

Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 142

The logo for 'bast' is written in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are closely spaced and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The 'b' is particularly prominent with its thick stroke.

Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

von

Hartmut Johannes Beckedahl

Stefan Koppers

Tim Schrödter

Bergische Universität Wuppertal

Lehr- und Forschungsgebiet Straßenentwurf und Straßenbau

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 142

bast

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

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

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

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

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl 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 Öffentlichkeitsarbeit.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 07.0279/2014/ERB:
Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Fachbetreuung
Bastian Wacker

Referat
Dimensionierung und Straßenaufbau

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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 978-3-95606-491-3

Bergisch Gladbach, Januar 2020



Kurzfassung – Abstract

Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Zur Prüfung fertiger Straßenbauleistungen werden Bohrkern-/Ausbauproben entnommen, die prinzipiell eine Schwächung der Straßenkonstruktion verursachen. Qualitativ minderwertige Verschlüsse von Bohrkernentnahmestellen führen häufig zu offenen Löchern in der Straßenbefestigung bzw. zu Schäden an der umgebenden Originalkonstruktion.

Um eine fachgerechte und qualitativ hochwertige Ausführung des Verschlusses zu erzielen, wurden Recherchen zu unterschiedlichen Verfahren und Materialien durchgeführt und eine Auswahl von 14 Verschlussvarianten evaluiert. Die Varianten bestehen aus einem Deckschicht-/Deckenersatz und einer Unterkonstruktion. Sie wurden mit zweckmäßig modifizierten und angepassten Prüfverfahren hinsichtlich Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit unter zyklischer Last untersucht.

Im Labor hergestellte Heißmischgutverschlüsse (HMG) sind dicht und ermöglichen einen guten Verbund zur Originalkonstruktion wohingegen im Labor hergestellte Kaltmischgutverschlüsse (KMG) undicht waren. Trotz gleichartiger Verdichtung sind die Oberflächenbilder zwischen den im Labor und den in situ hergestellten Verschlüssen unterschiedlich.

Die Dauerhaftigkeitsprüfungen (zyklische Belastung) verformen die Bohrkernverfüllungen im Verlauf der Konsolidierungsphase unterschiedlich und korrelieren mit der Steifigkeit der Unterkonstruktion bzw. der Verdichtungswilligkeit der eingesetzten Materialien.

Zwei Verschlussvarianten (HMG, KMG) wurden auf dem duraBAST in ein Versuchsfeld eingebaut und mit dem MLS30 belastet. Es wurden kontinuierlich Querebenenheits- und FWD-Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei einem fachgerechten Verschluss der Bohrkernentnahmestelle keine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit zu erwarten ist.

Des Weiteren wurde ein Dokumentationskonzept entwickelt, das eine Georeferenzierung von Bohrkernentnahmestellen per GPS ermöglicht. In die Entnahmestelle werden RFID-Transponder einge-

setzt, auf denen vor Ort Daten gespeichert und abgerufen werden können. Durch eine vorgesehene Verknüpfung der Entnahmestelle mit einer Datenbank kann auf weitere Daten des Asphaltaufbaus zugegriffen werden.

Abschließend sind die Erkenntnisse in einem Entwurf für eine Verfahrensanweisung zusammenfassend dargestellt worden.

Investigations to improve the method used for professional closing of drill core extraction points

In order to assess construction work on roads, drill cores are taken which tend to cause a weakening of the road construction. Inferior closings of drill core extraction points often result in open holes in the pavement or damage to the surrounding original construction.

In order to achieve professional and high-quality execution of the closing, research was carried out on different methods and materials, and a selection of 14 closing variants were evaluated. The closings consist of a surface layer replacement and a substructure. They were tested using modified and adapted test methods for leakage and durability under cyclical load.

Hot mix closings (HMG) produced in the laboratory are waterproof and enable a good bond with the original construction, whereas cold mix closings (KMG) produced in the laboratory were permeable. Despite similar compaction, the surface images differ between the closings produced in the laboratory and those produced in situ.

The durability tests (cyclical load) deform the core fillings in different ways during the consolidation phase and correlate with the rigidity of the substructure or the compactibility of the materials used.

Two closure variants (HMG, KMG) were installed on the duraBAST at a test site and loaded with the MLS30. Traverse evenness and FWD measurements were performed continuously. The results show that

given a proper closing of the drill core sampling point, no impairment of load capacity is to be expected.

Furthermore, a documentation concept was developed that enables geo-referencing of core extraction points by GPS. RFID transponders are installed at the extraction point that enable data to be stored and retrieved on site. By linking the extraction point to a database, further data can be accessed relating to the asphalt structure.

Finally, the insights gained were summarized in a draft manufacturing procedure specification.

Summary

Investigations to improve the method used for professional closing of drill core extraction points

Starting position and goals of the project

In order to assess construction work on roads, drill cores are taken as samples for laboratory tests from bonded layers. The extraction of drill cores is regulated in the technical test specifications for asphalt (TP Asphalt-StB) [1] and the technical test specifications for base courses with hydraulic binders and concrete pavements (TP Beton-StB) [2]. Unlike the extraction of drill cores, there are as yet no regulations regarding the filling and closing of drill core extraction points. For this reason, executing companies use different methods and materials for closing drill core extraction points. Unless prescribed by the contractor, some of these methods are selected depending on the surrounding layer materials.

Each drill core extraction causes a weakening of the road construction. If the closing is of high quality, damage to the closing or to the surrounding original construction can be avoided. Ensuring a permanent closing of the drill core extraction point in the form of a high-quality restoration of the traffic area is very important for traffic safety and also for economic and structural reasons.

In addition to the closing methods and materials used, the design quality of the closing has a significant impact on the durability and tightness of the core extraction point. Since there is often a lack of specifications, the closing of drill core extractions is frequently regarded as a downstream residual operation in practice and thus not carried out very carefully. In many cases, a lack of compaction of the repair material and/or a defective bond between the repair material and the original construction lead to premature damage formation.

For scientific investigations and future performance-oriented substance evaluation based on the current guidelines for the assessment of the structural substance of asphalt and concrete roads (RSO Asphalt [3] and RSO Beton [4]), a larger number of

drill core extraction is required than for conventional control tests. Acceptance for a larger number of drill core extractions can only be obtained if a closing process is available that allows high-quality restoration of the traffic area. Professional and permanent restoration of the traffic area using an appropriate closing method and materials means a larger number of core extractions can be carried out without causing a weakening of the existing structure.

In order to be able to use test results on the extracted layer materials even over longer periods of time, it is important to reliably document the data from the core extraction points for road construction authorities as well as for contractors and providers, and ensure the data is available on a lasting basis. Georeferenced location of the extraction points can also be helpful.

This results in the following goals for this research project:

- Design of a procedure for the professional closing and quality control of drill core extraction points
- Development of an innovative and application-friendly documentation concept for core extraction points

The procedure will be incorporated into the road engineering regulations and help maintain a required level of quality in the closing of drill core extraction points on asphalt and concrete pavements. This aim to ensure consistent and high-quality backfilling of drill core extraction points. For this purpose, known closing methods are evaluated and subsequently improved and/or new closing methods are developed.

The documentation concept should contain a solution for the permanent storage and provision of data such as contractor, date of extraction, purpose of extraction and commissioned testing center. Furthermore, georeferencing of the drill core extraction point should be enabled. For this purpose, a long-term, low-cost concept based on RFID technology was developed that is simple to use.

Research methodology

Investigation

At the beginning of the project, literature research was carried out for various closing methods and materials. Various work instructions and country-

specific adaptations of regulations of the road construction authorities were found, including those relating to the topic of the closing of drill core tapping points.

Requirements for filling core removal points are often described in specifications. For example, in the context of road renewal measures, the administrative authority "Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement" requires the filling of drill core holes with concrete C20/25 to 4 cm below the road surface and with the application of bituminous hot mix on top. [5]

By contrast, the Saxon road construction administration makes reference the material properties of the original construction when filling drill core holes in asphalt construction. The filling material should be selected with regard to the degree of compaction, the composition and the layer structure so that it approximates the parameters of durability, tightness and load-bearing capacity of the original construction. [6]

The State Development and Transport Ministry of Saxony-Anhalt describes the closing of drill core extraction points in its ZTV StB LSBB [7] "Procedures for closing drill core holes in pavements and cycle paths". Here it distinguishes between procedures for asphalt construction and concrete construction. For concrete construction, the extraction point should be filled up to 3 cm below the upper edge of the roadway with a concrete C30/37. The remaining 3 cm are closed with a plastic-modified mortar or C30/37 concrete. Two methods are proposed for asphalt constructions. In method A, the extraction point is filled up to 5 cm below the upper edge of the carriageway with a mixture of aggregates or an old drill core (at filling stations with $d = 300\text{mm}$ the concrete filling is used). In the area of the top layer, the extraction point should be closed with repair asphalt types which comply with the instructions for repair asphalt for the elimination of damage spots (H RepA) [8]. The surface should be slurred with pore filler and then chipped. [7]

The instructions for repair asphalt for the elimination of damage spots (H RepA) [8] are currently available in draft form. The paper contains information on various repair asphalt types and recommends the requirements for repair asphalt types and their composition. [8]

Research has shown that the closing of a core extraction point generally consists of two parts: the

topcoat replacement (asphalt construction) or concrete ceiling replacement (concrete construction method) and the substructure.

Evaluation of closing methods and materials

Based on the findings of this research, 14 different closing variables were derived which were subjected to a laboratory evaluation. The laboratory evaluation takes into account the two most important features of an extraction point closing: impermeability and durability.

In order to test the tightness of the cover layer substitute or concrete ceiling replacement material, a method was developed which is similar to the test method for hot asphalt (permeability of the specimens) based on DIN EN 12697-19 [9]. This method is used to test whether water can penetrate through the cover layer replacement material into the substructure of the core hole closing. There is no examination of the substructure.

In the tightness test, a plastic pipe ($\varnothing 200\text{ mm}$) is waterproofed with a silicone sealant on a carrier plate containing the material to be tested. After the sealant has hardened, a water column of 50 mm is built up in the pipe. The level of the tube is observed after 30 and 60 minutes and documented.

The durability test is based on the experimental principle of the uniaxial pressure threshold test. The experiment is intended to show how the various closing variants behave under cyclical loading. Attention is be paid in particular to possible settling/densification and potential damage in the joint area between the topcoat replacement material and the original construction.

Appropriate test specimens were produced for this purpose. The test specimens consist of an asphalt structure (approx. 280 mm) from which a drill core was taken. This is an extraction point produced by laboratory technology which can be closed using various closing methods and materials. The closed specimens produced in this way were tested under cyclical loading in a dynamic testing machine.

In addition to the laboratory tests, various drill cores were closed in the city of Wuppertal using eight different closing variants. The development of the status of the closed core holes was continuously monitored and documented over 12 months.

On the basis of the above test results, two variants were selected which were loaded on the duraBAST in a large-scale test using the Mobile Load Simulator MLS30. The test field and the drill core closings were continuously examined by means of the Falling Weight Deflectometer (FWD) and transverse evenness-measuring device. Changes in the bearing response and the evenness of the surface were documented.

Documentation concept

A large amount of information is generated by the removal of drill cores from road pavement and the examination of the samples obtained from it. In order to enable this information to be used on a lasting basis, it is necessary to develop a technically innovative documentation concept. To this end, the BAST proposed a sensor solution for the permanent storage and provision of the data which had previously been used in a collaborative research project PAST (Process-safe Automated Road Construction) [10]. In the PAST project, RFID temperature sensors were used to monitor the asphalt temperature.

RFID technology offers the possibility of contactless data transmission between a storage medium (RFID transponder) and a reading device. A key advantage of this technology is that the passive storage medium does not require its own power supply. As such, it is possible for a storage medium permanently incorporated in the closing of a core hole to be available over the entire lifetime of the pavement. This ensures the availability of the data stored on the storage medium over the lifetime of the road surface.

Development of the documentation concept involved an examination of the theoretical aspects and the information to be recorded and stored as well as data processing, technical requirements and feasibility. For this purpose, various RFID transponders were preselected based on various criteria and subjected to a laboratory evaluation with regard to the expected stress levels during installation of the transponder in the closing. Furthermore, a documentation concept was developed including graphic presentation of the data.

In order to evaluate the usability of RFID transponders, three different types were tested for their heat resistance at temperatures of up to 200

°C and their resistance to indirect impact. The indirect impact load test simulates the forces acting on the transponder during compression. The test is performed by installing a transponder in a Marshall test specimen by means of compression in the Marshall compactor. At the same time, heat resistance up to 140 °C is tested. The test for heat resistance up to 200 °C is carried out by incorporation into a mastic asphalt test specimen.

In order to test the limited reading range, the transponders were installed at differing depths in the extraction points and reading experiments were carried out both in situ and in the laboratory.

Test results

Closing methods and materials

The fill level in the plastic pipe was observed and documented during the leak test of the cover layer replacement materials or concrete ceiling replacement. Based on the level, three different results were defined. The result for a tested material is defined as "leaking" when all the water (0 mm water level) has drained through the closing within the first 30 minutes. Materials are defined as "moderately leakproof" when all the water has drained through the closing after 60 minutes or in which it was possible to detect water penetration at the bottom of the specimen. For materials whose water level is unchanged after 60 minutes and no water penetration has been detected, the result is defined as "leakproof".

The experiment shows that with the road repair concrete, the hot mix and the repair drill core it is possible to produce a leakproof covering layer replacement or concrete ceiling replacement. It was not possible to produce a leakproof topcoat substitute with either of the both cold mix grades (KMG-E and KMG-R). However, despite mechanical compaction by means of a hammer drill, a noticeably different, more open-pored surface pattern was found than in the case of in-situ compaction.

The evaluation of the durability of the various closing variants is based on the creep curve progression resulting from the experiment. Characteristic points in the creep curve were defined for this purpose: the end of the consolidation phase (after 10,000 cycles) and the end of the test (after 30,000 cycles), the slope being determined between these two points, which is the quasi-linear section of the creep curve.

In general, the test results are often in line with expectations and it can be seen that the slopes largely correlate with the stiffness of the closing. Since this is also an experimental test method, some special features must be taken into account in the assessment. The surface of the test specimens was not re-treated (grinded, etc.), so fluctuations or jumps may occur in the creep curve. During preparation of the test specimens, the attempt was made to ensure that compression was as uniform as possible by means of rotary hammer and pestle plate. It was not possible to verify this, however.

For the in-situ observations, eight closing variants were installed in each of two test fields (double occupancy). Based on ten observations, a photo documentation was created allowing change or damage to the extraction point closing to be detected. After twelve months under traffic, it was not possible to detect any change or damage to the closing at any extraction point.

For the load tests with the MLS30 it is possible to draw a positive conclusion. The extraction point closings of both variants were able to withstand stress and strain of 1,600,000 load applications. It was not possible to detect any outbreaks or total failure in the topcoat replacement materials. In the rolling lane, the settlements of the cover layer replacement materials (HMG and KMG-E) were almost level with the original construction.

In the semi-overrun extraction points, closings with HMG could be expected to have lesser deformations or displacements. Nevertheless, in the overrun section of the extraction point for both materials there was an equal height settlement with the original construction.

The results of the FWD measurements suggest no direct impact of the closed core extraction points on the load-bearing capacity of the surrounding road construction.

RFID transponder

Within the framework of this project, three different RFID transponder types were tested for their heat resistance and resistance to indirect impact stress. It was possible to show that all three transponder types are suitable for use in drill core extraction points.

In the review of the limited reading range it was possible to achieve consistently positive results,

with one exception. One transponder type could no longer be read after being installed in situ at a depth of 30 cm. It was not possible to establish whether there was an impairment due to damage or due to the disruption of the covering material. With one exception, it was possible to read all transponders after installation. The results also take into account the self-test carried out two months and twelve months after installation.

Conclusion

In conclusion it can be stated that the results of the laboratory tests are largely plausible and correspond to the in-situ observations. An exception here are the leakage tests carried out on the cold mixed products used. It was evident that it was not possible to carry out realistic compaction of the specimens in the laboratory.

Although the results of the durability test are not statistically substantiated, and it was not possible to demonstrate the reproducibility of test specimen production, the results show clear tendencies which correspond to reality and therefore seem plausible. It can be seen that both the absolute deformations and the slopes of the creep curves correlate with the assumed stiffness of the closing variants. Nevertheless, it should be noted that production of test specimens for the durability test is very complicated and reproducibility cannot be ensured.

Based on the in-situ observations, it can be seen that the durability of the closing depends in particular on professional and high-quality execution. The closings at the test sites in Wuppertal show no damage or changes after twelve months of storage.

The large-scale trial on the duraBAST with the MLS30 generally showed expected results. Due to the full load in the rolling lane, both the cold mix variant and the variants with hot mix showed equal height setting with the original design in the transverse profile. Due to the directionally stable load imposed by the large-scale test facility, mortar crushing was shown in the HMG variant in the area of the tread grooves, which are not to be expected in reality. At the partially overrun collection points, displacements in the direction of the unrolled part surface were found. The displacements were more pronounced in the cold mix variants than in the hot mix variant.

The FWD measurements proved that the closed extraction points have no influence on the load capacity of the road construction.

The documentation concept provides durable and sustainable documentation of drill core extraction points. It was possible to show that RFID transponders already on the market are suitable for installation at drill core extraction points. The transponders provide a local data storage facility. Linking the transponders with a database application offers the possibility of comprehensive data access. Due to the placement of the transponder in the upper third of the asphalt base layer, this also applies in the case of a surface layer renewal, so information can be provided about old stock even decades later. Location by means of GPS coordinates allows the extraction point or the transponder to be found even if the extraction point is no longer visible.

To conclude the FE project, a draft of a procedure for the professional closing of drill core extraction points was prepared. The draft of the procedural instruction should form the basis for further revision on the corresponding committees of the FGSV.

Literatur / Literature

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschrift für Asphalt (TP Asphalt-StB): Teil 27: Probenahme. Köln, 2012
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschrift für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (TP Beton-StB). Köln, 2010
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltstraßen (RSO Asphalt): In Bearbeitung, Entwurfsfassung. Köln, 2014
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz von Betonstraßen: In Bearbeitung. Köln
- [5] Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement - Fulda: Leistungsverzeichnis Fahrbahnerneuerungsmaßnahmen LK Fulda in 2016. URL https://vergabe.hessen.de/NetServer/TenderingProcedureDetails?function=_DownloadTenderDocument&TenderOID=54321-NetTender-15438a57da7-7c64bd1337219795&Document=Langtext.pdf – Überprüfungsdatum 2016-08-19
- [6] Landesamt für Straßenbau und Verkehr des Freistaats Sachsen: Ergänzende Regelungen der sächsischen Straßenbauverwaltung, Teil: Straßenbautechnik. URL http://www.list-sachsen.de/info/160302_Ergaenzende_Regelungen_Strassenbautechnik.pdf – Überprüfungsdatum 2016-08-19
- [7] Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt: ZTV-StB LSBB ST 17 : Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Straßen- und Ingenieurbau für den Geschäftsbereich der Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt. 2017
- [8] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Hinweise für Reparaturasphalt zur Schadstellenbeseitigung (H RepA). (Entwurf). 12.04.2017
- [9] DIN: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt: Teil 19: Durchlässigkeit der Probekörper. Deutsche Fassung EN 12697-19:2012. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2012
- [10] Bundesanstalt für Straßenwesen: PAST - Prozesssicherer Automatisierter Straßenbau. 2013. URL https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A770590241/Verbundforschungsvorhaben-PAST-Prozesssicherer/?tx_tibsearch_search%5bsearchspace%5d=tn

Inhalt

Abkürzungen	12	7	Entwurf einer Verfahrensanweisung	44
1 Einleitung	13	7.1	Anwendungsbereich und Zweck.....	44
2 Literaturrecherche	13	7.2	Verweise auf andere Regelwerke	47
2.1 Verschlussmaterialien und -verfahren.....	14	7.3	Begriffe.....	47
2.2 RFID-Technologie.....	17	7.4	Baustoffe und Verschlussmaterialien.....	48
3 Verfahren zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen	18	7.5	Verfahren	48
3.1 Übersicht verschiedener Verschlussvarianten	18	7.6	Geräte	48
3.2 Labortechnische Evaluation	20	7.7	Verschluss von Bohrkernentnahmestellen.....	49
3.2.1 Dichtigkeitsprüfung	20	7.7.1	Vorbereitung und Reinigung der Entnahmestelle	49
3.2.2 Dauerhaftigkeitsprüfung	22	7.7.2	Herstellung der Unterkonstruktion.....	49
4 Belastungsversuche mittels Mobile-Load-Simulator MLS30	27	7.7.3	Herstellung des Deckschichtersatzes bzw. Betondeckenersatz	49
4.1 Vorbereitungen und Einbau der Verschlussmaterialien.....	27	8 Zusammenfassung	49	
4.2 Durchführung der Belastungsversuche	29	Literatur	52	
4.3 Ergebnisse der Belastungsversuche	30	Bilder	53	
5 Dokumentation von Bohrkernentnahmestellen	37	Tabellen	54	
5.1 Vorbereitung und Vorauswahl RFID-Transponder.....	37	Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter: http://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.		
5.2 Technische Evaluation der vorausgewählten RFID-Transponder.....	39			
5.3 Dokumentationskonzept für Bohrkernentnahmestellen	40			
5.4 Grafische Datenbereitstellung mittels Georeferenzierung.....	43			
6 In-Situ-Beobachtungen	43			
6.1 Verschlussvarianten	44			

Abkürzungen

AC	Asphalt Concrete (Asphaltbeton)	MR	Messreihe
B	Betonbauweisen	nBK	nach Bohrkernentnahme
BAB	Bundesautobahn	nVS	nach Verschluss
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen	OK	Oberkante
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie	PAST	Prozesssicherer Automatisierter Straßenbau
BS	Bitumenstopfen	ppm	parts per million (Millionstel)
DIN	Deutsches Institut für Normung	RepA	Reparaturasphalt
DTK10	Digitale Topographische Karte im Maßstab 1:10000	RepBeton	Straßenreparaturbeton
duraBASt	Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der Bundesanstalt für Straßenwesen	RepBK	Reparaturbohrkern
DWD	Deutscher Wetterdienst	RFID	Radio Frequency Identification
EN	Europäische Norm	RSO	Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz
FE-Vorhaben	Forschungs- und Entwicklungsvorhaben	SMA	Stone Mastic Asphalt (Splittmastixasphalt)
FWD	Falling Weight Deflectometer	StB	Straßenbau
GIS	Geoinformationssystem	TL	Technische Lieferbedingungen
GK	Gesteinskörnung	TP	Technische Prüfvorschrift
GPS	Global Positioning System	UHF	Ultrahochfrequenz
H	Hinweise	vBK	vor Bohrkernentnahme
HF	Hochfrequenz	WMG	Warmmischgut
hgGK	Hydraulisch gebundene Gesteinskörnung	WWSV	Wuppertaler Walzsektorverdichter
HMG	Heißmischgut	ZTV	Zusätzliche technische Vertragsbedingungen
ID	Identifikationsnummer		
KMG-E	emulsionsgebundenes Kaltmischgut		
KMG-R	reaktives Kaltmischgut		
LSBB	Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt		
MHz	Megahertz		
MLS30	Mobile Load Simulator		
MPK	Marschallprobekörper		

1 Einleitung

Im Rahmen der Prüfungen von Bauleistungen im Straßenbau werden Bohrkernproben als Ausbauproben aus gebundenen Schichten entnommen. Die Bohrkernentnahme ist in den Technischen Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) [1] und den technischen Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (TP Beton-StB) [2] geregelt. Im Gegensatz zur Entnahme von Bohrkernen ist das Verfüllen und Verschließen von Bohrkernentnahmestellen bislang nicht geregelt. Aus diesem Grund werden unterschiedliche Verfahren und Materialien zum Verschließen von den ausführenden Firmen verwendet, die zum Teil in Abhängigkeit von den vorgefundenen Schichtbaustoffen gewählt werden, wenn sie nicht durch den Auftragnehmer vorgeschrieben werden.

Jede Bohrkernentnahmestelle stellt grundsätzlich eine Schwachstelle in der Straßenkonstruktion dar. Wird der Verschluss qualitativ hochwertig ausgeführt, können Schäden am Verschluss bzw. an der umgebenden Originalkonstruktion vermieden werden. Die hochwertige Wiederherstellung der Verkehrsfläche in Form eines dauerhaften Verschlusses der Bohrkernentnahmestelle ist aus verkehrssicherheitstechnischen, wirtschaftlichen und strukturellen Gründen sehr bedeutsam.

