

**Beurteilung von
Betonfahrbahndecken
hinsichtlich deren
in-situ AKR-Potenzial
bei Gesteinskörnungen
nach dem ARS Nr. 04/2013**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 162

bast

Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

von

Matthias Böhm
Eberhard Eikschen
Wibke Hermerschmidt
Christoph Müller
Roland Perkes

VDZ-gGmbH
Düsseldorf

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 162

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 08.0235:
Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Fachbetreuung
Janin Kuhnsch

Fachreferat
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 978-3-95606-636-8

Bergisch Gladbach, November 2021

Kurzfassung – Abstract

Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potential bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Schwerpunkt des Vorhabens waren Untersuchungen an bisher ungeschädigten Betonfahrbahndecken im Bundesfernstraßennetz, in denen vor rund 30 Jahren Gesteinskörnungen zur Anwendung kamen, die nach Auskunft der BAST gemäß den heutigen Bestimmungen nach dem ARS Nr. 04/2013 teilweise als alkaliempfindlich einzustufen sind.

In Abstimmung mit der BAST wurden insgesamt fünf Streckenabschnitte auf den Bundesautobahnen A7, A92 und A93 in Bayern für die Untersuchungen ausgewählt. Im ersten Bearbeitungsschritt erfolgte eine visuelle Begutachtung der Betondecken und eine Zuordnung zu AKR-Schadenskategorien. Des Weiteren wurden AKR-relevante Kennwerte der verwendeten Betonzusammensetzungen anhand der verfügbaren Bestandsunterlagen zusammengestellt. Im Anschluss erfolgte die Entnahme von Bohrkernen aus den Betondecken und die Präparation von Probekörpern für weitere Untersuchungen. Untersucht wurden die mechanischen Eigenschaften (Druck- und Spaltzugfestigkeit), der vorhandene Schädigungsgrad infolge AKR (Dünnschliffmikroskopie) sowie das Restdehnungspotential infolge AKR (Dehnung im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr und anschließende Dünnschliffmikroskopie).

Mittels Röntgenbeugungsanalyse und Dünnschliffmikroskopie erfolgten Vergleiche zwischen den im Beton vorhandenen und den aktuell in den Abbaustätten produzierten Gesteinskörnungen, soweit aktuelle Proben der Gesteinskörnungen beschafft werden konnten. Die aktuellen Gesteinskörnungsproben wurden mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie charakterisiert.

Bei der visuellen Begutachtung der Fahrbahndecken wurden an keinem der fünf Streckenabschnitte AKR-typische Schäden festgestellt. Die Laboruntersuchungen zum Schädigungsgrad und zum Restdehnungspotential infolge AKR bestätigten im Wesentlichen den aufgrund der Begutachtung angenommenen hohen AKR-Widerstand der Betone.

Assessment of concrete road pavements with regard to their in-situ ASR potential for aggregates according to the ARS No. 04/2013

The project focused on investigations of previously undamaged concrete road pavements in the federal highway network, in which aggregates were used some 30 years ago which according to the Federal Highway Research Institute pursuant to the current regulations laid down in the General Circular on Road Construction (ARS) No. 04/2014 partly have to be classified as alkali-reactive.

In consultation with the Federal Highway Research Institute a total of five road sections from the Federal Highways A7, A92 and A93 in Bavaria were selected for the investigations. First of all a visual inspection of the concrete road pavements and a classification to ASR damage categories were carried out. Moreover, ASR characteristic values of the concrete compositions used were compiled from the available inventory documents. Then the sampling of drill cores from concrete pavements took place and the test specimens were prepared for further investigations.

The mechanical properties (compressive and splitting tensile strength), the existing degree of damage due to ASR (thin-section microscopy) and the residual strain potential due to ASR (expansion in the 60°C concrete test with alkali supply and subsequent thin-section microscopy) were investigated.

By means of X-ray diffraction analysis and thin-section microscopy, comparisons were made between the aggregates present in the concrete and those currently produced in the quarries, as far as current samples of the aggregates could be obtained. The current aggregate samples were characterized by the rapid test method according to the Alkali Guidelines.

During the visual inspection of the road pavements, no damage typical for ASR was found on any of the five sections. The laboratory tests on the degree of damage and the potential for residual strain as a result of ASR essentially confirmed the high ASR resistance of the concretes assumed on the basis of the visual assessment.

1 Problem definition and objective

The suitability of aggregates or concrete compositions respectively with regard to their ASR sensitivity has to be assessed since the introduction of the General Circular on Road Construction (ARS) for the "Prevention of damage to concrete pavements as a result of an Alkali-Silica Reaction (ASR)" No. 04/2013 in compliance with a nationwide stipulated procedure. This applies to all roads of load classes Bk 100 to Bk 1,8 according to the Directives for the standardization of the superstructures of trafficked surfaces (RStO) 12 (moisture class WS).

It is therefore also necessary to consider those aggregates which in the past (before 2013) were not suspected of being potentially alkali-reactive. According to data of the Federal Highway Research Institute, as a result of carrying out WS basic tests in accordance with the ARS No. 04/2013, in particular, in Bavaria aggregates were classified as alkali-sensitive, with which concrete pavements were partially built for decades on which - by a general statement - until today no signs of a harmful ASR have been detected. This raises the question of whether the behavior of such aggregates or concrete pavements with the test methods and assessment criteria to be applied according to ARS No. 04/2013 is correctly depicted.

Aim of the research project No. FE 08.0235/2014/GGB "Assessment of concrete road pavements with regard to their in-situ ASR potential for aggregates according to the ARS No. 04/2013" was a comparison of the practical behavior of previously largely undamaged concrete road pavements and the behavior of the corresponding concretes or aggregates in laboratory tests. The investigations should focus on undamaged concrete pavements in which aggregates were used some 30 years ago, which according to the information provided by the Federal Highway Research Institute are classified as alkali-sensitive according to the current provisions of the ARS No. 04/2013.

2 Works done and results

2.1 Selection and inspection of concrete roads

In consultation with the Federal Highway Research Institute altogether five sections of the Bavarian Highways were selected for investigations. These include two sections of the A7 (N1 and N2), two sections of the A92 (F and W) and one section of the A93 (WE). Three of the concrete road pavements had a single-layer construction and two a two-layer construction.

In a first processing step, the visual inspection of the concrete surfaces and an assignment to the categories of the ASR were carried out. No damage typical of ASR was found on any of the five sections so that it was assigned to category 0.

2.2 Compilation of construction-related data

On the basis of the documents provided by the competent highway directorates of South-Bavaria and North-Bavaria, ASR-relevant characteristics of the concrete compositions used were compiled. Portland cements PZ 35 F from the delivery plants of Mergelstetten, Burglengenfeld and Karlstadt were used in the concretes. The cement contents were between 310 kg/m³ and 350 kg/m³, the water-cement ratios between 0.43 and 0.46. The inventory contained no information on the Na₂O equivalent of the cements. Crushed granite, basalt and

diabase were used as coarse aggregates. The associated quarries are located in Bavaria and continue to operate until the current time, with one exception. Furthermore, sand and gravel from local gravel plants were used, which were mostly located near the sections. With one exception of the gravel works, no contact data could be found so that it can be assumed that the majority of the works are no longer in operation.

2.3 Investigations on drill cores

Typically, five 350 mm diameter cores, two 150 mm diameter cores, and six 100 mm diameter cores were extracted from each section. In some cases, this system was deviated from due to technical problems with the drill core bit.

2.3.1 Testing the splitting tensile strength and compressive strength

From the cores with a diameter of 100 mm specimens were tested for the splitting tensile strength (slabs $\varnothing = 100$ mm, thickness = 50 mm, test according to the Technical testing regulations for base courses with hydraulic binders and concrete pavements (*TP B-StB*), part 3.1.05) and compressive strength (cylinder $\varnothing = 100$ mm, height = 100 mm, tested according to DIN EN 12390-3). For the concretes, the mean splitting tensile strengths were between 4.9 MPa and 7.1 MPa. The average compressive strengths were between 59.5 MPa and 118.5 MPa and were thus in some cases significantly higher than the values given in the inventory documents from the suitability tests.

2.3.2 60 °C concrete test with alkali supply

For the examination of the residual strain potential due to ASR, according to the provisions stipulated by the Federal Highway Research Institute, prisms with dimensions of approx. $100 \times 100 \times 300$ mm³ from 350 mm diameter cores were sawed. The prisms were tested with the 60°C concrete test with alkali supply through a 3% and a 10% NaCl solution. The strain evolutions measured during the tests are shown in **Figure 1**. All specimens showed relatively high strains in the first test cycle, which should not be attributed exclusively to an ASR. Concurrent studies of strain evolution due to moisture uptake on two prisms confirmed the assumption that a major part of the strains in the first test cycle are likely to be due to moisture uptake and not to ASR. For a better interpretation, therefore, the strain evolutions from the second test cycle were used. Within 10 test cycles, evaluated from the beginning of the second cycle, the concretes showed an increase in strain between 0.11 mm/m and 0.37 mm/m when supplied with alkali by a 10% NaCl solution. The increase in strain for all concretes was thus below the standard assessment criterion of $\epsilon \leq 0.50$ mm/m. In the experiments with alkali supply by a 3% NaCl solution, the increase in strain within the 10 test cycles considered was between 0.19 mm/m and 0.38 mm/m. Thus, the assessment criterion of $\epsilon \leq 0.30$ mm/m usual for moisture class WS was fulfilled in four cases and in two cases not fulfilled (concrete from section F as well as bottom-layer concrete from section WE).

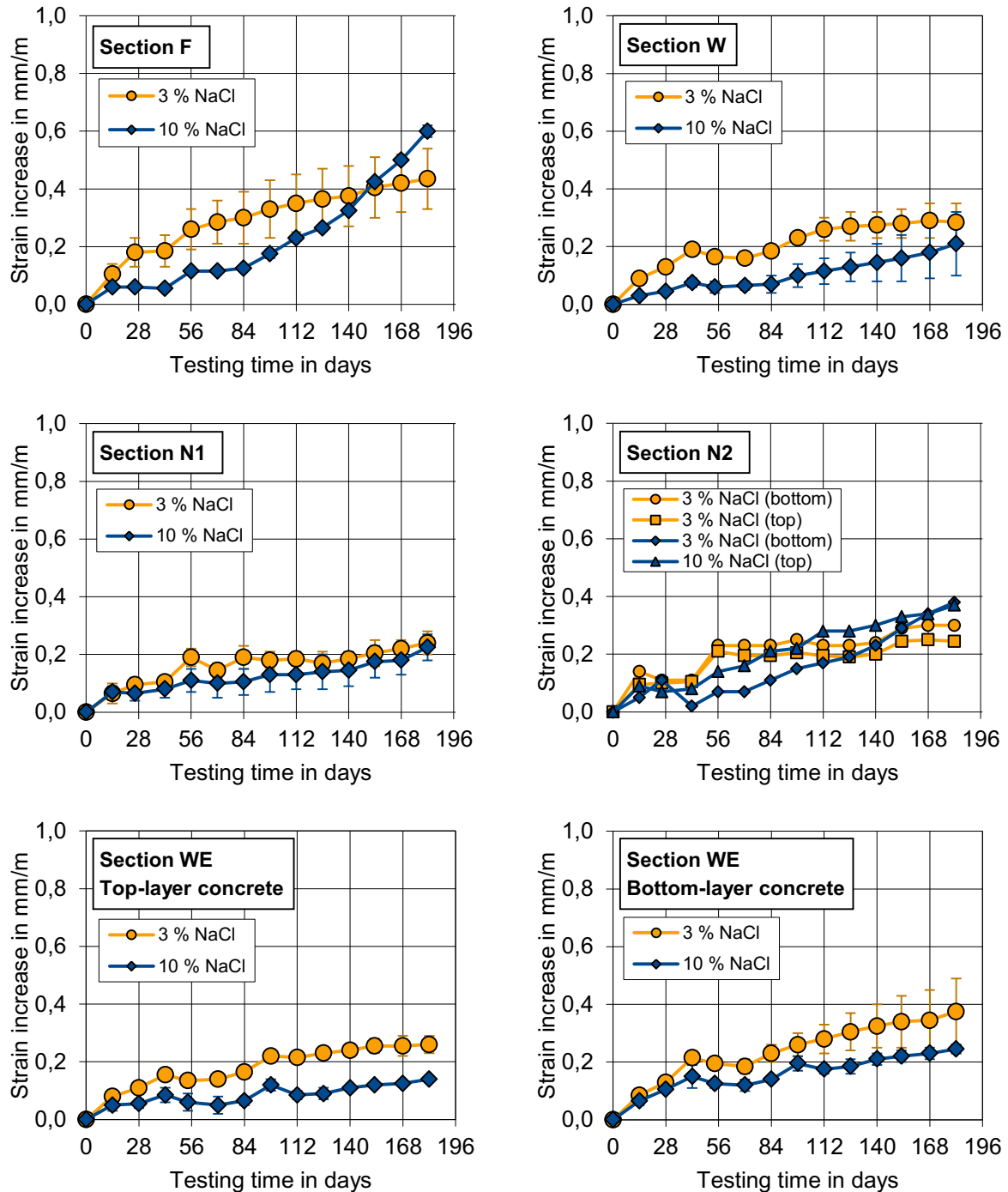


Figure 1 Strain evolution of the concrete samples (prisms approx. 100 x 100 x 300 mm³) in a 60°C concrete test with alkali supply by a 3% and a 10% NaCl solution, evaluated from the beginning of the second cycle

A reason for the fact that in some cases, contrary to expectations, the experiment with the lower NaCl concentration led to higher strains could not be found. Due to the relatively low strains in the experiments with 10% NaCl (neglecting the first test cycle) in combination with the in most cases towards the end of the test period low strain increases it could be concluded that the

concretes have largely a low residual strain potential with respect to ASR. The results of the concrete tests thus largely reflect the positive experience in practice available for the concretes.

2.3.3 Thin section microscopy

From the cores with a diameter of 350 mm or the sawn prisms respectively, thin sections were prepared and examined upon delivery and after testing in the 60°C concrete test with alkali supply through a 10% NaCl solution. It was found that the examined concretes showed no ASR-related structural damage in their initial state. This confirms the assignment of the corresponding highway sections to damage category 0. After completion of the 60 °C concrete tests with external alkali supply through a 10% NaCl solution, the concretes from the section WE (top-layer and bottom-layer concrete) showed no signs of a damaging ASR. The concretes from sections F, N1 and N2 (bottom-layer concrete) showed little evidence of damaging ASR after the test. Only in the concrete of section W moderate signs of a damaging ASR were observed after the test.

2.4 Investigations on aggregates

Another focus of work was the investigation of aggregates or comparisons between the existing aggregates in concrete and the aggregates currently produced in the quarrying sites.

2.4.1 X-ray diffraction analyses

To characterize the mineral phase constituents, X-ray diffraction analyses were carried out on the aggregates recovered from the concrete samples and on current samples of the aggregates, as far as their procurement was possible. For the three investigated crushed granites (Neustift, Schwarzach, Nittenau) a great similarity between the recovered and the current samples could be determined. The recovered aggregates, which according to the inventory documents were referred to as crushed diabase (Bad Berneck, Untersteinach), had the typical diabase mineral phases, but in terms of the proportions, these partly differed significantly from the current samples. A similar situation was found for the analyzed crushed basalt (according to stock documentation Zeilberg). In the recovered aggregate the typical mineral phases for basalt could be determined, but the proportions differed significantly from those of the current sample. The gravel sample recovered from the cores of Section 1 (F), referred to as gravel Moosburg according to the inventory, showed similarities to the current grained specimens 0/4 and 4/8 from gravel pit Moosburg. The gravel used in the other sections was not analyzed because no contact data could be found for the gravel works mentioned in the inventory documents.

2.4.2 Petrography on thin sections

The petrography of the aggregates was investigated on thin sections of the concrete samples before storage in the 60°C concrete test and on thin sections of scattering preparations from current aggregate samples. It showed that the current samples of gravel Moosburg, granite Schwarzach, granite Neustift, basalt Zeilberg and granite Nittenau agreed well in their properties with the corresponding aggregates that were used in the concretes. The current

sample of diabase Kupferberg, on the other hand, showed little agreement with the diabase Untersteinach (concrete N1), which originates from a quarry near the Kupferberg deposit.

2.4.3 Rapid test method according to the Alkali Guidelines

The current aggregate samples were characterized by the rapid test method according to the DAfStb Alkali Guidelines. The crushed basalt from the plant Zeilberg (used in accordance with inventory documents in section N2) showed in the rapid test method with at maximum 0.2 mm/m the lowest strain of all investigated aggregates. The tests of the crushed granites from the plants Nittenau (used in section WE, top-layer concrete), Neustift and Schwarzach (both used in sections F and W) gave strains in the middle range between 0.7 mm/m and 1.0 mm/m. The highest strains in the rapid test method were obtained for the crushed diabases from the plants Bad Berneck (about 1.6 mm/m, used in section N2) and Kupferberg (about 2.1 mm/m, reference to section N1, replacements examined, since quarry Untersteinach closed) as well as for the sand and gravel from the gravel pit Moosburg (sand 2.0 mm/m, gravel 1.4 mm/m, both used in section F).

3 Summary and conclusions

The project focused on investigations of previously undamaged concrete road pavements in the federal highway network, in which aggregates were used some 30 years ago, which according to the information provided by the Federal Highway Research Institute are partly classified as alkali-sensitive according to the ARS No. 04/2013.

During the visual inspection of the concrete road pavements selected for the investigation program, no damage typical of ASR was found on any of the five sections. The laboratory studies on the degree of damage and the residual strain potential as a result of ASR essentially confirmed the high ASR resistance of the concretes assumed on the basis of the visual assessment.

