrument durchgeführt werden. Mit den vorliegenden Messergebnissen während der Neubauphase und den unter Verkehr durchgeführten Tragfähigkeitsmessungen kann nachgewiesen werden, ob die RC-AKR-STS zu veränderten Auflagerungsbedingungen, vor allem durch eindringendes Wasser oder Tausalze im Bereich der Fugenkreuze, führt.

Beim Streckenabschnitt BAB A9, km 36+100 bis km 36+200, RiFa Leipzig, wurde die Querruge (Pressfuge) bzw. der gesamte Oberbau bei km 36+190 instrumentiert. Die Messdaten können in den nächsten 10 Jahren Aussagen über den Zustand der Fugen liefern und es auch ermöglichen, Rückschlüsse aus dem Wasserzutritt über die Fugen in die Schottertragschicht aus RC-AKR-Material hinein zu ziehen.

Zur Frage des Natriumeintrages über die Fugen in eine Tragschicht hinein besteht noch Untersuchungsbedarf. Denkbar wären die von WEISE et al. (2018b) vorgestellten Untersuchungen mit der Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS). Hierfür sollten Bohrkern aus einer hydraulisch gebundenen Tragschicht direkt unter einem Fugenkreuz entnommen werden. An diesen Bohrkernen wird dann die Eindringtiefe mittels LIBS ermittelt. Wichtig ist, dass unterschiedliche Fugenmaterialien und Fugenzustände, welche sicherlich einen Einfluss auf den Natriumeintrag haben, berücksichtigt werden.

Literatur

AURSTAD, J.; HOFF, I. (2002): Crushed Asphalt and Concrete as Unbound Road Materials – Comparison of Field Measurements and Laboratory Investigations. In: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields: Proceedings of the 6th International Conference on the Bearing

Capacity of Roads and Airfields, Lisbon, Portugal Nr. 6, S. 967-977

BRAMESHUBER, W; BROCKMANN, T. (2003): Ringversuch zur Ermittlung des statischen Elastizitätsmoduls von Beton. beton 53, Heft 6, S. 294-298

BREITENBÜCHER, R. (2015): Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Betonbauteilen bei gleichzeitiger zyklischer Beanspruchung und externer Alkali-Zufuhr. Beton- und Stahlbetonbau 110, H.1, S. 2

DÄHN, R.; ARAKCHEEVA, A.; SCHAUB, PH.; PATTISON, P.; CHAPUIS, G.; GROLIMUND, D.; WIELAND, E.; LEEMANN, A. (2016): Application of micro X-ray diffraction to investigate the reaction products formed by the alkali-silica reaction in concrete structures. Cement and Concrete Research 79, S. 49–56

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2015): Empfehlungen für die Schadensdiagnose und Instandsetzung von Betonbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind. beton 65 (2015), H.5, S.488-493

DFG Forschergruppe 1498: Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Betonbauteilen bei gleichzeitiger zyklischer Beanspruchung und externer Alkalizufuhr. Homepage: <http://for1498.sd.ruhr-uni-bochum.de/>

DRESSLER, A. (2013): Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton. Dissertation, Technische Universität München, München.

DREßLER, F.; KRASS, K.; RADENBERG, M.; WEINGART, W. (1994): Eignung von AKR-geschädigtem Beton als Recycling-Baustoff für den Straßenbau. Straße und Autobahn, H.1, S.18-24

EHRlich, N.; HENSEL, O. (2010): Straßenbau heute - Betondecken. 6. Aufl. Hg. v. BetonMarketing Deutschland GmbH. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH

FLOSS, R. (2011): Handbuch ZTVE-StB: Kommentar und Leitlinien mit Kompendium Erd- und Felsbau. 6. Aufl., Kirschbaum-Verl., Bonn