Neben den eingesetzten Verschlussverfahren und -materialien hat die Ausführungsqualität des Verschlusses einen bedeutenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit der Bohrkernentnahmestelle. Da oftmals Vorgaben fehlen, wird der Verschluss von Bohrlöchern in der Praxis häufig als nachgelagerte Restarbeit angesehen und somit nicht besonders sorgfältig ausgeführt. In vielen Fällen führen eine mangelnde Verdichtung des Reparaturmaterials und/oder ein mangelhafter Verbund zwischen Reparaturmaterial und der Originalkonstruktion zu einer vorzeitigen Schadensentstehung.

Für wissenschaftliche Untersuchungen und eine künftige performance-orientierte Substanzbewertung auf Grundlage der in Bearbeitung befindlichen Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz von Asphalt- und Betonstraßen (RSO Asphalt [3] und RSO Beton [4]), werden gegenüber konventionellen Kontrollprüfungen eine größere Anzahl von Bohrkernentnahmen erforderlich sein. Die Akzeptanz hierfür kann nur dann erlangt werden, wenn Verschlussverfahren zur Verfügung stehen, die eine

qualitativ hochwertige Wiederherstellung der Verkehrsfläche ermöglichen. Durch die fachgerechte und dauerhafte Wiederherstellung der Verkehrsfläche mit entsprechenden Verschlussverfahren und -materialien kann demzufolge eine größere Anzahl an Bohrkernen entnommen werden, ohne damit eine Schwächung der Substanz herbeizuführen.

Um Untersuchungsergebnisse an den entnommenen Schichtmaterialien auch über längere Zeiträume hinweg nutzen zu können, ist es wichtig, die Daten der Bohrkernentnahmestellen für Straßenbauverwaltungen sowie Auftragnehmer und -geber zuverlässig zu dokumentieren und nachhaltig nutzbar zu machen. Auch eine georeferenzierte Verortung der Entnahmestellen kann hierfür hilfreich sein.

Daraus ergeben sich folgende Ziele für dieses Forschungsprojekt:

- Entwurf einer Verfahrensanweisung für das fachgerechte Verschließen und die Qualitätskontrolle von Bohrkernentnahmestellen.
- Entwicklung eines innovativen und anwendungsreifen Dokumentationskonzeptes für Bohrkernentnahmestellen.

Die Verfahrensanweisung soll in das straßenbautechnische Regelwerk eingearbeitet werden und dabei helfen, beim Verschluss von Bohrkernentnahmestellen auf Straßen in Asphalt- und Betonbauweise ein erforderliches Qualitätsniveau einzuhalten. Hierdurch soll ein gleichbleibender und hochwertiger Verschluss von Bohrkernentnahmestellen gewährleistet werden. Dazu werden bekannte Verschlussverfahren evaluiert und im Anschluss verbessert und / oder neue Verschlussverfahren entwickelt.

Das Dokumentationskonzept soll eine Lösung zur permanenten Speicherung und Bereitstellung von Daten, wie Auftragnehmer, Datum der Probenahme, Zweck der Probenahme und beauftragte Prüfstelle, beinhalten. Des Weiteren soll die Georeferenzierung der Bohrkernentnahmestelle ermöglicht werden. Zu diesem Zweck wird ein wirtschaftliches Konzept auf Basis der RFID-Technologie entwickelt, das einfach und dauerhaft anwendbar ist.

2 Literaturrecherche

Zu Beginn des Projektes wurde eine Literaturrecherche zu den Themenbereichen Verschlussver-

fahren, Verschlussmaterialien und RFID-Transpondertechnik durchgeführt.

2.1 Verschlussmaterialien und -verfahren

Bohrkerne werden für eine Reihe von Prüfungen an Trag-, Binder- und/oder Deckschichten verwendet. Art und Umfang sind für Asphaltstraßen in den TP Asphalt-StB Teil 27 (Probenahme) [1] geregelt. Der Durchmesser der zu entnehmenden Bohrkerne liegt, je nach Verwendungszweck, zwischen 100 mm und 300 mm. Die Anzahl variiert je nach Untersuchungsumfang. [1]

Auch für Fahrbahndecken aus Beton werden im Zuge der Kontroll- und Eigenüberwachungsprüfung Bohrkerne gezogen. Durchmesser und Anzahl der zu entnehmenden Bohrkerne sind in den TP Beton-StB [2] festgelegt. Zukünftig werden die TP Beton-StB durch die Technische Prüfvorschrift für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen (TP B-StB) ersetzt [5].

Anforderungen an das Verschließen von Bohrkernentnahmestellen werden oftmals in Leistungsverzeichnissen beschrieben. So verlangt die Straßenbauverwaltung in Hessen zum Beispiel im Rahmen von Fahrbahnerneuerungsmaßnahmen das Verschließen von Bohrkernlöchern mit Beton C20/25 bis 4 cm unterhalb der Fahrbahnoberfläche und mit bituminösem Heißmischgut im oberen Bereich. [6]

Die sächsische Straßenbauverwaltung weist hingegen bei dem Verschließen von Bohrlöchern in Asphaltstraßen auf die Materialeigenschaften der Originalkonstruktion hin. Das zu verfüllende Material

soll hinsichtlich des Verdichtungsgrades, der Zusammensetzung und des Schichtenaufbaues so gewählt werden, dass es den Parametern Dauerhaftigkeit, Dichtigkeit und Tragfähigkeit der Originalkonstruktion nahekommt. [7]

Das Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt beschreibt das Verschließen von Bohrkernentnahmestellen in seinen ZTVStBLSBB [8] „Verfahrensweisen für das Schließen von Bohrlöchern in Fahrbahndecken und Radwegen“. Darin werden Verfahrensweisen nach Asphaltbauweise und Betonbauweise unterschieden. Für die Betonbauweise soll die Entnahmestelle bis 3 cm unter Oberkante Fahrbahn mit einem Beton C30/37 verfüllt werden. Die restlichen 3 cm werden mit einem kunststoffvergütetem Mörtel oder einem Beton C30/37 verschlossen. Für die Asphaltbauweise werden zwei Verfahren vorgeschlagen. Beim Verfahren A wird die Entnahmestelle bis 5 cm unter Oberkante Fahrbahn mit einer Gesteinskörnung oder einem alten Bohrkern verfüllt (bei Entnahmestellen mit \varnothing 300 mm erfolgt die Verfüllung mit Beton). Im Bereich der Deckschicht soll die Entnahmestelle mit Reparaturasphalten verschlossen werden, die nach den Hinweisen für Reparaturasphalt zur Schadstellenbeseitigung (H RepA) [9] geeignet sind. Die Oberfläche soll mit Porenfüllmasse abgeschlämmt und anschließend abgestreut werden. [8]

Die Hinweise für Reparaturasphalt zur Schadstellenbeseitigung (H RepA) [9] liegen zurzeit als Entwurf vor. Das Hinweispapier enthält Informationen über verschiedene Reparaturasphalte und gibt Empfehlung für die Anforderungen an Reparaturasphalte und deren Zusammensetzung.



Bild 2--1: Bohrkernentnahmestelle nach Fertigstellung (links) und nach 35 Monaten (rechts)



Bild 2-2: Mit Heißmischgut verschlossene Bohrkernentnahmestelle nach 3 Monaten Liegedauer

Zum Verschluss von Bohrkernentnahmestellen werden in der Praxis häufig Gesteinskörnungen als Unterkonstruktion und Kaltmischgut als Deckschichtersatz verwendet. Bei entsprechend hochwertigen Materialien und qualitativvoller Verdichtung können hiermit gute Ergebnisse erzielt werden. Bild 2-1 zeigt eine Bohrkernentnahmestelle unmittelbar nach dem Verschluss und nach 35 Monaten. Hierbei wurde eine Gesteinskörnung 8/11 als Unterkonstruktion und 4cm Kaltmischgut als Deckschichtersatz verwendet.

Eine weitere Möglichkeit für den Verschluss von Bohrkernentnahmestellen können alte Bohrkern- bzw. Reparaturbohrkerne sein, die entweder mit schnell erhärtendem Vergussmörtel in die Bohrlöcher bis zur Fahrbahnoberfläche eingebracht oder im unteren Bereich bis etwa 4 cm unterhalb der Oberfläche eingesetzt und mit Kaltmischgut im oberen Bereich abgeschlossen werden [10, 11]. Problematisch können hierbei der hohe Aufwand, etwa durch Mitführen eines Fugenvergusskochers, gesehen werden. Auch gestaltet sich bei diesem Verfahren das Erzielen der Höhengleichheit des Bohrlochverschlusses zur umgebenden Originalkonstruktion, zwecks Herstellung einer ebenen Fahrbahnoberfläche, schwierig.

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass zur Erzielung eines hochwertigen, dauerhaften und dichten Verschlusses einer Bohrkernentnahmestelle in Asphaltstraßen Heißasphalte am besten geeignet sind, weil sich das Material am ehesten den Eigenschaften der Originalkonstruktion angleicht. Zur Anwendung kommen hierbei Gussasphalte und Walzasphalte. Dabei wird das Bohrloch entweder komplett mit Heißasphalt verschlossen oder es erfolgt

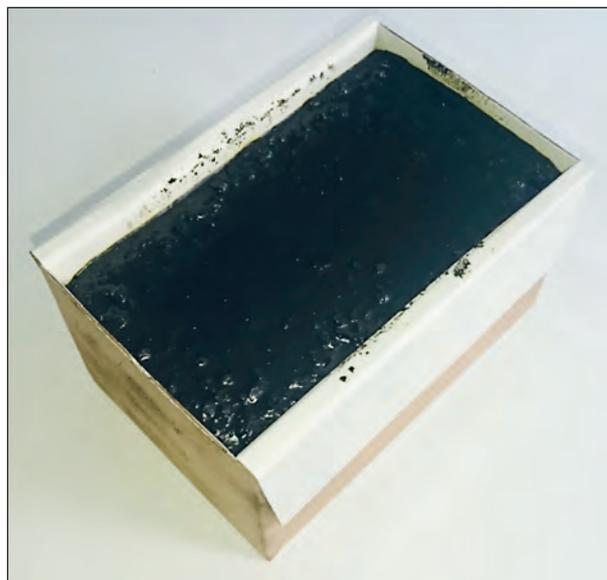


Bild 2-3: Portion Mikrowellenasphalt für das Verschließen einer Bohrkernentnahmestelle (obere 4 cm)



Bild 2-4: Bitumen-Bohrstopfen

ein Verschluss mit Heißasphalt im oberen Bereich des Bohrlochs (ca. 4 bis 8 cm) auf verdichteter Gesteinskörnung (siehe Bild 2--2).

Ein entsprechend selbstverdichtendes Asphaltmischgut (Mikrowellenasphalt) wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes in Kooperation mit der Fa. Asphalt Kleemann entwickelt (KF2168615HF1) „Entwicklung eines Erhaltungsverfahrens mit selbstverdichtenden Asphaltmischgütern zur zeitnahen und nachhaltigen Schlaglochsanieuerung“, gefördert vom BMWI (siehe Bild 2-3). [12]

Eine weitere Möglichkeit zum Verschließen einer Bohrkernentnahmestelle ist der Verschluss mit Bitumen-Bohrstopfen (siehe Bild 2-4). Auf einer zuvor verdichteten Unterkonstruktion aus einem Gesteinskörnungsgemisch werden diese vorgefertigten Bitumen-Bohrstopfen in das mittels Propangasbren-



Bild 2-5: Handstamper \varnothing 100 mm (links), Schlaghammer mit Verdichtungsplatte \varnothing 200 mm (Mitte) und \varnothing 140 mm (rechts)

ner erwärmte Bohrloch zentrisch eingedrückt. Im Anschluss werden die Bohrstöpfe mit einem Gummihammer oder Handstamper eingeschlagen und es erfolgt das Glätten der Oberfläche sowie Verschmelzen mit der umgebenden Originalkonstruktion mithilfe eines Propangasbrenners. Bei diesem Verfahren kann das Arbeiten mit einem Propangasbrenner als Gefahr angesehen werden. [13]

Aus eigenen Erfahrungen ist bekannt, dass für die Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit nicht nur das Verschlussmaterial entscheidend ist, sondern auch das Verfahren des Einbaus. Zur Gewährleistung von Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit sind insbesondere eine gute Verdichtung (bzw. die daraus resultierende Verformungsbeständigkeit und Tragfähigkeit) und der Haftverbund zwischen Verschlussmaterial und Originalkonstruktion ausschlaggebend.

Die technisch einfachste und am häufigsten verwendete Verfahrensweise ist die Handverdichtung der Verschlussmaterialien mit einem entsprechenden Handstamper (siehe Bild 2-5). Bei richtiger Anwendung lassen sich hiermit gute bis sehr gute Ergebnisse erzielen. Hierbei besteht die Gefahr, dass die Verdichtungsleistung durch die fortschreitende Ermüdung des Anwenders im Laufe eines Arbeitstages abnimmt. Das Verfahren ist technisch einfach



Bild 2-6: Transportable Mikrowelle zum Erhitzen der Asphaltportion [12] © Kleemann



Bild 2-7: Probenahmefahrzeug mit integriertem Bohrergerät und Mikrowellenofen [14] © Labor Hart

und erfordert nur geringen Stauraum im Entnahmefahrzeug, es kann bei allen verdichtungsfähigen Verschlussmaterialien eingesetzt werden.

Mit maschineller Verdichtung lassen sich ebenfalls gute Verdichtungsergebnisse erzielen, wobei auch hier die zunehmende Ermüdung des Anwenders berücksichtigt werden muss. Die Verdichtung erfolgt mithilfe eines Schlag- oder Bohrhammers mit Stamperplatte (siehe Bild 2-5). Die Stamperplatten sind in verschiedenen Durchmessern erhältlich und müssen an den Durchmesser des zu verschließenden Bohrloches ausgerichtet werden. Der Platzbedarf im Entnahmefahrzeug nimmt aufgrund des Mitführens eines Stromerzeugungsaggregates zu. Das Verfahren lässt sich bei allen verdichtungsfähigen Materialien einsetzen.

Bei der Verwendung von Heißmischgütern zum Verschluss von Bohrkernentnahmestellen kommt es grundsätzlich zu einem höheren technischen Aufwand. So muss neben der üblichen Entnahmearüstung auch die technische Ausrüstung zum Erwärmen oder ggf. zum Warmhalten entsprechen-



Bild 2-8: Stegbrüche zwischen den Bohrkernentnahmestellen

der Heißmischgutmengen mitgeführt werden. Eine Möglichkeit ist der Einsatz von Mikrowellenöfen, die bereits erfolgreich zur Sanierung von Schlaglöchern und bei der Bohrkernentnahme eingesetzt wurden (siehe Bild 2-6). Auch werden Fahrzeuge eingesetzt, bei denen sowohl das Bohrgerät als auch der Mikrowellenofen im Fahrzeug integriert sind (siehe Bild 2-7). Die Integration der Geräte in das Fahrzeug wirkt sich positiv auf die Arbeitsabläufe bei der Bohrkernentnahme und des Verschließens der Entnahmestelle aus. Die zusätzlichen technischen Installationen gehen allerdings immer zu Lasten der Ladekapazität von entnommenen Bohrkernen. Ein weiterer Nachteil ist die benötigte Zeit zum Erwärmen einer entsprechenden Asphaltportion, die i. d. R. länger als die Entnahme des Bohrkerns dauert.

Ein weiteres Qualitätskriterium bei der Entnahme von Bohrkernen ist der einzuhaltende Mindestabstand zwischen zwei Bohrkernen. Gemäß den TP Asphalt-StB Teil 27 [1] sind sämtliche zu einer Entnahmestelle gehörenden Bohrkern im Abstand von 5 cm bis 10 cm zu entnehmen. Zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit kann der Abstand zwischen den Bohrlöchern vergrößert werden. So fordert etwa das Landesamt für Bau und Verkehr des Freistaates Thüringen eine Erhöhung der Stegbreite zwischen den Bohrungen auf 15 cm bis 20 cm. [15] Bei Unterschreitung des Mindestabstandes kann es nach kurzer Zeit zu Stegbrüchen zwischen den Entnahmestellen kommen (siehe Bild 2-8).

2.2 RFID-Technologie

Innerhalb des Projektes wird nach einer Möglichkeit gesucht um Daten von entnommenen Bohrkernen auch für zukünftige Untersuchungen zur Verfügung stellen zu können. Daher soll eine Lösung gefunden werden Entnahmestellen so auszurüsten, dass im

Feld (sichtbare Entnahmestelle) z. B: Kontaktdaten abgegriffen werden können.

Hierzu bietet sich die RFID-Technik an, weil diese es ermöglicht eine sicht- und kontaktlose Datenübermittlung mithilfe von elektromagnetischen Wellen bzw. verschiedenen Funkfrequenzen durchzuführen. Die Abkürzung RFID steht für „Radio Frequency Identification“ und bedeutet so viel wie „Funkerkennung“. Ein einfaches RFID-System besteht im Allgemeinen aus zwei Hauptkomponenten, dem Speichermedium (Transponder) und dem Lesegerät (Reader). [16]

Zurzeit sind zahlreiche Transponder für unterschiedliche Anwendungsfälle auf dem Markt verfügbar. Sie werden in vielen verschiedenen Ausführungen und Bauformen hergestellt. Grundsätzlich werden RFID-Transponder nach aktiven und passiven Transpondern unterschieden. Aktive Transponder besitzen eine eigene Energieversorgung, sie sind daher technisch aufwendiger in der Herstellung und entsprechend teurer. Aktive Transponder sind für anspruchsvollere Aufgaben geeignet, bei denen z.B. Uhrzeiten oder extreme Reichweiten benötigt werden. Bei der ausschließlichen Verwendung als Lese- und Schreibmedium sind passive Transponder ausreichend und geeignet. [16]

Unterschieden wird zudem zwischen der Hochfrequenz-Technologie (HF) und der Ultrahochfrequenz-Technologie (UHF). UHF-Systeme können eine Schreib-Lese-Reichweite von mehreren Metern erzielen und liegen damit über der von HF-Systemen. [16]

Entsprechende RFID-Transponder im UHF-Bereich wurden bereits erfolgreich im Straßenbau eingesetzt. [17, 18]

3 Verfahren zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Das nachfolgende Kapitel beinhaltet einen Überblick über bisher bekannte Verschlussverfahren und -varianten, deren labortechnische Evaluation und die Entwicklung eines dauerhaften und zeitsparenden Verfahrens zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen in Straßenkonstruktionen mit Asphalt- und Betonbauweise.

Der Fokus der Verfahrensentwicklung liegt darauf, qualitativ hochwertige Bohrlochverschlüsse herzustellen, dabei aber mit einer möglichst geringen Zusatzausrüstung auszukommen. Somit soll eine in der Praxis optimale Anwendbarkeit und eine hohe Akzeptanz zur Durchführung dieses Verfahrens angestrebt werden.

3.1 Übersicht verschiedener Verschlussvarianten

Grundsätzlich lassen sich die verschiedenen Verschlussvarianten anhand des Deckschicht- bzw. Deckenersatzes und der Unterkonstruktion unterscheiden. Im Rahmen dieses FE-Vorhabens werden für den Deckschichtersatz bei Asphaltstraßen fünf verschiedene Verschlussmaterialien bzw. Deckschichtersatzmaterialien verwendet; dazu zählen Heißmischgut (HMG), emulsionsgebundenes Kaltmischgut (KMG-E) und reaktives Kaltmischgut (KMG-R) sowie zwei Festkörperverschlussvarianten (Bitumenstopfen und Reparaturbohrkern). Für den Deckenersatz bei der Betonbauweise wird ein Straßenreparaturbeton C30/37 verwendet.

Für die Unterkonstruktion werden ungebundene Gesteinskörnung (GK) und hydraulisch gebundene Gesteinskörnung (hgGK) sowie Kaltmischgut und Heißmischgut bei der Asphaltbauweise und Straßenreparaturbeton C30/37 bei der Betonbauweise verwendet.

Hieraus ergeben sich 14 zu prüfende Verschlussvarianten, die im Anhang A tabellarisch dargestellt sind und hier kurz beschrieben werden:

Variante A: Heißmischgut (HMG)

Bei dieser Variante wird das komplette Bohrloch mit einem Heißmischgut verschlossen. Diese Variante stellt aus konstruktiver Sichtweise das Optimum einer Verschlussvariante in Asphaltbauweise dar, da

diese Variante der Originalkonstruktion am ähnlichsten ist.

Je nach Bohrlochtiefe und Anzahl der zu entnehmenden Bohrkernkerne müssen entsprechende Mengen an Heißmischgut vorgehalten oder vor Ort erwärmt werden. Hierzu kann der Einsatz von Thermofahrzeugen sinnvoll sein, der allerdings aufwendig und kostenintensiv ist. Daher wird diese Variante nicht grundsätzlich zum Verschließen von Bohrkernentnahmestellen verwendet. Für einen Bohrkerndurchmesser von 150 mm ergibt sich ein Volumen von ca. 0,18 l je cm Bohrlochtiefe. Die Erwärmung einer entsprechenden Menge für ein 30 cm tiefes Bohrloch stellt damit eine erhebliche technische Herausforderung dar und erfordert einen entsprechenden gerätetechnischen Aufwand. Eine Erwärmung kleiner Mengen (bis ca. 5 Liter) vor Ort kann beispielsweise mit einer Mikrowelle erfolgen, der zeitliche Aufwand für einen entsprechenden Verschluss ist dann abhängig von der Geräteleistung. Je nach Art des HMG muss eine entsprechende Verdichtungsarbeit eingeplant werden, diese ist für Gussasphaltvarianten des HMGs besonders gering, da hierbei nur Lufteinschlüsse mit einem Holzstößel ausgetrieben werden müssen. Allerdings sind Auskühlzeiten zu berücksichtigen.

Variante B: Straßenreparaturbeton (RepBeton)

Für die Betonbauweise ergibt sich aus konstruktiver Sichtweise ein vollständiger Verschluss des Bohrlochs mit einem Straßenreparaturbeton C30/37 als Optimum. Dieser kann als Fertigtrockenmischung zur Entnahmestelle transportiert werden und vor Ort mit einer entsprechenden Menge Wasser gemischt werden.

Variante C, D, E: bitumenhaltige Mischgüter (HMG, KMG-R, KMG-E) auf hydraulisch gebundener Gesteinskörnung (hgGK)

Die Variante C (HMG/hgGK) stellt aus konstruktiver Sicht einen guten Kompromiss zur Variante A für die Asphaltbauweise dar. Der Aufwand zur Vorhaltung bzw. Erwärmung wird durch die Verringerung des HMG-Anteils deutlich reduziert, gleichzeitig kann, nach der Aushärtung der hgGK von einer guten Dauerhaftigkeit ohne Nachverdichtung bzw. Setzungen ausgegangen werden. Wie bei jeder Variante mit Heißmischgut ist eine entsprechende Abkühlzeit zu berücksichtigen.

Mit der Variante D (KMG-R/hgGK) und der Variante E (KMG-E/hgGK) kann auf die Vorhaltung bzw. Er-

wärmung von HMG vollständig verzichtet werden, wodurch der gerätetechnische Aufwand deutlich reduziert wird. Im Gegensatz zu den Varianten mit Heißmischgut muss bei den Varianten mit Kaltmischgut mehr Zeit für den sorgfältigen Einbau und die hochwertige Verdichtung der Materialien investiert werden. Die zweite Komponente des reaktiven Kaltmischgutes ist eine geringe Menge an Wasser und ist aus verfahrenstechnischen Gründen beim Kernbohren vorhanden.

Variante F: Kaltmischgüter mit unterschiedlichem Größtkorn (KMG-E 0/8 / KMG-E 0/11)

Die Variante F ist das Äquivalent zur Variante A mit kalt zu verarbeitenden Mischgütern. Hierbei wird das komplette Bohrloch mit KMG-E verschlossen. Dabei werden zwei Sorten mit unterschiedlichem Größtkorn verwendet; für die Deckschicht (4 cm) ein KMG-E 0/8 und für die Unterkonstruktion ein KMG-E 0/11.

Hierbei ist ein entsprechender Verdichtungs- aufwand zu berücksichtigen. Durch die Verwendung von KMG in der Unterkonstruktion ist diese Variante besonders kostenintensiv.