Inhalt

1	Einleitung	13
2	Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden	15
2.1	Auswahl der Streckenabschnitte und visuelle Begutachtung des Zustandes der Betonfahrbahndecken	15
2.2	Entnahme von Bohrkernen.....	16
2.3	Zusammenstellung baulosbezogener Daten	17
2.4	Untersuchungen an Bohrkernen aus Betonfahrbahndecken	17
2.4.1	60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr	17
2.4.2	Mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen	18
2.4.3	Bestimmung der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit	18
2.5	Untersuchungen an Gesteinskörnungen	19
2.5.1	Beschaffung von Gesteinskörnung.....	19
2.5.2	Röntgenbeugungsanalysen.....	19
2.5.3	Mikroskopische Untersuchungen an Streupräparaten	20
2.5.4	Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie.....	20
3	Untersuchungsergebnisse	21
3.1	Auswahl der Streckenabschnitte und visuelle Begutachtung des Zustandes der Betonfahrbahndecken	21
3.2	Entnahme von Bohrkernen.....	22
3.3	Zusammenstellung baulosbezogener Daten	22
3.4	Untersuchungen an Bohrkernen aus Betonfahrbahndecken	23
3.4.1	60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr	23
3.4.2	Mikroskopische Untersuchungen (Gesteinskörnungen im Beton).....	28
3.4.3	Mikroskopische Untersuchungen (Betongefüge)	32
3.4.4	Bestimmung der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit	36
3.5	Untersuchungen an Gesteinskörnungen	38
3.5.1	Röntgenbeugungsanalysen.....	38
3.5.2	Mikroskopische Untersuchungen	41
3.5.3	Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie.....	44
4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	47
4.1	Zusammenfassung.....	47
4.2	Schlussfolgerungen.....	49
5	Literatur und Dokumente	51
Bilder	52
Tabellen	53

6	Anhang	56
A	Protokolle der visuellen Begutachtung der Betonfahrbahndecken	56
A.1	Baulos 1 (F)	56
A.2	Baulos 2 (W)	60
A.3	Baulos 3 (N1)	64
A.4	Baulos 4 (N2)	67
A.5	Baulos 5 (WE).....	70
B	Dokumentation der Bohrkernentnahme	73
B.1	Baulos 1 (F)	73
B.2	Baulos 2 (W)	77
B.3	Baulos 3 (N1) BAB A7	82
B.4	Baulos 4 (N2)	88
B.5	Baulos 5 (WE).....	94
C	Zusammenstellung baulosbezogener Daten	99
C.1	Baulos 1 (F)	99
C.2	Baulos 2 (W)	100
C.3	Baulos 3 (N1)	101
C.4	Baulos 4 (N2)	102
C.5	Baulos 5 (WE).....	103
D	Ergebnisse der 60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr	104
D.1	Baulos 1 (F)	104
D.2	Baulos 2 (W)	106
D.3	Baulos 3 (N1)	108
D.4	Baulos 4 (N2)	110
D.5	Baulos 5 (WE).....	112
D.6	Feuchtedehnung	115
E	Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit	117
F	Mikroskopie	122
G	Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalysen / Rietveldauswertungen	187
H	Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens nach Alkali-Richtlinie	190

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

1 Einleitung

Die Eignung von Gesteinskörnungen bzw. Betonzusammensetzungen hinsichtlich deren AKR-Sensitivität ist seit der Einführung des Allgemeinen Rundschreibens Straßenbau zur „Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)“ Nr. 4/2013 [1] nach einem bundesweit festgelegten Vorgehen zu bewerten. Dies gilt für alle Straßen der Belastungsklassen Bk 100 bis Bk 1,8 gemäß RStO 12 (Feuchtigkeitsklasse WS).

Damit sind auch solche Gesteinskörnungen zu prüfen, die in der Vergangenheit (vor 2013) nicht im Verdacht standen, potenziell alkalireaktiv zu sein. Gemäß Angaben der BAST wurden infolge der Durchführung von WS-Grundprüfungen gemäß ARS Nr. 04/2013 insbesondere in Bayern „AKR-unverdächtige“ Gesteine als alkaliempfindlich eingestuft, mit denen teilweise bereits seit Jahrzehnten Betonfahrbahndecken gebaut wurden, an denen – nach pauschaler Aussage – bis heute keine Anzeichen einer schädigenden AKR festgestellt wurden. Es stellt sich daher die Frage, ob das Verhalten solcher Gesteinskörnungen bzw. Fahrbahndeckenbetone mit den nach ARS Nr. 04/2013 anzuwendenden Prüfverfahren und Bewertungskriterien korrekt abgebildet wird.

Ziel des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens (FuE-Vorhabens) FE 08.0235/2014/GGB „Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 4/2013“ war eine Gegenüberstellung des Praxisverhaltens von bisher weitgehend ungeschädigten Betonfahrbahndecken und dem Verhalten der entsprechenden Betone bzw. Gesteinskörnungen in Laborversuchen. Die Untersuchungen sollten sich schwerpunktmäßig auf ungeschädigte Betonfahrbahndecken beziehen, in denen vor rund 30 Jahren Gesteinskörnungen zur Anwendung kamen, die nach Auskunft der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) gemäß den heutigen Bestimmungen nach dem ARS Nr. 04/2013 als alkaliempfindlich einzustufen sind.

In Abstimmung mit der BAST wurden insgesamt fünf Streckenabschnitte des bayerischen Autobahnnetzes für die Untersuchungen ausgewählt. Dazu zählten zwei Abschnitte der A7, zwei Abschnitte der A92 und ein Abschnitt der A93.

In einem ersten Bearbeitungsschritt erfolgte die visuelle Begutachtung der Betondecken und eine Zuordnung zu AKR-Schadenskategorien gemäß der in [2] beschriebenen Kategorisierung. Auf Basis der von den zuständigen Autobahndirektionen Bayern-Süd und Bayern-Nord zur Verfügung gestellten Unterlagen wurden AKR-relevante Kennwerte der verwendeten Betonzusammensetzungen zusammengestellt.

Im nächsten Bearbeitungsschritt erfolgte die Entnahme von Bohrkernen aus den Betondecken. An Probekörpern, die aus den Bohrkernen gewonnen wurden, wurden Untersuchungen hinsichtlich der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit sowie des AKR-Rest-dehnungspotentials im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr durchgeführt. Des Weiteren wurden mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen durchgeführt. Hierbei wurde sowohl der Zustand des Betongefüges direkt nach der Entnahme der Bohrkernkerne als auch nach der Lagerung im 60 °C Betonversuch untersucht.

Einen weiteren Arbeitsschwerpunkt bildeten Untersuchungen an Gesteinskörnungen bzw. Vergleiche zwischen den in den Betonen vorhandenen und den aktuell in den Abbaustätten produzierten Gesteinskörnungen. Zur Charakterisierung des Mineralphasenbestandes wurden Röntgenbeugungsanalysen an aus den Betonproben rückgewonnenen Gesteinskörnungen sowie aktuellen Proben der Gesteinskörnungen durchgeführt, soweit deren Beschaffung möglich war. Die Petrographie der Gesteinskörnungen wurde an Dünnschliffen aus den Betonproben vor der Lagerung im 60 °C Betonversuch sowie an Dünnschliffen aus Streupräparaten aus aktuellen Gesteinskörnungsproben untersucht. Des Weiteren wurden die aktuellen Gesteinskörnungsproben mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie charakterisiert.

2 Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden

2.1 Auswahl der Streckenabschnitte und visuelle Begutachtung des Zustandes der Betonfahrbahndecken

In einem ersten Arbeitsschritt wurden nach den Vorgaben der BAST fünf Baulose ausgewählt. Die Strecken sollten aus dem bayrischen Autobahnnetz (Autobahndirektion Bayern-Nord bzw. Bayern-Süd) stammen und bereits eine Lebensdauer von ca. 30 Jahren aufweisen. Nach einer Grobauswahl der Strecken nach Aktenlage wurden nach Rücksprache mit der BAST und den Autobahndirektionen die Baulose festgelegt. Wichtiges Kriterium war, dass die Baulose zum heutigen Zeitpunkt keine Anzeichen einer schädigenden AKR aufweisen sollten. Außerdem sollte es möglich sein, aus den Strecken Bohrkern zu entnehmen (d. h. Strecken noch vorhanden und keine Baumaßnahmen in dem entsprechenden Bereich).

Für die Begutachtung der Strecken durch Mitarbeiter der VDZ gGmbH (Frau Hermerschmidt und Herr Eickschen) wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Langsame Befahrung der BAB auf dem Seitenstreifen
- Visuelle Zustandserfassung von Schadensmerkmalen der Betonbefestigung
- Zuordnung der Merkmale zu den Schadenskategorien I bis III entsprechend der Systematik in [2]
- Zusammenstellung der Ergebnisse in Protokollen.

Die Streckenabschnitte wurden mit einem Streckenfahrzeug der jeweiligen Autobahnmeisterei auf dem Seitenstreifen mit langsamer Geschwindigkeit von rd. 30 km/h abgefahren. Zu Beginn eines Bauloses und danach in regelmäßigen Abständen von rd. 500 bis 1000 m sowie bei Besonderheiten wurde angehalten und aus dem Fahrzeug ausgestiegen. Während der Befahrung und bei den Zwischenstopps wurde die Betonfahrbahndecke vom Seitenstreifen aus visuell auf Schäden begutachtet.

Während der Befahrung wurde beurteilt, ob die Schadensmerkmale systematisch auftreten oder als Einzelereignisse zu betrachten sind, die z. B. auch auf eine schlechte Bauausführung zurückgeführt werden können oder auch altersbedingt auftreten können.

Anhand des Oberflächenbildes wurde eine Einordnung gemäß den aktuellen AKR-Schadenskategorien entsprechend den „Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton“ [2] (**Tabelle 1**) vorgenommen und die Ergebnisse tabellarisch baulosbezogen mit entsprechenden typischen Bildern zusammengestellt. Die Schadenskategorie 0 wurde gewählt, wenn systematisch kein AKR-typisches Merkmal vorgefunden wurde.

Während der Bearbeitungszeit des FE-Vorhabens wurden die o. g. Empfehlungen aktualisiert. Hierbei wurde eine vierte Schadenskategorie eingeführt, die sich auf den Unterbeton bezieht. Die in **Tabelle 1** aufgeführten Schadenskategorien bleiben bzgl. der Zuordnung der Schadensmerkmale unverändert, besitzen jedoch in der aktualisierten Fassung den Zusatz „-OB“, um den Bezug zum Oberbeton zu kennzeichnen. Da die neue, vierte Schadenskategorie für das FE-Vorhaben keine Relevanz hat und die Einführung erst während der Bearbeitungszeit

erfolgte, wurde die Benennung der Schadenskategorien gemäß der Version von 2012 [2] beibehalten.

Tabelle 1 Zuordnung der Merkmale zu Schadenskategorien nach [2]

Schadenskategorie	Schadensmerkmale
I	<ul style="list-style-type: none"> - Verfärbung im Bereich der Querfugen/Fugenkreuze (i. A. beginnend im Fugenkreuz) - keine über Schwindrisse hinausgehende Rissbildung
II	<ul style="list-style-type: none"> - ausgeprägte Verfärbung im Bereich der Fugen - Rissbildungen in Fugenkreuzbereichen - beginnende bis ausgeprägte Netzrissbildung - ggf. Längs- und Querrisse an den Querfugen - ggf. zusätzliche Längsrissbildung in Rüttelgassen, noch kein Substanzverlust
III	<ul style="list-style-type: none"> - ausgeprägte Verfärbung im Bereich der Fugen - sehr ausgeprägte Rissbildung (häufig mit Verfärbungen) - ggf. Kantenschäden und/oder Eckabbrüche - ggf. Substanzverlust, z. B. Verschotterung

2.2 Entnahme von Bohrkernen

Für die Bohrkernentnahme wurde vom Auftragnehmer (VDZ gGmbH) bei der jeweiligen Autobahndirektion ein Antrag auf eine verkehrsrechtliche Anordnung der für die Bohrkernentnahme notwendigen Verkehrssicherung gestellt. Die Verkehrssicherung wurde von den Autobahnmeistereien Freising, Wörth a. d. Isar, Neusitz und Windischeschenbach kosten-neutral zur Verfügung gestellt. Den Autobahnmeistereien wird für die Unterstützung des Forschungsvorhabens gedankt. Die Sperrung erfolgte i. d. R. von 08.00 bis 17.00 Uhr. Um den Aufwand für die Sperrungen und die Behinderungen des Verkehrs zu minimieren, wurden die Bohrkernentnahmen auf Wunsch der jeweiligen Autobahnmeistereien aus dem Seitenstreifen aus zwei hintereinander liegenden Platten entnommen. Der Seitenstreifen wurde in allen fünf Fällen in einem Arbeitsgang mit den beiden Fahrstreifen auf voller Breite mit dem Gleitschalungsfertiger eingebaut.

Standardmäßig sollten aus jedem der fünf Querschnitte folgende Bohrkernentnahmen (BK) entnommen werden:

- 4 BK Ø 35 cm für die Gewinnung von Prismen 10 x 10 x 30 cm³ für den 60 °C Betonversuch mit Alkali-Zufuhr mit 3 % und 10 % NaCl sowie für die Rückgewinnung von Gesteinskörnung für das Schnellprüfverfahren
- 2 BK Ø 15 cm (Rückstellproben VDZ)
- 6 BK Ø 10 cm für die Prüfung der Druck- und Spaltzugfestigkeit.

Bei den Strecken W (6 BK Ø 35 cm) und N2 (3 BK Ø 35 cm) wurde hiervon abgewichen, da die Bohrkronen nicht mehr gewechselt werden konnten bzw. ein Bohrwagen defekt war.

Die Bohrkernentnahmen wurden in Gegenwart von Mitarbeitern der VDZ gGmbH (Eberhard Eickschen, Wibke Hermerschmidt) von der Firma ABE Weimar entnommen.

2.3 Zusammenstellung baulosbezogener Daten

Nach der Auswahl der Streckenabschnitte wurden baulosbezogene Daten zur Betonzusammensetzung (z. B. Lieferwerk des Zements, Zementart, Alkaligehalt des Zements, Zementgehalt, Art und Gehalt der Gesteinskörnungen) und zu sonstigen Randbedingungen (z. B. Baujahr, Oberbau) zusammengestellt. Die hierfür benötigten Unterlagen wurden von den Autobahndirektionen Bayern-Süd und Bayern-Nord zur Verfügung gestellt. Bei den Zementen wurde vor rd. 30 Jahren der Alkaligehalt noch nicht standardmäßig zur Kennzeichnung der Fahrbahndeckenzemente erhoben, so dass dieser Kennwert nicht in den Bauunterlagen enthalten ist. Mit Herausgabe des ARS 20/1993 [3] wurde die BAST beauftragt, zur Erfahrungssammlung die in situ eingesetzten Zemente hinsichtlich deren Normanforderungen zu überprüfen. Die in der BAST ermittelten Prüfergebnisse wurden erstmals 1998 (Zeitraum 1993 bis Ende 1997) und seit 1998 in Jahres- bzw. Halbjahresberichten zusammengestellt [4]. Um den Alkaligehalt der in den Baulosen eingesetzten Zemente abzuschätzen, wurden die Kennwerte aus den Berichten der BAST entnommen.

2.4 Untersuchungen an Bohrkernen aus Betonfahrbahndecken

2.4.1 60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr

Nach dem in **Bild 1** dargestellten Prinzip wurden aus den Bohrkernen mit 350 mm Durchmesser für jeden Streckenabschnitt vier (bei einschichtigen Betondecken) bzw. acht (bei zweischichtigen Betondecken) Prismen mit Abmessungen von rd. 100 x 100 x 300 mm³ gesägt. Die Prismen wurden zum Sägen so ausgerichtet, dass der Besenstrich der Betonoberfläche in Querrichtung der oberen Prismen (OL und OR) verlief. Die tatsächliche Länge der Prismen war aufgrund der notwendigen Sägeschnitte in den meisten Fällen etwas geringer als 300 mm. Nach dem Sägen wurden alle Prismen vermessen und gewogen und anschließend bis zur Gewichtskonstanz (Gewichtsänderung $\Delta m < 0,1$ M.-% innerhalb von 7 Tagen) im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Zur Erfassung der Dehnungen wurden mittig in die Stirnseiten der Prismen Vertiefungen gebohrt und Messmarken eingeklebt. Die Messmarken entsprachen den Angaben gemäß TP B-StB, Teil 1.1.09 [5].

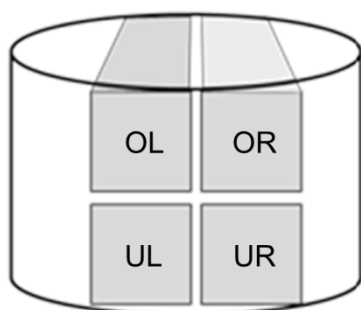


Bild 1

Prinzip des Zuschnitts von Prismen mit Abmessungen von rd. 100 x 100 x 300 mm³ aus den Bohrkernen mit 350 mm Durchmesser

Nach dem Erreichen der Gewichtskonstanz wurden die Prismen für sechs Tage bei 60 °C und 100 % relativer Luftfeuchte und anschließend für einen Tag bei 20 °C und 100 % relativer Luftfeuchte gelagert. Danach erfolgte die erste Messung der Dehnungen (Nullmessung). Im Anschluss wurden die Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr gemäß TP B-Stb, Teil

1.1.09 [5], Abschnitt 7 geprüft. Der Versuchsablauf umfasste jeweils 14 Prüfzyklen nach dem folgenden Ablauf:

1. fünf Tage Lagerung bei 60 °C im Trockenschrank
2. zwei Tage Lagerung bei 20 °C eingetaucht in 3 %ige bzw. 10 %ige NaCl-Lösung
3. sechs Tage Lagerung bei 60 °C und 100 % relativer Luftfeuchte
4. einen Tag Lagerung bei 20 °C und 100 % relativer Luftfeuchte mit anschließender Messung der Dehnungen.

In einzelnen Fällen musste der Prüfablauf geringfügig modifiziert werden, um sicherzustellen, dass die Umlagerung der Proben nicht auf einen Feiertag fällt. Hierzu wurde die Lagerung bei 60 °C im Trockenschrank (Punkt 1) bzw. bei 60 °C und 100 % relativer Luftfeuchte (Punkt 3) um jeweils maximal zwei Tage verkürzt bzw. verlängert.

Bei den zweischichtigen Betonfahrbahndecken werden die oberen Prismen im Folgenden mit „Oberbeton“ und die unteren mit „Unterbeton“ bezeichnet. Da die Prismen auf einen Querschnitt von 100 x 100 mm² zugeschnitten wurden, der Oberbeton aber bei den beiden zweischichtigen Decken nach optischer Beurteilung eine Dicke von weniger als 100 mm aufwies, wurde mit den oberen Prismen eher eine Kombination aus Ober- und Unterbeton geprüft.

2.4.2 Mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen

Aus den Bohrkernen mit 350 mm Durchmesser bzw. den gesägten Prismen wurden im Anlieferungszustand und nach Prüfung im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung Dünnschliffe hergestellt und untersucht. Dazu wurden zunächst Betonscheiben aus den jeweiligen Probekörpern gesägt. Die ausgewählten Betonproben wurden unter Vakuum mit einem unter UV-Licht fluoreszierenden Gießharz getränkt.