- FREUDENSTEIN, S; EGER, M. (2017): Datenerfassung an Betondecken zur Beurteilung der Fahrbahnsubstanz. Straße und Autobahn 68, Heft 8, S.595-600
- GIEBSON, C. (2013): Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel. Dissertation, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar.
- GIEBSON, C.; STARK, J.; LUDWIG, H.-M. (2016): Besonderheiten der Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen. beton 66 (2016), H.6, S.242-247
- GIEBSON, C.; VOLAND, K.; LUDWIG, H.-M.; MENG, B. (2017): Alkali-silica reaction performance testing of concrete considering external alkalis and preexisting microcracks. Structural Concrete 18, pp. 528-538
- GIEBSON, C.; SEYFARTH, K.; LUDWIG, H.-M. (2019): AKR unter kombinierten Einwirkungen - Einfluss von Vorschädigung und Einwalken. In: Sonderdruck der Veröffentlichungen der DFG Forschergruppe 1498 im Rahmen der 20. ibausil, S. 19-26
- HINRICHS, W. (1998): Schlagversuch an RC-Baustoffen. Straße und Autobahn, H.2, S.64-68
- HÜNGER, K.J. (2013): Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Abschlussbericht zum Projekt FE Nr. 84.0109/2009
- HÜNGER, K.-J.; BÖRNER, C. (2015): Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 88, Bergisch Gladbach
- JEHN, C.; SCHMIDT-DÖHL, F.; FRANKE, L. (2012): Nachträgliche Alkaliaufnahme der Betondecken von Verkehrswegen und der Prüfkörper in Performance-Tests zur Alkalireaktion infolge von Taumittel-Beaufschlagung. beton 62, Heft 10 S. 380-384
- KARCHER, C. (2011): Tragfähigkeit und Tragverhalten von Verkehrsflächen aus Beton. Straße und Autobahn, H.3, S.156-161
- KLEE, J. (2018): Verwendung von Recyclingmaterial aus AKR-geschädigten Betondecken. In: Griffig – Aktuelles über Verkehrsflächen aus Beton, 1/2018, S. 9-13
- KRASS, K.; WEINGART, W. (1993): Eignung von AKR-geschädigtem Beton als Recycling-Baustoff für den Straßenbau. AIF-Forschungsprojekt Nr. 306 D, Abschlussbericht
- LEEMANN, A.; LURA, P. (2013): E-modulus of the alkali-silica-reaction product determined by microindentation. Construction and Building Materials 44 (2013), pp. 221-227
- LEYKAUF, G. (1987): Hydraulisch gebundene Tragschichten aus alternativen Mineralstoffgemischen. Straßen- und Tiefbau 41 (1987), Nr. 1, S. 10-14
- LEYKAUF, G.; MOSS, T. (1987): Laborversuche mit hydraulisch gebundenem Asphaltgranulat und Auswirkung auf die Bemessung. Straße und Autobahn 38 (1987), Heft 11, S. 412-417
- LUSCHE, M. (1971): Einfluss der Höhe von Betonzylindern auf das Ergebnis einer Druck-E-Modul-Messung. beton 21, H. 9, S.365-371
- MARQUORDT, D.; KRELLE, C. (2015): Fahrbahndecken aus Beton aus Sicht des Auftraggebers. Betonstraßentagung 2015, Vorträge der Tagung der Arbeitsgruppe „Betonbauweisen“
- MIELICH, O. (2010): Beitrag zu den Schädigungsmechanismen in Betonen mit langsam reagierender alkaliempfindlicher Gesteinskörnung. DAfStb 583, Berlin
- MIELICH, O. (2019a): Empfehlungen zur Schadensdiagnose AKR-geschädigter Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung der Bauweise. Straße und Autobahn 70 (2019), Heft 8, S. 666-672
- MIELICH, O. (2019b): Rissbildungen und mechanische Betoneigenschaften an einem Fahrbahndeckenbeton mit Alkali-Kieselsäure-Reaktion. beton 69, H. 11
- MIELICH, O.; REINHARDT, H.W.; GARRECHT, H.; GIEBSON, C.; SEYFARTH, K.; LUDWIG, H.-M. (2015a): Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Beton als Bewertungskriterien von AKR-Performance-Prüfungen, Beton- und Stahlbetonbau 110, H.8

- MIELICH, O.; REINHARDT, H.W.; GARRECHT, H.; GIEBSON, C.; SEYFARTH, K.; LUDWIG, H.-M. (2015b): Mechanische Betoneigenschaften als weiteres Bewertungskriterium bei AKR-Performance-Prüfungen. 19. Internationale Baustofftagung IBAUSIL, 16.-18. September in Weimar.
- MIELICH, O.; REINHARDT, H.W.; ÖZKAN, H. (2019): Kriechen und mechanische Eigenschaften von Straßenbetonen nach AKR-provozirender Lagerung. *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), H.6, S.419-429
- MÜLLER, CH.; BORCHERS, I.; EICKSCHEN, E. (2008): Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren. *Straße und Autobahn* 59, H. 5, S. 272-281.
- MOSS, TH. (1985): Recycling von Beton im Straßenbau. *Betonstraßentagung 1985; Schriftenreihe der A.G. Betonstraßen (FGSV, Köln), Heft 17*, S. 58-61
- PFEIFER, L. (1996): Bau von Betondecken auf ungebundenen Tragschichten. *Straße und Autobahn*, H.3, S.143-147
- PFEIFER, L. (1997): Bauliche Schlussfolgerungen aus dem Längsdehnungsbestreben von Betonfahrbahnen. *Straße und Autobahn*, H.6, S.302-306
- PLEAU, R.; BERUBÉ, M.A.; PIGEON, M.; FOURNIER, B.; RAPHAEL, S. (1989): Mechanical behavior of concrete affected by AAR. *Conference Proceedings of the 8th ICAAR, Kyoto*, pp. 721 – 726
- PRZONDZIO, R.; TIMOTHY, J.J.; NGUYEN, M.; WEISE, F.; BREITENBÜCHER, R.; MESCHKE, G.; MENG, B. (2015): Vorschädigungen in Beton infolge zyklischer Beanspruchungen und deren Auswirkung auf Transportprozesse im Hinblick auf eine schädigende AKR. *Beton- und Stahlbetonbau* 110, H.1, S. 3-12
- PRZONDZIO, R.; SCHULTE-SCHREPPING, C.; BREITENBÜCHER, R. (2018): Innovativer Mehrfachprüfstand zur zyklischen Beanspruchung großformatiger Betonprobekörper. *Beton- und Stahlbetonbau* 113, H.1, S. 48-57
- REINHARDT, H.W.; MIELICH, O. (2014): Fracture toughness of alkali-sensitive rocks in alkaline solution. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 70 (2014), S. 552-558.
- SAGARIO, M.L.Q.; PHILLIP, S.K. OOI. (2011): Assessing the Compactibility of Recycled Concrete Aggregate. In: *Transportation Research Record H.2253*, S. 10-21
- SANCHEZ, L.F.M.; FOURNIER, B.; JOLIN, M.; MICHELL, C.; BASTIEN, J. (2017): Overall assessment of Alkali-Aggregate Reaction (AAR) in concretes presenting different strengths and incorporating a wide range of reactive aggregate types and natures. *Cement and Concrete Research* 93, pp. 17-31
- SCRIVENER, K.L.; CRUMBIE, A.K.; LAUGENSEN, P. (2004): The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12, S. 411-421.
- SEYFARTH, K.; GIEBSON, C.; STARK, J. (2009): AKR-Performance-Prüfung für Fahrbahndecken aus Beton: Erfahrungen aus Labor und Praxis im Vergleich. 17. Internationale Baustofftagung (ibausil), Weimar, *Tagungsbericht Band 2* (2009), S. 255-260
- SIEBEL, E.; BÖHM, M.; BORCHERS, I.; MÜLLER, C.; BOKERN, J.; SCHÄFER, E. (2006): AKR-Prüfverfahren – Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz. Teil 1; Teil 2. *beton* 56 (2006), H. 12, S.599-604; *beton* 57 (2007), H. 1-2, S. 63-71
- STARK, J. (2008): Alkali-Kieselsäure-Reaktion. *Schriftenreihe FIB Nr. 3*, Bauhaus-Universität Weimar
- STARK, J.; FREYBURG, E.; SEYFARTH, K.; GIEBSON, C. (2006): AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen. *beton* 56 (2006), H. 12, S.574-581
- VASSILIOU, K. (1989): Bautechnische Eigenschaften von ungebundenen Tragschichten aus wiederverwendbaren Baustoffen. *Dissertation Karlsruhe, Universität Fridericana zu Karlsruhe (TH)*
- VILLARET, S. (2014): Endbereiche – Längsdehnungsverhalten von Betonfahrbahnen. *Straße und Autobahn* 65, Heft 9, S.680 – 688
- WEISE, F.; WIEDMANN, A.; VOLAND, K. KOTAN, E.; EHRIG, K.; MÜLLER, H.S. (2015): Auswirkungen von Ermüdungsbeanspruchungen auf Struktur und Eigenschaften von Fahrbahnde-