Variante G und H: Kaltmischgut auf Gesteinskörnung (KMG-E / GK)

Die Varianten mit Kaltmischgut auf Gesteinskörnung werden bei dem Verschluss von Bohrkernentnahmestellen häufig eingesetzt. Die Varianten G und H unterscheiden sich lediglich durch die Abstufung der Gesteinskörnung für die Unterkonstruktion.

Für die Variante G wird ein Einkorngemisch der Korngruppe 8/11 verwendet. Durch die Verwendung des Einkorngemisches ist ein entsprechender Schutz vor Entmischung der Gesteinskörnung bei der Lagerung und insbesondere des Transportes gewährleistet. Wie bei enggestuften Korngrößenverteilungen üblich, ist hierbei von einer schlechteren Verdichtbarkeit auszugehen, daher erhöht sich der Verdichtungs- aufwand entsprechend. Als effektiv und kraftsparend hat sich dabei eine Verdichtung mittels elektrischem Bohrhammer anstelle eines Handstampfers erwiesen.

Die Unterkonstruktion der Variante H besteht aus einer GK 5/11.

Varianten I und J: reaktives Kaltmischgut auf Gesteinskörnung (KMG-R / GK)

Diese beiden Varianten entsprechen den vorgenannten Varianten, allerdings wird statt eines emul-

sionsgebundenen Kaltmischguts (KMG-E) ein reaktives Kaltmischgut (KMG-R) verwendet.

Vorteile des reaktiven Kaltmischgutes ergeben sich durch die wesentlich schnellere Aushärtung. Die Varianten mit KMG-R können kostenintensiver als die Varianten mit KMG-E sein.

Varianten K und L: Heißmischgut auf Gesteinskörnung (HMG / GK)

Die Unterkonstruktion der Varianten K und L entsprechen ebenfalls den vorgenannten Varianten. Als Deckschichtersatzmaterial wurde hierbei jedoch ein Heißmischgut verwendet.

Bei den Varianten K und L muss wieder ein entsprechend gerätetechnischer Aufwand (hier: Mitführen eines Mikrowellenofens) berücksichtigt werden. Durch die Verwendung eines Gussasphaltes entfällt die Verdichtung. Auch hier muss wieder eine Aushaltzeit eingeplant werden.

Varianten M und N: Bitumenstopfen und Reparaturbohrkern auf Gesteinskörnung

Die Varianten M und N sind zwei im Projektverlauf untersuchte Festkörperverschlussvarianten. Hierbei werden Festkörper in das Bohrloch eingeschlagen oder eingelegt. Vorteil dieser Varianten ist eine dauerhafte Oberfläche des Verschlusses, vergleichbar mit der Oberfläche eines Heißmischgutes. Im Gegensatz zum Heißmischgut entfällt der zeitliche Aufwand für das Erwärmen entsprechender Mischgut- mengen. Für beide Varianten ist allerdings ein vergleichbarer gerätetechnischer Aufwand (Anwärm- brenner oder ggf. Mikrowellenofen) zur Erwärmung des Bohrlochs oder der Fugenverguss- masse zu berücksichtigen.

Für die Variante M (BS / GK) wurde ein 8 cm dicker Bitumenstopfen verwendet. Der Bitumenstopfen hat eine konische Form und verjüngt sich von 166 mm auf 154 mm. Laut Herstellerangaben erfolgte der Einbau in folgenden Schritten:

Zunächst erfolgt der Aufbau der Unterkonstruktion mit Gesteinskörnung (2/5, 5/8, oder 8/11) bis 70 mm unterhalb der Fahrbahnoberfläche. Im Anschluss wird das Bohrloch mittels Anwärm- brenner erwärmt und der Bitumenstopfen in das Bohrloch eingesetzt. Zum Schluss kann der Bitumenstopfen mit einem Gummihammer oder Handstampfer eingeschlagen werden. Mit dem Anwärm- brenner kann die Oberfläche des Bitumenstopfens geglättet und mit dem umgebenden Asphaltbelag verschmolzen werden. Ein Einbau mit geringem Überstand führt

unter den Verkehrslasten zu einer vollflächigen Abdichtung. [13]

Eine Herstellung von Prüfkörpern im Labor nach Herstellerangaben konnte nicht erfolgen. Durch das Anwärmen des Bohrlochs verringert sich die Steifigkeit des Asphaltes so erheblich, dass die Prüfkörper beim Einschlagen des Bitumenstopfens radial zum Bohrloch reißen. Es konnte beobachtet werden, dass die Bitumenstopfen aufgrund ihrer Abmessungen und des umgebenden warmen Asphaltes, diesen erheblich verdrängen. Die dadurch entstehende Einspannung und Verschmelzung des Bitumenstopfens mit dem Asphalt ist vermutlich sehr effektiv, konnte aber im Labor noch nicht realistisch simuliert werden.

Die Variante N (RepBK / GK) ist die zweite Festkörpervariante im FE-Vorhaben. Hierbei wird das Bohrloch bis 40 mm unterhalb der Fahrbahnoberfläche mit einer Gesteinskörnung 5/11 verfüllt und im Anschluss ein vorgefertigter Reparaturbohrkern (RepBK) mit einer Dicke von 40 mm in das Bohrloch eingelegt. Die verbleibende Fuge zwischen RepBK und Originalkonstruktion wird mit Bitumen verschlossen.

Bei der Herstellung von Prüfkörpern der Variante N im Labor wurde zunächst eine heiß zu verarbeitende Fugenvergussmasse verwendet. Laut Hersteller liegt die Verarbeitungstemperatur zwischen 160 °C und 180 °C. Es zeigte sich, dass die Fugenvergussmasse trotz der hohen Temperatur noch eine relativ hohe Viskosität aufwies. Dadurch war das Eingießen der Fugenvergussmasse in die ca. 3 mm breite Fuge kaum möglich. Des Weiteren verringerte sich die Temperatur der Fugenvergussmasse zwischen Originalkonstruktion und RepBK sehr schnell, so dass ein Verguss der Fuge über die gesamte Höhe zwischen Originalkonstruktion und RepBK nicht erfolgte, sondern lediglich eine Abdichtung an der Oberfläche.

In einem zweiten Versuch wurde die Originalkonstruktion mittels Anwärmbrenner erwärmt und anschließend der RepBK eingelegt. Die Fuge wurde mit einem Bitumen 50/70 statt mit der Fugenvergussmasse vergossen. Aufgrund der höheren Viskosität des Bitumens bei geringeren Temperaturen und der vorgewärmten Originalkonstruktion konnte so die Fuge vollständig über die gesamte Höhe verschlossen werden.

3.2 Labortechnische Evaluation

Eine labortechnische Evaluation von Verschlussvarianten soll eine objektive Möglichkeit zur Prüfung und zum Vergleich verschiedener Verschlussverfahren und -materialien bieten. Hierbei sollen insbesondere die Haupteigenschaften Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit unter möglichst realistischen Bedingungen geprüft werden. Hierzu wurden vorhandene Prüfverfahren zweckmäßig modifiziert und angepasst sowie eine Prüfsystematik entwickelt. Dieses Vorgehen war erforderlich, da keine vorgeschriebenen Prüfverfahren verfügbar sind.

3.2.1 Dichtigkeitsprüfung

Für die Untersuchungen der Dichtigkeit des Deckschichtersatzmaterials wurde ein Verfahren in Anlehnung an die DIN EN 12697-19 „Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt (Teil 19: Durchlässigkeit der Probekörper) [19] entwickelt. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3-1 dargestellt. Mit diesem Verfahren wird geprüft, ob Wasser durch das Deckschichtersatzmaterial in die Unterkonstruktion des Bohrlochverschlusses eindringen kann. Eine Prüfung der In einem ersten Schritt wurden sogenannte Trägerplatten hergestellt, die zur Aufnahme des zu untersuchenden Deckschichtersatzmaterials dienen. Zur Herstellung der Trägerplatten wurden rechteckige Asphalt- bzw. Betonprobekörper (Probekörper) mit einer Höhe von 50 mm hergestellt. Im Anschluss erfolgte aus diesen Probekörpern eine zentrische Bohrkernentnahme (\varnothing 150 mm) zur Herstellung des Bohrloches.

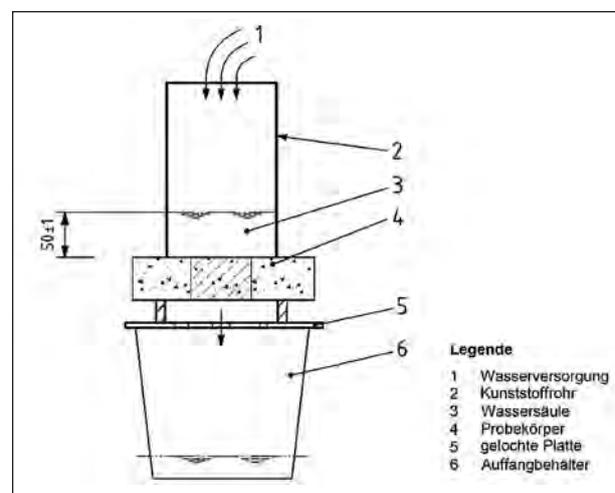


Bild 3-1: Versuchsaufbau zur Prüfung der Dichtigkeit in Anlehnung an DIN EN 12697-19 [19]



Bild 3-2: Dichtigkeitsprüfung mit Kaltmischgut; links: Versuchsaufbau, rechts: durchlaufendes Wasser während der Prüfung

Im zweiten Arbeitsschritt wurde das Bohrloch in der Trägerplatte mit verschiedenen Deckschichtersatzmaterialien (KMG, HMG, RepBK, Bitumenstopfen und RepBeton) verschlossen. Im Gegensatz zu der Verdichtung in den Vorversuchen (mit Handstampfer), wurde für die abschließende Prüfung auf Dichtigkeit der Deckschichtersatzmaterialien die Verdichtung unter Einsatz eines Bohrhammers mit Stampferplatte (\varnothing 140 mm) durchgeführt. Hiermit soll eine gleichmäßigere und ggf. intensivere Verdichtung stattfinden. Bei dem verwendeten selbstverdichtenden HMG konnte auf eine zusätzliche Verdichtung verzichtet werden.

Nach dem Verschließen des Bohrloches wurde ein Kunststoffrohr (\varnothing 200 mm) mit einem Silikondichtstoff auf der Trägerplatte wasserdicht befestigt. Nach dem Aushärten des Dichtstoffes konnte die Prüfung stattfinden. Zur Prüfung der Dichtigkeit wurde eine definierte Menge Wasser in das Kunststoffrohr gefüllt und geprüft, ob an der Unterseite des verschlossenen Bohrloches Wasser austritt.

Im Rahmen von Vorversuchen, die mit einem Kaltmischgut durchgeführt wurden, sollte in Anlehnung an die DIN EN 12697-19 [19] eine Wassersäule von 30 cm aufgefüllt und über eine definierte Zeit aufrecht gehalten werden (siehe Bild 3-2). Diese Vorgehensweise erwies sich als nicht praxistauglich, da das verwendete Kaltmischgut sehr durchlässig war und keine 30 cm hohe Wassersäule aufgebaut werden konnte. In Absprache mit dem Betreuungsausschuss wurde die einzufüllende Wassermenge reduziert. In Anlehnung an die Definition eines „sehr starken Regenereignisses“ des Deutschen Wetterdienstes wurde für die Prüfung der Dichtigkeit eine Wassermenge von 1,6 l verwen-

det, dies entspricht einer Wassersäule von 50 mm [20].

Die Abbruchkriterien der Prüfung waren entweder das vollständige Durchfließen der Wassermenge oder ein unveränderter Wasserpegel nach 60 Minuten im Vergleich zum Wasserpegel nach 30 Minuten (Sättigungszeitraum des Prüfkörpers) bzw. eine trockene Unterseite nach 60 Minuten. Aus diesen Abbruchkriterien ergaben sich die Prüfergebnisse „undicht“ oder „dicht“. Für den Fall, dass nach 60 Minuten nicht die vollständige Wassermenge durchgeflossen ist, der Wasserpegel aber deutlich verändert bzw. die Unterseite des Bohrloches nass ist, lautet das Prüfergebnis „mäßig dicht“. Bei undichten oder mäßig dichten Prüfergebnissen ist zudem zu klären, ob eine Begründung für das Prüfergebnis erkennbar ist (z. B. mangelhafte Prüfkörperherstellung).

Für jedes Deckschichtersatzmaterial wurde ein Prüfkörper hergestellt (Ausnahme: RepBK), an diesen Prüfkörpern wurde die Prüfung durchgeführt.

Zunächst wurden Dichtigkeitsprüfungen an den im FE-Vorhaben verwendeten Kaltmischgütern (KMG-E und KMG-R) durchgeführt. Trotz der geräteunterstützten Verdichtung konnte kein wasserundurchlässiger Deckschichtersatz hergestellt werden. Zudem musste das KMG-E mit einem Drahtgitter (Maschenweite ca. 10 x 10 mm) von unten gestützt werden, dadurch konnte eine Beschädigung oder das Herausfallen aus der Trägerplatte verhindert werden.

Die Dichtigkeitsprüfung des Bitumenstopfens erfolgte im Rahmen von Vorversuchen an einem Bitumenstopfen aus einer Musterlieferung des Herstel-

Deckschichtersatzmaterial	Wasserstand [mm] nach 30 Min	Wasserstand [mm] nach 60 Min	Ergebnis	Bemerkung
KMG-E	0	0	undicht	mit Drahtgitter
KMG-R	0	0	undicht	
HMG	50	50	dicht	
Bitumenstopfen	50	50	mäßig dicht	feuchte Unterseite
RepBK1	12	0	mäßig dicht	Fugenvergussmasse; Durchfluss nach 39 Min
RepBK2	50	50	dicht	Bitumen 50/70
RepBeton	50	50	dicht	

Tab. 3-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dichtigkeitsprüfung für Deckschichtersatzmaterialien

lers. Die Herstellung erfolgte ohne Anwärmen der Originalkonstruktion. Mit den Bitumenstopfen aus der Hauptlieferung für das FE-Vorhaben konnten keine Prüfkörper hergestellt werden, da die Trägerplatten beim Einschlagen beschädigt wurden. Ursächlich hierfür waren geringfügig geänderte Abmessungen der Bitumenstopfen.

Der Reparaturbohrkern wurde mithilfe von zwei verschiedenen Materialien in die Trägerplatte eingebaut. Zuerst wurde eine Fugenvergussmasse verwendet, deren Viskosität so hoch war, dass kein vollständiger Fugenverguss möglich war. Als Alternative wurde ein Straßenbaubitumen 50/70 verwendet, hiermit konnte ein vollständiger Fugenverschluss erzielt werden.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Dichtigkeitsprüfung ist in Tabelle 3-1 dargestellt.

3.2.2 Dauerhaftigkeitsprüfung

Die Prüfung der Dauerhaftigkeit erfolgte an Bohrlochverschlussvarianten, die im Laboratorium hergestellt und einer dynamischen Belastung in einer Prüfmaschine unterzogen wurden. Die Prüfung der Dauerhaftigkeit basiert dabei auf dem Versuchsprinzip des einaxialen Druckschwellversuches. Der Versuch soll zeigen, wie sich die verschiedenen Verschlussvarianten unter der zyklischen Belastung verhalten. Dabei ist besonders auf eine ggf. stattfindende Setzung/Nachverdichtung und ggf. auftretende Schädigungen im Fugenbereich zwischen Deckschichtersatzmaterial und Originalkonstruktion zu achten.

Hierzu mussten entsprechende Prüfkörper mit den verschiedenen Verschlussvarianten hergestellt werden. Da die meisten Verschlussvarianten aus zwei Schichten bestehen, der oberen Schicht mit dem Deckschichtersatzmaterial und der unteren Schicht mit der Unterkonstruktion, musste ein entsprechend

tiefes Bohrloch in einen Asphaltkörper gebohrt bzw. hergestellt werden.

Die ursprüngliche Planung sah die Herstellung von Asphaltprobeplatten mit einer Dicke von 240 mm im Wuppertaler-Walzsektorverdichter (WWSV) vor. Dies erwies sich nach ersten Versuchen aufgrund der Masse des hergestellten Asphaltprobekörpers (ca. 120 kg) als nicht praktikabel. Daher wurde entschieden, die Asphaltkörper aus einzelnen Asphaltprobeplatten zusammensetzen. Der Asphaltprobekörper besteht somit aus einer ca. 30 mm dicken Basisplatte ohne Bohrloch (AC 5 DN) und drei Asphaltplatten (AC 16 BS) mit jeweils 80 mm Dicke sowie einer 40 mm hohen Deckschichtplatte (SMA 11 S) in denen, analog zur Dichtigkeitsprüfung, jeweils zentrisch ein Bohrkern entnommen wurde. Die einzelnen Asphaltplatten wurden anschließend mit einem Straßenbaubitumen 50/70 verklebt.

Diese im Labor hergestellten Bohrlöcher, mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Tiefe von ca. 280 mm, wurden anschließend mit den 14 verschiedenen Verschlussvarianten verschlossen und nachfolgend in einer dynamischen Prüfmaschine geprüft.

Die Prüfung erfolgt nach dem Prinzip des einaxialen Druckschwellversuches in Anlehnung an die TPAsphalt-StB-Teil 25 B1 [21]. Die Belastung des Bohrlochverschlusses erfolgte dynamisch über eine Lastplatte ($\varnothing=96$ mm) mittels einer Impulsbelastung. Die aufgebrachte zyklische Impulsbelastung von 0,35 N/mm² entspricht der Oberspannung aus den TPAsphaltStB Teil 25 B1 [21]. Die Dauer der Prüfung wurde auf 30.000 Belastungszyklen und die Prüftemperatur auf 20 °C festgelegt. Mit der langen Versuchsdauer sollte sichergestellt werden, dass ein ggf. eintretendes Setzungsverhalten bzw. eine Nachverdichtung ausreichend gut dokumentiert wird.



Bild 3-3: Schädigung des Asphaltkörpers im Bereich der Deckschichtplatte nach einem Vorversuch mit höherer Oberspannung



Bild 3-4: links: verdichtete Gesteinskörnung 8/11; rechts: Verdichtung von KMG-R mit einem elektrischen Bohrhammer mit Stampferplatte

In Vorversuchen wurde mit höheren Spannungen experimentiert, dabei zeigten sich allerdings Schädigungen im Bereich der Deckschichtplatte (siehe Bild 3-3). Zur Vermeidung derartiger Schäden wurde auf eine höhere Oberspannung verzichtet.

Die Verdichtung der Verschlussmaterialien wurde mit einem elektrischen Bohrhammer mit Stampferplatte (\varnothing 140 mm) durchgeführt. Das Bild 3-4 zeigt exemplarisch die Verdichtung eines Prüfkörpers für die Dauerhaftigkeitsprüfung.

Aufgrund der aufwändigen Prüfkörperherstellung wurde zunächst für jede Verschlussvariante nur ein Prüfkörper hergestellt und geprüft. Eine Ausnahme bildet die Variante N (RepBK), da hierbei zwei unterschiedliche Vergussmaterialien zur Anwendung kamen. Im weiteren Verlauf des Projektes wurde eine ausgewählte Anzahl von Varianten jeweils an einem weiteren Prüfkörper erneut geprüft. Die Wiederholung der Prüfung dient der Validierung der zuvor gewonnenen Ergebnisse. Hierzu

zählen die Varianten F, G, H, K, L; die Ergebnisse sind in Tabelle 3-2 dargestellt.

Die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfung sind als Kriechkurven der getesteten Verschlussvarianten in Bild 3-5 dargestellt. Die quantitativen Ergebnisse enthält die Tabelle 3-2, hier sind die Verformung in mm nach 10.000 Belastungszyklen und nach 30.000 Belastungszyklen sowie die Steigung zwischen dem 10-tausendsten und dem 30-tausendsten Belastungszyklus in Millionstel (parts per million [ppm]) wiedergegeben (Markierung in z. B. Bild 3-5). Der Abschnitt zur Ermittlung des Steigungsmaßes der Kriechkurve wurde so gewählt, dass eine ausreichende Phase zur Konsolidierung vorliegt und der weitere Verlauf dennoch als repräsentativ für ein Langzeitverhalten mit annähernd linearer Steigung ist. Zudem wird der Rang nach dem Steigungsmaß gegeben.

Die Prüfergebnisse entsprechen häufig den Erwartungen. Die Variante F liefert mit einer Verformung

Varianten-Bez.	Deckschicht- ersatzmaterial	Unter- konstruktion	Verformung		Steigung	Rang
			nach 10.000 Zyklen [mm]	nach 30.000 Zyklen [mm]	zwischen Zyklus 10.000 und 30.000 [ppm]	nach Steigung
A	HMG		-0,29	-0,35	-3,19	6
B	RepBeton		-0,12	-0,14	-1,20	1
C	HMG	hyd. geb. GK	-0,41	-0,49	-4,03	8
D	KMG-R 0/5	hyd. geb. GK	-0,41	-0,47	-3,17	5
E	KMG-E 0/8	hyd. geb. GK	-0,23	-0,29	-2,93	4
F.1	KMG-E 0/8	KMG-E 0/11	-0,77	-1,06	-14,67	18
F.2			-0,66	-0,97	-15,53	19
G.1	KMG-E 0/8	GK 8/11	-0,63	-0,78	-7,43	15
G.2			-0,33	-0,45	-5,81	13
H.1	KMG-E 0/8	GK 5/11	-0,42	-0,54	-6,04	14
H.2			-0,46	-0,63	-8,30	16
I	KMG-R 0/5	GK 8/11	-0,26	-0,32	-2,57	2
J	KMG-R 0/5	GK 5/11	-0,69	-0,86	-8,48	17
K.1	HMG	GK 8/11	-0,93	-1,03	-5,07	10
K.2			-0,60	-0,70	-4,98	9
L.1	HMG	GK 5/11	-0,56	-0,66	-5,12	11
L.2			-0,47	-0,58	-5,46	12
N.1	RepBK	GK 8/11	-0,12	-0,18	-2,79	3
N.2	RepBK	GK 8/11	-0,44	-0,51	-3,88	7

Tab. 3-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfung der Bohrlochverschlussvarianten

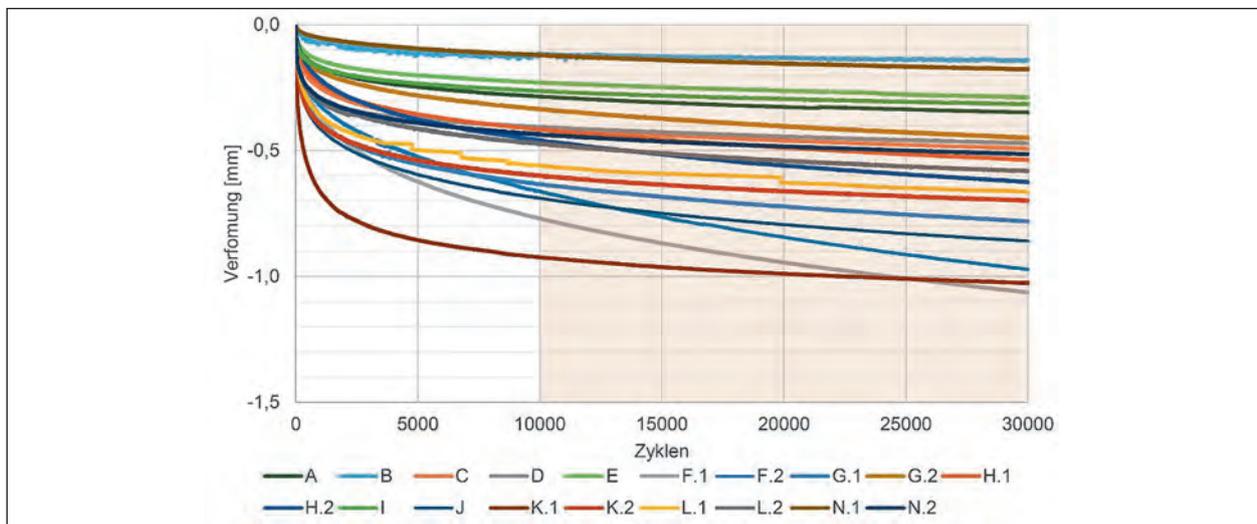


Bild 3-5: Grafische Darstellung der Kriechkurven der Dauerhaftigkeitsprüfung verschiedener Bohrlochverschlussvarianten

1,06 mm nach 30.000 Zyklen das schlechteste Prüfergebnis. Allerdings zeigt sich hiermit die geringe Spannweite der Ergebnisse hinsichtlich der Verformung. Ein differenzierteres Bild liefert die Betrachtung der Steigung des Kriechkurvenverlaufes. Die größte Steigung mit 14,67 bzw. 15,53 ppm ist ebenfalls bei der Variante F zu erkennen. Die geringste Steigung konnte bei der Variante B festgestellt werden (1,20 ppm). Die Variante B weist ebenfalls eine sehr geringe Konsolidierung auf. Aufgrund der Ma-

terialeigenschaften von Beton entsprechen diese Ergebnisse den Erwartungen, daher kann diese Variante als eine der möglichen Referenzvarianten herangezogen werden.