Die getränkten Betonprobekörper wurden auf eine Schichtdicke von 30 µm geschliffen und mit einem Deckglas abgedeckt. Die Dünnschliffe wurden unter dem Polarisationsmikroskop auf die Petrographie der verwendeten Gesteinskörnung sowie auf mögliche Schädigungen und deren Ursachen hin untersucht.

2.4.3 Bestimmung der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit

Aus jeder zu untersuchenden Betonfahrbahndecke wurden im Regelfall fünf Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit entnommen (Ausnahme Streckenabschnitt W: Entnahme von drei Bohrkernen wegen Problemen mit einer Bohrkronen). Von jedem Bohrkern wurde oben und unten je eine Scheibe mit einer Dicke von 50 mm durch Sägen abgetrennt. An diesen Zylinderscheiben wurde die Spaltzugfestigkeit nach TP B-StB, Teil 3.1.05 [6] bestimmt. Am mittleren Teil jedes Bohrkerns wurde die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 [7] bestimmt. Hierzu wurde der verbleibende Teil des Bohrkerns nach dem Sägen der Scheiben mit 50 mm Dicke auf ein Verhältnis von Höhe zu Durchmesser $h/d = 1$ gekürzt. Falls dies aufgrund einer zu geringen Bohrkernlänge nicht

möglich war, wurde das bestehende Verhältnis von Höhe zu Durchmesser beibehalten. Die Stirnflächen wurden planparallel geschliffen.

2.5 Untersuchungen an Gesteinskörnungen

2.5.1 Beschaffung von Gesteinskörnung

Zur Durchführung von Vergleichen zwischen den im Beton vorhandenen und den aktuell in den Abbaustätten anstehenden Gesteinskörnungen wurden Proben aus der aktuellen Produktion der in **Tabelle 2** aufgelisteten Gesteinskörnungen beschafft. Die weiteren laut Bestandsunterlagen in den Fahrbahndeckenbetonen verwendeten Gesteinskörnungen konnten nicht beschafft werden, da die Herstellwerke nicht mehr existieren oder keine Kontaktdaten gefunden werden konnten.

Tabelle 2 Beschaffte Gesteinskörnungsproben

Gesteinskörnung	Werk	Gestein ¹⁾	Hersteller	Bezug zu Strecke(n)	Eingang beim VDZ
Brechsand 0/2 mm	Zeilberg	Basalt	Basalt AG	4 (N2)	25.04.2018
Splitt 2/8 mm					
Splitt 8/16 mm					
Splitt 8/16 mm	Bad Berneck	Diabas	Hartsteinwerke Schicker OHG	4 (N2)	02.08.2018
Splitt 16/22 mm					
Splitt 8/11 mm	Kupferberg	Diabas	Hartsteinwerke Schicker OHG	3 (N1) ²⁾	02.08.2018
Splitt 11/16 mm					
Splitt 16/22 mm					
Splitt 11/22 mm	Neustift	Granit	Niederbayerische Schotterwerke Rieger & Seil GmbH & Co. KG	1 (F), 2 (W)	13.08.2018
Splitt 8/16 mm	Nittenau	Granit	Karl Schwinger GmbH & Co. KG	5 (WE) (Oberbeton)	23.08.2018
Splitt 16/22 mm					
Splitt 11/22 mm	Schwarzach	Granit	Ludwig Venus GmbH & Co. KG	1 (F), 2 (W)	27.08.2018
Kies 4/8 mm	Moosburg	Flusssand/ -kies	Rohrdorfer Sand und Kies GmbH	1 (F)	30.07.2018
feine GK 0/4 mm					
¹⁾ gemäß Angaben des Herstellers ²⁾ Gemäß vorhandener Unterlagen zu den Betonzusammensetzungen wurde Diabassplitt aus dem Steinbruch Untersteinach verwendet, der aktuell nicht mehr betrieben wird. Nach Angaben des Herstellers besteht hinsichtlich der Geologie eine große Ähnlichkeit zum ca. 20 km Luftlinie entfernten Standort Kupferberg. Die Proben vom Standort Kupferberg wurden daher ersatzweise untersucht.					

2.5.2 Röntgenbeugungsanalysen

Der Mineralphasenbestand der in **Tabelle 2** aufgelisteten Gesteinskörnungen wurde mittels Röntgenbeugungsanalyse mit Rietveldauswertung untersucht. Um einen Vergleich mit den Gesteinskörnungen durchführen zu können, die in den Fahrbahndeckenbetonen zum Einsatz kamen, wurden kleine Mengen der Gesteinskörnungen aus den Bohrkernen zurückgewonnen. Hierzu wurden die Bohrkernkerne bzw. Teile davon mit einer Schlagbohrmaschine grob zerkleinert. Die so erhaltenen Stücke wurden in einem Backenbrecher weiter zerkleinert. Das zerkleinerte Material wurde nach visueller Beurteilung manuell sortiert. Die nach diesem Verfahren rückgewonnenen Gesteinskörnungen wurden ebenfalls mittels Röntgenbeugungsanalyse mit Rietveldauswertung untersucht.

2.5.3 Mikroskopische Untersuchungen an Streupräparaten

Von den in **Tabelle 2** aufgelisteten Gesteinskörnungen wurden Dünnschliffe hergestellt und untersucht (Basalt Zeilberg, Fraktion 2/8 mm; Diabas Kupferberg, Fraktion 8/11 mm; Granit Neustift, Fraktion 11/22 mm; Granit Nittenau, Fraktion 8/16 mm; Granit Schwarzach, Fraktion 11/22 mm; Kies Moosburg, Fraktion 4/8 mm). Dazu wurden von den untersuchten Gesteinsproben Streupräparate hergestellt, indem eine Gesteinsfraktion unter Vakuum in einem unter UV-Licht fluoreszierenden Gießharz eingebettet wurde.

Die eingebetteten Gesteinskörnungspräparate wurden auf eine Schichtdicke von 30 µm geschliffen und mit einem Deckglas abgedeckt. Die Dünnschliffe wurden unter dem Polarisationsmikroskop hinsichtlich ihrer Petrographie untersucht.

2.5.4 Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie

Die in **Tabelle 2** aufgelisteten Gesteinskörnungen wurden mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie [8] analysiert.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Auswahl der Streckenabschnitte und visuelle Begutachtung des Zustandes der Betonfahrbahndecken

In der **Tabelle 3** sind die ausgewählten fünf Streckenabschnitte zusammengestellt. Die Fahrbahndecken wiesen zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme ein Alter zwischen 30 und 32 Jahren auf.

Tabelle 3 Übersicht über die fünf ausgewählten Streckenabschnitte

Auto- bahndi- rektion	Kürzel	BAB Nr.	zuständige Autobahn- meisterei	km und Richtung	Ent- nahme bei km	Bau- jahr / Alter	Anzahl Schich- ten
Bayern- Süd	1 (F)	A92	Freising	28,0 bis 47,0 Freising – Dingolfing-Ost	45,0	1987 / 30 a	1
	2 (W)	A92	Wörth a. d. Isar	89,5 bis 92,0 Freising – Dingolfing-Ost	91,7	1986 / 31 a	1
Bayern- Nord	3 (N1)	A7	Neusitz	734,0 bis 737,0 Rotenburg o.d.T. – Dinkelsbühl	735,2	1985 / 32 a	1
	4 (N2)	A7	Neusitz	714,0 bis 722,0 Kitzingen – Rotenburg o.d.T.	718,0	1985 / 32 a	2
	5 (WE)	A93	Windisch- eschenbach	126,5 bis 124,0 Oberpfälzer Wald – Weiden- West	125,0	1987 / 30 a	2

Tabelle 4 Zusammenstellung der Ergebnisse der Begutachtung der fünf Baulose

Bau- los Nr.	BAB	km und RiFa	Bau- jahr/ Alter in Jahren	Ergebnisse der Begutachtung	
				Scha- densbe- schrei- bung	Schäden / Schadenskategorie
1 (F)	BAB A92	42,0 bis 47,0, Dingol- fing	1987/ 30	Tabelle 15	Netzrisse, Längsriss im 1. Fahrstreifen, vereinzelt Plattenauswechselungen in Beton
					keine AKR-typischen Schäden außer möglicher- weise den Netzrissen; Schadenskategorie 0
2 (W)	BAB A92	89,5 bis 92,0, Dingol- fing	1986/ 31	Tabelle 16	Längsriss im 1. Fahrstreifen, vereinzelt Plattenaus- wechselungen in Beton
					keine AKR-typischen Schäden Schadenskategorie 0
3 (N1)	BAB A7	734,0 bis 737,0, Ulm	1987/ 30	Tabelle 17	Längsriss im 1. Fahrstreifen, vereinzelt Plattenaus- wechselungen in Beton, Kornausbrüche im Längsfu- genbereich
					keine AKR-typischen Schäden Schadenskategorie 0
4 (N2)	BAB A7	714,0 bis 722,0, Ulm	1985/ 32	Tabelle 18	Längsriss im 1. Fahrstreifen, vereinzelt Plattenaus- wechselungen in Beton
					keine AKR-typischen Schäden Schadenskategorie 0
5 (WE)	BAB A93	126,5 bis 124,0, Hof	1987/ 30	Tabelle 19	Längsriss im 1. Fahrstreifen, vereinzelt Plattenaus- wechselungen in Beton
					keine AKR-typischen Schäden Schadenskategorie 0

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Begutachtungen. Alle fünf Fahrbahndecken wurden der Schadenskategorie 0 zugeordnet. Daraus ergibt sich, dass aufgrund der

visuellen Begutachtung kein Hinweis auf eine schädigende AKR besteht. Die ausführlichen Ergebnisse der Begutachtung sind im Anhang A zusammengestellt.

3.2 Entnahme von Bohrkernen

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Entnahme der Bohrkern aus den Betonfahrbahndecken. Eine ausführliche Dokumentation der Bohrkernentnahme ist im Anhang B zusammengestellt.

Standardmäßig sollten aus jeder der fünf Fahrbahnen folgende Bohrkern (BK) entnommen werden:

- 4 BK Ø 35 cm für die Gewinnung von Prismen 10 x 10 x 30 cm³ für den 60 °C Betonversuch mit Alkali-Zufuhr mit 3 % und 10 % NaCl sowie für die Rückgewinnung von Gesteinskörnung für das Schnellprüfverfahren
- 2 BK Ø 15 cm (Rückstellproben VDZ)
- 6 BK Ø 10 cm für die Prüfung der Druck- und Spaltzugfestigkeit.

Bei den Strecken W (6 BK Ø 35 cm) und N2 (3 BK Ø 35 cm) wurde hiervon abgewichen, da die Bohrkronen nicht mehr gewechselt werden konnte bzw. ein Bohrwagen defekt war.

Tabelle 5 Informationen zur Bohrkernentnahme

Baulos	BAB	Bohrkerne bei km	Entnahmedatum	entnommene Bohrkern	Dicke Betondecke [cm]	Anzahl Schichten	Bauweise	Oberflächentextur
1 (F)	A92,	45,0, FR Dingolfing	22.08.2017	4 BK Ø 35, 2 BK Ø 15 6 BK Ø 10	23	1	Betondecke auf HGT, unterschiedlicher Verbund mit HGT; 2 Fahrstreifen und Seitenstreifen	Besenstrich quer über Fahr- und Seitenstreifen durchgängig gefertigt
2 (W)	A92	91,7, FR Dingolfing	23.08.2017	6 BK Ø 35, 4 BK Ø 10	21,5	1		
3 (N1)	A7	735,2, FR Ulm	10.10.2017	4 BK Ø 35, 2 BK Ø 15 6 BK Ø 10	24	1		
4 (N2)	A7	718,0, FR Ulm	11.10.2017	3 BK Ø 35, 4 BK Ø 15 6 BK Ø 10	21	2 *)		
5 (WE)	A93	125,0, FR Hof	25.10.2017	4 BK Ø 35, 2 BK Ø 15 6 BK Ø 10	24 (Oberbeton rd. 7 cm)	2		
<p>*) Nach Aussage der zuständigen Autobahnmeisterei handelt es sich bei dem Streckenabschnitt 4 (N2) um eine einschichtige Bauweise. Bei der Entnahme der Bohrkern wurden diese optisch ebenfalls als einschichtig beurteilt. Erst bei der Mikroskopie der Dünnschliffe im Anschluss an die 60 °C Betonversuche fiel auf, dass sich die Zusammensetzung des Betons im unteren und oberen Bereich der Bohrkern unterschied</p>								

3.3 Zusammenstellung baulosbezogener Daten

In **Tabelle 6** ist eine Übersicht ausgewählter Kennwerte der Betonzusammensetzungen der untersuchten Streckenabschnitte zusammengestellt. Eine ausführliche Darstellung der baulosbezogenen Daten ist in Anhang C zu finden.

Tabelle 6 Übersicht über die Betonzusammensetzungen der untersuchten Baulose

Kürzel	BAB-Nr.	Lieferwerk Zement (PZ 35 F)	Zementgehalt in kg/m ³	Na ₂ O-Äquivalent in M.-%	Na ₂ O-Äquivalent in M.-% aus Berichten der BAST (ab 1993)	grobe Gesteinskörnung
1 (F)	A92	Schwenk Mergelstetten	350	keine Angaben in den Bauunterlagen vorhanden	0,60 bis 0,71	Granit Neustift, Granit Schwarzach
2 (W)	A92	Heidelberg Zement Burglen-genfeld	330		0,30 bis 0,51	Granit Neustift, Granit Schwarzach
3 (N1)	A7	Schwenk Mergelstetten	330		0,60 bis 0,71	Diabas Untersteinach
4 (N2)	A7	Schwenk Karlstadt	OB: 330 UB: 320		1,10 bis 1,20	OB: Basalt Zeilberg, Diabas Bad Berneck UB: Basalt Zeilberg
5 (WE)	A93	Heidelberg Zement Burglen-genfeld	OB: 330 UB: 310		0,30 bis 0,51	OB: Granit Nittenau UB: Kies Scharnagel / Pischeldorf

3.4 Untersuchungen an Bohrkernen aus Betonfahrbahndecken

3.4.1 60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr

In den 60 °C Betonversuchen mit Alkalizufuhr ergaben sich für alle Probekörper verhältnismäßig hohe Dehnungen im ersten Prüfzyklus, die nicht ausschließlich auf eine AKR zurückzuführen sein dürften. Möglicherweise ist ein Teil der Dehnungen durch eine Feuchtaufnahme bedingt. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurde die Dehnungsentwicklung von zwei weiteren Prismen aus dem Streckenabschnitt F, die bei 20 °C und ≥ 98 % relativer Feuchte gelagert wurden, bestimmt. In den ersten 14 Tagen zeigten diese Prismen eine Dehnungszunahme, die in der gleichen Größenordnung wie die im ersten Prüfzyklus der 60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr lag. Dieser Vergleich lässt den Schluss zu, dass ein Großteil der anfänglich gemessenen Dehnungen im 60 °C Betonversuch auf eine Feuchtaufnahme zurückzuführen sein dürfte. Für eine Beurteilung des AKR-Widerstands der Betone anhand der Dehnungsverläufe erscheint es daher nicht zielführend, die Auswertung wie üblich auf 10 Prüfzyklen ab Versuchsbeginn zu beziehen. Stattdessen werden im Folgenden die im ersten Prüfzyklus (14 Tage Prüfdauer) bestimmten Dehnungen nicht mit in die Auswertung einbezogen, sondern es wird die Dehnungszunahme ab dem zweiten Prüfzyklus betrachtet. Die Dehnungszunahme ab dem zweiten Prüfzyklus ist für die untersuchten Betone in **Bild 2** bis **Bild 7** dargestellt. Die Prüfdauer ist in **Bild 2** bis **Bild 7** definiert als verstrichene Zeit ab Beginn des 2. Prüfzyklus. Bei den dargestellten Dehnungen handelt es sich jeweils um Mittelwerte aus Messungen an zwei Probekörpern. Die Abweichungen der Einzelwerte zum Mittelwert sind mit vertikalen Balken an jedem Messpunkt kenntlich gemacht.

Die Einzel- und Mittelwerte der Dehnungen aller Probekörper in den 60 °C Betonversuchen mit Alkalizufuhr sowie die ergänzend bestimmten Feuchtedehnungen über die gesamte Versuchszeit sind im Anhang D zusammengestellt. Die Abmessungen und Massen der Probekörper sowie Fotos der Probekörper vor der Prüfung sind ebenfalls im Anhang D zusammengestellt.