- ckenbetonen. Beton- und Stahlbetonbau 110, H.1, S. 22-33
- WEISE, F. (2017): 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/wissenstransfer/veranstaltungsarchiv/2017/akr-fachforum/download/>
- WEISE, F.; KIND, T.; STELZNER, L; WIELAND, M. (2018a): Dunkelverfärbung der Betonfahrbahndecke im AKR-Kontext. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), H. 9, S. 647-655
- WEISE, F.; MILLAR, S.; WILSCH, G. (2018b): Analyse des Tausalzeintrags in Fahrbahndeckenbetone mit neuartiger Prüftechnik. Beton- und Stahlbetonbau 113 (2018), H. 9, S. 656-666
- WEISE, F.; KRÜTT, E.; MENG, B. (2018c): AKR unter kombinierten Einwirkungen - Rissbildungs- und Transportmechanismen. 20. Internationale Baustofftagung (ibausil), Weimar, Tagungsbericht Band 2, S. 93-105
- WIEDMANN, A.; WEISE, F.; KOTAN, E.; MÜLLER, H.S.; MENG, B. (2017): Effects of fatigue loading and alkali-silica reaction on the mechanical behavior of pavement concrete. Structural Concrete 18, pp. 539-549
- Normen, Richtlinien, Merkblätter**
- ALKALI-RICHTLINIE (2013): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Ausgabe Oktober 2013
- BTR RC-StB 14 (2014): Brandenburgische Technische Richtlinien für Recycling-Baustoffe im Straßenbau. Gemeinsame Richtlinien des Ministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz und des Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg
- ZTV Beton-StB (2007): Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln
- ZTV SoB-StB 04/07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe 2004 / Fassung 2007, Köln
- TL SoB-StB 04/07: Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe 2004 / Fassung 2007, Köln
- TL Gestein-StB 04/07: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe 2004 / Fassung 2007, Köln
- AP Trag Teil B 2.2: Arbeitspapier – Tragfähigkeit. Teil B 2.2 – Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Betonbauweisen (AP Trag Teil B 2.2). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe 2012, Köln
- AP Trag Teil C 2.2: Arbeitspapier – Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen. Teil C 2.2 – Falling Weight Deflectometer (FWD): Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen – Betonbauweisen (AP Trag Teil C 2.2). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe 2017, Köln
- TP B-StB – Teil 1.1.09 (2018): Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen: AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Betonbauweisen, Ausgabe Juni, Köln
- TP B-StB – Teil 1.1.10 (2018): Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen: AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (Klimawechselagerung). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe Juni, Köln
- RDO BETON 09: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau

- von Verkehrsflächen (RDO Beton 09). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe 2009, Köln
- RStO (2012): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln
- Rundschreiben Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2012): Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die Bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton. Bonn, April 2012
- RILI SA (2005): Straßen- und Brückenbautechnik; Richtlinie zur Verwertung mineralischer Abfälle im Straßenbau, Fassung 2005 - Anlage 1: Anhang: Richtlinie zur Verwertung mineralischer Abfälle im Straßenbau. Ministerium für Bau und Verkehr, Verwaltungsvorschrift Sachsen-Anhalt
- Merkblatt (1998) zur Wiederverwendung von Beton aus Fahrbahndecken. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Ausgabe 1998, Köln
- DIN 1048-5 (1991): Prüfverfahren für Beton – Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Beuth Verlag
- DIN 18127 (2012): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch. Beuth Verlag
- DIN 18134 (2012): Baugrund - Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch. Beuth Verlag
- DIN 18135 (2012): Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Eindimensionaler Kompressionsversuch. Beuth Verlag
- DIN 52450 (1985): Prüfung anorganischer nicht-metallischer Baustoffe; Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern. Beuth Verlag
- DIN EN 933-1 (2012): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren. Deutsche Fassung EN 933-1:2012, Beuth Verlag
- DIN EN 933-4 (2015): Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl. Deutsche Fassung EN 933-4:2008, Beuth Verlag
- DIN EN 1097-2 (2010): Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung. Deutsche Fassung EN 1097-2:2010, Beuth Verlag
- DIN EN 1367-1 (2007): Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel. Deutsche Fassung EN 1367-1:2007, Beuth Verlag
- DIN EN 12390-2 (2009): Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Deutsche Fassung EN 12390-2:2009, Beuth Verlag
- DIN EN 12390-13 (2009): Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul). Deutsche Fassung EN 12390-13:2013, Beuth Verlag
- DIN EN 13286-47 (2012): Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes. Beuth Verlag

Bilder

- Bild 3-1: Prinzip zur Gewinnung von Probekörpern aus Bohrkernen (Durchmesser 350 mm).
- Bild 3-2: Prinzip zur Gewinnung von Probekörpern aus Bohrkernen.
- Bild 3-3: Schleibinger Truhe zur Bestimmung der Nachdehnung (links), angepasste Edelstahlbehälter für die prismatischen Prüfkörper mit den Abmessungen 10 x 10 x 28 cm³ (rechts).
- Bild 3-4: Über den Prüfzeitraum im Eimer befeuchtetes RC-AKR-Material für die AKR-provozierende Lagerung im Klima (40/100).

- Bild 3-5: Versuchsaufbau einaxialer Kompressionsversuch (links) und gefüllter Ödometertopf (rechts).
- Bild 3-6: Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer auf der Oberfläche der verdichteten ToB (links) und auf dem Fahrbahndeckenbeton (rechts).
- Bild 3-7: Statischer Plattendruckversuch auf einer ungebundenen Tragschicht (links) und dynamischer Plattendruckversuch im Bohrloch auf einer ungebundenen Tragschicht (rechts).
- Bild 3-8: Versuchsanordnung eines Biegebalkens mit Folienumhüllung während des Dauerschwingversuchs.
- Bild 4-1: BAB A9, RF Berlin, km 24+650 (links) und km 23+243 (rechts), Übersichtsaufnahme.
- Bild 4-2: BAB A9, Standspur, Schadenskategorie 0, an der Oberfläche keine Schäden sichtbar.
- Bild 4-3: BAB A9, vier Ausbaustücke (links) und Ausbaustück mit Horizontalrissbildung (rechts).
- Bild 4-4: BAB A9, 1.ÜS/2.ÜS, Schadenskategorie I, Dunkelverfärbung im Bereich des Fugenkreuzes.
- Bild 4-5: BAB A9, Ausbaustück (links) und bereits ausgeprägte Horizontalrissbildung (rechts).
- Bild 4-6: BAB A9, LS/1.ÜS, Schadenskategorie II, beginnende Rissbildung im Bereich der Fugenkreuze.
- Bild 4-7: BAB A9, Ausbaustück (links) und deutlich ausgeprägte Horizontalrissbildung (rechts).
- Bild 4-8: BAB A9, LS/1.ÜS, Schadenskategorie III, beginnende Verschotterung.
- Bild 4-9: BAB A9, Ausbaustück (links) und Horizontalrissbildung mit Ausbruchstück (rechts).
- Bild 4-10: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Schadenskategorie 0 und I (1), während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-11: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Schadenskategorie II (2) und III (3), während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-12: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A9-0 (links) und A9-1 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.
- Bild 4-13: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A9-2 (links) und A9-3 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.
- Bild 4-14: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A9-Global, Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.
- Bild 4-15: Mittelwerte des Widerstands gegen Zerkümmern mit dem Schlagversuch (SZ8/12,5) für RC-AKR-Material in Abhängigkeit der Varianten A9-0 bis -3 und A9-Global.
- Bild 4-16: Korngrößenverteilung A9-0 (links) und A9-1 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.
- Bild 4-17: Korngrößenverteilung A9-2 (links) und A9-3 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.
- Bild 4-18: Korngrößenverteilung A9-Global jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.
- Bild 4-19: Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300 mm) der Varianten A9-0 bis -3 und A9-Global während der Lagerung im Klima (40/100).