Die Variante N (Reparaturbohrkern auf GK 8/11) wurde zweimal geprüft, da sich mit der Fugenvergussmasse (N.1) kein durchgehender Fugenverguss herstellen ließ, somit konnte die Fuge nur oberflächlich versiegelt werden. Als Alternative er-

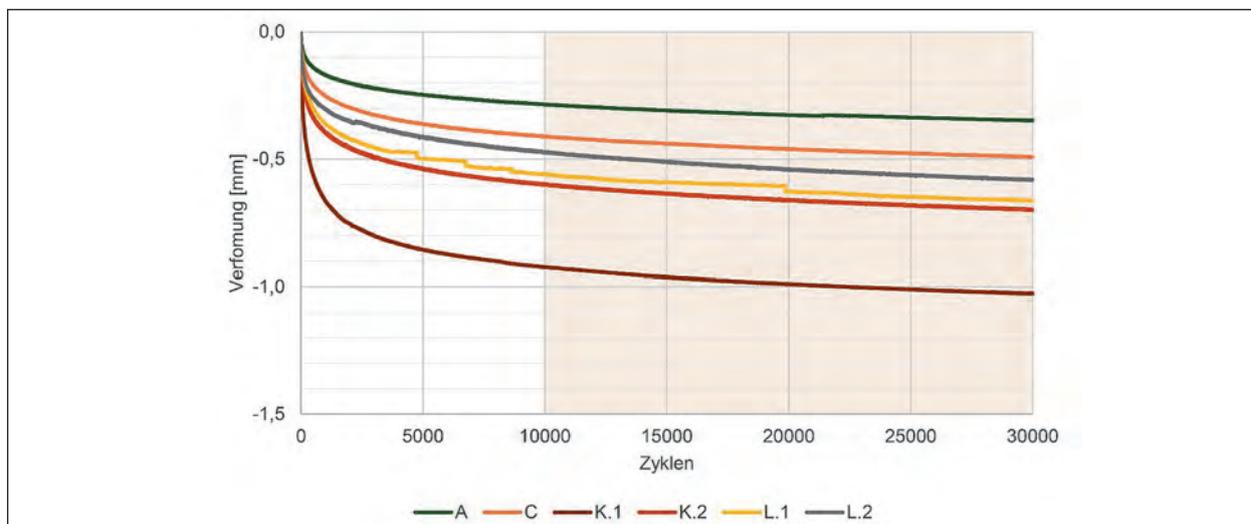


Bild 3-6: Vergleich der Kriechkurven der Varianten mit Heißmischgut (HMG) als Deckschichtersatzmaterial

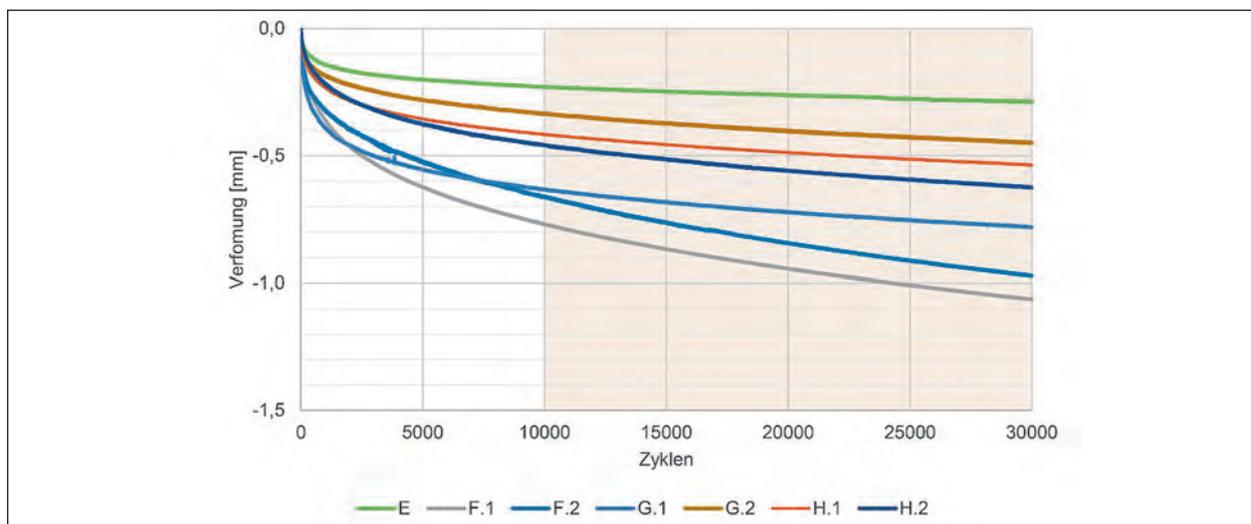


Bild 3-7: Vergleich der Kriechkurven der Varianten mit emulsionsgebundenem Kaltmischgut (KMG-E) als Deckschichtersatzmaterial

folgte der Fugenverguss mit einem Straßenbaubitumen 50/70 (N.2), das eine wesentlich geringe Viskosität bei entsprechender Verarbeitungstemperatur aufweist. Hiermit konnte ein durchgehender Fugenverguss erzielt werden. Die Ergebnisse der Dauerhaftigkeit zeigen einen geringen Unterschied, während der Kriechkurvenverlauf der Variante N.1 dem der Variante B sehr ähnlich ist und dementsprechend kaum konsolidiert, hat die Variante N.2 eine höhere Konsolidierung. Hierzu könnten Unterschiede bei Verdichtung der Unterkonstruktion beitragen.

Weiterhin zeigen sich insbesondere die Verläufe der Kriechkurven der Varianten mit Heißmischgut als Deckschichtersatzmaterial (A, C, K und L) und die Kriechkurven der Varianten mit Kaltmischgut KMG-E (E, F, G und H) hinsichtlich ihrer Unterkon-

struktion plausibel. Es ist erkennbar, dass mit abnehmender Steifigkeit bzw. Verdichtungswilligkeit des Unterkonstruktionsmaterials die Kriechkurvenverläufe durch entsprechende Konsolidierungsphasen und einem entsprechenden Langzeitverhalten gekennzeichnet sind (vgl. Bild 3-6 und Bild 3-7). Diese Ergebnisse konnten durch die Wiederholungsprüfungen an den Varianten F, G, H, K, L validiert werden, wie die Rangfolge der Steigung verdeutlicht.

Bei den Varianten mit Heißmischgut zeigt sich die geringste Konsolidierung bei der Variante A (Bohrlochverschluss mit HMG), gefolgt von Variante C mit der hydraulisch-gebundenen Gesteinskörnung und Variante L bei der die Unterkonstruktion aus einer Gesteinskörnung 5/11 besteht. Mit deutlichem Abstand zu den vorgenannten Varianten zeigt sich das Ergebnis hinsichtlich der Konsolidie-

rung bei der Variante K. Die Steigungen der Kriechkurvenverläufe präsentieren sich in ähnlicher Reihenfolge, allerdings zeigt sich hier, dass die Varianten K und L mit ihren Ergebnissen sehr dicht beieinander liegen und hinsichtlich der Rangfolge bei den Ergebnissen der Konsolidierung ihren Rang tauschen.

Die Ergebnisse der Varianten mit Kaltmischgut zeigen ebenfalls einen Kriechkurvenverlauf entsprechend der Steifigkeit bzw. der Verdichtungswilligkeit des Unterkonstruktionsmaterials. Das beste Ergebnis zeigt sich hier bei der Variante E (mit hydraulisch-gebundener GK). Darauf folgt die Variante mit der Gesteinskörnung 5/11 und der Gesteinskörnung 8/11. Das Schlusslicht in diesem Vergleich bildet die Variante F, bei der die Unterkonstruktion aus einem Kaltmischgut 0/11 besteht. Die Variante F weist im Vergleich zu allen anderen geprüften Varianten das mit Abstand schlechteste Langzeitverhalten auf (vgl. Bild 3-7)

Die drei Varianten mit dem reaktiven Kaltmischgut weisen gute bis mittelmäßige Prüfergebnisse auf. Ein eindeutiges Verhalten wie bei den beiden vorgenannten Deckschichtersatzmaterialien HMG und KMG-E ist, aufgrund der Anzahl der Varianten, nur bedingt erkennbar. Hier zeigt die Variante I (KMG-R auf GK 8/11) das beste Ergebnis. Danach folgen die Variante D (KMG-R auf hyd. geb. GK) und die Variante J (KMG-R auf GK 5/11). Im Gesamtvergleich rangiert die Variante J mit ihrem Langzeitverhalten auf dem vorletzten Rang.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse der Prüfung auf Dauerhaftigkeit weitestgehend den Erwartungen entsprechen und es hierbei kein Versagen einer Variante gab. Hinsichtlich der Verdichtbarkeit bzw. Verdichtungswilligkeit der Unterkonstruktion konnte beobachtet werden, dass die Verwendung einer geringfügig abgestuften Gesteinskörnung (5/11) die Spannweiten der Prüfergebnisse deutlich positiv beeinflusst. Die Spannweiten der Varianten H und L nach 30.000 Zyklen betragen 0,09mm und 0,08mm. Eine ähnliche Spannweite (0,09mm) konnte bei der Variante F festgestellt werden. Die Varianten mit einem Einkornmisch (8/11) als Unterkonstruktion (Varianten G, K und L) lieferten jeweils eine Spannweite zwischen den Prüfergebnissen von 0,33mm.

Die Spannweiten zwischen den Prüfergebnissen der Dauerhaftigkeitsprüfung zeigen eine mögliche Reproduzierbarkeit bzw. Gleichmäßigkeit bei der Verdichtung der Unterkonstruktion auf. Herstellungsbedingt, durch die Verdichtung mit Motorhammer und aufgrund der geringen Anzahl von Prüfungen kann allerdings keine statistisch abgesicherte Aussage getroffen werden.

Das hier entwickelte Verfahren zur Prüfung der Dauerhaftigkeit liefert für alle untersuchten Varianten eine sehr geringe Spannweite bei den gemessenen Verformungen, die maximale gemessene Verformung an der Oberfläche der Verfüllung beträgt bei der Variante F 1,06mm. Aufgrund der geringen Oberspannung bei zyklischer Belastung ist die Wirkungstiefe und damit der Einfluss der Unterkonstruktion auf die Prüfergebnisse unbekannt. Weiterhin ist anzumerken, dass Einflüsse die sich aus der Alterung von Deckschichtersatzmaterialien ergeben, insbesondere bei KMG, nicht berücksichtigt werden konnten. Zudem ist die Herstellung von Prüfkörpern extrem aufwändig und die Reproduzierbarkeit ist nicht nachweisbar.

Für die in Kapitel 4 beschriebenen Belastungsversuche mittels Mobile-Load-Simulator MLS30 wurden aufgrund der hier gewonnen Erkenntnisse zwei Variante ausgesucht.

In Absprache mit dem Auftraggeber wurden die Varianten H und L für die Belastungsversuche auf dem duraBAST gewählt. Die Entscheidung für die Unterkonstruktion 5/11 ist mit der geringen Spannweite der Prüfergebnisse und der daraus resultierenden reproduzierbaren Verdichtung begründet worden. Für die Auswahl des Deckschichtersatzmaterials wurden die Varianten mit HMG, KMG-E und KMG-R aufgrund der häufigen Verwendung und des geringen technischen Aufwands in Betracht gezogen, hierzu wurde die Spannweite der Prüfergebnisse aller Varianten mit den Unterkonstruktionen aus GK 5/11 und GK 8/11 ermittelt und bewertet. Die hydraulisch gebundene Gesteinskörnung wurde aufgrund des technischen Aufwands nicht berücksichtigt. Bei dieser Betrachtung wurden die geringsten Spannweiten bei den Varianten mit den Deckschichtersatzmaterialien HMG und KMG-E festgestellt.

Die Prüfergebnisse aller Varianten sind im Anhang enthalten.



Bild 4-1: duraBAST im Autobahnkreuz Köln-Ost (BAB 3/4) © BAST

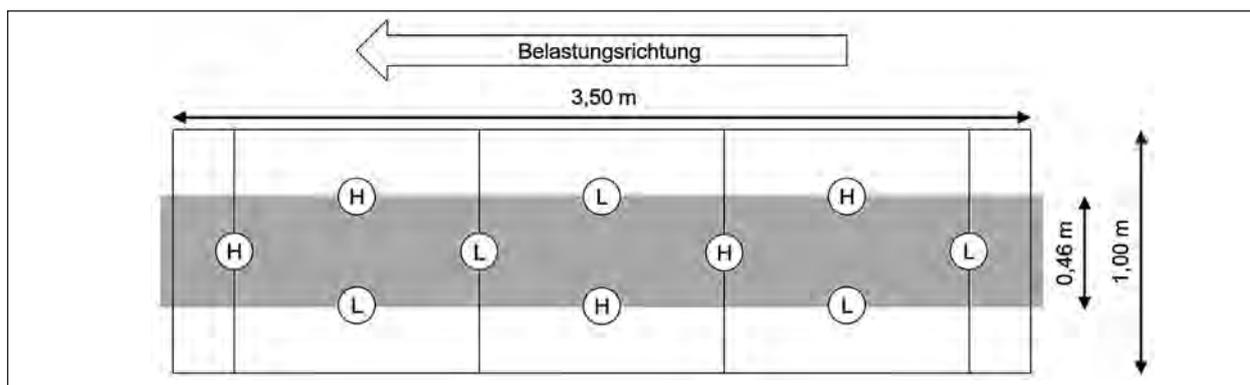


Bild 4-2: Schema der Belastungsfläche mit Verschlussvarianten H und L und MLS30 Rollspur (grau)

4 Belastungsversuche mittels Mobile-Load-Simulator MLS30

Für die Verifizierung der Verschlussvarianten wurden in einer Versuchsfläche auf dem Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der BAST (duraBAST, siehe Bild 4-1) insgesamt zehn Bohrkernentnahmestellen mit zwei unterschiedlichen Verschlussmaterialien verschlossen. Im Anschluss erfolgte ein zeittraffender Belastungsversuch mit dem Mobile Load Simulator MLS30, eine mobile Großversuchsanlage im Maßstab 1:1, mit insgesamt 1,6 Millionen Überrollungen mit einer Radlast von 50 kN.

Das Versuchsfeld und die Verschlüsse der Bohrkernentnahmestellen wurden kontinuierlich mittels Falling-Weight-Deflectometer (FWD) und Querebenenmessgerät untersucht. Zudem erfolgte eine versuchsbegleitende Fotodokumentation.

4.1 Vorbereitungen und Einbau der Verschlussmaterialien

Der Belastungsversuch erfolgte auf der Versuchsfläche DU-Z2a auf dem duraBAST. Diese Fläche

wurde zuvor für das Forschungsprojekt HEALROAD verwendet und setzt sich aus 5 cm offenporiger Asphaltdeckschicht, 5 cm Asphaltbinderschicht und 14 cm Asphalttragschicht zusammen, welche sich auf einer 16 cm dicken Frostschutzschicht befinden [22].

Die Belastungsfläche ist 3,50m lang und 1,00m breit. Die beiden Verschlussmaterialien wurden jeweils für fünf Entnahmestellen (\varnothing 150mm) verwendet. Davon befinden sich jeweils zwei in der Rollspur, welche komplett überrollt wurden und jeweils drei am Rand, welche ungefähr zur Hälfte überrollt wurden.

Als Verschlussmaterialien wurden, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, die Varianten H (emulsionsgebundenes Kaltmischgut 0/8 auf Gesteinskörnung 5/11) und L (Heißmischgut auf Gesteinskörnung 5/11) ausgewählt. In Bild 4-2 ist das Versuchsfeld mit Anordnung der Verschlussvarianten dargestellt.

Da die Bohrkernentnahme aus organisatorischen Gründen vier Tage vor dem Verschließen erfolgte, wurden die Bohrlöcher vor dem Verschließen angefeuchtet, um möglichst realistische Bedingungen herzustellen. Anschließend wurde je Bohrkernentnahmestelle die Gesteinskörnung 5/11 in zwei La-

gen eingebaut und unter Verwendung eines Bohrhammers mit Stampferplatte verdichtet. Die Unterkonstruktion schließt bei beiden Varianten 4 cm unterhalb der Oberkante Fahrbahn ab. Für das Deckschichtersatzmaterial der Variante K wurde das As-



Bild 4-3: Versuchsfeld nach dem Einbau der Verschlussvarianten

phaltnischgut im Vorfeld im Labor hergestellt und portionsweise in Glasbehälter gefüllt. Diese wurden vor dem Einbau in einem Mikrowellenofen auf 200°C erwärmt und unmittelbar danach in das Bohrloch eingefüllt. Mithilfe eines Holzstößels und Spachtels wurde der Mikrowellenasphalt verteilt und geglättet. Das emulsionsgebundene Kaltmischgut wurde lagenweise oberhalb der Unterkonstruktion eingebaut und mit einer leichten Überhöhung an der Oberfläche mittels Bohrhammer und Stampferplatte verdichtet. Beide Verschlussvarianten wurden nach Fertigstellung mit Sand abgestreut. Die Belastungsfläche ist nach dem Einbau der Verschlussvarianten in Bild 4-3 zu sehen.

An neun auf dem Versuchsfeld fixierten Messpunkten wurden kontinuierlich Querebenheitsmessungen mit einem Profilometer durchgeführt. Die Messungen fanden im Anschluss an die Bohrkernentnahme und den Verschluss der Entnahmestellen sowie nach 50.000, 500.000, 1.000.000 und 1.600.000 Überrollungen statt. Die Messpunkte sind in Bild 4-4 dargestellt. Neben den sieben Messpunkten, welche im

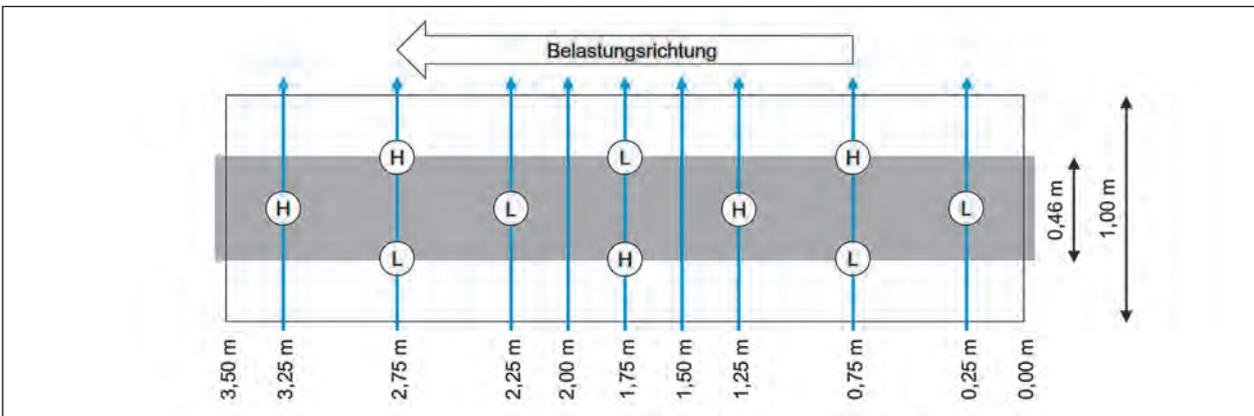


Bild 4-4: Messpunkte für die Querebenheitsmessungen

Überrollungen MLS30	Messreihe	FWD (klein)	FWD (groß)	Querebenheit	Oberflächenbilder
vor Bohrkernentnahme (vBK)	MR1	(✓)	✓	✓	✓
nach Bohrkernentnahme (nBK)	MR2	(✓)	✓	✓	✓
nach Verschluss (nVS)	MR3	(✓)	✓	✓	✓
25.000	MR4	✓	-	-	-
50.000	MR5	(✓)	✓	✓	✓
100.000	MR6	✓	-	-	-
200.000	MR7	✓	-	-	✓
500.000	MR8	(✓)	✓	✓	✓
750.000	MR9	✓	-	-	-
1.000.000	MR10	(✓)	✓	✓	✓
1.600.000	MR11	(✓)	✓	✓	✓

(✓) = Bestandteil der großen FWD Messung

Tab. 4-1: Zeitpunkte der Querebenheits- und FWD-Messungen sowie der Aufnahme von Oberflächenbildern

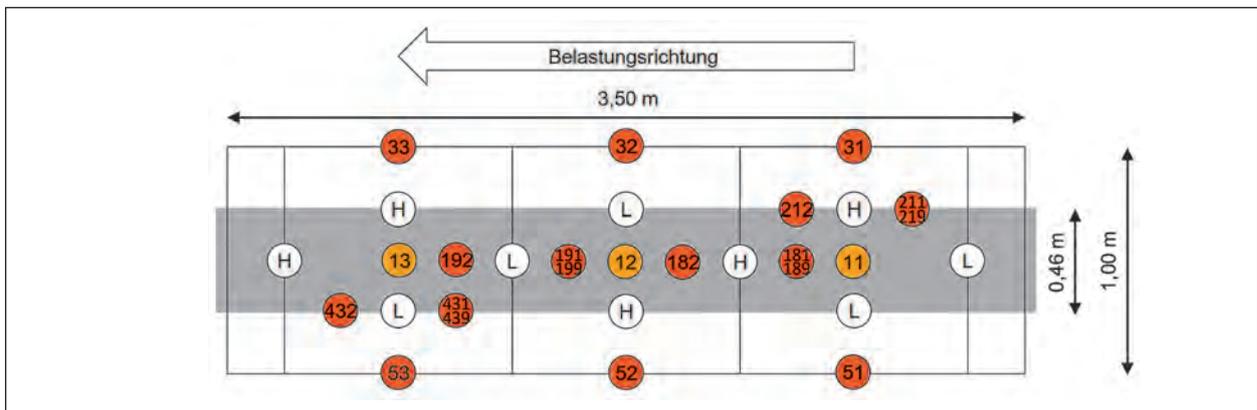


Bild 4-5: Positionen und Bezeichnungen der Messpunkte für FWD-Messungen

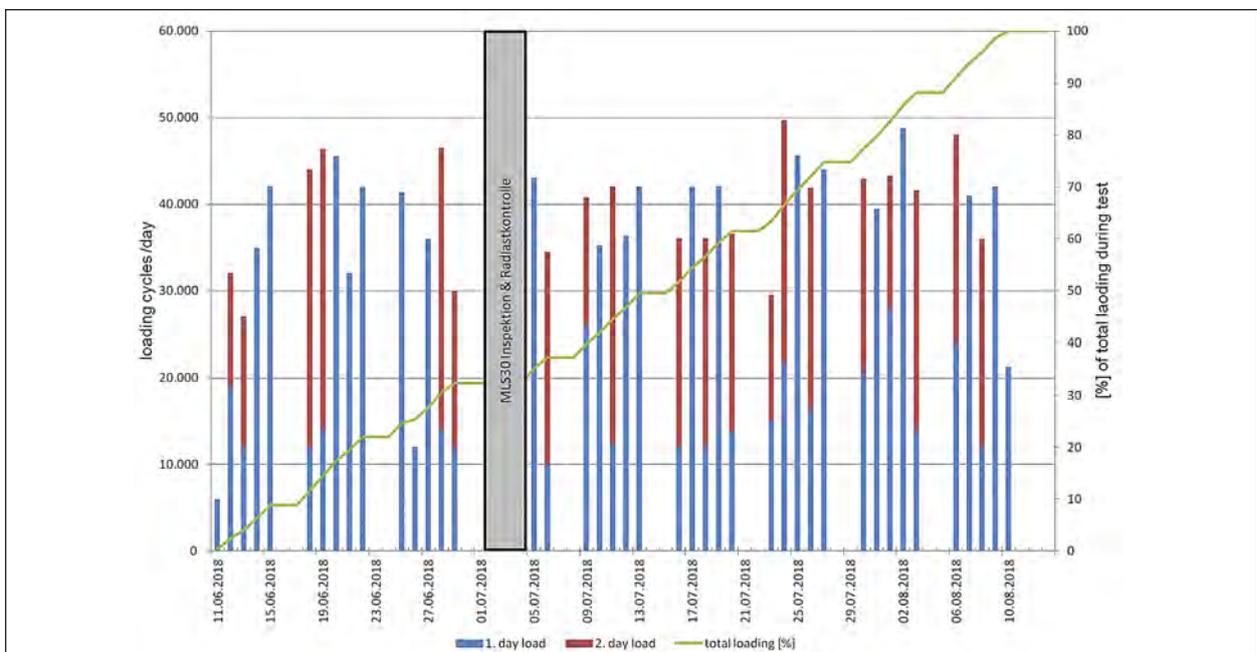


Bild 4-6: Betriebszeiten des MLS30 © BAST

Profil eine oder zwei Bohrkernentnahmestellen enthalten, wurden auch zwei Querebenenprofile gemessen, welche keine Bohrkernentnahmestelle enthalten (1,50m und 2,00m).