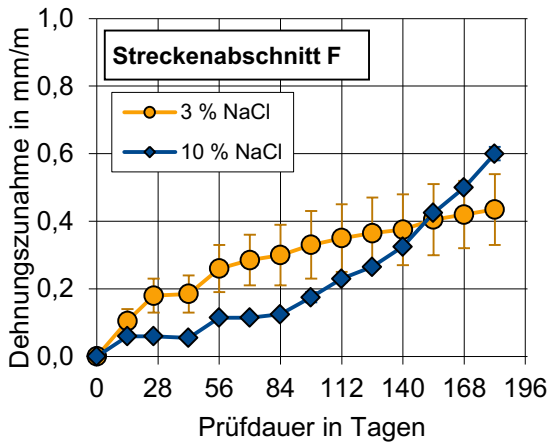


Bild 2 Streckenabschnitt F: Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

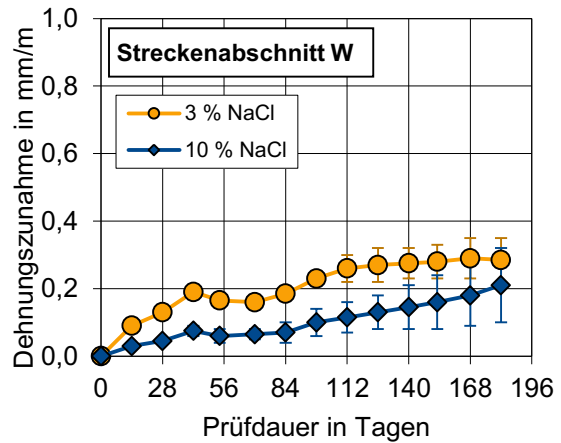


Bild 3 Streckenabschnitt W: Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

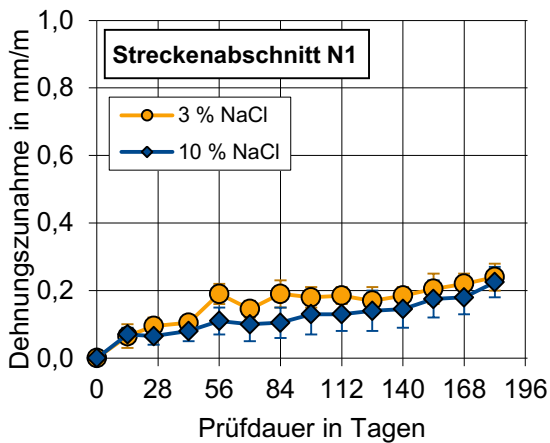


Bild 4 Streckenabschnitt N1: Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

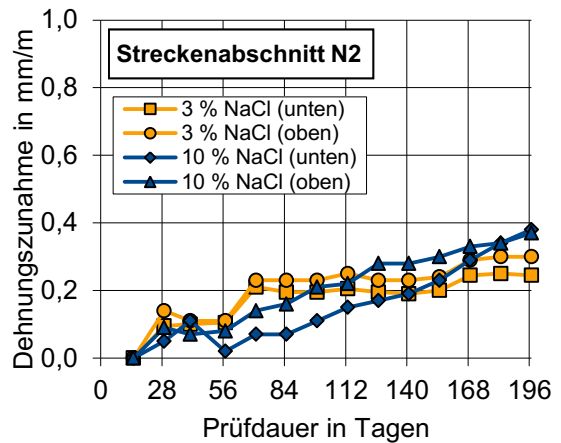


Bild 5 Streckenabschnitt N2: Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

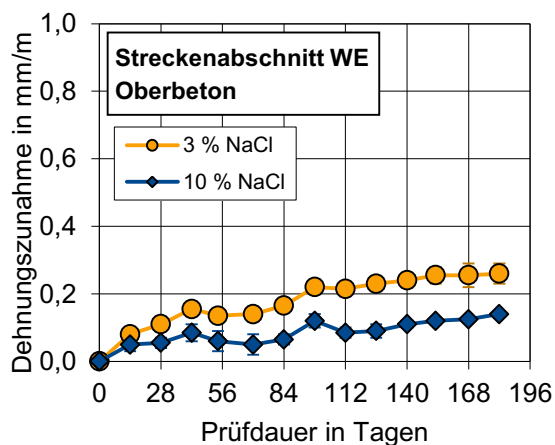


Bild 6 Streckenabschnitt WE (Oberbeton): Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

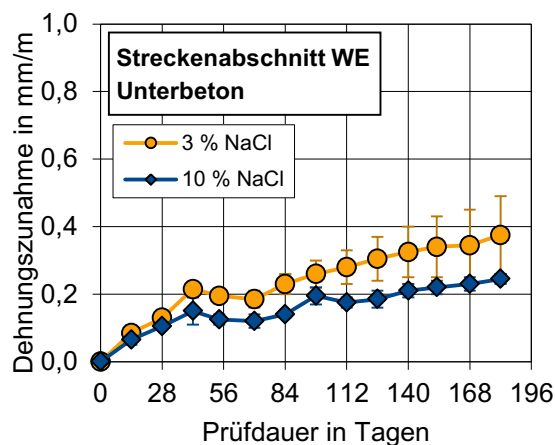


Bild 7 Streckenabschnitt WE (Unterbeton): Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

Für einige Versuchsserien ergaben sich verhältnismäßig große Differenzen zwischen den Dehnungen der zwei geprüften Probekörper. Die größten Dehnungsdifferenzen zwischen den einzelnen Probekörpern zeigten sich in der Prüfung des Betons aus dem Streckenabschnitt F mit 3 % NaCl. Es wird vermutet, dass die Differenzen der Dehnungen auf Inhomogenitäten im Betongefüge zurückzuführen sind. Eine systematische Abhängigkeit der Dehnungen von der Lage der Prismen im Bohrkern (oben oder unten) konnte nicht festgestellt werden, d. h. es wurden nicht durchgängig an den Prismen aus den unteren Teilen der Bohrkernhöhen höhere Dehnungen gemessen als an den Prismen aus den oberen Teilen der Bohrkernhöhen oder umgekehrt.

In den Versuchsreihen mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige NaCl-Lösung wurden teilweise höhere Dehnungen bestimmt als in den Versuchsreihen mit Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung. Nach Erfahrungen des VDZ sind die Dehnungen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3 %ige NaCl-Lösung in den meisten Fällen geringer als mit einer 10 %igen NaCl-Lösung. Diese Erfahrungen basieren überwiegend auf Versuchen mit Laborbetonen. Die hier untersuchten Betonproben stammen dagegen aus Bestandsstrecken mit einem Alter von mehr als 30 Jahren. In diesen Fällen beeinflussen möglicherweise weitere Parameter, deren Einfluss bei Laborbetonen nicht oder nur in geringem Maße vorhanden ist, den Dehnungsverlauf stärker als die Konzentration der Prüflösung.

In **Tabelle 7** ist ein Vergleich der Dehnungszunahme innerhalb von 10 Prüfzyklen, ausgewertet ab dem zweiten Prüfzyklus, mit den üblichen Bewertungskriterien des 60 °C Betonversuchs mit Alkalizufuhr für die Feuchtigkeitsklasse WS gemäß [9] dargestellt. In allen Versuchen mit Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung lag die Dehnungszunahme unterhalb des in [9] angegebenen Bewertungskriteriums von $\epsilon \leq 0,50$ mm/m. In den Versuchen mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige NaCl-Lösung wurde das in [9] angegebene Bewertungskriterium von $\epsilon \leq 0,30$ mm/m in vier Fällen erfüllt und in zwei Fällen nicht erfüllt (Beton aus Streckenabschnitt F sowie Unterbeton aus Streckenabschnitt WE).

Tabelle 7 Dehnungszunahme der Betone zwischen dem 2. und 11. Prüfzyklus (Prüfdauer = 140 Tage) im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen und Vergleich mit den Bewertungskriterien gemäß [9]

Bezeichnung	Dehnungszunahme [mm/m] zwischen dem 2. und 11. Prüfzyklus (Prüfdauer = 140 Tage) im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr durch	
	3 %ige NaCl-Lösung	10 %ige NaCl-Lösung
F	0,38	0,33
W	0,28	0,15
N1	0,19	0,15
N2 (Oberbeton) ¹⁾	0,24	0,30
N2 (Unterbeton)	0,16	0,23
WE (Oberbeton) ¹⁾	0,24	0,11
WE (Unterbeton)	0,33	0,37
Bewertungskriterien [9]	≤ 0,30	≤ 0,50
1) Bei den zweischichtigen Fahrbahndecken war die Grenze zwischen Ober- und Unterbeton nicht eindeutig zu erkennen. Es ist anzunehmen, dass die Schichtdicken der Oberbetone < 10 cm (= Kantenlänge Prisma) waren, sodass die mit „Oberbeton“ bezeichneten Prismen auch Anteile aus dem Unterbeton enthielten.		

Für die Betone aus den Streckenabschnitten N1, N2 und W sowie den Oberbeton aus dem Streckenabschnitt WE kann anhand der erfüllten Bewertungskriterien für die Dehnungen von einem ausreichenden AKR-Widerstand in der Feuchtigkeitsklasse WS ausgegangen werden. Die Beurteilung des AKR-Widerstands anhand der 60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr stimmt für diese Betone gut mit den Ergebnissen der visuellen Zustandserfassung überein, bei der nach einer Nutzungsdauer von > 30 Jahren keine Merkmale einer schädigenden AKR an den Betonfahrbahndecken festgestellt wurden.

Bei dem Beton aus dem Streckenabschnitt F und dem Unterbeton aus dem Streckenabschnitt WE wurde jeweils das Bewertungskriterium für die Dehnung bei Alkalizufuhr durch eine 3 %ige NaCl-Lösung überschritten, während das Bewertungskriterium für die Dehnung bei Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung eingehalten wurde. An den zugehörigen Betonfahrbahndecken wurden bei der visuellen Zustandserfassung nach einer Nutzungsdauer von > 30 Jahren keine Merkmale einer schädigenden AKR festgestellt. Insofern wird der AKR-Widerstand dieser beiden Betone bei Anwendung des üblichen Bewertungskriteriums für die Versuche mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige NaCl-Lösung möglicherweise zu kritisch bewertet. Dieser Umstand kann bei der Anwendung der Bewertungskriterien in Einzelfällen auftreten, da diese so festgelegt wurden, dass Betone mit einem nicht ausreichenden AKR-Widerstand sicher erkannt werden können, vgl. [9]. In der gutachtlichen Praxis würde der bestandene Versuch bei Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung in aller Regel dazu führen, dass die Betone als ausreichend beständig gegen AKR eingestuft würden. Des Weiteren werden bei WS-Grundprüfungen und AKR-Performance-Prüfungen die Ergebnisse von Dünnschliffuntersuchungen in die Beurteilung des AKR-Widerstandes mit einbezogen, sodass die Dehnungsgrenzwerte nicht die alleinigen Beurteilungskriterien darstellen.

Im Anschluss an die 60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr wurde aus einem Prisma je Beton ein Dünnschliff für lichtmikroskopische Untersuchungen präpariert, vgl. Abschnitt 3.4.2. Die

restlichen Prismen wurden im Klimaraum bei (20 ± 1) °C und (65 ± 5) % relativer Luftfeuchte (Klima 20/65) gelagert. Nach rund 20 Wochen der Lagerung im Klima 20/65 wurden die Dehnungen der Prismen erneut gemessen. Hierdurch sollte geprüft werden, inwieweit die in den 60 °C Betonversuchen entstandenen Dehnungen reversibel sind. In **Tabelle 8** sind die Dehnungen der einzelnen Prismen nach 14 Prüfzyklen und nach anschließender Lagerung im Klima 20/65 sowie die zugehörigen Dehnungsdifferenzen (Dehnungsrückgang) angegeben. Die Werte zeigen, dass die Lagerung im Klima 20/65 bei allen Prismen einen Rückgang der Dehnungen bewirkte, d. h. dass die in den 60 °C Betonversuchen entstandenen Dehnungen teilweise reversibel sind. Der Dehnungsrückgang betrug zwischen 0,09 mm/m und 0,28 mm/m, im Mittel über alle Prismen 0,18 mm/m. Für die Beurteilung des AKR-Widerstands könnte alternativ zu der in **Tabelle 7** vorgenommenen Auswertung der Dehnungszunahme zwischen dem 2. und 11. Prüfzyklus auch die um den Dehnungsrückgang reduzierte Gesamtdehnung herangezogen werden. Da in diesem Untersuchungsprogramm aus jeweils einem Probekörper je Beton ein Dünnschliff präpariert wurde, konnte der Dehnungsrückgang an jeweils drei von vier Probekörpern bestimmt werden. Da damit keine konsistente Auswertung möglich ist, wurde die in **Tabelle 7** vorgenommene Gegenüberstellung zwischen Dehnungszuwachs und bekannten Beurteilungskriterien zur Beurteilung herangezogen.

Tabelle 8 Dehnungen der Prismen in mm/m nach 14 Prüfzyklen sowie nach anschließender Lagerung im Klima 20/65 für rund 20 Wochen

Bezeichnung Strecke	Art der Dehnung	Alkalizufuhr durch ...			
		...3 %ige NaCl-Lösung		...10 %ige NaCl-Lösung	
		Prisma 1	Prisma 2	Prisma 1	Prisma 2
1 (F)	A: 14 Prüfzyklen	0,55	0,86	0,89	0,89
	B: 14 Prüfzyklen + ca. 20 Wo. 20/65	0,35	0,69	-- ¹⁾	0,71
	Dehnungsdifferenz A-B	0,20	0,17	--	0,18
2 (W)	A: 14 Prüfzyklen	0,67	0,51	0,55	0,32
	B: 14 Prüfzyklen + ca. 20 Wo. 20/65	0,39	0,31	-- ¹⁾	0,15
	Dehnungsdifferenz A-B	0,28	0,20	--	0,17
3 (N1)	A: 14 Prüfzyklen	0,39	0,53	0,39	0,52
	B: 14 Prüfzyklen + ca. 20 Wo. 20/65	0,24	0,36	0,22	-- ¹⁾
	Dehnungsdifferenz A-B	0,15	0,17	0,17	--
4 (N2)	A: 14 Prüfzyklen	0,57	0,58	0,61	0,68
	B: 14 Prüfzyklen + ca. 20 Wo. 20/65	0,39	0,49	0,47	-- ¹⁾
	Dehnungsdifferenz A-B	0,18	0,09	0,14	--
5 (WE) (Oberbeton)	A: 14 Prüfzyklen	0,47	0,55	0,33	0,38
	B: 14 Prüfzyklen + ca. 20 Wo. 20/65	0,28	0,36	0,18	-- ¹⁾
	Dehnungsdifferenz A-B	0,19	0,19	0,15	--
5 (WE) (Unterbeton)	A: 14 Prüfzyklen	0,79	0,54	0,55	0,57
	B: 14 Prüfzyklen + ca. 20 Wo. 20/65	0,60	0,31	0,37	-- ¹⁾
	Dehnungsdifferenz A-B	0,19	0,23	0,18	

¹⁾ Dehnungsmessung nicht möglich, weil Prisma für die Präparation eines Dünnschliffs verwendet wurde.

3.4.2 Mikroskopische Untersuchungen (Gesteinskörnungen im Beton)

Beton aus Streckenabschnitt 1 (F)

Im Dünnschliff von Beton F wurden natürlich gerundete Gesteinskörner (Sand und Kies) mit Durchmessern von bis zu ca. 6 mm beobachtet (**Bild 87** bis **Bild 90**). Die Körner bestanden aus Quarzit, teilweise fossilhaltigem Kalkstein, quarzreichen Sedimentgesteinen, Chertgesteinen, Quarzkristallen (Sandfraktion), Feldspatkristallen (Sandfraktion) und vereinzelt Glimmerkristallen (Sandfraktion).

Darüber hinaus enthielt der Beton Splittkörner mit Durchmessern von bis zu ca. 15 mm. Die Splittkörner bestanden aus Granit. Petrographisch ließen sich zwei verschiedene Varietäten unterscheiden, die in etwa gleichen Anteilen auftraten.

Die erste Granitvarietät war gröber kristallin als die zweite Varietät. Sie bestand aus Quarz, Feldspat (meist Plagioklas), Glimmer (meist Biotit), Apatit und einer opaken Phase (**Bild 91**, **Bild 92**). Daneben trat akzessorisch Amphibol auf. Der Apatit trat oft idiomorph als Einschluss in Biotit auf (**Bild 93**, **Bild 94**). Wie Feldspat und Quarz war auch Biotit oft grobkristallin und bildete

teilweise Agglomerationen. Plagioklas war teilweise in zusammenhängenden Domänen serizitiert.

Die zweite Granitvarietät war feiner kristallin. Sie bestand aus Quarz, Feldspat (Alkalifeldspat und Plagioklas) und Glimmer (Biotit und Muskovit; **Bild 95**, **Bild 96**). Der Biotit war oft vergrünt. Er enthielt häufig Einschlüsse mit pleochroitischen Höfen (**Bild 97**, **Bild 98**) sowie seltener Rutilnadeln. Die Feldspäte waren teilweise serizitiert.

Beton aus Streckenabschnitt 2 (W)

Im Dünnschliff von Beton W wurden natürlich gerundete Gesteinskörner (Sand und Kies) mit Durchmessern von bis zu ca. 6 mm beobachtet (**Bild 105** bis **Bild 108**). Die Körner bestanden aus Quarzit, quarzreichen Sedimentgesteinen, Chertgesteinen, Quarzkristallen (Sandfraktion), Feldspatkristallen (Sandfraktion) und teilweise fossilhaltigem Kalkstein.

Darüber hinaus enthielt der Beton Splittkörner mit Durchmessern von bis zu ca. 15 mm. Die Splittkörner bestanden aus Granit. Petrographisch ließen sich zwei verschiedene Varietäten unterscheiden. Sie ähnelten stark den beiden Graniten in Beton F.

Die erste Granitvarietät war gröber kristallin als die zweite auftretende Varietät. Sie bestand aus Quarz, Feldspat (meist Plagioklas), Glimmer (meist Biotit), Apatit und einer opaken Phase (**Bild 109**, **Bild 110**). Daneben trat akzessorisch Amphibol auf. Der Apatit trat oft idiomorph als Einschluss in Biotit auf (**Bild 111**, **Bild 112**), war aber seltener als in der entsprechenden Granitvarietät in Beton F. Wie Feldspat und Quarz war auch Biotit oft grobkristallin und bildete teilweise Agglomerationen. Plagioklas war teilweise in zusammenhängenden Domänen serizitiert.

Die zweite Granitvarietät trat im Dünnschliff von Beton W etwas häufiger auf als die erste Varietät. Sie war feiner kristallin und bestand aus Quarz, Feldspat (Alkalifeldspat und Plagioklas) und Glimmer (Biotit und Muskovit; **Bild 113**, **Bild 114**). Der Biotit war oft vergrünt. Er enthielt häufig Einschlüsse mit pleochroitischen Höfen (**Bild 115**, **Bild 116**) sowie seltener Rutilnadeln. Die Feldspäte waren teilweise serizitiert.

Gemäß den Bestandsunterlagen besteht bezüglich der groben Gesteinskörnungen eine große Ähnlichkeit der Zusammensetzungen der Betone aus den Abschnitten 1 (F) und 2 (W). Dieser Zusammenhang konnte mit den Dünnschliffuntersuchungen bestätigt werden.

Beton aus Streckenabschnitt 3 (N1)

Im Dünnschliff von Beton N1 wurden natürlich gerundete Gesteinskörner (Sand und Kies) mit Durchmessern von bis zu ca. 15 mm beobachtet (**Bild 124** bis **Bild 127**). Die Körner bestanden aus Quarzit, teilweise verkieseltem Kalkstein, SiO₂-reichen Plutoniten, teilweise kalkig zementierten SiO₂-reichen Sedimentgesteinen, Quarzkristallen (Sandfraktion), Feldspatkristallen (Sandfraktion) und Chertgesteinen.

Darüber hinaus enthielt der Beton Splittkörner mit Durchmessern von bis zu ca. 18 mm. Die Splittkörner bestanden aus deutlich alteriertem basischen Vulkangestein (Diabas), das jedoch sehr variable petrographische Eigenschaften aufwies (**Bild 128** bis **Bild 133**). Meist hatten die Splittkörner eine mikrokristalline Matrix. Darin lagen unregelmäßig feinkristalline, nadelförmige Plagioklaskristalle und teilweise ebenso feinkörnige Pyroxenkristalle. Die Phasen waren unterschiedlich stark alteriert. Des Weiteren traten opake Phasen auf. Einige Körner enthielten größere Einsprenglinge aus Plagioklas, selten auch aus Pyroxen oder Olivin (**Bild 132**, **Bild 133**). Die Einsprenglinge waren teilweise vollständig zu Alterationsprodukten umgewandelt. Bei den Alterationsprodukten handelte es sich meist um Calcit (**Bild 131**) und Chlorit. Einzelne Splittkörner waren als Mandelstein ausgeprägt. Die Poren des Mandelsteins waren vollständig mit Calcit oder sehr feinkörnigen Phasen gefüllt. Selten waren Splittkörner mit vergleichbarem Mineralbestand grobkristallin ausgeprägt. Die Splittkörner enthielten teilweise Quarz- oder Calcitadern.