- Bild 4-20: BAB A14, RF Magdeburg, km 143+500 (links) und km 144+200 (rechts), Übersichtsaufnahme.
- Bild 4-21: BAB A14, LS/1.ÜS, Schadenskategorie 0, an der Oberfläche keine Schäden sichtbar.
- Bild 4-22: BAB A9, vier Ausbaustücke (links) und Ausbaustück mit Horizontalrissbildung (rechts).
- Bild 4-23: BAB A14, LS/1.ÜS, Schadenskategorie I, Dunkelverfärbung im Bereich des Fugenkreuzes.
- Bild 4-24: BAB A14, Ausbaustücke (links) und bereits ausgeprägte Horizontalrissbildung (rechts).
- Bild 4-25: BAB A14, LS/1.ÜS, Schadenskategorie II, beginnende Rissbildung im Fugenkreuz.
- Bild 4-26: BAB A14, Ausbaustücke (links) und deutlich ausgeprägte Horizontalrissbildung (rechts).
- Bild 4-27: BAB A14, LS/1.ÜS, Schadenskategorie III, beginnende Verschotterung.
- Bild 4-28: BAB A14, Ausbaustücke (links) und Horizontalrissbildung mit Ausbruchstücken (rechts).
- Bild 4-29: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Schadenskategorie 0 und I (1), während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-30: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Schadenskategorie II (2) und III (3), während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-31: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A14-0 (links) und A14-1 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.
- Bild 4-32: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung A14-2 (links) und A14-3 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.
- Bild 4-33: Mittelwerte des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch (SZ8/12,5) für RC-Material der BAB A14 in Abhängigkeit der Varianten A14-0 bis -3.
- Bild 4-34: Korngrößenverteilung A14-0 (links) und A14-1 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.
- Bild 4-35: Korngrößenverteilung A14-2 (links) und A14-3 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.
- Bild 4-36: Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300 mm) der Varianten A14-0 bis -3 während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-37: BAB A9, RF Leipzig, km 34+000 (links) und km 36+000 (rechts), Übersichtsaufnahme.
- Bild 4-38: BAB A9, RF Leipzig, km 36+500 (links) und km 39+000 (rechts), Übersichtsaufnahme.
- Bild 4-39: Bohrkernentnahmestellen BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 36+038.
- Bild 4-40: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 36+068 (links Standspur (SS), rechts 2.Überholspur (2.ÜS)) während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-41: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 36+068 (links 1.Überholspur (1.ÜS), rechts Lastspur (LS)) während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-42: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmestellen bei km 34+000 (links) und km 39+000 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei

- Verwendung eines RC-Gemisches.
- Bild 4-43: Mittelwerte des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch (SZ8/12,5) für RC-AKR-Material der BAB A9 in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 34+000 und km 39+000.
- Bild 4-44: Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 34+000 (links) und km 39+000 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.
- Bild 4-45: Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300 mm) mit RC-AKR-Material von km 34+000 und km 39+000 während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-46: BAB A9, RF Berlin, km 22+400 (links) und km 21+000 (rechts), Übersichtsaufnahme.
- Bild 4-47: BAB A9, RF Berlin, km 19+200 (links) und km 17+800 (rechts), Übersichtsaufnahme.
- Bild 4-48: Bohrkernentnahmestellen BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 21+000.
- Bild 4-49: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 21+000 (links Standspur (SS), rechts 2.Überholspur (2.ÜS)) während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-50: Nachdehnung an prismatischen Prüfkörpern in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 21+000 (links 1.Überholspur (1.ÜS), rechts Lastspur (LS)) während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 4-51: Mittelwert (n=3) der Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 17+800 (links) und km 19+200 (rechts), Schwankungsbreiten und Anforderung an die Korngrößenverteilung 0/32 STS unter Betondecke bei Verwendung eines RC-Gemisches.
- Bild 4-52: Mittelwerte des Widerstands gegen Zertrümmerung mit dem Schlagversuch (SZ8/12,5) für RC-Material der BAB A9 in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 17+800 und km 19+200.
- Bild 4-53: Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 17+800 (links) und km 19+200 (rechts) jeweils nach Aufbereitung im Prallbrecher, nach dem einaxialen Kompressionsversuch (Ödometerversuch) und nach AKR-provozierender Lagerung im Klima (40/100) über einen Zeitraum von 9 Monaten.
- Bild 4-54: Dehnung von HGT-Probekörpern (150/300 mm) mit RC-AKR-Material von km 17+800 und km 19+200 während der Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 5-1: Übersichtsaufnahme über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 36+100 und km 36+200 vor (links) und nach (rechts) dem Einbau der Fahrbahndecke.
- Bild 5-2: NTC 10k Ω (Temperaturmessung, links) und Bauteil für die Impedanzmessung (Feuchtigkeitsmessung, rechts) sowie der an der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart entwickelte Sensorstab (CFK U-Profil, rechts).
- Bild 5-3: Lage der Sensorstäbe in der Schottertragschicht (STS) und im frostunempfindlichen Material (FU).
- Bild 5-4: Lage der Sensorstäbe am Tagesansatz (spätere Pressfuge) bei km 36+190.
- Bild 5-5: Lage der Sensorstäbe am Tagesansatz (Querfuge als Pressfuge ausgebildet) bei km 36+190.
- Bild 5-6: Fertiggestellter Gerätekasten bei km 36+190.
- Bild 5-7: Übersichtsaufnahme über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 17+000 und km 16+900 vor (links) und nach (rechts) dem Einbau der Fahrbahndecke.
- Bild 5-8: Übersichtsaufnahme (links) über den 100 m langen Streckenabschnitt zwischen km 85+700 und km 85+600 und Oberfläche der Schottertragschicht (rechts) nach dem Verdichten bei km 85+620.