Tabelle 4-1 beschreibt die Zeitpunkte, an denen die verschiedenen Messsysteme zum Einsatz gekommen sind. Dabei ist zu beachten, dass die FWD Messungen mit zwei Messkonzepten durchgeführt wurden

Die Positionen und Bezeichnungen der Messpunkte sind in Bild 4-5 dargestellt. Das kleine FWD Messkonzept beinhaltet drei Messpunkte innerhalb der Rollspur mittig zwischen den Verschlussvarianten (11, 12, 13). Zusätzlich zu diesen, gehören zu dem großen FWD Messkonzept 17 weitere Messpunkte. Diese befinden sich innerhalb der Rollspur (181, 182, 189, 191, 192, 199), am Rand der Rollspur (211, 212,

219, 431, 432, 439) und außerhalb der Rollspur (31, 32, 33, 51, 52, 53). An den Messpunkten 189, 199, 219 und 439 wurde das FWD gedreht und entgegen der Belastungsrichtung gemessen. Auf der Versuchsfläche wurden bei beiden Messkonzepten drei gleichbleibende Referenzpunkte außerhalb des Versuchsfeldes gemessen (7, 8, 9).

4.2 Durchführung der Belastungsversuche

Der für die Belastungsversuche eingesetzte MLS30 der BAST verfügt über vier Belastungsräder, welche sich im Inneren in einer geschlossenen Kette auf Schienen befinden. Durch eine rundlaufende vertikal-ovale Bewegung wird die Radlast von 50 kN/Rad auf die Versuchsfläche aufge-

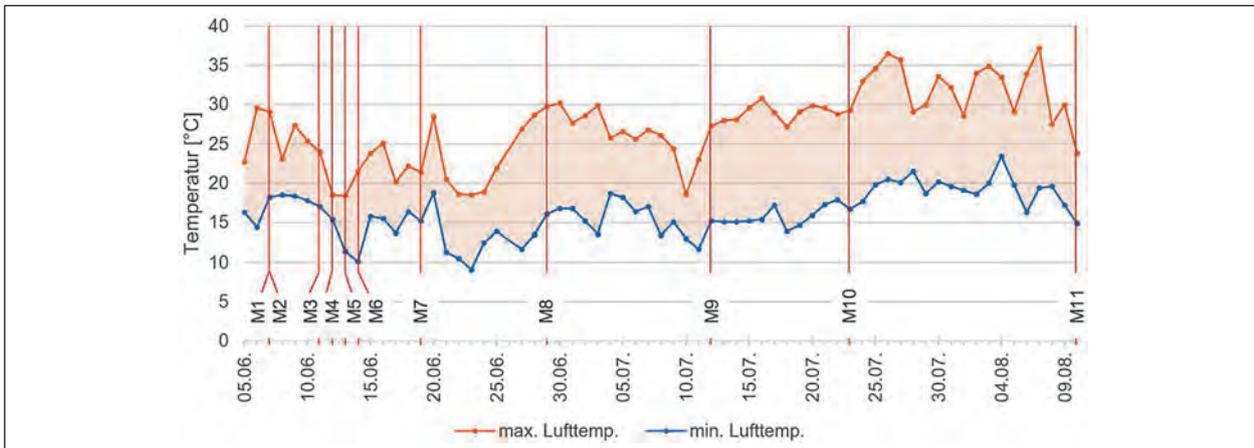


Bild 4-7: Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen der Messstation Köln-Stammheim [25]

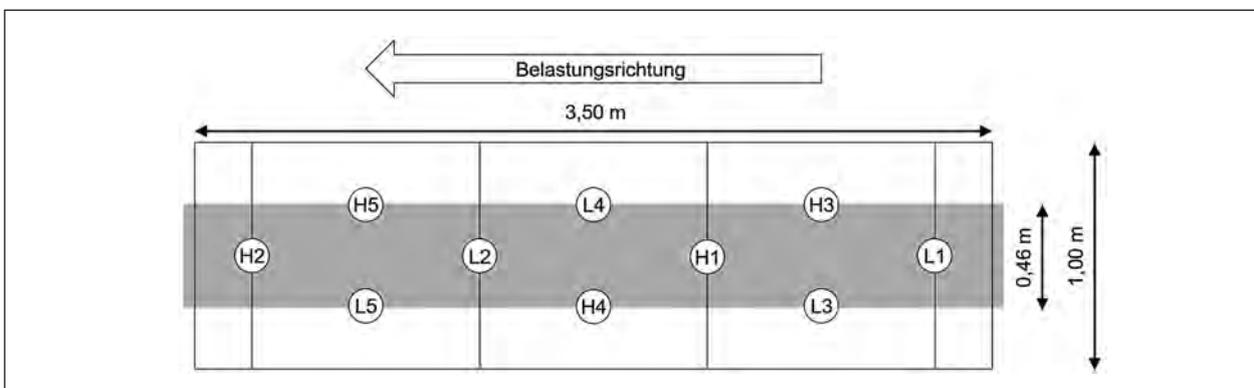


Bild 4-8: Nummerierung der Bohrkernentnahmestellen

bracht. Das Versuchsfeld wurde vom 11.06.2018 bis zum 10.08.2018 belastet. Insgesamt wurden 1.600.000 Überrollungen erzielt. Die Verteilung der Belastung auf die Versuchszeit ist in Bild 4-6 dargestellt. [23]

Eingesetzt wurde eine Super-Single Bereifung, welche eine Reifenaufstandsfläche von ca. 46 cm Breite aufweist. Die Frequenz der Belastung betrug 6.000 Überrollungen/h, umgerechnet auf die Geometrie der Belastungseinrichtung bedeutet dies eine Geschwindigkeit von 6.000 mm/s (ca. 22 km/h) [24]. Der MLS30 wurde nach den gültigen Wartungsintervallen von 50.000 Überrollungen von der Versuchsfläche heruntergefahren und gewartet. Diese Belastungspausen wurden genutzt, um auf dem Versuchsfeld Querebenen- und FWD-Messungen durchzuführen und die Bohrkernverschlüsse sowie deren Umgebung mittels Oberflächenbildern zu dokumentieren. Die Zeitpunkte der Untersuchungen, bezogen auf die durchgeführten Überrollungen, sind in Tabelle 4-1 dargestellt.

Das Bild 4-7 stellt die Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen der Messstation Köln-Stammheim des

Deutschen Wetterdienstes [25] während der Belastungsversuche dar. Die Messstation befindet sich in der Nähe des duraBAST und verdeutlicht die ab Ende Juni herrschenden hohen Temperaturen, welche die Belastungsversuche begleitet haben.

4.3 Ergebnisse der Belastungsversuche

Für die Auswertung der Ergebnisse der Belastungsversuche wurden die einzelnen Bohrkernentnahmestellen des Versuchsfeldes nach dem Schema in Bild 4-8 durchnummeriert. Die Varianten L1 und L2 sowie H1 und H2 liegen innerhalb, die Varianten L3 bis L5 und H3 bis H5 liegen am Rande der Rollspur.

An den Querprofilen, welche keine Bohrkernentnahmestellen enthalten (vgl. Bild 4-4), hat sich durch die Belastung mit dem MLS30 die Fahrbahn in der Rollspur nach 1.600.000 Überrollungen um ca. 4 bis 5 mm (Position 1,50 m) bzw. 5 bis 7 mm (Position 2,00 m) gesetzt. Exemplarisch ist in Bild 4-9 das Querebenenprofil an der Position 2,00 m

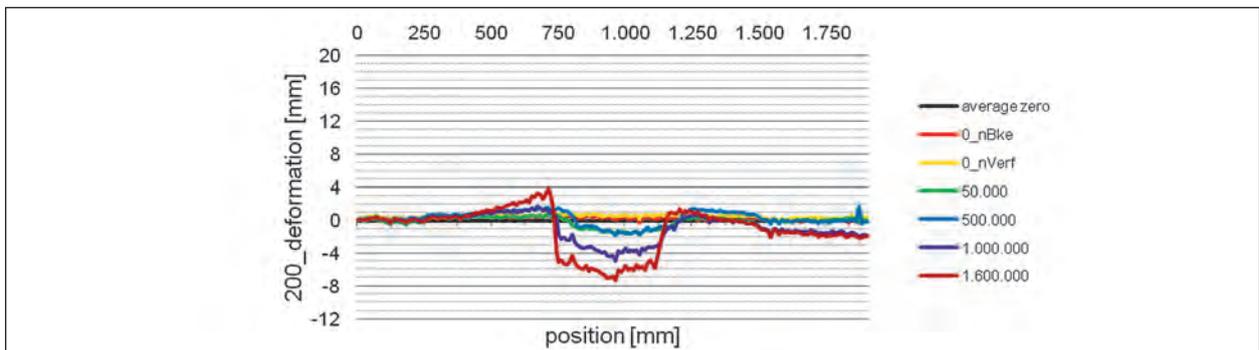


Bild 4-9: Querebenheitsprofil ohne Bohrkernentnahmestelle (Position 2,00 m) © BASt

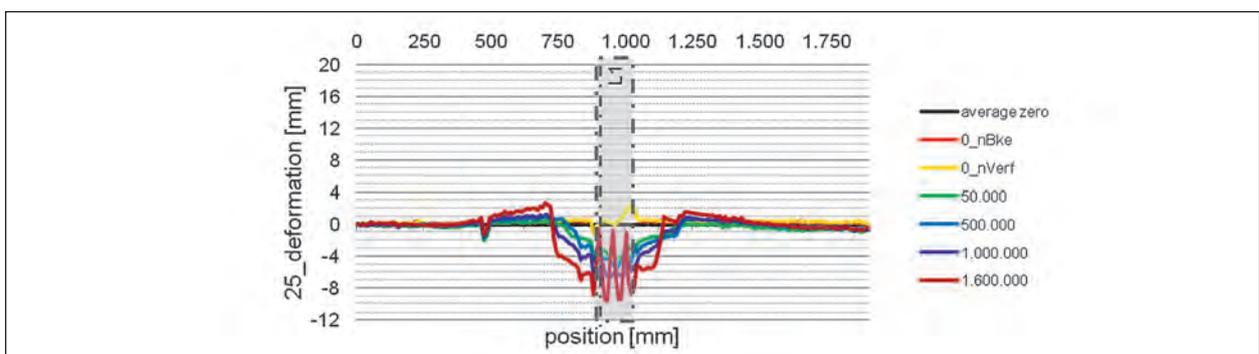


Bild 4-10: Querebenheitsprofil Position L1 © BASt



Bild 4-11: Position L1 nach 1.600.000 Überrollungen © BASt

dargestellt. Beide Querebenheitsprofile werden nachfolgend als Referenzmessungen für die Profile mit Bohrkernentnahmestellen verwendet.

Das Querebenheitsprofil an der Position L1 (siehe Bild 4-10) zeigt nach 1,6 Mio. Überrollungen (dunkelrote Linie) deutliche Ausschläge im Bereich des Bohrlochverschlusses. Hier hat sich der Bitumenmörtel an der Oberfläche des Deckschichtersatzes aus HMG aufgrund der spurtreuen Überrollung durch den MLS30 in das Profil des Super-Single Reifens hineingedrückt und ragt heraus (siehe Bild 4-11). Die umliegende Originalkonstruktion hat sich durch die Belastungen mit 4 bis 9 mm etwas stärker als an den Referenzpositionen gesetzt. Gleiches wurde an der Position L2 festgestellt.

Am Querebenheitsprofil der Position H1 (siehe Bild 4-12) lässt sich die Überhöhung erkennen (gelbe Linie), welche während des Verschleißens hergestellt wurde. Durch die Nachverdichtung ist diese nach 50.000 Überrollungen (grüne Linie) nicht mehr vorhanden. Im weiteren Verlauf finden am Bohrkernverschluss sowie der umliegenden Originalkonstruktion Setzungen statt, die mit bis zu 8 mm nur geringfügig über den Setzungen an den Referenzpositionen liegen (siehe Bild 4-13). Gleiches wurde an der Position H2 festgestellt.

Starke Verdrückungen der Deckschichtersatzmaterialien wurden am Rande der Rollspur bei halber Überrollung festgestellt. Das Querebenheitsprofil der Positionen H4 und L4 (siehe Bild 4-14) zeigt

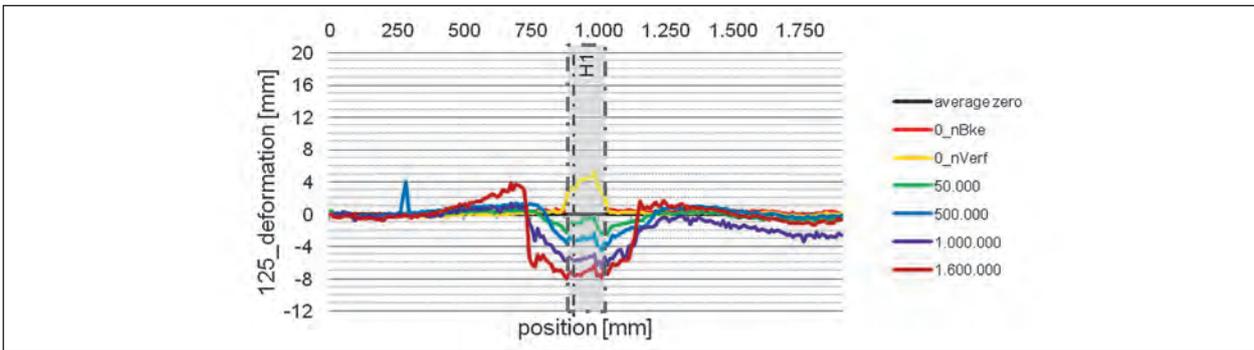


Bild 4-12: Querebenheitsprofil Position H1 © BAST



Bild 4-13: Position H1 nach 1.600.000 Überrollungen © BAST

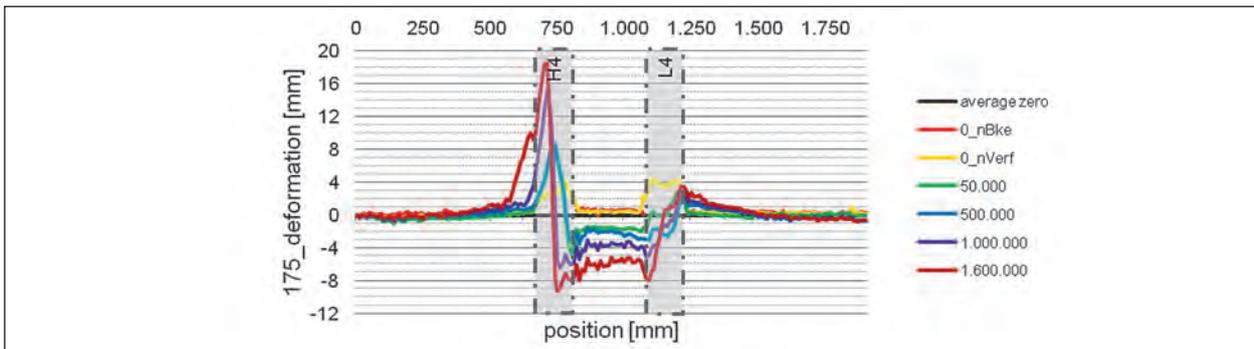


Bild 4-14: Querebenheitsprofil Position H4 und L4 © BAST



Bild 4-15: Position H4 nach 1.600.000 Überrollungen © BAST

deutlich, wie sich das KMG (linke Seite) außerhalb des überrollten Bereichs herausdrückt. Der überrollte Bereich zwischen den Bohrkernentnahmestellen weist mit einer Setzung von bis zu 8 mm ein ähnliches Setzungsverhalten auf wie an den Referenzpositionen. Der gleiche Effekt, wenn auch weniger ausgeprägt, ist beim HMG (rechte Seite) zu erkennen. Das Ausmaß der Verdrückungen an den Positionen H4 und L4 ist in Bild 4-15 zu sehen.

Messreihe	Überrollungen MLS30	$\varnothing T_{\text{Luft}}$ [°C]	$\varnothing T_{\text{Oberfläche}}$ [°C]
1	vor Bohrkernentnahme (vBK)	26,5	26,1
2	nach Bohrkernentnahme (nBK)	29,7	31,4
3	nach Verschluss (nVS)	25,5	27,9
4	25.000	18,6	19,7
5	50.000	16,3	17,2
6	100.000	24,3	24,4
7	200.000	19,0	19,6
8	500.000	26,8	26,1
9	750.000	25,8	25,9
10	1.000.000	28,0	26,9
11	1.600.000	23,2	23,8

Tab. 4-2: Messreihenbezeichnung mit Anzahl der Überrollungen sowie Luft- und Oberflächentemperaturen

Auffällig ist, dass die Deckschichtersatzmaterialien auf der linken Seite in Belastungsrichtung stärkere Verdrückungen aufweisen als auf der rechten Seite. Dies kann möglicherweise daran liegen, dass die Rollspur des MLS30 in Belastungsrichtung leicht nach rechts versetzt war. An den Positionen L3, L5, H3 und H5 sind ähnliche Verdrückungen nach außen hin zu beobachten. Diese haben allerdings ein geringeres Ausmaß. Vergleicht man die Verdrückung nach 1.600.000 Überrollungen bei halber Überrollung am Rand der Rollspur, schneidet das HMG als Deckschichtersatzmaterial besser ab als das KMG.

Insgesamt fanden vier kleine und acht große FWD Messreihen an sechs bzw. 24 Messpunkten statt. Während der FWD-Messungen lagen die Lufttemperaturen zwischen 16,2 und 33,0 °C. Die Messreihen mit den entsprechenden Überrollungen des MLS30 sowie den durchschnittlichen Luft- und Oberflächentemperaturen sind in Tabelle 4-2 dargestellt.

Der Messpunkt 8 liegt in Belastungsrichtung 7 m entfernt von der Mitte des Versuchsfeldes. Er dient als einer von drei Referenzpunkten für die FWD-Messungen. Das Bild 4-16 zeigt die Deflexi-

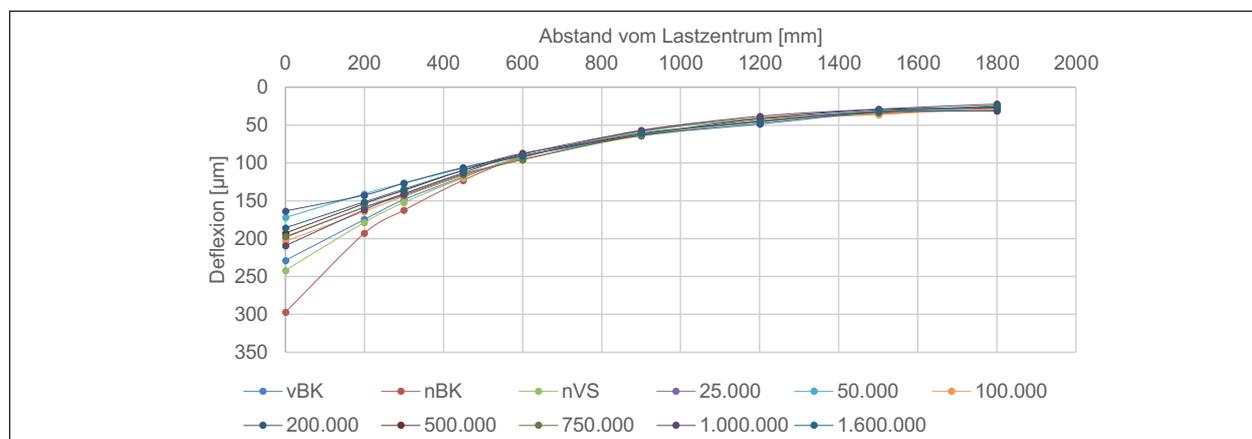


Bild 4-16: Deflexionsmulde Messpunkt 8 für die Messreihen 1 bis 11

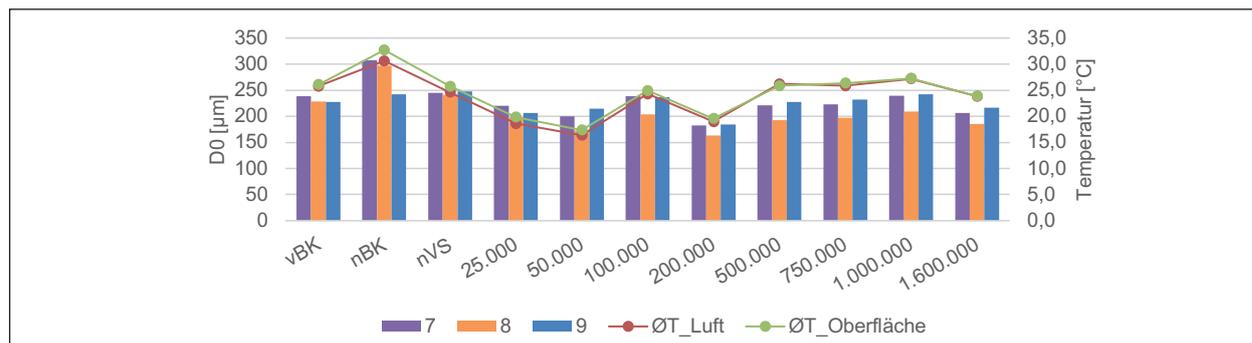


Bild 4-17: D_0 , Luft- und Oberflächentemperatur an den Messpunkten 7, 8 und 9 für die Messreihen 1 bis 11

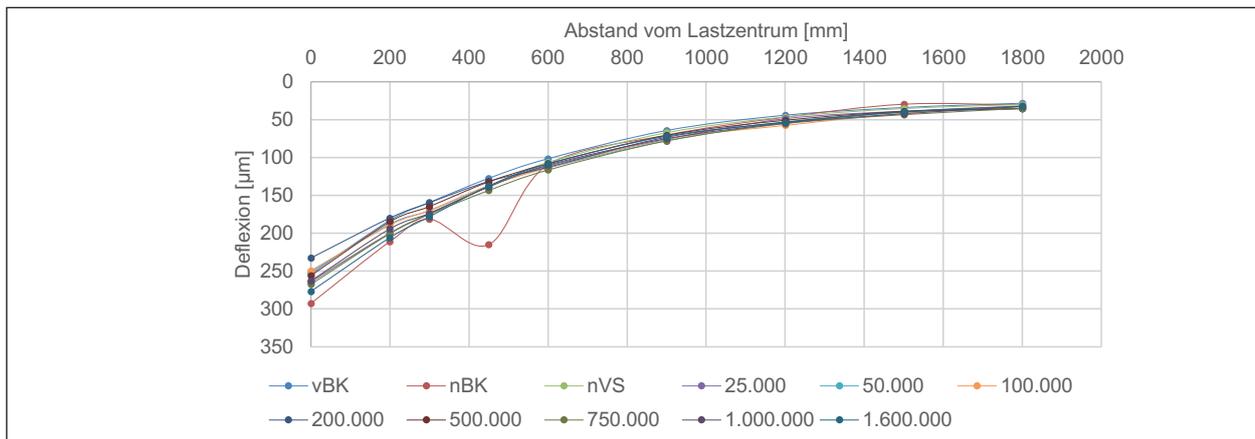
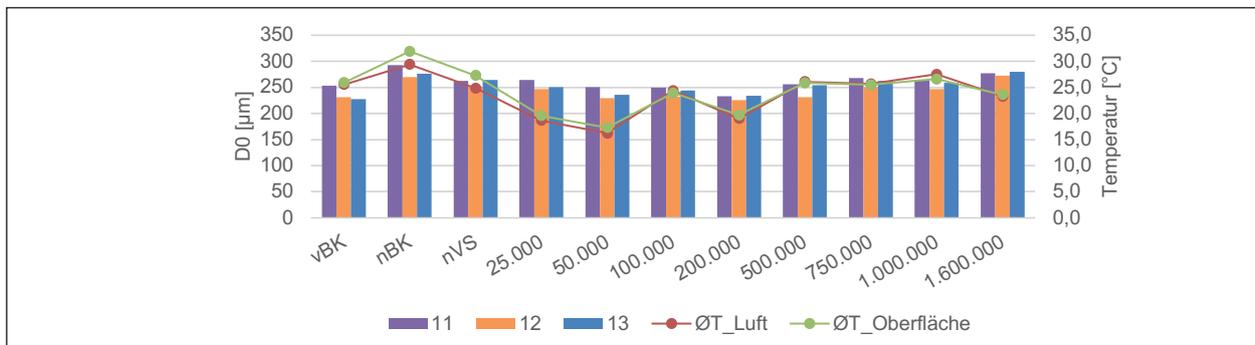


Bild 4-18: Deflexionsmulde in Messpunkt 11 für die Messreihen 1 bis 11

Bild 4-19: D₀, Luft- und Oberflächentemperatur an den Messpunkten 11, 12 und 13 für die Messreihen 1 bis 11

onsmulden zu den verschiedenen Messzeitpunkten für den Messpunkt 8. Die Ergebnisse der Messreihe 2 (nBK), welche nach der Bohrkernentnahme durchgeführt wurde, weichen nach oben hin stark von denen der anderen Messreihen ab. Ursache hierfür könnten die hohen Luft- und Oberflächentemperaturen während der Messreihe 2 sein. Der gleiche Ausschlag lässt sich am zweiten Referenzpunkt (Messpunkt 7) beobachten, jedoch nicht am dritten Referenzpunkt (Messpunkt 9). Dies wird in Bild 4-17 veranschaulicht, welches die D₀-Werte an den Messpunkten 7, 8 und 9 sowie die mittleren Luft- und Oberflächentemperaturen der jeweiligen Messzeitpunkte aufzeigt.