Oberbeton aus Streckenabschnitt 4 (N2)

Im Dünnschliff von Beton N2 (Oberbeton) wurden natürlich gerundete Gesteinskörner (Sand) mit Durchmessern von bis zu ca. 2 mm beobachtet (**Bild 140** bis **Bild 143**). Die Körner bestanden aus Quarzkristallen, Quarzit, Feldspatkristallen und SiO₂-reichen Plutoniten.

Darüber hinaus enthielt der Beton gebrochene Sandkörner und Splittkörner mit Durchmessern von bis zu ca. 16 mm. Petrographisch ließen sich zwei verschiedene Materialien unterscheiden.

Die Brechsandkörner (**Bild 140**, **Bild 141**) sowie ein Teil der Splittkörner (**Bild 144** bis **Bild 147**) bestanden aus einem mittelkristallinen basischen Vulkangestein (Basalt oder Basanit). Als Mineralphasen wurden Feldspat (meist Plagioklas), Pyroxen sowie weiteren Phasen mit niedrigen (wahrscheinlich Nephelin) bis sehr niedrigen (wahrscheinlich Analcim) Interferenzfarben beobachtet. Daneben trat eine opake Phase auf. Einige Körner enthielten Einsprenglinge aus Olivin oder Pyroxen (**Bild 146**, **Bild 147**). Verschiedene Phasen, vor allem Olivin, waren teilweise stark alteriert.

Ein Teil der groben Splittkörner (**Bild 148** bis **Bild 151**) bestand aus einem feinkristallinen basischen Vulkangestein, das deutliche Anzeichen für Alteration aufwies (Diabas). Die Matrix des Gesteins bestand vor allem aus Feldspat (wahrscheinlich vor allem Plagioklas) und Alterationsprodukten. Darüber hinaus wurde Pyroxen in unterschiedlichen Anteilen beobachtet. Teilweise waren die Splittkörner als Mandelstein ausgeprägt, dessen Poren mit Quarz, Calcit oder nicht identifizierbaren, sehr feinkristallinen Phasen gefüllt waren (**Bild 150**, **Bild 151**). Teilweise enthielt das Gestein Einsprenglinge aus Pyroxen, der wenig bis vollständig alteriert war.

Unterbeton aus Streckenabschnitt 4 (N2)

Im Dünnschliff von Beton N2 (Unterbeton) wurden natürlich gerundete Gesteinskörner (Sand) mit Durchmessern von bis zu ca. 2 mm beobachtet (**Bild 154**, **Bild 155**). Die Körner bestanden aus Quarzkristallen, Quarzit, Feldspatkristallen und SiO₂-reichen Plutoniten.

Darüber hinaus enthielt der Beton gebrochene Sandkörner (**Bild 154, Bild 155**) und Splittkörner (**Bild 156, Bild 159**) mit Durchmessern von bis zu ca. 22 mm. Petrographisch entsprach das Material dem Gestein, das in Beton N2 (Oberbeton) im Brechsand- und Splittanteil auftrat.

Die Brechsand- und Splittkörner bestanden aus einem mittelkristallinen basischen Vulkangestein. Als Mineralphasen wurden Feldspat (meist Plagioklas), Pyroxen sowie weiteren Phasen mit niedrigen (wahrscheinlich Nephelin) bis sehr niedrigen (wahrscheinlich Analcim) Interferenzfarben beobachtet. Daneben trat eine opake Phase auf. Einige Körner enthielten Einsprenglinge aus Olivin oder Pyroxen. Verschiedene Phasen, vor allem Olivin, waren teilweise stark alteriert.

Oberbeton aus Streckenabschnitt 5 (WE)

Im Dünnschliff von Beton WE (Oberbeton) wurden natürlich gerundete Gesteinskörner (Sand und Kies) mit Durchmessern von bis zu ca. 8 mm beobachtet (**Bild 163, Bild 166**). Die Körner bestanden aus Quarzit, quarz- und feldspatreichen Plutoniten und Metamorphiten, quarzreichen Sedimentgesteinen, Quarzkristallen (Sandfraktion), Feldspatkristallen (Sandfraktion), stark alterierten basischen Magmatiten sowie Glimmerkristallen (Sandfraktion).

Darüber hinaus enthielt der Beton Splittkörner mit Durchmessern von bis zu ca. 18 mm. Die Splittkörner bestanden aus Granit (**Bild 167 bis Bild 172**). Als Mineralphasen traten Quarz, Feldspat (vor allem Alkalifeldspat) und Glimmer (vor allem Biotit) auf. Im Splitt wurden Domänen oder ganze Körner mit deutlich unterschiedlichen Kristallgrößen von Quarz und Feldspat beobachtet (**Bild 167 bis Bild 172**). Die Kristalle waren mittel- bis sehr grobkristallin. In den sehr grobkristallinen Bereichen, teils auch in mittelkristallinen Bereichen, trat Feldspat oft idiomorph auf. Die Biotitgehalte waren in feinkristallinen Bereichen höher. Die Biotitkristalle waren hier teilweise schwach eingeregelt (**Bild 167**). Biotit war teilweise vergrünt. Feldspäte waren teilweise stark alteriert.

Unterbeton aus Streckenabschnitt 5 (WE)

Im Dünnschliff von Beton WE (Unterbeton) wurden natürlich gerundete Gesteinskörner (Sand und Kies) mit Durchmessern von bis zu ca. 22 mm beobachtet (**Bild 175, Bild 178**). Nach ihrer petrographischen Zusammensetzung stimmte das Material mit der Sand- und Kiesfraktion in Beton WE (Oberbeton) überein. Die Körner bestanden aus Quarzit, quarz- und feldspatreichen Plutoniten und Metamorphiten, quarzreichen Sedimentgesteinen, Quarzkristallen (Sandfraktion), Feldspatkristallen (Sandfraktion), stark alterierten basischen Magmatiten sowie Glimmerkristallen (Sandfraktion).

3.4.3 Mikroskopische Untersuchungen (Betongefüge)

Beton aus Streckenabschnitt 1 (F)

Der Beton aus dem Streckenabschnitt F enthielt Luftporen und Verdichtungsporen mit Durchmessern von bis zu 2 mm. An seiner Oberfläche (Betonfahrbahndecke) war der Beton bis in eine Tiefe von ca. 4 mm carbonatisiert.

Im Ausgangszustand (vor 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr) wurden im Beton einige Risse durch Kies- und Sandkörner und Zementstein beobachtet (**Bild 100, Bild 101**). In wenigen Luftporen neben Kies- und Sandkörnern trat Alkali-Kieselgel auf (**Bild 99, Bild 100**). Somit waren in dem Beton in geringem Umfang Anzeichen für eine AKR erkennbar, die jedoch nicht schädigend war.

Nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung) wurden im Vergleich zum Ausgangszustand mehr Risse durch Kies- und Sandkörner und Zementstein beobachtet (**Bild 102, Bild 103**). Die Risse waren teilweise vernetzt. Außerdem trat mehr Alkali-Kieselgel in Luftporen auf (**Bild 104**). Vereinzelt verliefen auch Risse durch Splittkörner und Zementstein. Die Betonprobe zeigte somit nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr in geringem Umfang Anzeichen für eine schädigende AKR.

Beton aus Streckenabschnitt 2 (W)

Der Beton aus dem Streckenabschnitt W enthielt Luftporen und Verdichtungsporen mit Durchmessern von bis zu 2 mm. An seiner Oberfläche (Betonfahrbahndecke) war der Beton bis in eine Tiefe von ca. 4 mm carbonatisiert, entlang einiger oberflächlicher Risse etwas tiefer.

Im Ausgangszustand (vor 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr) wurden im Beton wenige Risse durch Sand- und Kieskörner und Zementstein beobachtet (**Bild 117, Bild 118**). In einzelnen Luftporen neben Kies- und Sandkörnern trat Alkali-Kieselgel auf (**Bild 119**). Somit waren in dem Beton in sehr geringem Umfang Anzeichen für eine AKR erkennbar, die jedoch nicht schädigend war.

Nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung) wies der Beton deutlich mehr Risse durch Sand- und Kieskörner und Zementstein auf (**Bild 121 bis Bild 123**). Die Risse waren teilweise vernetzt. Darüber hinaus wurde deutlich mehr Alkali-Kieselgel in Luftporen und auch in Rissen beobachtet (**Bild 120 bis Bild 123**). Die Betonprobe zeigte somit nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr Anzeichen für eine schädigende AKR.

Gemäß den Bestandsunterlagen besteht bezüglich der groben Gesteinskörnungen eine große Ähnlichkeit der Zusammensetzungen der Betone aus den Abschnitten 1 (F) und 2 (W). Dieser Zusammenhang konnte mit den Dünnschliffuntersuchungen sowohl bzgl. der Petrographie der Gesteinskörnungen (vgl. Abschnitt 3.4.2) als auch bzgl. des Zustandes des Betongefüges bestätigt werden.

Beton aus Streckenabschnitt 3 (N1)

Der Beton aus dem Streckenabschnitt N1 enthielt Luftporen und Verdichtungsporen mit Durchmessern von bis zu 3 mm. Viele Luftporen waren randlich oder vollständig mit Ettringit gefüllt (**Bild 134**). Hinweise auf Gefügeschäden durch sekundäre Ettringitbildung wurden jedoch nicht beobachtet. An seiner Oberfläche (Betonfahrbahndecke) war der Beton bis in eine Tiefe von ca. 3 mm carbonatisiert.

Im Ausgangszustand (vor 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr) wurden im Beton einige feine Risse durch Sand- und Kieskörner und Zementstein beobachtet (**Bild 135**). In einzelnen Luftporen neben Kies- und Sandkörnern trat Alkali-Kieselgel auf (**Bild 136**). Somit waren in dem Beton in sehr geringem Umfang Anzeichen für eine AKR erkennbar, die jedoch nicht schädigend war.

Auch nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung) traten einige feine Risse durch Sand- und Kieskörner und Zementstein auf (**Bild 138**). Daneben wurden einzelne etwas breitere und mehrere cm lange Rissysteme beobachtet. Die Risse verliefen durch ein Sandkorn und am Rande durch ein Splittkorn (**Bild 137**). Sie enthielten keine Reaktionsprodukte. Einzelne Luftporen neben Kieskörnern und neben einem Splittkorn (an vollständig alteriertem Einsprengling in Diabas) enthielten Alkali-Kieselgel (**Bild 139**). Die Betonprobe zeigte somit nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr in geringem Umfang Anzeichen für eine schädigende AKR.

Betone aus Streckenabschnitt 4 (N2)

Bei dem Streckenabschnitt N2 wurde anhand der Bestandsunterlagen und der optischen Begutachtung der Bohrkerne zunächst von einer einschichtigen Bauweise ausgegangen. Erst anhand der Dünnschliffuntersuchungen wurde festgestellt, dass die Betone im oberen und unteren Bereich der Bohrkerne Unterschiede in Bezug auf die Gesteinskörnung aufwiesen. Im oberen Bereich war Diabassplitt vorhanden, der im unteren Bereich nicht gefunden werden konnte. Durch eine weitergehende Recherche in Bestandsunterlagen wurde nachträglich bestätigt, dass die Betondecke einen zweischichtigen Aufbau besitzt. Aufgrund der Konzeption des Versuchsprogramms wurde vor dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ein Dünnschliff aus dem oberen Teil eines Bohrkerns untersucht, der im Wesentlichen den Oberbeton repräsentiert. Nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr wurde ein Dünnschliff aus einem Prisma aus dem unteren Teil des Bohrkerns untersucht, der den Unterbeton repräsentiert.

Oberbeton aus Streckenabschnitt 4 (N2)

Der Oberbeton aus dem Streckenabschnitt N2 F enthielt Luftporen und Verdichtungsporen mit Durchmessern von bis zu 3 mm. An seiner Oberfläche (Betonfahrbahndecke) war der Beton bis in eine Tiefe von ca. 5 mm carbonatisiert, entlang einiger oberflächlicher Risse etwas tiefer.

Im Ausgangszustand (vor 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr) wurden in dem Beton einige Risse an der Oberfläche, senkrecht zur Fahrbahndecke, beobachtet. Die Risse waren bis ca. 15 mm tief und ungefüllt. Solche oberflächennahen, kurzen Risse gehen vermutlich auf

mechanische Ursachen zurück. Darüber hinaus wurden in dem Beton nur vereinzelt Risse beobachtet, die aus Splittkörnern in den Zementstein reichten (**Bild 152**). In einzelnen Luftporen neben Sandkörnern trat Alkali-Kieselgel auf (**Bild 153**). Somit waren in dem Beton in geringem Umfang Anzeichen für eine AKR erkennbar, die jedoch nicht schädigend war.

Unterbeton aus Streckenabschnitt 4 (N2) (Unterbeton; nur nach 60-°C Betonversuch)

Der Unterbeton aus dem Streckenabschnitt N2 enthielt Luftporen und Verdichtungsporen mit Durchmessern von bis zu 3 mm.

Nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung) traten in dem Beton Risse durch Zementstein und um Gesteinskörner auf, die teilweise zu Rissystemen vernetzt waren. Teilweise verliefen Risse durch Splittkörner, Brechsandkörner oder Sandkörner und Zementstein (**Bild 160, Bild 161**). Die Risse waren ungefüllt. Einzelne Luftporen neben Sandkörnern aus Quarz und aus Basalt enthielten Alkali-Kieselgel (**Bild 162**). Die Betonprobe zeigte somit nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr in geringem Umfang Anzeichen für eine schädigende AKR.

Oberbeton aus Streckenabschnitt 5 (WE)

Der Oberbeton aus dem Streckenabschnitt WE enthielt Luftporen und Verdichtungsporen mit Durchmessern von bis zu 5 mm. An seiner Oberfläche (Betonfahrbahndecke) war der Beton bis in eine Tiefe von ca. 5 mm carbonatisiert, entlang von Kontaktzonen zu Splittkörnern etwas tiefer.

Im Ausgangszustand (vor 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr) wurden in dem Beton einige Risse an der Oberfläche, senkrecht zur Fahrbahndecke, beobachtet. Die Risse waren bis ca. 15 mm tief und ungefüllt. Sie verliefen durch einzelne Sandkörner und randlich durch einzelne Splittkörner. Solche oberflächennahen, kurzen Risse gehen vermutlich auf mechanische Ursachen zurück. Somit waren in dem Beton keine Anzeichen für eine AKR erkennbar.

Nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung) war das Betongefüge im Wesentlichen unverändert. Es wurden einzelne Risse an der Oberfläche des Probekörpers beobachtet, die durch einzelne Sand- und Splittkörner und durch Zementstein verliefen und ungefüllt waren (**Bild 173**). Darüber hinaus traten einzelne Risse auf, die von Kieskörnern aus in die Zementsteinmatrix verliefen. Vereinzelt Luftporen enthielten Alkali-Kieselgel (**Bild 174**). Die Betonprobe zeigte somit nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr in geringem Umfang Anzeichen für eine AKR, die jedoch nicht schädigend war.

Unterbeton aus Streckenabschnitt 5 (WE)

Der Unterbeton aus dem Streckenabschnitt WE enthielt Luftporen und Verdichtungsporen mit Durchmessern von bis zu 4 mm.

Weder im Ausgangszustand (vor 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr) noch nach dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr (10 %ige NaCl-Lösung) wurden in dem Beton Hinweise beobachtet, die auf eine AKR hindeuten.

3.4.4 Bestimmung der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit

In **Bild 8** sind die an den Bestandsproben bestimmten Spaltzugfestigkeiten dargestellt. Die einzelnen Messwerte sowie die Abmessungen und Rohdichten der Probekörper sind in **Tabelle 31** bis **Tabelle 35** im Anhang E zusammengestellt. Die Proben aus dem oberen Teil des Bohrkerns (Fahrbahnoberfläche) sind dabei jeweils mit „-o“ am Ende der Probenbezeichnung benannt. Dementsprechend tragen die Proben aus dem unteren Teil des Bohrkerns (Übergang zur Trag-schicht) die Benennung „-u“ am Ende der Probenbezeichnung. Bei den zweischichtigen Streckenabschnitten (N2 und WE) wurde davon ausgegangen, dass die Proben „-o“ den Oberbeton (OB) und die Proben „-u“ den Unterbeton (UB) repräsentieren. Eine klare optische Abgrenzung zwischen Ober- und Unterbeton war an den Bohrkernen aus den zweischichtigen Streckenabschnitten nicht möglich. Zum Vergleich sind in **Tabelle 31** bis **Tabelle 35** die Biegezugfestigkeiten aufgeführt, die gemäß den Bestandsunterlagen im Rahmen der Eignungsprüfungen an Balken mit den Abmessungen 700 x 150 x 100 mm³ bestimmt wurden. Die gemessenen Spaltzugfestigkeiten waren größtenteils geringer als die jeweiligen Biegezugfestigkeiten. Die Proben aus dem Abschnitt 4 (N2) wiesen die höchsten Spaltzugfestigkeiten auf (Oberbeton 7,2 MPa, Unterbeton 7,0 MPa). Dies bestätigt die Angaben in den Bestandsunterlagen, nach denen die Betone aus dem Abschnitt 4 (N2) in den Eignungsprüfungen die höchsten Biegezugfestigkeiten aufwiesen (Oberbeton 7,9 MPa, Unterbeton 7,8 MPa).