- Bild 6-1: Übersichtsaufnahme (links) und Dunkelverfärbung im Bereich von Quer- und Längsfugen (rechts) bei km 171+500.
- Bild 6-2: Bohrloch nach Bohrkernentnahme (links) und nach dem Entfernen von überschüssigem Bohrwasser.
- Bild 6-3: RC-AKR-ToB aus Bohrloch 1 und Korngrößenverteilungen an RC-AKR-ToB 0/32, welche aus drei Bohrlöchern bei km 171+500 entnommen wurde.
- Bild 6-4: Übersichtsaufnahme bei km 155+000 in (links) und gegen (rechts) die Fahrtrichtung.
- Bild 6-5: Bohrkern 1 (links) und RC-ToB im Bohrloch 1 (rechts) nach Bohrkernentnahme
- Bild 6-6: Reprofilierter RC-ToB im Bohrloch 2 (links) und verfestigte RC-AKR-ToB im Bohrloch 2 nach Entfernen der rd. 15 cm starken reprofilierten RC-ToB (rechts).
- Bild 6-7: RC-ToB aus Bohrloch 2 bei km 155+000 und Korngrößenverteilung an RC-ToB 0/32, welches aus den zwei Bohrlöchern bei km 155+000 entnommen wurde.
- Bild 7-1: Schlagzertrümmerungswerte SZ8/12,5 aus DREßLER ET AL. (1994).
- Bild 7-2: Mittelwerte ($n = 12$) des statischen E-Moduls (links) und der Druckfestigkeit (rechts), ermittelt an Zylindern (150/300), zusammengefasst für alle Varianten A9-0 bis -3 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 7-3: Mittelwerte ($n = 12$) des statischen E-Moduls (links) und der Druckfestigkeit (rechts), ermittelt an Zylindern (150/300), zusammengefasst für alle Varianten A14-0 bis -3 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 7-4: Mittelwerte ($n = 6$) des statischen E-Moduls (links) und der Druckfestigkeit (rechts), ermittelt an Zylindern (150/300), zusammengefasst für die Varianten km 39+000 / km 34+000 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 7-5: Mittelwerte ($n = 6$) des statischen E-Moduls (links) und der Druckfestigkeit (rechts), ermittelt an Zylindern (150/300), zusammengefasst für die Varianten km 19+200 / km 17+800 nach 28 Tagen Lagerung gemäß DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie 90, 180 und 270 Tagen Lagerung im Klima (40/100).
- Bild 8-1: Berücksichtigung der Bauweisen (einschichtig oder zweischichtig) mit AKR-empfindlichen und -unempfindlichen Betonzusammensetzungen sowie internen und externen Alkaliquellen (aus: MIELICH, 2019a).
- Bild 8-2: Links: Bohrkern mit und ohne Horizontalriss nahe Fugenkreuz (Abstand Bohrlochwandung zur Fuge rd. 3 und 21 cm) Rechts: Bohrkern ohne Horizontalriss an einer rd. 1,5 Jahre alten Betondecke (aus: MIELICH, 2019a).
- Bild 8-3: Prinzip zur Gewinnung von Probekörpern aus Bohrkernen mit Durchmesser 350 mm aus Plattenmitte.
- Bild 8-4: Links: Oberfläche Fahrbahndecke nach dem Zertrümmern mit der Polygonalbandagenwalze. Rechts: Nach Zertrümmern ohne nennenswerte Rissbildung über die Deckenhöhe.
- Bild 8-5: Links: Oberfläche Fahrbahndecke beim Rubblizing (Quelle: Dr. Rother). Rechts: Oberfläche nach dem Zertrümmern, ohne nennenswerte Tiefenwirkung (Quelle: Dr. Rother).
- Bild 8-6: Links: Polygonalbandagenwalze (Würfelwalze), Rechts: Fallschwert.
- Bild 8-7: Links: Meißel (Quelle: Dr. Wieland), Rechts: Fräse.
- Bild 8-8: Links: Aufbruchhammer Power Sledge (Quelle: Frau Klee), Rechts: Detail zum Aufbruchhammer.
- Bild 10-1: Sieblinienbereich für ein RC-Gemisch 0/32 für Schottertragschichten unter

Betondecke (links) und Baustoffgemisch 0/32 für Frostschutzschichten (rechts) nach TL SoB-StB 04/07.

Frostbeanspruchung für das RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher.

Tabellen

- Tab. 2-1: Aufbruch AKR-geschädigter Betondecken (KLEE, 2018).
- Tab. 4-1: Übersicht der Ausbaustücke (A9-0 bis A9-3), auf dem Streckenlos entnommenes RC-AKR-Material (A9-Global) und Bohrkerne (A9-D1 bis A9-D8) der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 24+650 bis km 23+243
- Tab. 4-2: Lesehilfe über die Zusammenstellung der Ergebnisse.
- Tab. 4-3: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (D1) und der Plattenmitte (D2).
- Tab. 4-4: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (D3) und der Plattenmitte (D4).
- Tab. 4-5: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (D5) und der Plattenmitte (D6).
- Tab. 4-6: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (D7) und der Plattenmitte (D8).
- Tab. 4-7: CBR-Werte bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit der Varianten A9-0 bis -3.
- Tab. 4-8: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A9 vor 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).
- Tab. 4-9: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A9 nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).
- Tab. 4-10: Kornform und Widerstand gegen
- Tab. 4-11: Mittelwert des statischen E-Moduls der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.
- Tab. 4-12: Mittelwert der Druckfestigkeit der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.
- Tab. 4-13: Statische Biegezugfestigkeit vor (β_{BZvor}) und nach (β_{BZnach}) dem Dauerschwingversuch in Abhängigkeit der Schadens-kategorie (0 bzw. 3) und des Probenalters (60 bzw. 270 Tage Lagerung in der 40 °C Nebelkammer).
- Tab. 4-14: Übersicht der Ausbaustücke (A14-0 bis A14-3) und der Bohrkerne (A14-D1 bis A14-D8) der BAB A14, Leipzig – Magdeburg, Richtungsfahrbahn Magdeburg, km 143+500 bis km 144+200
- Tab. 4-15: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A14 aus dem Fugenbereich (D1) und der Plattenmitte (D2).
- Tab. 4-16: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A14 aus dem Fugenbereich (D3) und der Plattenmitte (D4).
- Tab. 4-17: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A14 aus dem Fugenbereich (D5) und der Plattenmitte (D6).
- Tab. 4-18: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A14 aus dem Fugenbereich (D7) und der Plattenmitte (D8).
- Tab. 4-19: CBR-Werte bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit der Varianten A14-0 bis -3.
- Tab. 4-20: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A14 vor 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).