Für den Messpunkt 11, welcher sich innerhalb der Rollspur befindet, ist die Deflexionsmulde in Bild 4-18 abgebildet. Die Deflexion an der Position 450 mm weicht ab, weil sich das Geophon an dieser Stelle während der Messreihe 2 (nBK) über einer nicht verschlossenen Bohrkernentnahmestelle befand. Diese Fehlstelle ist bei den durchgeführten Messreihen nach Verschließen der Bohrkernentnahmestelle nicht mehr vorhanden. Die Analyse der Messreihe 2 mit den weiteren Messreihen gestaltet sich schwierig, da nicht unterschieden werden kann, welchen Einfluss die hohen Luft- und Oberflächentemperaturen und welchen die offenen Bohrkernentnahmestellen auf die Deflexionen der Fahr- bahnoberfläche haben. Verglichen mit der Messreihe 1 (vBK) fällt auf, dass die Deflexionen nach 1,6 Mio. Überrollungen (Messreihe 11) an allen Geophonpositionen höher sind. Sie liegen eng beieinander und verlaufen qualitativ sehr ähnlich.

Auch an den weiteren Messpunkten in der Rollspur ist zu erkennen, dass die D₀-Werte nach 1.600.000 Überrollungen über den vor der Bohrkernentnahme gemessenen liegen (vgl. Bild 4-19). Auffällig ist zudem, dass ein Anstieg zwischen der letzten und der vorletzten Messreihe zu verzeichnen ist, obwohl die Temperatur abnimmt. Dies ist ebenfalls an den weiteren Messpunkten innerhalb der Belastungsfläche zu beobachten. Damit zeigen diese Messungen ein gegensätzliches Verhalten zu den Referenzpunkten 7, 8 und 9, welche zum Zeitpunkt der Messreihe 11 sinken (vgl. Bild 4-17). Da nach Beendigung der Belastungsversuche versuchsbedingt (Entnahme von verfüllten Bohrkernen) keine weiteren FWD-Messungen durchgeführt wurden, kann keine Aussage zur Entwicklung dieser gegenläufigen Tendenz getroffen werden.

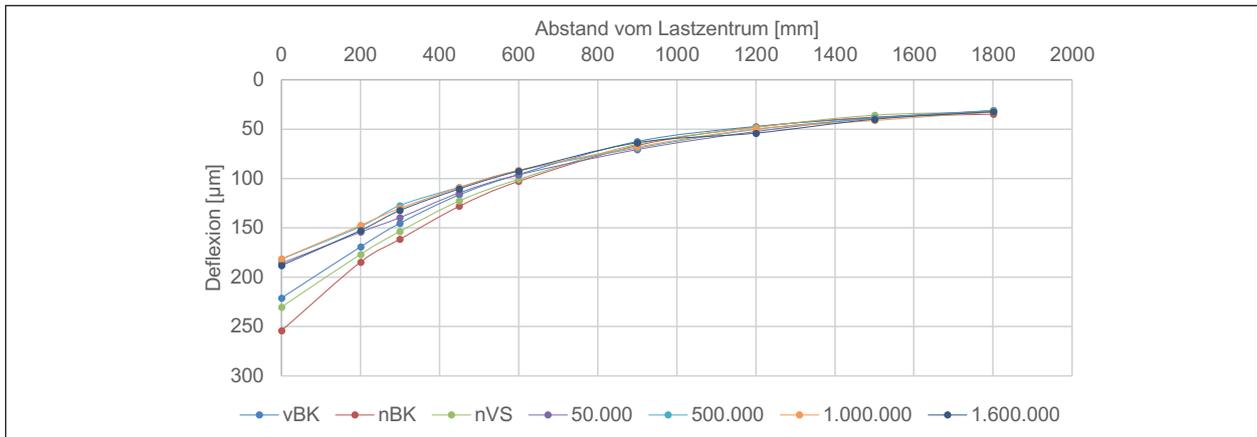


Bild 4-20: Deflexionsmulde in Messpunkt 31 für die Messreihen 1, 2, 3, 5, 8, 10, 11

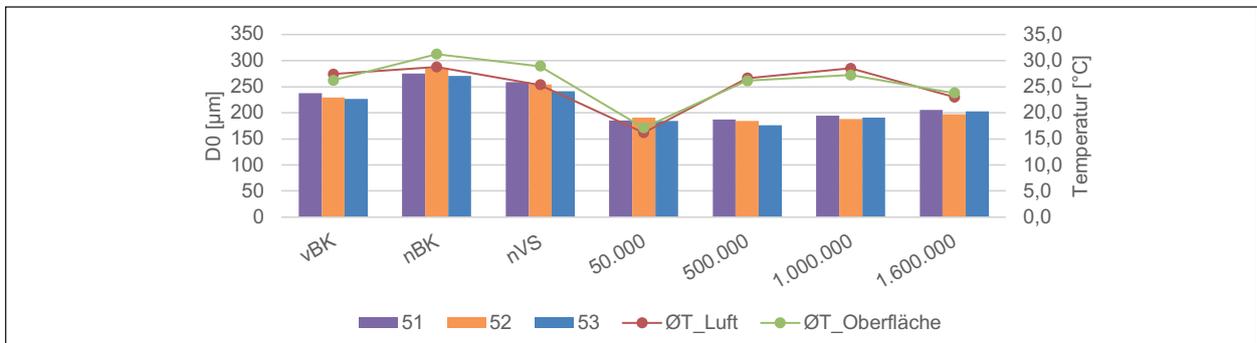
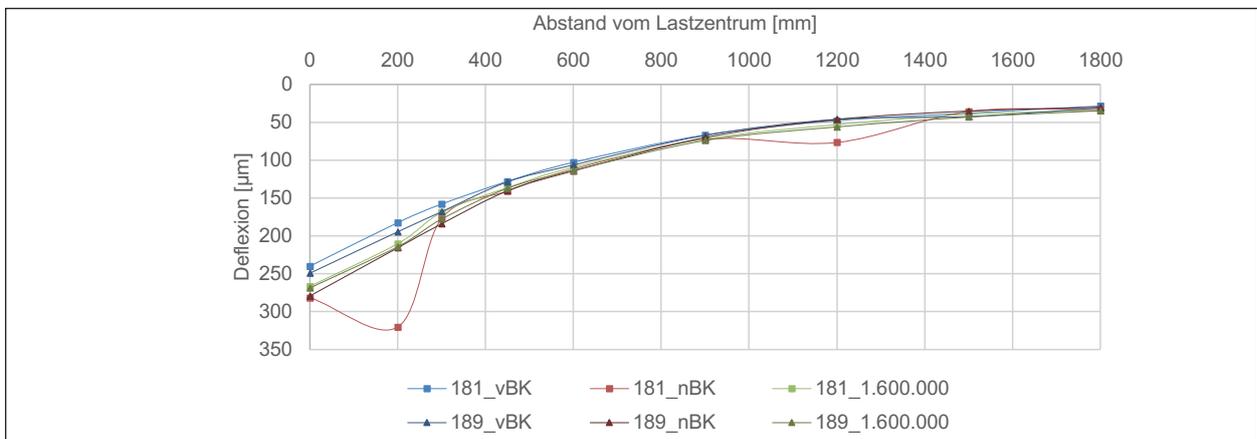
Bild 4-21: D_0 , Luft- und Oberflächentemperatur an Messpunkt 31 für die Messreihen 1, 2, 3, 5, 8, 10, 11

Bild 4-22: Deflexionsmulde in Messpunkt 181 bzw. 189 für die Messreihen 1, 2, und 11

Das Bild 4-20 stellt die Deflexionsmulde in Messpunkt 31 der unterschiedlichen Messreihen dar. Auffällig ist hier, dass die Deflexionen mit zunehmender Zahl an Überrollungen tendenziell abnehmen. Der gleiche Verlauf lässt sich auch an den weiteren Messpunkten am Rande der Rollspur (32, 33, 51, 52, 53) feststellen. Exemplarisch ist diese Entwicklung für die Messpunkte 51, 52 und 53 in Bild 4-21 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Deflexionen im Lastzentrum nach den Belastungen niedriger sind als vor der Bohrkernentnahme (Messreihe 1).

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, wurden vier Messpunkte (189, 199, 219, 439) entgegen der Belastungsrichtung gemessen. Exemplarisch werden nachfolgend die Messpunkte 189 (neben einem Verschluss aus emulsionsgebundenem Kaltmischgut) und 199 (neben einem Verschluss aus Heißmischgut) innerhalb der Rollspur genauer betrachtet. Bild 4-5 zeigt, dass die Messpunkte 181 und 189 sowie 191 und 199 dasselbe Lastzentrum besitzen. Lediglich die Ausrichtung des FWD ist unterschiedlich: Messpunkte 181 und 191 wurden in und Messpunkte 189 und 199 entgegen der Belastungs-

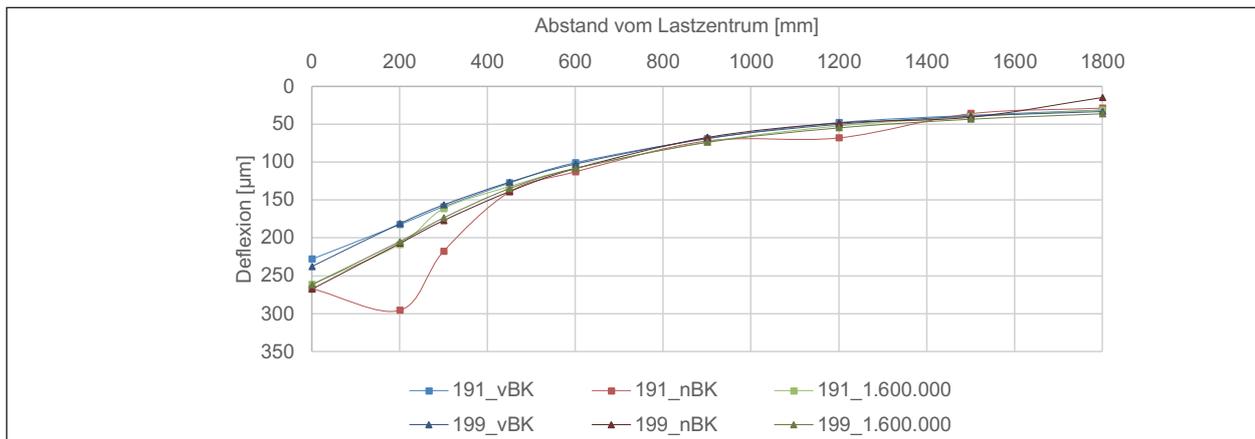


Bild 4-23: Deflexionsmulde in Messpunkt 191 bzw. 199 für die Messreihen 1, 2, und 11



Bild 4-24: Entnommene Bohrkernscheibe an Position H1 (KMG)

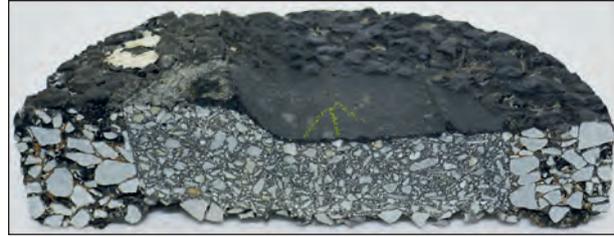


Bild 4-25: Entnommene Bohrkernscheibe an Position L5 (HMG)

richtung gemessen. Sowohl die Deflexionsmulden in Messpunkt 181 bzw. 189 (Bild 4-22) als auch in Messpunkt 191 bzw. 199 (Bild 4-23) stellen einen ähnlichen Verlauf dar und zeigen die gute Wiederholbarkeit der FWD-Messungen im Lastzentrum. Die D0-Werte zu den Messreihen nach Bohrkernverschluss und nach 1.600.000 Überrollungen sind an beiden Positionen nahezu deckungsgleich.

Im Anschluss an die Belastungsversuche mit dem MLS30 wurde eine Auswahl von Verschlussvarianten auf dem Versuchsfeld mittels einer Bohrkronen (\varnothing 250 mm) entnommen. Die Bohrkernscheiben, an denen sich das Deckschichtmaterial bereits beim Ausbau von den darunter liegenden Schichten getrennt hat, wurden im Labor senkrecht zur Belastungsrichtung zersägt, um den Verbund zwischen Deckschichtersatzmaterial und der umgebenden Originalkonstruktion zu untersuchen. Die Ergebnisse sind exemplarisch in den nachfolgenden Bildern zu sehen und zeigen gute Ergebnisse für den Verbund bei der Variante aus KMG (siehe Bild 4-24) und aus HMG (siehe Bild 4-25). Die guten Ergebnisse für den Verbund sind möglicherweise durch das Eindringen der Asphalte in den umgebenden offenporigen Belag begünstigt worden.

Die kontinuierliche Fotodokumentation sowie die Querebenenprofile aller Positionen und Auswer-

tungen zu den FWD-Messungen sind als Anhang angefügt.

Zusammenfassend kann ein positives Fazit der Belastungsversuche mit dem MLS30 auf dem duraBAST gezogen werden. Die Verschlüsse beider Varianten haben die hohen Beanspruchungen von 1,6 Mio. Überrollungen in neun Wochen bei hohen Lufttemperaturen überstanden. Es kam zu keinen Ausbrüchen oder Totalversagen der Deckschichtersatzmaterialien. In der Rollspur haben sowohl das HMG als auch das KMG gut abgeschnitten. Die Setzungen fanden annähernd höhengleich mit der umgebenden Originalkonstruktion statt. Lediglich die Profilabdrücke des Super-Single Reifens an der Oberfläche der Verschlussvariante aus HMG fallen negativ ins Gewicht, sind allerdings durch die spurtreue Belastung bei extremen Randbedingungen zu erklären. Am Rand der Rollspur liefert das HMG bessere Ergebnisse als das KMG. Im überrollten Bereich findet auch hier bei beiden Verschlussvarianten eine höhengleiche Setzung wie bei der umgebenden Originalkonstruktion statt. Außerhalb des überrollten Bereichs sind insbesondere bei der Verschlussvariante aus KMG starke Verdrückungen festzustellen. Die Ergebnisse der FWD-Messungen lassen auf keine direkte Beeinflussung der verschlossenen Bohrkernentnahmestellen auf die Tragfähigkeit der umgebenden Straßenkonstruktion schließen.

5 Dokumentation von Bohrkernentnahmestellen

Mit der Entnahme von Bohrkernen aus Straßenbefestigungen sowie der Prüfung der daraus gewonnenen Proben lassen sich eine Vielzahl von Informationen gewinnen. Damit diese Informationen dauerhaft und nachhaltig genutzt werden können, ist die Entwicklung eines technisch innovativen Dokumentationskonzeptes nötig. Hierzu wurde vom Auftraggeber eine Sensorlösung zur dauerhaften Speicherung und Bereitstellung der Daten vorgeschlagen, die bereits in einem Verbundforschungsvorhaben PAST (Prozesssicherer Automatisierter Straßenbau) [17] angewendet wurde. Im PAST-Projekt wurden RFID-Temperatur Sensoren zur Überwachung der Asphalttemperatur eingesetzt.

Die RFID-Technologie bietet die Möglichkeit einer berührungslosen Datenübermittlung zwischen einem Speichermedium (RFID-Transponder) und einem Lesegerät. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist, dass das passive Speichermedium keine eigene Stromversorgung benötigt. Somit ist es möglich, dass ein Speichermedium dauerhaft in den Verschluss einer Bohrkernentnahmestelle eingearbeitet werden kann und über die Nutzungsdauer der Straßenbefestigung zur Verfügung steht. Damit stehen auch die auf dem Speichermedium gespeicherten Daten über die Nutzungsdauer der Straßenbefestigung zur Verfügung.

Der folgende Teil widmet sich der Entwicklung eines technischen Verfahrens zur nachhaltigen Dokumentation von Bohrkernentnahmestellen auf Basis der RFID-Technologie. Hierbei werden sowohl die theoretischen Aspekte, wie die zu erfassenden und zu speichernden Informationen sowie die Datenverarbeitung, als auch die technischen Anforderungen und die Machbarkeit untersucht. Dazu wurden verschiedenen RFID-Transponder hinsichtlich verschiedener Kriterien vorausgewählt und einer labortechnischen Evaluierung hinsichtlich der zu erwartenden Beanspruchungen beim Einbau des Transponders in den Verschluss unterzogen. Des Weiteren wurde ein Dokumentationskonzept inklusive einer grafischen Bereitstellung der Daten erarbeitet.

5.1 Vorbereitung und Vorauswahl RFID-Transponder

Damit die RFID-Technologie erfolgreich zur Dokumentation von Bohrkernentnahmestellen eingesetzt werden kann, müssen verschiedene theoretische Fragestellungen, die die Anforderungen an die Transponder definieren, beantwortet werden.

Dazu zählen insbesondere Überlegungen hinsichtlich der Datenmenge, die erfasst bzw. gespeichert werden soll. Das Mindestmaß der Datenmenge sollte sich hierbei an den „Mindestangaben in der Niederschrift zur Probenahme“ orientieren, welche in den TP AsphaltStB Teil 27 (Tabelle 1) [1] definiert sind.

Die Mindestangaben enthalten u. a. allgemeine Informationen zur Baumaßnahme (z. B. Auftraggeber, Auftragnehmer, Asphaltmischwerk, usw.), Informationen über die Ausbauprobe (z. B. Anzahl der Proben, Soll-Schichtenaufbau, Asphaltmischgutart/ -sorte, usw.), Angaben zum Untersuchungsauftrag (Zweck der Probenahme, beauftragte Prüfstelle, ggf. Angaben zur Erstprüfung, usw.). Die Datenmenge die sich aus den Mindestangaben ergibt, ist aus technischer Sicht überschaubar und benötigt somit nicht viel Speicherplatz.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Lese- / Schreibreichweite des Transponders. Die Reichweite ist im Wesentlichen abhängig von der Ausrichtung und Größe der Antenne und somit auch von der Bauweise des Transponders (Abmessungen, ggf. Schutzhülle). Als zweiter Faktor, der die Reichweite wesentlich beeinflusst, ist die Einbautiefe in den Entnahmestellenverschluss zu berücksichtigen.

Die Form und Größe des Transponders soll so beschaffen sein, dass der Transponder zum Einen kein Störkörper im Verschluss der Bohrkernentnahmestelle darstellt und zum Anderen eine Stabilität aufweist, die den Beanspruchungen, die beim Einbau auf den Transponder einwirken, standhält. Zu den Beanspruchungen während des Einbaus zählen die indirekte Schlagbeanspruchung beim Verdichten und eine ggf. thermische Beanspruchung je nach Einbautiefe bei der Verwendung von Heißasphalt als Deckschichtersatzmaterial.

Anhand dieser Überlegungen wurden drei verschiedene Transponder vorausgewählt (siehe Bild 5-1). Für alle ausgewählten Transponder besteht ein Lese- und Schreibzugriff mit einem entspre-

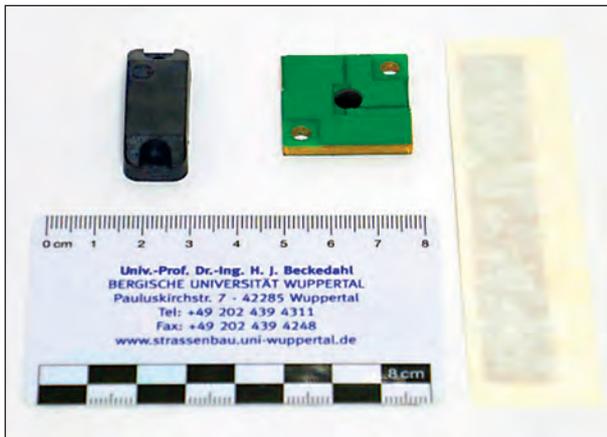


Bild 5-1: Vorausgewählte RFID-Transponder (Typ 1 links, Typ 2 Mitte, Typ 3 rechts)

	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Gesamtspeicher [Byte]	112	138	138
Arbeitsfrequenz [MHz]	860...960 (UHF)	865...868 (UHF)	865...868 (UHF)
Gehäuseform	quaderförmig	quaderförmig	Etikett
Abmessungen (L/B/H) [mm]	36 / 13 / 7	28 / 28 / 3	110 / 50
Funktionstemperatur [°C]	-40 bis +85	-40 bis +85	-40 bis +70
Speichertemperatur [°C]	k.A.	bis 220 °C / 1x10h	bis 200 °C

Tab. 5-1: Eigenschaften der vorausgewählten RFID-Transponder

chenden RFID-Handcomputer, sodass Daten auf den Transpondern jederzeit verändert bzw. ergänzt werden können. Alle Transponder haben eine ähnliche Größe des Datenspeichers (112 bis 138 Byte) auf dem die Informationen die sich aus den Mindestangaben ergeben, mit einem entsprechenden Datenformat gespeichert werden können. Als Arbeitsfrequenz wurde der UHF-Bereich (Ultra-High-Frequency-Bereich) zwischen 860 und 960 MHz (Europa-Standard) gewählt. Der UHF-Bereich bietet eine theoretische Lese- und Schreibreichweite von bis zu 10m, je nach Bauart der Antenne / des Transponders und evtl. Hindernissen zwischen Transponder und RFID-Handcomputer. Die angestrebte Reichweite der Transponder sollte ausreichend sein, um einen Zugriff auf den Transponder aus dem Stand zu ermöglichen (RFID-Handcomputer ca. einen Meter über Oberkante Straßenbefestigung).

Bezüglich der Form und Größe des Transponders wurde nach ersten Überlegungen eine kleine kubische Form bevorzugt. Hierbei stellte sich allerdings heraus, dass bei dieser Form keine brauchbare Reichweite erzielt werden konnte. Daher wur-



Bild 5-2: RFID-Handcomputer mit Dipolantenne

den quaderförmige Transponder mit rechteckiger und quadratischer Grundfläche sowie ein Transponder in Etikettenform gewählt.