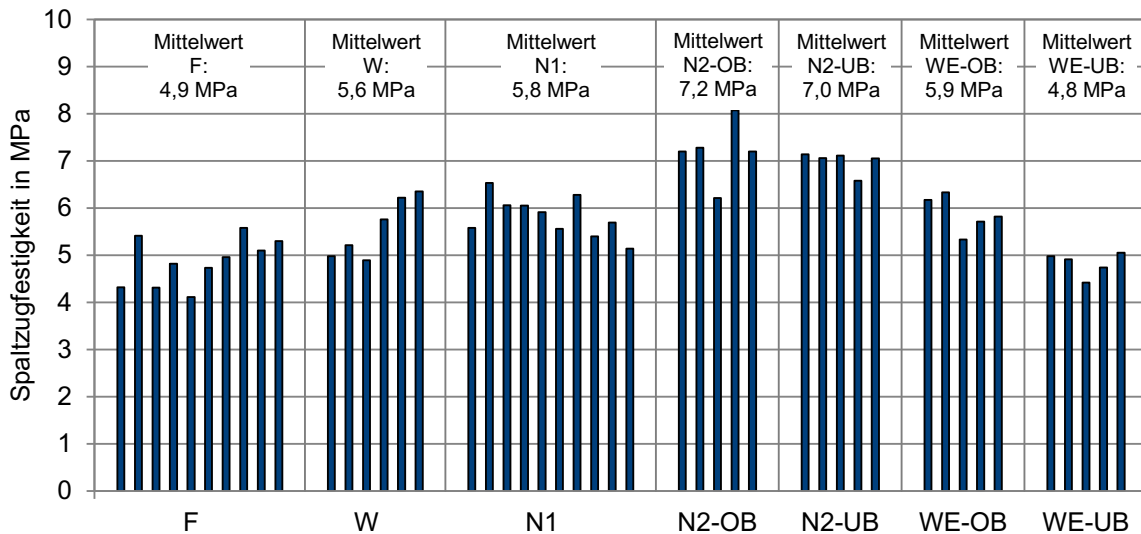


Bild 8 Spaltzugfestigkeiten der untersuchten Betone

In **Bild 9** sind die an den Bestandsproben bestimmten Druckfestigkeiten dargestellt. Die einzelnen Messwerte sowie die Abmessungen und Rohdichten der Probekörper sind in **Tabelle 36** bis **Tabelle 40** im Anhang E zusammengestellt. Zum Vergleich sind in **Tabelle 36** bis **Tabelle 40** zusätzlich die Druckfestigkeiten aufgeführt, die gemäß den Bestandsunterlagen im Rahmen der Eignungsprüfungen an Würfeln mit 200 mm Kantenlänge bestimmt wurden. Die Druckfestigkeit der Bestandsproben wurde jeweils am mittleren Teil eines Bohrkerns bestimmt, vgl. Abschnitt 2.4.3. Für die zweischichtigen Streckenabschnitte (N2 und WE) wurde anhand der optischen Beurteilung angenommen, dass die Probekörper im Wesentlichen den Unterbeton repräsentieren. Die an den Bestandsproben bestimmten Druckfestigkeiten waren durchgehend höher als die in den Bestandsunterlagen angegebenen Druckfestigkeiten, die im Rahmen der

Eignungsprüfungen an Würfeln mit 20 cm Kantenlänge bestimmt wurden. Gemäß den Bestandsunterlagen wurden alle Betone der Festigkeitsklasse B35 zugeordnet und erreichten in den Eignungsprüfungen Druckfestigkeiten zwischen 45 MPa und 57 MPa. Die an den Bestandsproben bestimmten Druckfestigkeiten waren bei den Streckenabschnitten 2 (W), 3 (N1) und 4 (N2) mit > 90 MPa deutlich höher.

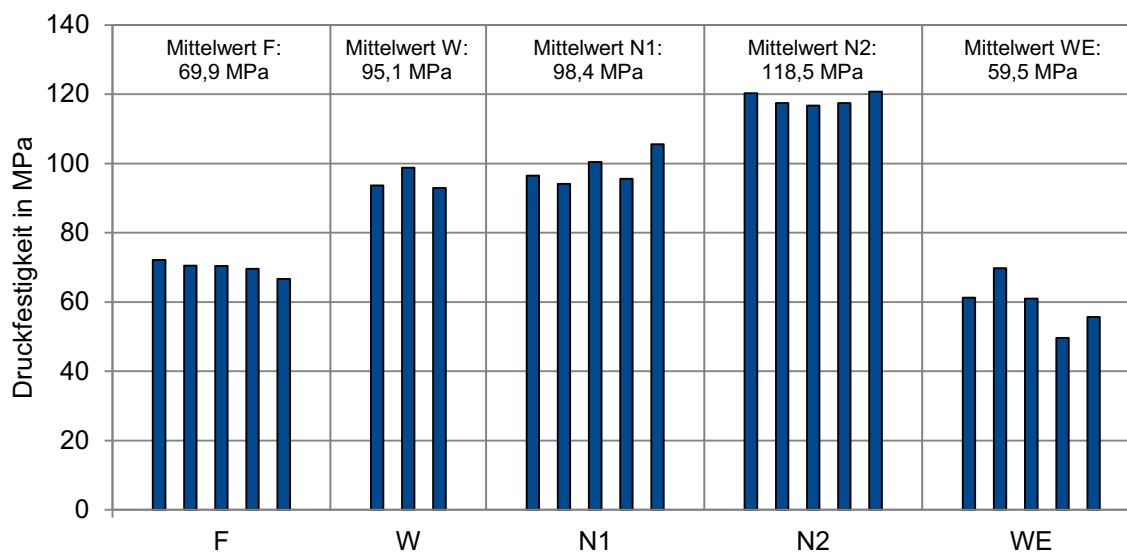


Bild 9 Druckfestigkeiten der untersuchten Betone

3.5 Untersuchungen an Gesteinskörnungen

3.5.1 Röntgenbeugungsanalysen

An Gesteinskörnungsproben, die aus den Bohrkernen durch Brechen und Sortieren zurückgewonnen wurden, wurden Röntgenbeugungsanalysen mit Rietveldauswertung durchgeführt. Zum Vergleich wurden Gesteinskörnungsproben aus der aktuellen Produktion untersucht, sofern diese von den Herstellern beschafft werden konnten. Die Ergebnisse der Rietveldauswertungen sind in **Tabelle 9** bis **Tabelle 14** zusammengestellt. Die zugehörigen Röntgendiffraktogramme sind im Anhang G in **Bild 217** bis **Bild 222** dargestellt.

Tabelle 9 Ergebnisse der Rietveldauswertung für die Granitsplitt aus Neustift und Schwarzach sowie die zugehörigen rückgewonnenen Gesteinskörnungen aus Bohrkernen (Streckenabschnitte 1 (F) und 2 (W))

		rückgewonnene Gesteinskörnung aus Bohrkernen, gem. Unterlagen Gemisch Neustift + Schwarzach		neu beschaffte Gesteinskörnungsproben (2018)	
		Bohrkern F	Bohrkern W	Granitsplitt 11/22 Neustift	Granitsplitt 11/22 Schwarzach
Quarz	[%]	30 - 35	35 - 40	35 - 40	ca. 35
Feldspäte Kalifeldspat Plagioklas	[%]	ca. 20 ca. 30 - 35	20 - 25 ca. 25	20 - 25 ca. 25	5 - 10 30 - 35
Biotit	[%]	5 - 8	ca. 5	< 2	ca. 10
Muskovit	[%]	< 2	ca. 5	5 - 8	ca. 5
Chlorit	[%]	< 3	3 - 5	< 3	ca. 5
Kaolinit	[%]	< 2	< 2	< 2	Spuren
Calcit	[%]	< 1	< 1	Spuren	< 2
Hämatit	[%]	< 1	< 1	Spuren	< 1
Hornblende	[%]	< 3	< 3	-	-

Tabelle 10 Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Sand und Kies aus Moosburg sowie die aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 1 (F)

		rückgewonnene Gesteinskörnung aus Bohrkern F	neu beschaffte Gesteinskörnungsproben (2018)	
		Moosburg (gem. Unterlagen)	Sand 0/4 Moosburg	Kies 4/8 Moosburg
Quarz	[%]	60 - 65	50 - 60	40 - 45
Calcit	[%]	< 5	10 - 15	ca. 15
Dolomit	[%]	20 - 25	20 - 25	35 - 40
Feldspatgruppe - Kalifeldspat - Albit - Plagioklas	[%]	5 - 7 3 - 4 2 - 3 -	ca. 5 2 - 3 2 - 3 Spuren	ca. 3 < 2 ca. 1 -
Hornblende	[%]	< 2	Spuren	< 2
Muskovit / Illit	[%]	< 2	ca. 3	< 2
Kaolinit	[%]	< 1	< 1	< 1
Chlorit-Gruppe	[%]	Spuren	< 3	Spuren

Tabelle 11 Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Diabassplitt aus Kupferberg sowie die aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 3 (N1)

		rückgewonnene Gesteinskörnung aus Bohrkern N1; Untersteinach (gem. Unterlagen)	neu beschaffte Gesteinskörnungsprobe Diabassplitt 11/16 Kupferberg (2018) – Ersatz für Untersteinach
Plagioklas-Gruppe incl. Albit	[%]	40 - 50	25 - 30
Quarz	[%]	< 2	ca. 20
Calcit	[%]	5 - 7	< 2
Dolomit	[%]	-	8 - 10
Glimmer-Gruppe (Illit)	[%]	< 5	ca. 30
Chlorit-Gruppe	[%]	ca. 25	5 - 10
Kaolinit	[%]	-	< 3
Pyroxen-Gruppe	[%]	8 - 10	< 2
Olivin	[%]	-	Spuren
Hämatit	[%]	-	Spuren

Tabelle 12 Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Diabassplitt aus Bad Berneck sowie die zugehörige aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 4 (N2)

		rückgewonnene Gesteinskörnung aus Bohrkern N2; Bad Berneck (gem. Unterlagen)	neu beschaffte Gesteinskörnungsprobe Diabassplitt 8/16 Bad Berneck (2018)
Quarz	[%]	3 – 5	10 – 12
Calcit	[%]	3 – 5	10 – 12
Glimmergruppe	[%]	< 3	ca. 5
Plagioglase (Anorthit, Albit)	[%]	40 - 50	25 – 30
Kalifeldspat	[%]	< 5	ca. 10
Chlorit-Gruppe	[%]	30 - 35	ca. 30
Zeolith oder Stilpnomelan	[%]	-	< 2
Magnetit	[%]	< 1	ca. 1

Tabelle 13 Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Basaltplitt aus Zeilberg sowie die zugehörige aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 4 (N2)

		rückgewonnene Gesteinskörnung aus Bohrkern N2; Zeilberg (gem. Unterlagen)	neu beschaffte Gesteinskörnungsprobe Basaltplitt 8/16 Zeilberg (2018)
Plagioklas-Gruppe	[%]	15 - 20	ca. 20
Alkalifeldspat-Gruppe	[%]	ca. 10	20 – 25
Glimmer-Gruppe (Biotit)	[%]	< 1	< 3
Pyroxen-Gruppe	[%]	35 - 40	20 - 25
Olivin	[%]	8 - 10	ca. 5
Analcim	[%]	ca. 5	10 – 15
Nephelin	[%]	10 - 15	ca. 10
Chlorit / Montmorillonit	[%]	< 2	< 3
Magnetit	[%]	ca. 3	< 2
Hämatit	[%]	Spuren	Spuren
Apatit	[%]	< 1	< 2

Tabelle 14 Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Granitsplitt aus Nittenau sowie die zugehörige aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 5 (WE), Oberbeton

		rückgewonnene Gesteinskörnung aus Bohrkern WE; Nittenau (gem. Unterlagen)	neu beschaffte Gesteinskörnungsprobe Granitsplitt 8/16 Nittenau (2018)
Quarz	[%]	ca. 30	ca. 25
Feldspäte Kalifeldspat Albit Anorthit	[%]	ca. 30 ca. 25 ca. 5	ca. 30 ca. 25 < 5
Biotit / Muskovit	[%]	5 – 8	ca. 10
Chlorit	[%]	< 3	5 – 8
Kaolinit	[%]	< 1	< 2
Calcit	[%]	< 1	< 1
Hämatit	[%]	< 1	< 1

In den Streckenabschnitten 1 (F) und 2 (W) wurden gemäß den Bestandsunterlagen Granitsplitte aus Neustift und Schwarzach verwendet. Die rückgewonnenen Gesteinskörnungen sind somit als Gemisch der beiden Granitsplitte anzusehen. Anhand der Ergebnisse der Röntgenbeugungsanalysen konnten die Angaben aus den Bestandsunterlagen größtenteils bestätigt werden, s. **Bild 217** bzw. **Tabelle 9**. Die rückgewonnene Gesteinskörnung aus dem Streckenabschnitt 1 (F) erwies sich im Vergleich zu den aktuellen Proben als Gemisch von Neustift und Schwarzach mit Dominanz von Schwarzach. In den Bestandsunterlagen wurden keine Angaben zur Aufteilung der Gesteinskörnungen gemacht. Die rückgewonnene Gesteinskörnung aus dem Streckenabschnitt 2 (W) erwies sich im Vergleich zu den aktuellen Proben als Gemisch von Neustift und Schwarzach mit Dominanz von Neustift. Gemäß den Bestandsunterlagen wurde in dem Beton ein höherer Anteil des Splittes aus Schwarzach verwendet, sodass in diesem Fall keine vollständige Übereinstimmung mit den Analyseergebnissen gegeben ist.

Weiterhin kamen gemäß den Bestandsunterlagen im Streckenabschnitt 1 (F) Sand und Kies aus Moosburg zum Einsatz. Dieses Kieswerk war das einzige der in den Unterlagen genannten, zu dem Kontaktdaten gefunden und somit aktuelle Proben beschafft werden konnten. Die aus den Bohrkernen zurückgewonnene Kiesprobe wies im Vergleich zu den aktuellen Proben der Korngruppen 0/4 und 4/8 eine ähnliche Phasenzusammensetzung auf, s. **Bild 218**, wobei die Mengenanteile der Phasen etwas variierten, s. **Tabelle 10**.

Im Streckenabschnitt 3 (N1) wurde gemäß den Bestandsunterlagen Diabassplitt aus Untersteinach eingesetzt. Nach Aussagen der Firma Schicker Diabas wurde der zugehörige Steinbruch mittlerweile geschlossen. Die Firma Schicker Diabas betreibt in der Region weitere Diabassteinbrüche, wobei nach Aussage des Technischen Betriebsleiters Herrn Kreil der Standort Kupferberg geologisch die größte Ähnlichkeit mit dem geschlossenen Standort Untersteinach aufweist. Aus diesem Grund wurde eine Probe des Diabassplittes 11/16 aus Kupferberg untersucht und mit der rückgewonnenen Gesteinskörnung aus dem Streckenabschnitt 3 (N1) verglichen. Die rückgewonnene Gesteinskörnung und die Probe aus Kupferberg wiesen deutliche Unterschiede in der Zusammensetzung auf, s. **Bild 219** bzw. **Tabelle 11**. Der Vergleich mit der Gesteinskörnung aus Kupferberg erscheint daher hier nicht zutreffend.

Im Streckenabschnitt 4 (N2) wurden gemäß den Bestandsunterlagen Basaltsplitt aus Zeilberg und Diabassplitt aus Bad Berneck eingesetzt. Die rückgewonnene Gesteinskörnung wurde anhand von optischen Kriterien als Diabas (grünliche Farbe) oder Basalt (dunkelgraue Farbe) klassifiziert und anschließend getrennt analysiert. Für den rückgewonnenen Diabas-splitt konnte eine Ähnlichkeit mit der aktuellen Probe aus Bad Berneck festgestellt werden, s. **Bild 220**. Die Phasenverteilung gemäß Rietveldauswertung wies aber zum Teil größere Unterschiede auf, s. **Tabelle 12**. Weiterhin wiesen sowohl die rückgewonnene Diabasprobe als auch die aktuelle Probe Ähnlichkeiten mit dem rückgewonnenen Material aus dem Streckenabschnitt 3 (N1), gemäß Bestandsunterlagen Diabassplitt aus Untersteinach, auf. Der Standort Bad Berneck liegt ca. 15 km Luftlinie vom geschlossenen Steinbruch Untersteinach entfernt und wird ebenfalls von der Firma Schicker Diabas betrieben.

Bei der Analyse der als Basalt klassifizierten rückgewonnenen Gesteinskörnung aus dem Streckenabschnitt 4 (N2) konnten die für einen Basalt typischen Mineralphasen festgestellt werden, die Mengenanteile unterschieden sich aber deutlich von denen der aktuellen Probe (andere Feldspattypen, Pyroxene, Olivin, Foide), s. **Bild 221** bzw. **Tabelle 13**. Derartige Abweichungen sind prinzipiell innerhalb einer Lagerstätte denkbar. Die Unterschiede könnten jedoch ebenso ein Hinweis darauf sein, dass die rückgewonnene Probe aus einer anderen Lagerstätte stammt als dokumentiert. In diesem Fall konnte somit anhand der Röntgenbeugungsanalysen nicht eindeutig geklärt werden, ob die rückgewonnene und die aktuelle Probe bzgl. ihrer Herkunft übereinstimmen.

Im Oberbeton des Streckenabschnitts 5 (WE) kam gemäß den Bestandsunterlagen Granitsplitt aus Nittenau zum Einsatz. Die rückgewonnene Gesteinskörnung wies im Vergleich zur aktuellen Probe aus Nittenau eine sehr ähnliche Zusammensetzung auf, s. **Bild 222** bzw. **Tabelle 14**.

3.5.2 Mikroskopische Untersuchungen

Kies Moosburg

Die untersuchte aktuelle Probe des Kieses war nach ihrer petrographischen Zusammensetzung gut mit dem Kies in Beton F vergleichbar. Die Annahme, dass die Materialien aus derselben Quelle stammen, ist plausibel.

In dem Streupräparat traten teils fossilhaltige Kalksteine, Quarzit, quarzreiche Sedimentgesteine und Chertgesteine auf (**Bild 179** bis **Bild 184**).

Granit Schwarzach

Die untersuchte aktuelle Probe wies aus petrographischer Sicht eine große Ähnlichkeit mit einem der in den Betonen F und W enthaltenen Graniten auf (gröber kristallin ausgeprägte Varietät).

Das Gestein wies vergleichbare Kristallgrößen auf und bestand aus Quarz, Feldspat (meist Plagioklas), Glimmer (meist Biotit) und einer opaken Phase (**Bild 185** bis **Bild 188**). Wie Feldspat und Quarz war auch Biotit oft grobkristallin und bildete teilweise Agglomerationen. Plagioklas war teilweise in zusammenhängenden Domänen serizitisiert.

Im Gegensatz zu dem entsprechenden Material in den Betonen F und W wurden in diesem Granit jedoch kein Apatit und kein Amphibol beobachtet. Trotzdem handelt es sich wahrscheinlich um dasselbe Material.

Granit Neustift

Die untersuchte aktuelle Probe wies aus petrographischer Sicht eine große Ähnlichkeit mit einem der in den Betonen F und W enthaltenen Graniten auf (feine kristallin ausgeprägte Varietät). Wahrscheinlich handelt es sich um dasselbe Material.