- Tab. 4-21: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall, des Schädigungsgrads und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material der BAB A14 nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).
- Tab. 4-22: Kornform und Widerstand gegen Frostbeanspruchung für das RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher.
- Tab. 4-23: Mittelwerte des statischen E-Moduls der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.
- Tab. 4-24: Mittelwerte der Druckfestigkeit der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 280 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.
- Tab. 4-25: Statische Biegezugfestigkeit vor ($\beta_{BZ_{vor}}$) und nach ($\beta_{BZ_{nach}}$) dem Dauerschwingversuch für die Varianten A14-0 und A14-3 sowie in Abhängigkeit des Probenalters (60 bzw. 270 Tage Lagerung in der 40 °C Nebelkammer).
- Tab. 4-26: Übersicht von entnommenem RC-AKR-Material und Bohrkernen aus der Fahrbahndecke der BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 33+400 bis km 40+305.
- Tab. 4-27: Lesehilfe über die Zusammenstellung der Ergebnisse.
- Tab. 4-28: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (75-Fuge) und Plattenmitte (85-Mitte).
- Tab. 4-29: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (51-Fuge) und Plattenmitte (61-Mitte).
- Tab. 4-30: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (32-Fuge) und Plattenmitte (42-Mitte).
- Tab. 4-31: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (13-Fuge) und Plattenmitte (23-Mitte).
- Tab. 4-32: CBR-Werte bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 34+000 und km 39+000.
- Tab. 4-33: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen bei km 34+000 und km 39+000 vor 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).
- Tab. 4-34: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen km 34+000 und km 39+000 nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).
- Tab. 4-35: Kornform und Widerstand gegen Frostbeanspruchung für das RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher.
- Tab. 4-36: Mittelwerte des statischen E-Moduls der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.
- Tab. 4-37: Mittelwerte der Druckfestigkeit der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 280 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.
- Tab. 4-38: Statische Biegezugfestigkeit vor ($\beta_{BZ_{vor}}$) und nach ($\beta_{BZ_{nach}}$) dem Dauerschwingversuch für die Varianten km 34+000 und km 39+000 sowie in Abhängigkeit des Probenalters (60 bzw. 270 Tage Lagerung in der 40 °C Nebelkammer).
- Tab. 4-39: Übersicht von entnommenem RC-AKR-Material und Bohrkernen aus der Fahrbahndecke der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 22+565 bis km 16+500
- Tab. 4-40: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (75-Fuge) und Plattenmitte (85-Mitte).
- Tab. 4-41: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9