Bei den Transpondern werden im Allgemeinen eine Funktionstemperatur (betrifft Lese- und Schreibvorgänge) und eine Speichertemperatur angegeben. Die Speichertemperatur gibt an, bis zu welcher Temperatur bei einer bestimmten Einwirkungsdauer kein Datenverlust auftritt. Für Verschlüsse von Bohrkernentnahmestellen mit Heißmischgut sollte die Speichertemperatur mindestens 200 °C betragen. Der Funktionstemperaturbereich der ausgewählten Transponder liegt zwischen -40 °C und +85 °C, die Speichertemperatur bei bis zu 220 °C (siehe Tabelle 5-1).

Zur Prüfung der Funktionalität der RFID-Transponder wurde ein RFID-Handcomputer eingesetzt. Das Gerät verfügt über eine leistungsstarke Dipolantenne und ermöglicht das Auslesen und Beschreiben von RFID-Transpondern im HF- und UHF-Frequenzbereich (siehe Bild 5-2). Durch die Dipolantenne können maximale Lese- und Schreibreichweiten in Abhängigkeit von Transponderantenne und Einbautiefe erzielt werden. Des Weiteren verfügt das Gerät über ein GPS-Modul mit dem eine Georeferenzierung der Bohrkernentnahmestelle vorgenommen werden kann.

Zur Erzielung einer möglichst großen Akzeptanz in den Straßenbauverwaltungen ist das gesamte Dokumentationskonzept so gestaltet, dass es den üblichen Ablauf der Probenahme nicht verändert und wenig Kosten verursacht. Da es sich bei RFID-Transpondern um Massenartikel handelt, die überwiegend im Ausland produziert und in Deutschland nur von Zwischenhändlern vertrieben werden, stellte die Beschaffung von einzelnen Mustern bzw. klei-

nen Stückzahlen für die Versuche eine besondere Herausforderung dar. Da der Stückpreis von RFID-Transpondern von der Ausstattung (z. B. Schutzklasse, Antenne) und bestellter Stückzahl abhängig ist, können im Rahmen dieses Projektes keine verlässlichen Aussagen bezüglich des Stückpreises getroffen werden. Es ist aber davon auszugehen, dass sich die Stückpreise für das hier entwickelte Dokumentationskonzept im Bereich von einstelligen Eurobeträgen veranschlagen lassen.

5.2 Technische Evaluation der vorausgewählten RFID-Transponder

Zur Gewährleistung der Funktionalität nach dem Einbau in die Bohrkernentnahmestelle fand eine Eignungsprüfung der Transponder im Laboratorium statt. Mit dieser labortechnischen Evaluation wurden die wesentlichen Anforderungen an die Transponder beurteilt, die sich aus den zu erwartenden Beanspruchungen (Verdichtungsenergie, Hitzebeanspruchung) während des Einbaus ergeben. Die Prüfungen umfassten den Widerstand gegen Schlag- und Wärmebeanspruchung sowie die Lesereichweite.

Zur möglichst realistischen Nachbildung der Schlag- und Wärmebeanspruchung wurden die RFID-Transponder mittig in einen Marshall-Probekörper eingebaut. Die Verdichtung erfolgte wie üblich mit 50 Schlägen pro Seite mittels Marshall-Verdichtungsgerät, die Verdichtungstemperatur des Mischgutes betrug dabei 140 °C. Wie zu erwarten war, konnte aufgrund der hohen Temperaturen kein Transpondertyp unmittelbar nach dem Einbau in das heiße Mischgut ausgelesen werden. Nach dem Abkühlen der Marshall-Probekörper konnten bei allen Transpondertypen die auf den Transpondern gespeicherten Daten mit dem RFID-Handcomputer ausgelesen werden.

Damit konnte für alle drei Transpondertypen eine erste Eignung gegenüber der indirekten Schlag- und der Wärmebeanspruchung labortechnisch evaluiert werden.

Da in diesem Forschungsprojekt als Deckschichtersatzmaterial u. a. ein Gussasphalt eingesetzt wurde, musste in einem zweiten Versuch die Wärmebeständigkeit der Transponder bei Temperaturen bis 200 °C geprüft werden. Dazu wurden nochmals alle Transpondertypen in jeweils einen zylindrischen Gussasphaltprobekörper eingebaut. Hier-



Bild 5-3: RFID-Transponder nach dem Ausbau aus den Marshall-Probekörpern (Typ 1 links, Typ 2 Mitte, Typ 3 rechts)

bei zeigte sich das gleiche Ergebnis wie beim Einbau in die Marshall-Probekörper, unmittelbar nach dem Einbau konnte keiner der Transpondertypen ausgelesen werden. Während der Abkühlphase, nachdem die Oberflächentemperatur des Probekörpers auf unter 100 °C gesunken ist, konnte auch hierbei festgestellt werden, dass alle Transpondertypen der höheren Wärmebeanspruchung (200 °C) widerstanden haben. Die auf den RFID-Transpondern gespeicherten Daten konnten problemlos ausgelesen werden.

Zur Untersuchung, ob und in welchem Umfang Beschädigungen an den Transpondern durch den Einbau in einen Marshall-Probekörper aufgetreten sind, wurden die Marshall-Probekörper erwärmt und die RFID-Transponder freigelegt bzw. ausgebaut. Bild 5-3 zeigt die ausgebauten RFID-Transponder nach einer Reinigung von Bindemittelresten. Bis auf kleinere oberflächliche Beschädigungen am Gehäuse (Typ 1) sind keine gravierenden Mängel aufgetreten. Die Lesbarkeit der Transponder war auch nach dem Ausbau und der Reinigung weiterhin gegeben.

Da die Lesereichweite der RFID-Transponder u.a. davon abhängig ist, wie viel Störmaterial sich zwischen dem Transponder und dem Handcomputer befindet, wurden die Transponder hinsichtlich der eingeschränkten Lesereichweite einer labortechnischen Evaluation unterzogen.

Die Prüfung erfolgte mithilfe der Probekörper mit Bohrkernentnahmestelle für den Dauerhaftigkeitsversuch. Hierzu wurden in verschiedenen Tiefen (40 mm, 140 mm und 280 mm von OK Asphalt) Transponder in verschiedene Prüfkörper eingebaut und anschließend Leseversuche durchgeführt. Als



Bild 5-4: RFID-Transponder in Bohrkernentnahmestellen vor dem Verschließen
(links: Typ 2 bei 300 mm unter OK Asphalt; rechts: Typ 3 bei 150 mm unter OK Asphalt)

Störmaterialien wurden hierbei Gesteinskörnung 8/11 bis 40 mm unter OK Asphalt und eine Bohrkernscheibe aus SMA 11 S mit einer Höhe von 40 mm verwendet.

Nach dem so erfolgten losen Verschluss des Bohrloches wurden Leseversuche im Abstand von mindestens einem Meter über OK Asphaltdeckschicht durchgeführt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass alle Transponder trotz der Störfaktoren (Gesteinskörnung / Asphalt) lesbar waren.

Zur Verifizierung der Laborergebnisse wurde die Prüfung mit zwei Transpondertypen (Typ 2 und Typ 3) bei einer realen Baumaßnahme durchgeführt. Bei der Baumaßnahme im Stadtgebiet Wuppertal sollten Schürfen bis 500 mm unter OK Asphalt hergestellt und Proben entnommen werden. Der Asphaltaufruch erfolgte dabei als Bohrkernentnahme mit einem Durchmesser von 300 mm. Beim Verfüllen der Schürfe wurden in Tiefen von 300 mm, 150 mm und 40 mm unter OK Asphalt RFID-Transponder eingebaut. Der abschließende Verschluss erfolgte mit einer Gesteinskörnung 8/11 bis 40 mm unter OK Asphalt und emulsionsgebundenem Kaltasphalt als Deckschichtersatz in Höhe von 40 mm (siehe Bild 5-4).

Bei diesen In-situ-Versuchen konnte festgestellt werden, dass alle sechs Transponder unmittelbar nach dem Einbau lesbar waren. Bei weiteren Leseversuchen ca. zwei Monate und zwölf Monate nach dem Einbau konnte der Transponder vom Typ 3 in der Tiefe 300 mm unter OK Asphalt nicht gelesen werden. Bei allen anderen Transponder konnten die Leserversuche erfolgreich abgeschlossen werden.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die hier ausgewählten Transponder bis zu einer Einbautiefe von 15 cm problemlos einsetzbar sind. Daher wird im Folgenden eine Einbautiefe der Transponder im oberen Bereich der Asphalttragschicht empfohlen. Dabei bleibt der Transponder während des gesamten Nutzungszeitraums des asphaltgebundenen Oberbaus im Verschluss erhalten.

5.3 Dokumentationskonzept für Bohrkernentnahmestellen

Nachdem die technische Evaluierung des Einsatzes von RFID-Transpondern in Bohrkernentnahmestellen erfolgreich abgeschlossen wurde, musste ein Datenverarbeitungs- bzw. Datensicherungskonzept entwickelt werden.

Hierzu war es erforderlich einen Datenkatalog festzulegen, der die relevanten bzw. zu erfassenden Daten definiert. Als Grundlage für diesen Datenkatalog dienen die TP AsphaltStB Teil 27 [1] in der die „Mindestangaben in der Niederschrift zur Probenahme“ festgelegt sind. Anhand dieser Mindestangaben wurde ein Mindestdatensatz definiert der zusätzlich noch eine Transponder-Identifikation sowie die GPS-Verortung der Entnahmestelle mittels Breiten- und Längengrad enthält.

Die GPS-Verortung soll dabei automatisch während der Datenübertragung auf den Transponder (Schreibvorgang) erfolgen. Hierzu ist ein entsprechender RFID-Handcomputer mit GPS-Modul erforderlich. Zusätzlich zur GPS-Verortung soll der Datensatz weitere Lageinformationen wie z. B. einen Netzknotenbezug oder einen einfachen Bezug zu Straßenname und Hausnummer ermöglichen.

Der Mindestdatensatz enthält Angaben zur Probenahme (Prüfinstitut, Prüfer) und Angaben zum Untersuchungsauftrag, wie z. B. das Entnahmedatum und den Zweck der Probenahme. Des Weiteren enthalten die Mindestdaten allgemeine Informationen zur Bauausführung (z. B. Baumaßnahme, Auftraggeber, Baufirma und Asphaltmischwerk) und Informationen zur entnommenen Probe (Probenbezeichnung, ggf. Anzahl der Proben, usw.). Der vollständige Mindestdatensatz ist im Anhang abgebildet.

Ursprünglich war vorgesehen, alle Informationen vor Ort auf einem Transponder zu speichern. Mit der Ausarbeitung dieses Mindestdatensatzes wurde jedoch ersichtlich, dass der Datenumfang so erheblich ist, dass eine Erfassung bzw. Eingabe vor Ort an der Entnahmestelle aus zeitliche Gründen nicht praktikabel ist. Zudem besteht die Gefahr einer möglichen erhöhten Fehleranfälligkeit bei der Vororteingabe.

Zur Reduzierung des zeitlichen Aufwandes der Dateneingabe an der Entnahmestelle und zur Vermeidung von Fehlern bei der Vororteingabe sollte der zeitliche Aufwand und die einzugebende Datenmenge stark reduziert werden. Daher wurden die Daten hinsichtlich der Notwendigkeit einer Vororteintragung charakterisiert und in Gruppen eingeteilt.

Es konnte festgestellt werden, dass einige Daten innerhalb eines Untersuchungsauftrages als konstant angesehen werden können. Diese Daten sind für den jeweiligen Untersuchungsauftrag spezifisch und wiederholen sich daher an jeder Entnahmestelle. Dazu zählen z. B. der Auftraggeber, die Baumaßnahme, die Baufirma usw. Eine weitere Eigenschaft dieser Konstanten ist, dass Sie in der Regel bereits vor der Bohrkernentnahme bekannt sind (Grundlage der Auftragsplanung) und somit bereits vor der Entnahme in einen Datensatz eingearbeitet werden können.

Eine zweite Datengruppe ist als variabel innerhalb eines Untersuchungsauftrages definiert, sie sind somit nicht vor der Bohrkernentnahme bekannt und müssen vor Ort in den Datensatz übernommen werden. Hierbei handelt es sich um Daten, wie z. B. die Probenbezeichnung, die Anzahl der Proben oder die Daten der Verortung.

Diese Überlegungen führten dazu, dass für das Dokumentationskonzept eine Datenbanklösung vorgeschlagen wird, die mit der entsprechenden

technischen Ausrüstung ein Auslesen des Mindestdatensatzes vor Ort und ggf. das Auslesen eines erweiterten Datensatzes per drahtloser Datenverbindung (z. B. Mobilfunkstandard GSM) von einem Datenserver ermöglicht.

Für diese Anwendung ist eine spezielle Softwarelösung erforderlich, deren Programmierung nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes ist.

Die Software ermöglicht einem Sachbearbeiter das Anlegen eines Projektes; dieses Projekt basiert auf dem Untersuchungsauftrag und enthält dementsprechend alle hierzu erforderliche Daten (siehe Mindestdatensatz). Nach dem Anlegen ist es dem Sachbearbeiter möglich, konstante Daten des Untersuchungsauftrages einzugeben. Des Weiteren kann der Sachbearbeiter Dokumente (z. B. Erstprüfungen der Asphalte) mit dem Projekt verknüpfen bzw. in der Datenbank speichern.

Die Projektdatei wird nach Fertigstellung auf den Handcomputer übertragen. Die Übertragung kann per Anschluss an den Computer oder per Datenverbindung / Netzwerk von einem Datenserver erfolgen. Bei einer großflächigen Anwendung (z. B. Bundesgebiet) mit mehreren Baulastträgern und Prüfinstituten als Anwender ist ein zentraler Datenserver zu empfehlen.

Nach der Bohrkernentnahme wird der Transponder in den Entnahmestellenverschluss eingearbeitet. Hierbei sollte die Einbautiefe im oberen Bereich der Asphalttragschicht liegen. Der Baustoffprüfer vor Ort kann dann innerhalb des Projektes eine neue Entnahmestelle anlegen. Für diese Entnahmestelle werden nun die konstanten Daten (spezifische Untersuchungsdaten) als Standard übernommen, der Baustoffprüfer kann diese bestätigen oder ändern, falls Änderungen erforderlich sind. Danach ergänzt der Baustoffprüfer den Datensatz um die variablen Daten (spezifische Entnahmedaten). Zu diesen Daten gehören insbesondere die Probenbezeichnung, die Anzahl der Proben, Informationen zu Schichtenverbund und ggf. weitere Angaben zur Verortung. Die variablen Daten wie z. B. Wetter bei der Probenahme und Name, Vorname des Baustoffprüfers sollten bei der ersten Entnahmestelle eingetragen und für die folgenden Entnahmestellen als Standard übernommen werden (lokale Ergänzung der konstanten Daten). Das Entnahmedatum soll beim Anlegen der Entnahmestelle vom System übernommen werden.

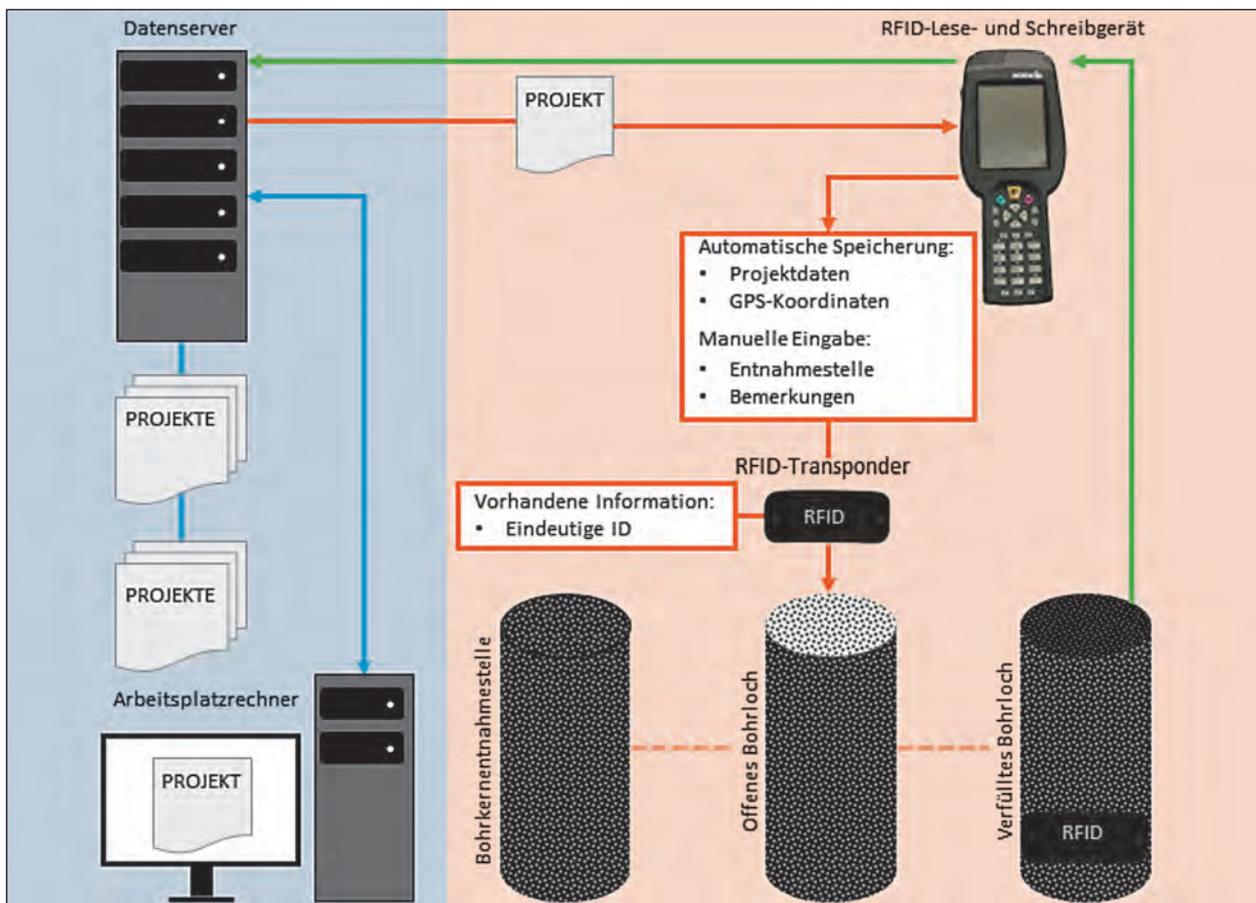


Bild 5-5: Schema des Dokumentationskonzepts

Nachdem die variablen Daten im Datensatz ergänzt wurden, müssen alle Daten auf den Transponder übertragen bzw. gespeichert werden. Dieser Übertragungs- bzw. Speichervorgang beinhaltet dabei das Abrufen / Messen der GPS-Koordinaten (da sich das Gerät zu diesem Zeitpunkt unmittelbar über dem Bohrloch befindet) und die Generierung der SID des Transponders. Die GPS-Koordinaten und die SID werden automatisch im Datensatz gespeichert. Im Anschluss erfolgt die Übertragung bzw. Speicherung des Mindestdatensatzes auf dem Transponder. Ggf. kann der nun vollständige Datensatz per GSM automatisch an einen Datenserver übertragen werden. Ist die automatische Übertragung per GSM nicht erwünscht oder steht kein Signal für eine Datenverbindung zur Verfügung, muss der vollständige Datensatz später im Prüfinstitut auf den Datenserver übertragen werden.

Bei einer späteren Besichtigung der Entnahmestelle können die auf dem Transponder gespeicherten Mindestdaten mit einem entsprechenden RFID-Lesegerät gelesen werden. Dieses Dokumentationskonzept sieht zudem vor, dass über die SID ein Zugang zur Datenbank per GSM ermöglicht wird. Da-

mit stehen dann Vorort an der Entnahmestelle weitere Informationen zur Verfügung (z. B. Erstprüfung oder die Ergebnisse der Kontrollprüfung).

Das erarbeitete Dokumentationskonzept ist im Schema in Bild 5-5 dargestellt.

Mit dem Dokumentationskonzept als Datenbanklösung steht eine dauerhafte und nachhaltige Dokumentation von Bohrkernentnahmestellen zur Verfügung. Durch die Lage des Transponders im oberen Drittel der Asphalttragschicht steht dieser auch im Falle einer Deckenerneuerung noch zur Verfügung und kann somit noch nach Jahrzehnten Aufschlüsse über den Altbestand geben. Das Auffinden wird dabei über die GPS-Koordinate ermöglicht, selbst wenn keine Entnahmestelle mehr durch die Asphaltdeckenerneuerung zu sehen ist. Im Falle einer Erneuerung der gesamten Fahrbahn entfällt der Nutzen des Transponders und dieser wird dann mit ausgebaut.

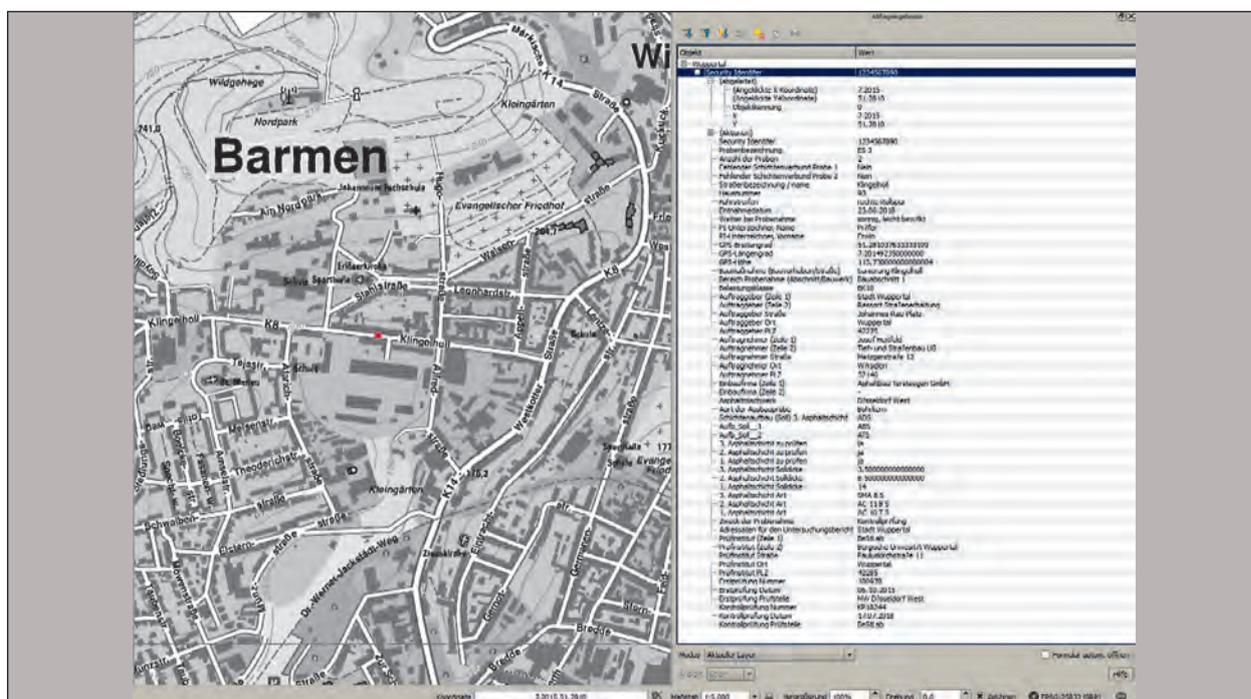


Bild 5-6: GIS-Oberfläche mit Kartenfenster (links) und Abfrageergebnis (rechts) [27]



Bild 5-7: Darstellung von Bohrkernentnahmestellen auf einer Karte (Kartengrundlage DTK10) als Export aus dem GIS-System [27]

5.4 Grafische Datenbereitstellung mittels Georeferenzierung

Mithilfe der im Datensatz gespeicherten GPS-Koordinate erfolgt unter Verwendung eines Geoinformationssystems (GIS), das als Teilmodul in der Software zur Verfügung stehen soll, die grafische Darstellung der Entnahmestelle auf einer digitalen Ortskarte. Damit steht eine georeferenzierte Verknüpfung der in einem Datenbankformat abgespeicherten Informationen zur Probenahme mit einer Ortskarte, wie etwa der Digitalen Topographischen Karte im Maßstab 1:10000 (DTK10) [26] zur Verfügung. Neben der grafischen Darstellung sind durch die Verknüpfung zur Datenbank im Geoinformationssystem die abgespeicherten Informationen der Probenahme und ggf. weiterer Prüfungen hinterlegt und können unmittelbar durch die Auswahl einer Entnahmestelle abgefragt bzw. eingesehen werden (siehe Bild 5-6).