Das Gestein wies vergleichbare Kristallgrößen auf und bestand aus Quarz, Feldspat (Alkalifeldspat und Plagioklas) und Glimmer (Biotit und Muskovit; **Bild 189, Bild 190**). Der Biotit war oft vergünt. Er enthielt häufig Einschlüsse mit pleochroitischen Höfen (**Bild 191, Bild 192**) sowie seltener Rutilnadeln. Die Feldspäte waren teilweise serizitisiert.

Diabas Kupferberg

Bei der untersuchten aktuellen Probe handelte es sich um ein teils deutlich alteriertes basisches Vulkangestein (Diabas). Die im Streupräparat untersuchten Körner waren in ihren petrographischen Eigenschaften sehr variabel.

Als Mineralphasen wurden vor allem Feldspat (Plagioklas) und Pyroxen identifiziert. Daneben trat in Adern Quarz auf. Als Alterationsprodukte enthielt das Gestein vor allem Carbonate, Chlorit und Serizit. Einige der untersuchten Körner wiesen ein Fließgefüge auf (**Bild 193, Bild 194**). Andere hatten ein porphyrisches Gefüge mit Einsprenglingen aus Plagioklas in einer feinkristallinen Matrix aus Plagioklas und Pyroxen (**Bild 195, Bild 196**). Teilweise war das Gestein mittel- bis grobkristallin ausgeprägt und enthielt vor allem Plagioklas und Pyroxen (**Bild 197, Bild 198**). Die Gehalte an Alterationsprodukten waren sehr unterschiedlich (gering bis hoch).

Es handelte sich, wie bei dem Splitt in Beton N1, um Diabas. Aus petrographischer Sicht wiesen diese beiden Diabase aber viele Unterschiede auf. Es bleibt daher unklar, ob die beiden Diabase hinsichtlich ihres Verhaltens bezüglich einer AKR im Beton vergleichbar sind.

Basalt Zeilberg

Etwa 40 % der untersuchten aktuellen Probe entsprachen in ihrer Ausprägung dem Basalt/Basanit, der als Brechsand und Splitt im Beton N2 beobachtet wurde. Es handelte sich um ein mittelkristallines, basisches Vulkangestein (Basalt/Basanit; **Bild 199, Bild 200**). Als Mineralphasen wurden Feldspat (meist Plagioklas), Pyroxen sowie weitere Phasen mit niedrigen (wahrscheinlich Nephelin) bis sehr niedrigen (wahrscheinlich Analcim) Interferenzfarben beobachtet. Daneben trat eine opake Phase auf. Das Gestein enthielt teilweise Einsprenglinge aus Olivin oder Pyroxen. Verschiedene Phasen, vor allem Olivin, waren teilweise stark alteriert.

Etwa 60 % der hier untersuchten Probe wiesen einen vergleichbaren Phasenbestand auf. Hier war das Gestein jedoch insgesamt eher grobkristallin ausgeprägt oder enthielt große Einsprenglinge aus Pyroxen und Plagioklas in einer feinkristallinen Grundmasse, die oft stark

alteriert war (**Bild 201**, **Bild 202**). Teilweise wurden hier radialstrahlig gewachsene, feine Kristallbündel beobachtet, die nicht identifiziert werden konnten. Häufig trat in dieser Varietät des Gesteins eine sehr langgestreckte opake Phase auf.

Trotz der Unterschiede ist es nicht unwahrscheinlich, dass es sich bei dem Gestein um dasselbe Material wie in Beton N2 handelt. Unterschiede in der Kristallgröße von Basalten/Basaniten bei vergleichbarem Phasenbestand können auf unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten der Lava zurückgehen, aus denen das Gestein entstanden ist. Solche Unterschiede sind in verschiedenen Bereichen von Gesteinskörpern aus Basalt/Basanit zu erwarten.

Diabas Bad Berneck

Ein Teil der untersuchten aktuellen Splittprobe bestand aus einem feinkristallinen basischen Vulkangestein, das deutliche Anzeichen für Alteration aufwies (Diabas). Die Matrix des Gesteins, soweit noch erkennbar, bestand vor allem aus Feldspat (wahrscheinlich vor allem Plagioklas) und Alterationsprodukten. Darüber hinaus wurde teilweise Pyroxen beobachtet (**Bild 203**, **Bild 204**). Einige Splittkörner waren als Mandelstein ausgeprägt, dessen Poren mit Quarz, Calcit oder nicht identifizierbaren, sehr feinkristallinen Phasen gefüllt waren (**Bild 205**, **Bild 206**). Teilweise enthielt das Gestein Einsprenglinge aus Pyroxen (**Bild 203**, **Bild 204**).

Außerdem traten Körner auf, die fast vollständig aus grobkristallinem Calcit bestanden. In diesen Körnern traten jedoch auch Domänen aus Chlorit auf. Möglicherweise handelte es sich bei diesen Körnern um große Mandelfüllungen des Diabases.

Darüber hinaus enthielt die Probe Splittkörner, die aus quarzreichem Sedimentgestein (Quarzsandstein) bestanden, in dem teilweise die Schichtung erkennbar war (**Bild 207**, **Bild 208**). Der Sandstein enthielt Calcitadern oder calcitreiche Domänen.

Schließlich wurden Splittkörner aus einer Brekzie beobachtet, die Körner aller genannten Petrographien enthielt (**Bild 209**, **Bild 210**). Die Matrix der Brekzie bestand im Wesentlichen aus (durch geologische Alteration gebildetem) Chlorit. Auch Calcitadern traten in den Körnern auf.

Aus den Beobachtungen lässt sich schließen, dass die untersuchte Probe neben dem eigentlichen Diabas auch Nebengesteine enthielt, die eng mit der Entstehung des Diabases als Pillowbasalt assoziiert sind.

Die petrographischen Eigenschaften des eigentlichen Diabases waren denen des Diabas-splitts in Beton N2 ähnlich, auch wenn im Beton keine entsprechenden Nebengesteine beobachtet wurden. Wahrscheinlich handelt es sich um dasselbe Material.

Granit Nittenau

Die untersuchte aktuelle Probe wies aus petrographischer Sicht eine große Ähnlichkeit mit dem in Beton WE (Oberbeton) enthaltenen Granit auf. Wahrscheinlich handelt es sich um dasselbe Material.

In dem Gestein traten Quarz, Feldspat (vor allem Alkalifeldspat) und Glimmer (vor allem Biotit) auf. Im Splitt wurden Domänen oder ganze Körner mit deutlich unterschiedlichen Kristallgrößen von Quarz und Feldspat beobachtet (**Bild 211**, **Bild 216**). Die Kristalle waren mittel- bis sehr grobkristallin. In den sehr grobkristallinen Bereichen, teils auch in mittelkristallinen Bereichen, trat Feldspat oft idiomorph auf. Die Biotitgehalte waren in feinkristallinen Bereichen höher. Die Biotitkristalle waren hier teilweise schwach eingeregelt. Biotit war teilweise vergrünt. Feldspäte waren teilweise stark alteriert.

3.5.3 Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie

Die Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens nach Alkali-Richtlinie [8] sind in **Bild 10** bis **Bild 16** dargestellt. Der dargestellte Dehnungsverlauf entspricht jeweils dem Mittelwert von drei Prismen. Die einzelnen Messwerte sind im Anhang G angegeben. Die geringsten Dehnungen im Schnellprüfverfahren wurden für die Basaltsplitt bzw. den Basaltbrechsand aus dem Werk Zeilberg gemessen (0,14 mm/m bis 0,19 mm/m nach 13 Tagen). Die höchsten Dehnungen ergaben sich für die Diabassplitt aus dem Werk Kupferberg (2,06 mm/m bis 2,12 mm/m) sowie für die feine Gesteinskörnung aus dem Werk Moosburg (2,02 mm/m). Für die weiteren Gesteinskörnungen (Splitt Neustift, Nittenau, Schwarzach und Bad Berneck sowie Kies Moosburg) lagen die Dehnungen in einem Wertebereich zwischen 0,70 mm/m und 1,68 mm/m. Bei denjenigen Splitten, bei denen mehrere Korngruppen untersucht wurden (Zeilberg, Bad Berneck, Kupferberg, Nittenau), ergab das Schnellprüfverfahren erwartungsgemäß ähnliche Ergebnisse für die unterschiedlichen Korngruppen, da diese jeweils aus dem gleichen Festgestein hergestellt werden.

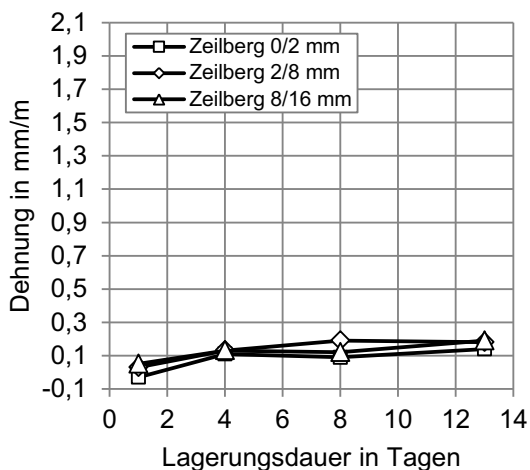


Bild 10 Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnungen aus dem Werk Zeilberg

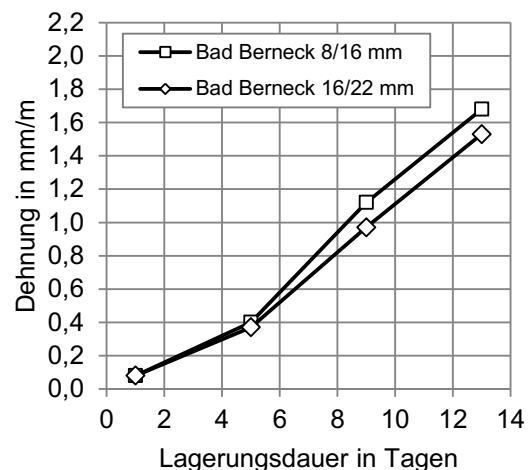


Bild 11 Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnung aus dem Werk Bad Berneck

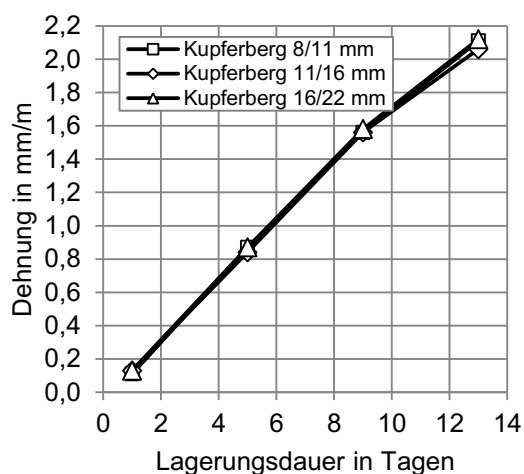


Bild 12 Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnungen aus dem Werk Kupferberg

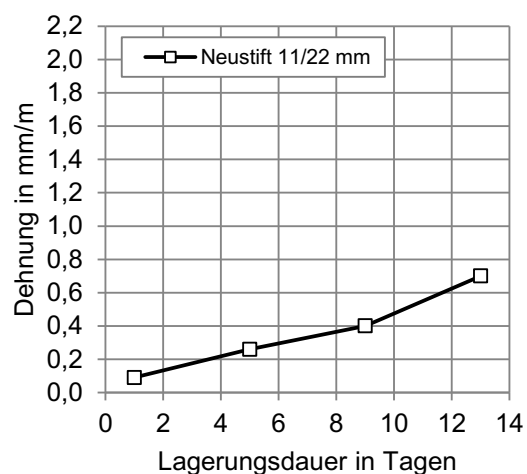


Bild 13 Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnung aus dem Werk Neustift

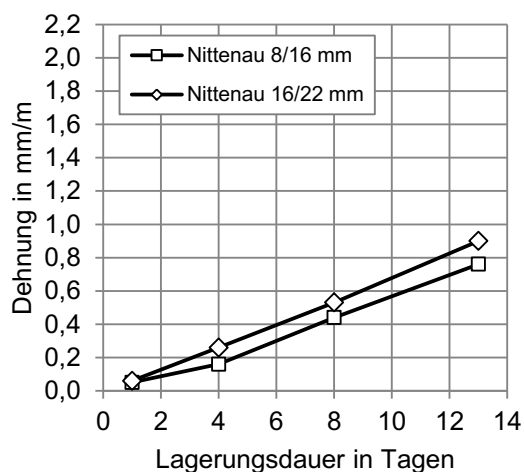


Bild 14 Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnungen aus dem Werk Nittenau

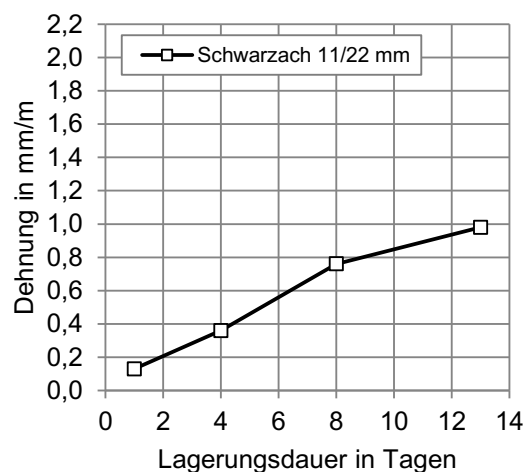


Bild 15 Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnung aus dem Werk Schwarzach

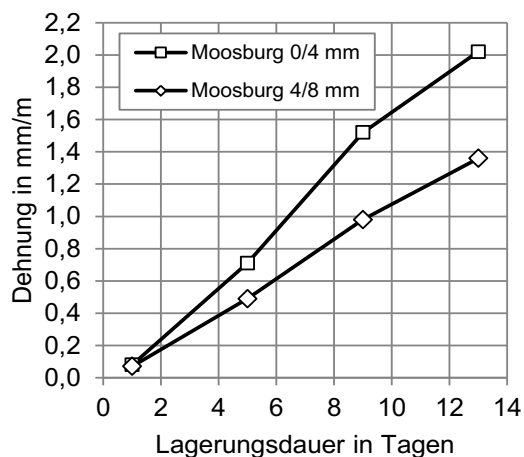


Bild 16 Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnungen aus dem Werk Moosburg

Gemäß Alkali-Richtlinie [8] gelten Gesteinskörnungen, für die im Schnellprüfverfahren eine Dehnung $> 1,0$ mm/m nach 13 Tagen bestimmt wurde, als potentiell alkaliempfindlich. Dies träge auf die Proben aus den Werken Bad Berneck, Kupferberg und Moosburg zu. Die Anwendbarkeit der Einstufung ist nach Alkali-Richtlinie aber auf bestimmte Gesteinsarten beschränkt, zu denen die hier untersuchten Gesteinskörnungen nicht zählen. Insofern sind die Dehnungen bei diesen Gesteinskörnungen nicht zwangsläufig als Indiz für eine erhöhte Alkaliempfindlichkeit zu werten. Gemäß einer in Bayern gültigen Bekanntmachung der Obersten Baubehörde [10], die als zusätzliche Regelung zum ARS Nr. 04/2013 gilt, sind Untersuchungen mit dem Schnellprüfverfahren Bestandteil des sogenannten Verfahrens 4. Mit dem Verfahren 4 kann der Nachweis der Unbedenklichkeit einer groben Gesteinskörnung hinsichtlich der Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion alternativ zu den im ARS Nr. 04/2013 beschriebenen Verfahren V1 bis V3 erbracht werden. Das Verfahren 4 kann beim Einsatz einer Gesteinskörnung in Unterbeton bzw. Oberbeton ($D > 8$ mm) angewendet werden, es gilt nicht für Oberbeton bzw. Waschbeton. Im letztgenannten Fall ist ein Gutachten gemäß der Verfahrensbeschreibungen V1 bis V3 zu erstellen. Die Schnelltests bei der Anwendung des Verfahrens 4 dienen gemäß [10] der Erfahrungssammlung und haben somit keine Konsequenz für die Bewertung der Eignung einer groben Gesteinskörnung, sofern die weiteren Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Verfahrens 4 erfüllt sind (Einstufung in Alkaliempfindlichkeitsklasse E I sowie Nachweis positiver Erfahrungen im Straßenbau).

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

4.1 Zusammenfassung

Schwerpunkt des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens (FuE-Vorhabens)

FE 08.0235/2014/GGB „Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 4/2013“ waren Untersuchungen an bisher ungeschädigten Betonfahrbahndecken im Bundesfernstraßennetz, in denen vor rund 30 Jahren Gesteinskörnungen zur Anwendung kamen, die nach Auskunft des Auftraggebers, der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), gemäß den heutigen Bestimmungen nach dem ARS Nr. 04/2013 [1] teilweise als alkaliempfindlich einzustufen sind.

In Abstimmung mit der BASt wurden insgesamt fünf Streckenabschnitte des bayerischen Autobahnnetzes für die Untersuchungen ausgewählt. Dazu zählten zwei Abschnitte der A7 (N1 und N2), zwei Abschnitte der A92 (F und W) und ein Abschnitt der A93 (WE). Drei der Betonfahrbahndecken wiesen einen einschichtigen und zwei einen zweischichtigen Aufbau auf.

In einem ersten Bearbeitungsschritt erfolgte die visuelle Begutachtung der Betondecken und eine Zuordnung zu AKR-Schadenskategorien gemäß der in [2] beschriebenen Kategorisierung. An keinem der fünf Streckenabschnitte wurden AKR-typische Schäden festgestellt, sodass jeweils eine Zuordnung zur Schadenskategorie 0 vorgenommen wurde.

Anschließend wurden auf Basis der von den zuständigen Autobahndirektionen Bayern-Süd und Bayern-Nord zur Verfügung gestellten Unterlagen AKR-relevante Kennwerte der verwendeten Betonzusammensetzungen zusammengestellt. In den Betonen kamen Portlandzemente PZ 35 F aus den Lieferwerken Mergelstetten, Burglengenfeld und Karlstadt zum Einsatz. Die Zementgehalte lagen zwischen 310 kg/m^3 und 350 kg/m^3 , die Wassermenge zwischen 0,43 und 0,46. Die Bestandsunterlagen enthielten keine Angaben zum Na_2O -Äquivalent der Zemente. Als gebrochene Gesteinskörnungen kamen Granit-, Basalt- und Diabassplitte zum Einsatz. Die zugehörigen Steinbrüche liegen in Bayern und werden bis auf eine Ausnahme bis zum jetzigen Zeitpunkt weiter betrieben. Weiterhin kamen Sande und Kiese aus lokalen Kieswerken zum Einsatz, die zumeist in der Nähe der Streckenabschnitte lagen. Zu den Kieswerken konnten mit einer Ausnahme keine Kontaktdaten mehr gefunden werden, sodass davon auszugehen ist, dass ein Großteil der Werke mittlerweile nicht mehr in Betrieb ist.