- aus dem Fugenbereich (51-Fuge) und Plattenmitte (61-Mitte).
- Tab. 4-42: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (32-Fuge) und Plattenmitte (42-Mitte).
- Tab. 4-43: Ergebnisse an Bohrkernen der BAB A9 aus dem Fugenbereich (13-Fuge) und Plattenmitte (23-Mitte).
- Tab. 4-44: CBR-Werte bei optimalem Wassergehalt und nach 24 h Wasserlagerung in Abhängigkeit der Entnahmestelle bei km 17+800 und km 19+200.
- Tab. 4-45: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen bei km 17+800 und km 19+200 vor 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).
- Tab. 4-46: Erstbelastungs-, Entlastungs- und Wiederbelastungsmoduln in Abhängigkeit vom Spannungsintervall und der Einbaudichte für das RC-AKR-Material bei den Entnahmestellen bei km 17+800 und km 19+200 nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).
- Tab. 4-47: Kornform und Widerstand gegen Frostbeanspruchung für das RC-AKR-Material nach Aufbereitung im Prallbrecher.
- Tab. 4-48: Mittelwerte des statischen E-Moduls der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.
- Tab. 4-49: Mittelwerte der Druckfestigkeit der hergestellten HGTs nach 28 Tagen Lagerung nach DIN EN 12390-2:2009-08 (Feuchtekammer) sowie nach 90, 180 und 270 Tagen 40 °C Nebelkammerlagerung.
- Tab. 4-50: Statische Biegezugfestigkeit vor (bZvor) und nach (bZnach) dem Dauerschwingversuch für die Varianten km 17+800 und km 19+200 sowie in Abhängigkeit des Probenalters (60 bzw. 270 Tage Lagerung in der 40 °C Nebelkammer).
- Tab. 5-1: Verformungsmoduln auf der OK STS und OK Neubau, ermittelt mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD), mit dem leichten Fallgewichtsgerät (LFG) und dem statischen Plattendruckversuch (PDV) auf dem Streckenabschnitt zwischen km 36+100 bis km 36+200.
- Tab. 5-2: Verformungsmoduln, ermittelt auf der OK STS und OK Neubau mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD), mit dem leichten Fallgewichtsgerät (LFG) und dem statischen Plattendruckversuch (PDV) auf dem Streckenabschnitt zwischen km 17+000 bis km 16+900.
- Tab. 5-3: Verformungsmoduln, ermittelt auf der OK STS mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD), mit dem leichten Fallgewichtsgerät (LFG) und dem statischen Plattendruckversuch (PDV) auf dem Streckenabschnitt zwischen km 85+700 bis km 85+600.
- Tab. 5-4: Begleitende Untersuchungen am Naturschotter für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel.
- Tab. 6-1: Äquivalenter Verformungsmodul Eä, Bettungsmodul E0 und Anzahl der Messpunkte, ermittelt auf OK Beton in Plattenmitte, Querfuge und Fugenkreuz mit Angabe des Variationskoeffizienten (Klammerwert).
- Tab. 7-1: Auswertung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der Entnahmerichtung der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 24+650 bis km 23+243.
- Tab. 7-2: Auswertung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der Entnahmerichtung der BAB A14, Leipzig – Magdeburg, Richtungsfahrbahn Magdeburg, km 143+500 bis km 144+200.
- Tab. 7-3: Auswertung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der Entnahmerichtung BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 36+038.
- Tab. 7-4: Auswertung der Elastizitätsmoduln in Abhängigkeit der Entnahmerichtung BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 21+000.

- Tab. 7-5: Elastizitätsmodul vor und nach ($E\text{-Modul}_{\text{vor}}$, $E\text{-Modul}_{\text{nach}}$) sowie Druckfestigkeit nach der Bestimmung der Nachdehnung im Klima (40/100) und der verbleibenden Dehnung im Klima (20/65) der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 24+650 bis km 23+243 (Klammerwerte in %).
- Tab. 7-6: Elastizitätsmodul vor und nach ($E\text{-Modul}_{\text{vor}}$, $E\text{-Modul}_{\text{nach}}$) sowie Druckfestigkeit nach der Bestimmung der Nachdehnung im Klima (40/100) und der verbleibenden Dehnung im Klima (20/65) der BAB A14, Leipzig – Magdeburg, Richtungsfahrbahn Magdeburg, km 143+500 bis km 144+200 (Klammerwerte in %).
- Tab. 7-7: Elastizitätsmodul vor und nach ($E\text{-Modul}_{\text{vor}}$, $E\text{-Modul}_{\text{nach}}$) sowie Druckfestigkeit nach der Bestimmung der Nachdehnung im Klima (40/100) und der verbleibenden Dehnung im Klima (20/65) der BAB A9, Berlin – Leipzig, Richtungsfahrbahn Leipzig, km 36+038 (Klammerwerte in %).
- Tab. 7-8: Elastizitätsmodul vor und nach ($E\text{-Modul}_{\text{vor}}$, $E\text{-Modul}_{\text{nach}}$) sowie Druckfestigkeit nach der Bestimmung der Nachdehnung im Klima (40/100) und der verbleibenden Dehnung im Klima (20/65) der BAB A9, Leipzig – Berlin, Richtungsfahrbahn Berlin, km 21+000 (Klammerwerte in %).
- Tab. 7-9: Einfluss auf die Anforderungen einer ToB (Frostschuttschicht FSS, Schottertragschicht STS) von Baustoffgemischen aus natürlichen Gesteinskörnungen, RC-Material aus Beton aufbruch und RC-Material aus AKR-geschädigtem Fahrbahndeckenbeton.
- Tab. 7-10: CBR-Werte am RC-AKR-Material vs. Naturschotter.
- Tab. 7-11: Einaxialer Kompressionsversuch nach der Aufbereitung im Prallbrecher.
- Tab. 7-12: Einaxialer Kompressionsversuch nach 9-monatiger Lagerung im Klima (40/100).
- Tab. 7-13: Schottertragschichten aus RC-AKR-Material vs. Baustoffgemisch aus natürlichen Gesteinsvorkommen.
- Tab. 7-14: Tragfähigkeitsmessungen auf OK Fahrbahndeckenbeton mit Schottertragschicht aus RC-AKR-Material im Alter von 28 Tagen ohne Verkehr und 1,6 Jahre unter Verkehrslast.
- Tab. 7-15: Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling-Weight Deflectometer (FWD) und mit dem leichten Fallgewichtsgerät auf den Bestandsstrecken der BAB A14, A24 und A9 jeweils im Bohrloch auf STS, RC-STG und HGT.
- Tab. 7-16: Tragfähigkeitsmessungen auf OK Fahrbahndeckenbeton mit Schottertragschichten aus RC-AKR-Material (Neubau) vs. Schottertragschichten aus RC-AKR-Material an einer 21 Jahre alten Bestandsstrecke.

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

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, Miehl

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, Tiemann, 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, Scherkenbach, 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 Asphalteigenschaften 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 duraBAS

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

Durner
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.

S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

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

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

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

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

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

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

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

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich
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

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