In einem weiteren Bearbeitungsschritt erfolgte die Entnahme von Bohrkernen aus den Betondecken. In der Regel wurden aus jedem Streckenabschnitt fünf Bohrkern mit 350 mm Durchmesser, zwei Bohrkern mit 150 mm Durchmesser und sechs Bohrkern mit 100 mm Durchmesser entnommen. In einzelnen Fällen wurde aufgrund von technischen Problemen mit der Bohrkronen von dieser Systematik abgewichen.

Aus den Bohrkernen mit 100 mm Durchmesser wurden Probekörper für die Prüfung der Spaltzugfestigkeit (Scheiben $\varnothing = 100 \text{ mm}$, Dicke = 50 mm, Prüfung nach TP B-StB, Teil 3.1.05) und der Druckfestigkeit (Zylinder $\varnothing = 100 \text{ mm}$, Höhe = 100 mm, Prüfung nach DIN EN 12390-3) präpariert. Für die Betone ergaben sich mittlere Spaltzugfestigkeiten zwischen 4,9 MPa und 7,2 MPa. Die mittleren Druckfestigkeiten lagen zwischen 59,5 MPa und 118,5 MPa und waren

damit teilweise deutlich höher als die in den Bestandsunterlagen angegebenen Werte aus den Eignungsprüfungen.

Für die Prüfung des Restdehnungspotentials infolge AKR wurden gemäß Vorgaben der BAST Prismen mit Abmessungen von rd. 100 x 100 x 300 mm³ aus den Bohrkernen mit 350 mm Durchmesser gesägt. Die Prismen wurden mit dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige und eine 10 %ige NaCl-Lösung geprüft. Alle Probekörper zeigten verhältnismäßig hohe Dehnungen im ersten Prüfzyklus, die nicht ausschließlich auf eine AKR zurückzuführen sein dürften. Parallel durchgeführte Untersuchungen zur Dehnungsentwicklung infolge Feuchteaufnahme an zwei Prismen bestätigten die Vermutung, dass ein Großteil der Dehnungen im ersten Prüfzyklus auf eine Feuchteaufnahme und nicht auf eine AKR zurückzuführen sein dürfte. Für weitere Auswertungen wurden daher die Dehnungsverläufe ab dem zweiten Prüfzyklus herangezogen. Innerhalb von 10 Prüfzyklen, ausgewertet ab dem Beginn des zweiten Zyklus, zeigten die Betone bei Alkalizufuhr durch eine 10 %ige NaCl-Lösung eine Dehnungszunahme zwischen 0,11 mm/m und 0,37 mm/m. Die Dehnungszunahme lag damit für alle Betone unterhalb des in [9] angegebenen Bewertungskriteriums von $\epsilon \leq 0,50$ mm/m. In den Versuchen mit Alkalizufuhr durch eine 3 %ige NaCl-Lösung lag die Dehnungszunahme innerhalb der betrachteten 10 Prüfzyklen zwischen 0,19 mm/m und 0,38 mm/m. Damit wurde das in [9] angegebene Bewertungskriterium von $\epsilon \leq 0,30$ mm/m in vier Fällen erfüllt und in zwei Fällen nicht erfüllt (Beton aus Streckenabschnitt F sowie Unterbeton aus Streckenabschnitt WE). Eine Begründung für den Umstand, dass in einigen Fällen wider Erwarten die Prüfung mit der geringeren NaCl-Konzentration zu höheren Dehnungen führte, konnte nicht gefunden werden. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Dehnungen in den Versuchen mit 10 % NaCl (bei Vernachlässigung des ersten Prüfzyklus) in Kombination mit den in den meisten Fällen zum Ende der Prüfdauer hin geringen Dehnungsanstiegen konnte geschlussfolgert werden, dass die Betone größtenteils ein geringes Restdehnungspotential bzgl. AKR aufweisen. Die Ergebnisse der Betonversuche spiegeln somit im Wesentlichen die für die Betone vorhandenen positiven Praxiserfahrungen wider. Offene Fragen bestehen hinsichtlich des Einflusses der Probekörpergeometrie. In der Vergangenheit wurde das Restdehnungspotential von bestehenden Betonen beim VDZ zumeist an Bestandsproben in Form von längs halbierten Bohrkernen mit 150 mm Durchmesser untersucht. Trotz identischer Vorlagerung zeigten diese in der Regel keinen so ausgeprägten Dehnungsanstieg im ersten Prüfzyklus wie die im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Prismen. Gleiches gilt für die Prüfung von im Labor hergestellten Prismen mit Abmessungen von 75 x 75 x 280 mm³. Vermutlich hat der Feuchtezustand der Proben vor dem Beginn des Versuchs, der sich je nach Alter und Geometrie der Proben unterscheidet, einen signifikanten Einfluss auf die Dehnungsentwicklung im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr.

Bei den Dünnschliffuntersuchungen zeigte sich, dass die untersuchten Betone in ihrem jeweiligen Ausgangszustand keine AKR-bedingten Gefügeschäden aufwiesen. Dies bestätigt die Zuordnung der entsprechenden Streckenabschnitte zur Schadenskategorie 0. Nach Abschluss der 60 °C Betonversuche mit Alkalizufuhr von außen durch eine 10 %ige NaCl-Lösung zeigten die Betone aus dem Abschnitt WE (Ober- und Unterbeton) keine Anzeichen für eine schädigende AKR. Die Betone aus den Abschnitten F, N1 und N2 (Unterbeton) wiesen nach der Prüfung in geringem Umfang Anzeichen für eine schädigende AKR auf. Nur in dem Beton aus dem Abschnitt W wurden nach der Prüfung in mäßigem Umfang Anzeichen für schädigende AKR beobachtet.

Einen weiteren Arbeitsschwerpunkt bildeten Untersuchungen an Gesteinskörnungen bzw. Vergleiche zwischen den im Beton vorhandenen und aktuell in den Abbaustätten produzierten Gesteinskörnungen.

Zur Charakterisierung des Mineralphasenbestandes wurden Röntgenbeugungsanalysen an den aus den Betonproben rückgewonnenen Gesteinskörnungen und an aktuellen Proben der Gesteinskörnungen durchgeführt, soweit deren Beschaffung möglich war. Für die drei untersuchten Granitsplitte (Neustift, Schwarzach, Nittenau) konnte jeweils eine große Ähnlichkeit zwischen den rückgewonnenen und den aktuellen Proben festgestellt werden. Die rückgewonnenen Gesteinskörnungen, die gemäß den Bestandsunterlagen als Diabassplitte (Bad Berneck, Untersteinach) bezeichnet wurden, wiesen die für Diabas typischen Mineralphasen auf, hinsichtlich der Mengenteile unterschieden diese sich aber teilweise deutlich von den aktuellen Proben. Ein ähnlicher Umstand ergab sich für den untersuchten Basaltsplitt (gemäß Bestandsunterlagen Zeilberg). In der rückgewonnenen Gesteinskörnung konnten die für einen Basalt typischen Mineralphasen festgestellt werden, die Mengenanteile unterschieden sich aber deutlich von denen der aktuellen Probe. Die aus den Bohrkernen des Abschnitts 1 (F) zurückgewonnene Kiesprobe, gemäß Bestandsunterlagen als Kies Moosburg bezeichnet, wies Ähnlichkeiten mit den aktuellen Gesteinskörnungsproben 0/4 und 4/8 aus dem Kieswerk Moosburg auf. Die in den weiteren Abschnitten eingesetzten Kiese wurden nicht analysiert, da zu den in den Bestandsunterlagen genannten Kieswerken keine Kontaktdaten gefunden werden konnten.

Die Petrographie der Gesteinskörnungen wurde an Dünnschliffen aus den Betonproben vor der Lagerung im 60 °C Betonversuch und an Dünnschliffen aus Streupräparaten aus aktuellen Gesteinskörnungsproben untersucht. Dabei zeigte sich, dass die neu beschafften Gesteinskörnungen Kies Moosburg, Granit Schwarzach, Granit Neustift, Basalt Zeilberg und Granit Nittenau in ihren Eigenschaften gut mit den entsprechenden Gesteinen aus den gleichen Quellen übereinstimmen, die in den Betonen eingesetzt wurden. Der neu beschaffte Diabas Kupferberg zeigte dagegen wenig Übereinstimmung mit dem Diabas Untersteinach (Beton N1), der aus einem nah der Lagerstätte Kupferberg gelegenen Steinbruch stammt.

Die aktuellen Gesteinskörnungsproben wurden mit dem Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie charakterisiert. Die Basaltsplitte und der Basaltbrechsand aus dem Werk Zeilberg (gemäß Bestandsunterlagen im Abschnitt N2 verwendet) zeigten im Schnellprüfverfahren mit max. 0,2 mm/m die geringsten Dehnungen von allen untersuchten Gesteinskörnungen. Die Prüfungen der Granitsplitte aus den Werken Nittenau (verwendet in Abschnitt WE, Oberbeton), Neustift und Schwarzach (beide verwendet in den Abschnitten F und W) ergaben Dehnungen im mittleren Bereich zwischen 0,7 mm/m und 1,0 mm/m. Die höchsten Dehnungen im Schnellprüfverfahren ergaben sich für die Diabassplitte aus den Werken Bad Berneck (rd. 1,6 mm/m, verwendet in Abschnitt N2) und Kupferberg (rd. 2,1 mm/m, Bezug zu Abschnitt N1, ersatzweise untersucht, da Steinbruch Untersteinach geschlossen) sowie für den Sand und Kies aus dem Kieswerk Moosburg (Sand 2,0 mm/m, Kies 1,4 mm/m, beide verwendet in Abschnitt F).

4.2 Schlussfolgerungen

Mit den durchgeführten Untersuchungen wurde bestätigt, dass die Betone aus den fünf untersuchten Streckenabschnitten einen hohen Widerstand gegen schädigende Alkali-Kieselsäure-

Reaktion aufweisen. In der Ausschreibung des FE-Vorhabens wurde diese Beobachtung zunächst als Widerspruch zu den Berichten über nicht bestandene WS-Grundprüfungen nach ARS 04/2013 für einige der in den Betonen eingesetzten Gesteinskörnungen gewertet. Die Sichtung der Unterlagen aus der Bauphase der begutachteten Streckenabschnitte ergab, dass bzgl. der Zusammensetzung signifikante Unterschiede zwischen den Bestandsstrecken und den aktuellen Vorgaben für Fahrbahndeckenbetone bestehen. Es ist anzunehmen, dass die verhältnismäßig geringen Zementgehalte (310 bis 350 kg/m³) und die in vielen Fällen verhältnismäßig geringen Na₂O-Äquivalente (0,30 bis 0,71 M.-%) den AKR-Widerstand positiv beeinflussen. Demgegenüber werden in WS-Grundprüfungen Betone geprüft, die hinsichtlich des AKR-Widerstands pessimal zusammengesetzt sind. Weiterhin kommen im Fall der Anwendung der Waschbetonbauweise Betone mit Zementgehalten von mindestens 420 kg/m³ zum Einsatz. In diesem Fall liegen die Zementgehalte deutlich über denen der Betone, die im Rahmen des FE-Vorhabens untersucht wurden.

Die Frage, ob WS-Grundprüfungen für die in den Betonen eingesetzten Gesteinskörnungen zu realistischen Beurteilungen kommen, kann somit nicht pauschal beantwortet werden. Eine Modifikation des Prüfverfahrens oder eine Änderung der Beurteilungskriterien wird nicht empfohlen, da der 60 °C Betonversuch das Verhalten der Betone in der Praxis angemessen abbildete. Stattdessen sei darauf hingewiesen, dass mit dem Verfahren der AKR-Performance-Prüfung (Verfahrensbeschreibung V1 gemäß ARS 04/2013) ein weiteres Prüfkonzept als Alternative zu WS-Grundprüfungen zur Verfügung steht. In AKR-Performance-Prüfungen werden Betone untersucht, deren Zusammensetzung mit in der Praxis einzusetzenden Fahrbahndeckenbetonen übereinstimmt. In diesem Prüfkonzept können gezielt Betone mit einem optimierten AKR-Widerstand geprüft werden. So ist es in einigen Fällen möglich, Gesteinskörnungen ohne bestandene WS-Grundprüfung trotzdem in Fahrbahndeckenbetonen einzusetzen.

Die Untersuchungen verdeutlichten weiterhin, dass die Ergebnisse von Prüfungen an Bestandsproben nicht ohne weiteres mit denen von Prüfungen an im Labor hergestellten Proben verglichen werden können. Als wesentliche Gründe hierfür wurden Unterschiede hinsichtlich des Feuchtegehalts und der Probengeometrie vermutet. Für eine genauere Interpretation der Einflüsse sind umfangreichere systematische Untersuchungen notwendig.

5 Literatur und Dokumente

- [1] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013 (ARS 04/2013), Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), Bonn, 22. Januar 2013.
- [2] Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton, Fortschreibung April 2012.
- [3] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 20/1993 „Anforderungen an Zemente für Fahrbahndecken aus Beton“, Bonn, 8. Juni 1993.
- [4] Berichte der BAST: Eigenschaften von Zementen für Fahrbahndecken aus Beton, Jahresabschlussbericht (ab 1993).
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Betonbauweisen: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen, TP B-StB, Teil 1.1.09, AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr), Ausgabe 2018
- [6] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Betonbauweisen (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen; TP B-StB, Teil 3.1.05, Spaltzugfestigkeit von Beton an Zylinderscheiben, Ausgabe 2016
- [7] DIN EN 12390-3: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009
- [8] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliereaktion im Beton: Alkali-Richtlinie. Berlin: Beuth, Oktober 2013 (DAfStb-Richtlinie).
- [9] Müller, C., Borchers, I., Eickschen, E.: Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren: Hinweise zur Ableitung praxisgerechter Bewertungskriterien für Performance- und WS-Grundprüfungen. Beton, 10: S. 397-404, 2012
- [10] Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007, Änderung/Ergänzung 2014, TL Beton StB 07; 18. August 2014; Az.: IID9-43435-002/08

Bilder

Bild 1: Prinzip des Zuschnitts von Prismen mit Abmessungen von rd. 100 x 100 x 300 mm³ aus den Bohrkernen mit 350 mm Durchmesser

Bild 1: Streckenabschnitt F: Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

Bild 3: Streckenabschnitt W: Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

Bild 2: Streckenabschnitt N1: Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

Bild 3: Streckenabschnitt N2: Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

Bild 4: Streckenabschnitt WE (Oberbeton): Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

Bild 5: Streckenabschnitt WE (Unterbeton): Dehnungszunahme der Prismen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr ab dem zweiten Prüfzyklus

Bild 6: Spaltzugfestigkeiten der untersuchten Betone

Bild 7: Druckfestigkeiten der untersuchten Betone

Bild 8: Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnungen aus dem Werk Zeilberg

Bild 9: Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnung aus dem Werk Bad Berneck

Bild 10: Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnungen aus dem Werk Kupferberg

Bild 11: Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnung aus dem Werk Neustift

Bild 12: Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnungen aus dem Werk Nittenau

Bild 13: Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnung aus dem Werk Schwarzach

Bild 14: Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens für die Gesteinskörnungen aus dem Werk Moosburg

Tabellen

Tabelle 1: Zuordnung der Merkmale zu Schadenskategorien nach [2]

Tabelle 2: Beschaffte Gesteinskörnungsproben

Tabelle 3: Übersicht über die fünf ausgewählten Streckenabschnitte

Tabelle 4: Zusammenstellung der Ergebnisse der Begutachtung der fünf Baulose

Tabelle 5: Informationen zur Bohrkernentnahme

Tabelle 6: Übersicht über die Betonzusammensetzungen der untersuchten Baulose

Tabelle 7: Dehnungszunahme der Betone zwischen dem 2. und 11. Prüfzyklus (Prüfdauer = 140 Tage) im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen und Vergleich mit den Bewertungskriterien gemäß [9]

Tabelle 8: Dehnungen der Prismen in mm/m nach 14 Prüfzyklen sowie nach anschließender Lagerung im Klima 20/65 für rund 20 Wochen

Tabelle 9: Ergebnisse der Rietveldauswertung für die Granitsplitte aus Neustift und Schwarzach sowie die zugehörigen rückgewonnenen Gesteinskörnungen aus Bohrkernen (Streckenabschnitte 1 (F) und 2 (W))

Tabelle 10: Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Sand und Kies aus Moosburg sowie die aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 1 (F)

Tabelle 11: Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Diabassplitt aus Kupferberg sowie die aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 3 (N1)

Tabelle 12: Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Diabassplitt aus Bad Derneck sowie die zugehörige aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 4 (N2)

Tabelle 13: Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Basaltplitt aus Zeilberg sowie die zugehörige aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 4 (N2)

Tabelle 14: Ergebnisse der Rietveldauswertung für den Granitsplitt aus Nittenau sowie die zugehörige aus Bohrkernen rückgewonnene Gesteinskörnung zu Streckenabschnitt 5 (WE), Oberbeton

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxismgerechten 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 Asphalteinbau

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 Nutzungsgregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

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

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

Wacker, Scherckenbach, Jansen

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

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

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler, Schröder, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

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

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

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

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

Stephan, Weigel

€ 19,00

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

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

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

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

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

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

Freudenstein, Neudert

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

S 127: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton

Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

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

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

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

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

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

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

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

Radenberg, Holzwarth

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

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

Radenberg, Gehrke

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

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

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins

€ 15,50

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

Wolf, Uhlig

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

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

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

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

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

Botor, Tost

€ 15,50

S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser

€ 16,50

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

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr

€ 22,50

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

Groschup, Große, Eger, Freudenstein

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

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

S 153: **Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ**

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskaewetz

€ 23,00

S 154: **Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)**

Büchler, Wistuba

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

S 155: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte**

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

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

S 156: **Asphaltoberbau und extreme Temperaturen**

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

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

S 157: **Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW**

Schipek, Steffen

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

S 158: **Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette**

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

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

S 159: **Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren**

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

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

S 160: **Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton**

Rigo, Unterderweide

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

S 161: **Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz**

Kathmann, Schroeder

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

S 162: **Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013**

Böhm, Eikschon, Hermerschmidt, Müller, Perkes

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.