Innerhalb des GIS kann die Datenbank als Vektordatei mit dem Geometrietyp „Punkt“ eingefügt werden. Anhand der in Dezimalgrad abgespeicherten GPS-Koordinaten wird zu jeder SID-Nummer (Bohrkernentnahmestelle) ein georeferenzierter Punkt erzeugt, welcher auf der DTK10 [26] dargestellt wird (siehe Bild 5-7).

6 In-situ-Beobachtungen

Zusätzlich zu der labortechnischen Evaluation von Verschlussvarianten wurden Feldversuche auf Straßen im Stadtgebiet von Wuppertal durchgeführt. Verschiedene Verschlussvarianten wurden an unterschiedlichen Stellen eingebaut und über einen Zeitraum von ca. einem Jahr während der Projektlaufzeit kontinuierlich beobachtet und dokumentiert.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde diese Fotodokumentation als Qualitätskontrolle der Bohrkernverschlüsse durchgeführt. Weitere Maßnahmen zur Qualitätskontrolle wurden nicht untersucht. Abschließend konnte keine Lösung erarbeitet werden, welche sich hinsichtlich der Durchführbarkeit, des Zeitaufwands, des Geräteeinsatzes sowie der Arbeits- und Verkehrssicherheit zur Qualitätskontrolle von Bohrkernentnahmestellen eignet.

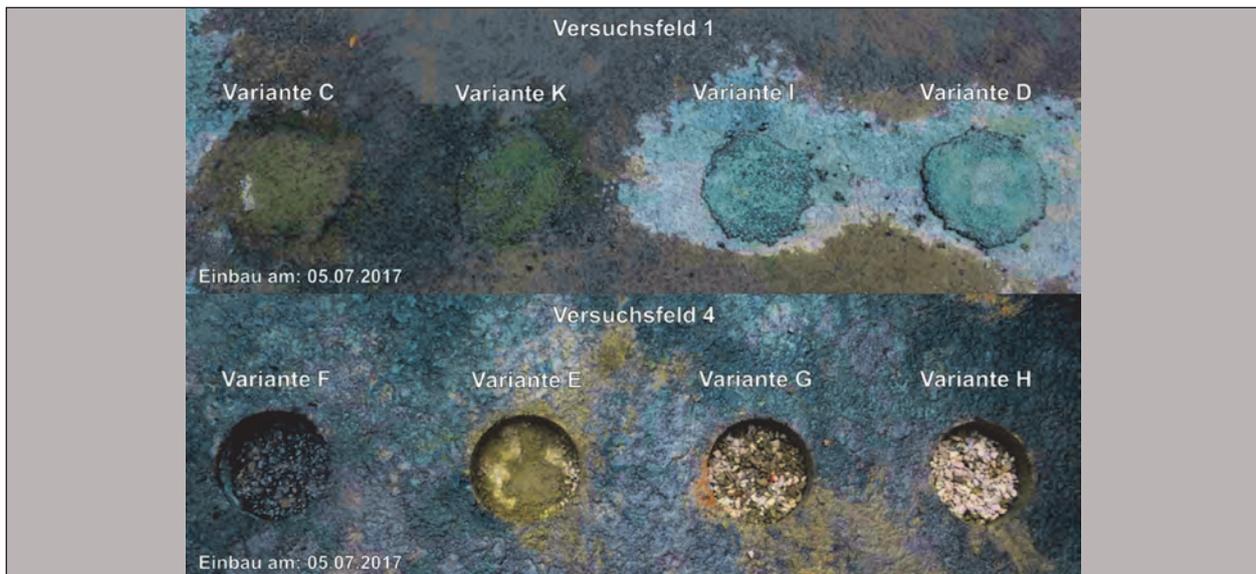


Bild 6-1: Versuchsfeld 1 (komplett verschlossen) und Versuchsfeld 4 (Unterkonstruktionen)

6.1 Verschlussvarianten

Acht Verschlussvarianten konnten am 05.07.2017 im Rahmen von Kontrollprüfungen in Wuppertal eingebaut werden. Die acht Verschlussvarianten wurden jeweils in Doppelbelegung in vier Versuchsfeldern eingebaut. Das Bild 6-1 zeigt exemplarisch zwei Versuchsfelder. Im Versuchsfeld 1 sind die Varianten C und K (Gussasphalt) und die Varianten I und D (reaktiver Kaltasphalt) bereits vollständig eingebaut. Im Versuchsfeld 4 sind noch die verschiedenen Unterkonstruktionen der Varianten F, E, G und H zu sehen.

Die Bohrkernentnahmestellen wurden kontinuierlich beobachtet, um ggf. entstehende Schädigungen und der ggf. stattfindende Fortschritt der Schädigung zu dokumentieren. Bild 6-2 und Bild 6-3 zeigen exemplarisch die Bilddokumentationen der Versuchsfelder 1 und 4. Die hier nicht abgebildeten Versuchsfelder 2 und 3 entsprechen den Versuchsfeldern 1 und 4.

Der hier dargestellte Dokumentationszeitraum vom Einbau (05.07.2017) bis zur letzten Dokumentation (06.07.2018) entspricht einem Jahr. Beide Bilddokumentationen zeigen deutlich, dass alle Bohrkernentnahmestellen keine Schädigungen aufweisen. Die vollständige Bilddokumentation ist im Anhang dargestellt.

7 Entwurf einer Verfahrensanweisung

Im folgenden Teil wurden die gewonnenen Erkenntnisse in einem Entwurf einer Verfahrensanweisung für das fachgerechte Verschließen von Bohrkernentnahmestellen zusammengefasst. Da die Ausarbeitung einer endgültigen Fassung in den Verantwortungsbereich der entsprechenden Gremien der FGSV fällt, ist dieses Kapitel mit „Entwurf einer Verfahrensanweisung“ überschrieben. Inhalt und Aufbau des Entwurfsdokumentes sind nachfolgend angefügt.

7.1 Anwendungsbereich und Zweck

Im Rahmen der Prüfungen von Bauleistungen im Straßenbau werden Bohrkernentnahmen als Ausbauprobe aus gebundenen Schichten entnommen. Die Bohrkernentnahme ist in den Technischen Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) [1] und den technischen Prüfvorschriften für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (TP Beton-StB) [2] geregelt. Im Gegensatz zur Entnahme von Bohrkernen ist das Verfüllen und Verschließen von Bohrkernentnahmestellen bislang nicht geregelt.

Dieser Entwurf einer Verfahrensanweisung beschreibt Verfahren zum fachgerechten Verschließen von Bohrkernentnahmestellen für Verkehrsflächen in Asphalt- und Betonbauweise. Jede Bohrkernentnahmestelle stellt grundsätzlich eine

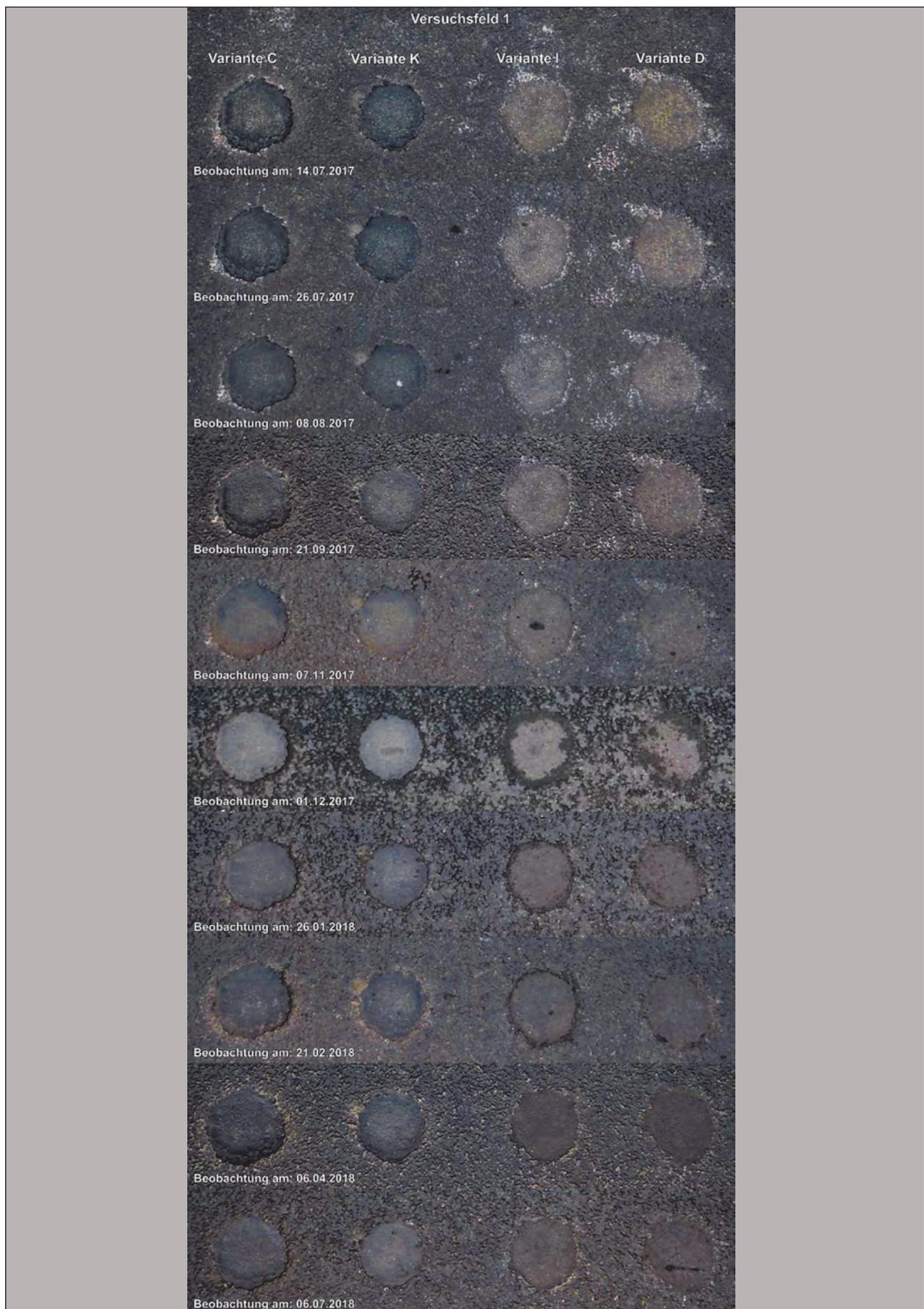


Bild 6-2: Bilddokumentation der In-situ-Beobachtungen des Versuchsfeldes 1 am Döppersberg in Wuppertal

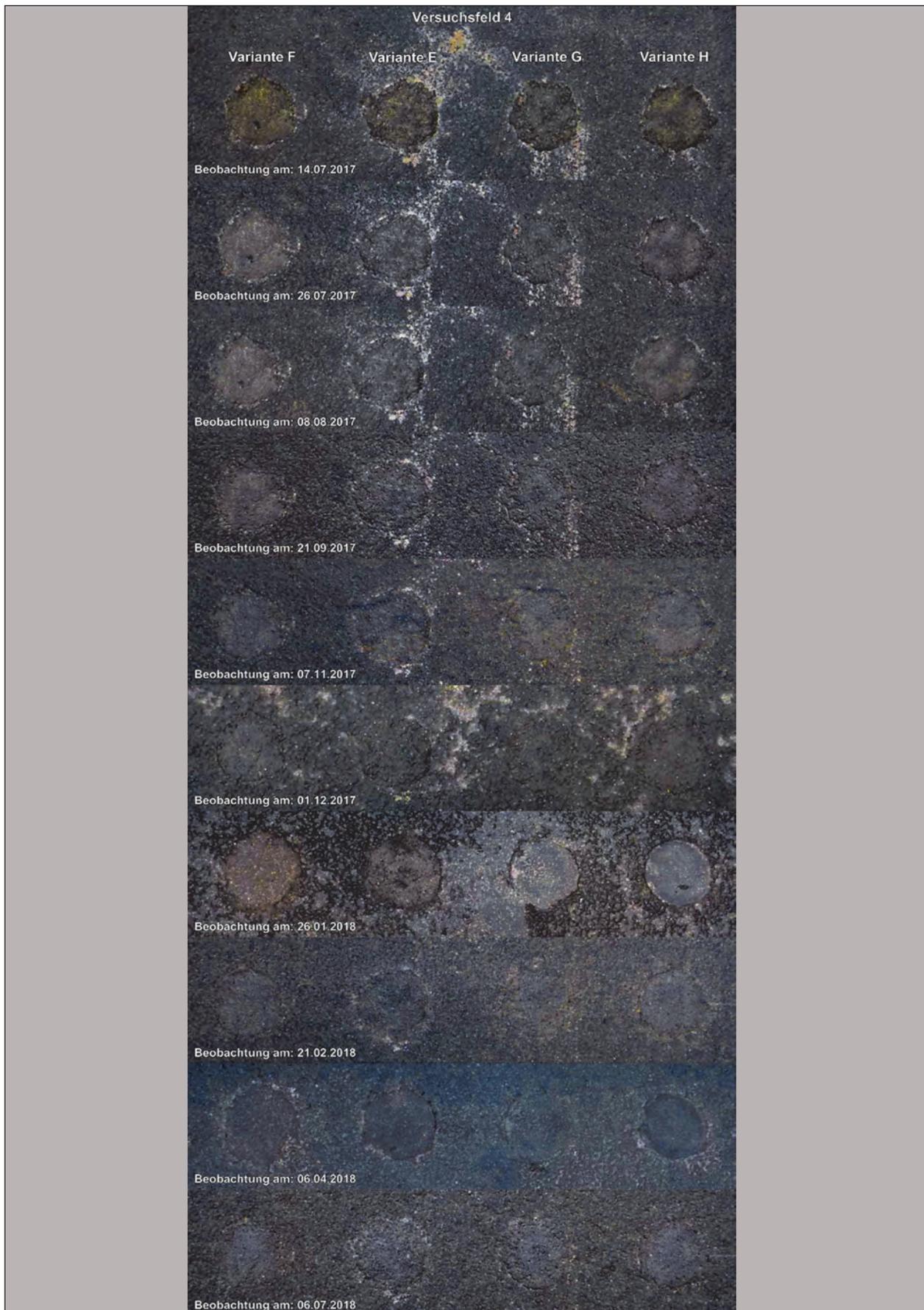


Bild 6-3: Bilddokumentation der In-situ-Beobachtungen des Versuchsfeldes 4 am Döppersberg in Wuppertal

Schwachstelle in der Straßenkonstruktion dar. Um Schäden am Verschluss bzw. an der umgebenden Originalkonstruktion zu vermeiden und ein erforderliches Qualitätsniveau zu erreichen, ist die fachgerechte und fachlich hochwertige Ausführung der Verschlüsse von Bohrkernentnahmestellen notwendig.

Die in dieser Verfahrensanweisung beschriebenen Verfahren wurden innerhalb des Forschungsprojektes FE 07.0279/2014/ERB „Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen“ im Labor und in situ durchgeführt und untersucht.

7.2 Verweise auf andere Regelwerke

H RepA	Hinweise für Reparaturasphalt zur Schadstellenbeseitigung
TL Gestein-StB	Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnung im Straßenbau

7.3 Begriffe

Originalkonstruktion

Gebundener Straßenoberbau (Asphalt oder Beton) der die Bohrkernentnahmestelle umgibt.

Bohrkernentnahmestelle

Zu Prüfzwecken technisch hergestellte Schadstelle im gebundenen Straßenoberbau aus Asphalt oder Beton.

Gesteinskörnung

Körniges Material, das nach den TL Gestein-StB [28] für die Verwendung im Straßenbau geeignet ist.

Verschluss

Der Verschluss einer Bohrkernentnahmestelle stellt aus bautechnischer Sicht die Beseitigung der zu Prüfzwecken, technisch hergestellten Schadstelle in der Originalkonstruktion dar. Der Verschluss muss den gleichen Beanspruchungen wie die Fahrbahnkonstruktion standhalten und muss daher die gleichen Aufgaben (hinsichtlich Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit) erfüllen. Der Verschluss kann einteilig oder zweiteilig hergestellt werden.

Der einteilige Verschluss besteht durchgehend (von der Sohle der Bohrkernentnahmestelle bis zur OK der Originalkonstruktion) aus demselben Material (z. B. Straßenreparaturbeton, Heißmischgut).

Beim zweiteiligen Verschluss werden zwei verschiedene Materialien für den Verschluss verwendet (z. B. Gesteinskörnung und Kaltmischgut). Der zweiteilige Verschluss besteht aus einer Unterkonstruktion und einem Deckschichtersatz.

Unterkonstruktion

Die Unterkonstruktion bildet das Tragwerk für den Deckschichtersatz (Asphalt) bzw. den Betondeckenersatz. Zur Gewährleistung einer dauerhaften Tragfähigkeit muss die Unterkonstruktion gut verdichtbar und dauerhaft sein. Die Unterkonstruktion kann aus gebundenen Materialien bestehen (z. B. bei einteiligen Verschlüssen). Im Allgemeinen besteht die Unterkonstruktion bei zweiteiligen Verschlüssen aus Gesteinskörnung.

Deckschichtersatz (Asphalt)

Der Deckschichtersatz übernimmt die Funktionen der Originalkonstruktion im Bereich der Bohrkernentnahmestelle. Er muss daher dicht und dauerhaft sein.

Betondeckenersatz

Der Betondeckenersatz übernimmt die Funktionen der zu ersetzenden Betondecke in der Originalkonstruktion im Bereich der Bohrkernentnahmestelle. Er muss daher dicht und dauerhaft sein.

Deckschichtersatzmaterial bzw. Betondeckenersatzmaterial

Ein gebundenes Material, das sich für den Einbau als Deckschichtersatz (Asphalt) bzw. Betondeckenersatz eignet (z. B. KMG, HMG, WMG oder RepBeton).

Reparaturasphalt

Reparaturasphalte sind Asphaltmischgüter die aus einer Kornabgestuften Gesteinskörnung, einem bitumenhaltigen Bindemittel und ggf. Zusätzen bestehen. Sie werden nach ihrem Größtkorn und der Art des bitumenhaltigen Bindemittels unterschieden. [9]

Je nach Herstellung werden Reparaturasphalte in sieben Produktsorten eingeteilt, dazu zählen Kaltmischgüter mit verschiedenen Bindemitteln, Heißmischgut und Warmmischgut. [9]

Kaltmischgut (KMG)

Kaltmischgut ist ein kalt zu verarbeitendes Asphaltmischgut, bestehend aus Gesteinskörnung, bitumenhaltigen Bindemitteln und Zusätzen.

Es gibt verschiedene Kaltmischgüter, die in den „Hinweisen für Reparaturasphalt zur Schadstellenbeseitigung (H RepA)“ ausführlich beschrieben sind. Dazu zählen u. a. emulsionsgebundenes Kaltmischgut (KMG-E) und reaktives Kaltmischgut (KMG-R), die nach den HRepA für den Verschluss von Bohrkernentnahmestellen geeignet sind. [9]

Vorschläge für die Zusammensetzung von KMG sind im Anhang B der HRepA [9] beschrieben.

Heißmischgut (HMG)

Zu Reparaturzwecken eignen sich im Allgemeinen gussasphaltähnliche Mischgüter. Aufgrund der Fließfähigkeit im heißen Zustand kann das Mischgut ohne Verdichtung eingebaut werden. Der Bindemittelüberschuss garantiert eine sehr gute Dichtigkeit und Haftung zur Originalkonstruktion. Das Heißmischgut besteht aus einem Gesteinskörnungsgemisch, polymermodifiziertem Bitumen und Zusätzen. Es wird portionsweise an der Entnahmestelle im mitgeführten Mikrowellenofen erwärmt und anschließend eingebaut.

Vorschläge für die Zusammensetzung sind im Anhang B der HRepA [9] beschrieben.

Straßenreparaturbeton (RepBeton)

Eine Betonfertigmischung, die sich zur Reparatur von Verkehrsflächen in Betonbauweise eignet. Der Straßenreparaturbeton soll die Festigkeitsklasse C30/37 und ein Größtkorn von 8 mm aufweisen. Er kann als portionierte Fertigtrockenmischung zur Baustelle transportiert und vor dem Einbau mit Wasser angemischt werden.

7.4 Baustoffe und Verschlussmaterialien

Zur Herstellung eines hochwertigen und dauerhaften Verschlusses einer Entnahmestelle sollten grundsätzlich qualitativ geeignete Verschlussmaterialien verwendet werden. Das gilt für die Unterkonstruktion und den Deckschicht- bzw. Betondeckenersatz. Bei der Probenahme anfallende Reststoffe (z. B. Bohrkerne) sollten nicht verwendet werden.

Die Unterkonstruktion sollte aus Gesteinskörnung bestehen, die den TLGestein-StB entspricht. Zur Vermeidung von Entmischungen der Gesteinskörnung während des Transports und des Einbaus

sollte eine enggestufte Gesteinskörnung gewählt werden (z. B. 5/11).

Der Deckschichtersatz sollte aus qualitativ hochwertigen Reparaturasphalten erfolgen, hierzu sind die HRepA [9] zu beachten.

Für den Deckschichtersatz in Verkehrsflächen aus Beton sind geeignete Fertigmischungen zu wählen.

7.5 Verfahren

Verfahren A - Verkehrsflächen in Asphaltbauweise (niedrige Beanspruchungen)

- Unterkonstruktion: bis max. 4 cm unterhalb Fahrbahnoberkante Gesteinskörnung der Korngruppe 5/11
- Deckschichtersatz: bis OK Originalkonstruktion emulsionsgebundenes Kaltmischgut (KMG-E)

Verfahren B - Verkehrsflächen in Asphaltbauweise (hohe Beanspruchungen)

- Unterkonstruktion: bis max. 4 cm unterhalb Fahrbahnoberkante Gesteinskörnung der Korngruppe 5/11
- Deckschichtersatz: bis OK Originalkonstruktion Heißmischgut (HMG)

Verfahren C - Verkehrsflächen in Betonbauweise

- Bis Fahrbahnoberkante Straßenreparaturbeton C30/37

7.6 Geräte

Stromerzeugungsaggregat

Für den Betrieb von Elektrogeräten wie Bohrhammer und Mikrowellenofen wird ein Stromerzeugungsaggregat benötigt, welches im Bauwagen mitgeführt werden muss.

Bohrhammer mit Stampferplatte

Für die Verdichtung der Gesteinskörnung und des emulsionsgebundenen Kaltmischgutes sollte ein Bohrhammer mit runder Stampferplatte verwendet werden. Stampferplatten sind in verschiedenen Durchmessern erhältlich und müssen dem Durchmesser des zu verschließenden Bohrloches entsprechen.

Mikrowellenofen

Für die Erwärmung des selbstverdichtenden Heißmischgutes (Mikrowellenasphalt) ist ein Mikrowellenofen erforderlich. Eine Gewerbemikrowelle mit einer Leistung von mindestens 1800 Watt wird empfohlen, um die Erwärmungszeit gering zu halten.

7.7 Verschluss von Bohrkernentnahmestellen

7.7.1 Vorbereitung und Reinigung der Entnahmestelle

Überschüssiges Bohrwasser und Bohrschlämme sind im unmittelbaren Umkreis der Bohrkernentnahmestelle an der Oberfläche der Originalkonstruktion mit einem Besen grob zu entfernen. Der obere Bereich der Wandfläche der Bohrkernentnahmestelle (Anschlussfläche des Deckschichtersatzmaterials) ist von groben Verschmutzungen mit einem feuchten Schwamm zu befreien. Nach der Reinigung ist im Bohrloch stehendes Wasser zu entfernen.

7.7.2 Herstellung der Unterkonstruktion

Zur Herstellung der Unterkonstruktion soll die Gesteinskörnung der Korngruppe 5/11 lagenweise eingebaut und verdichtet werden. Die Lagen sollen dabei nicht dicker als 10 cm sein. Die Verdichtung soll mithilfe eines Bohrhammers mit Stampferplatte erfolgen.

Für Verkehrsflächen aus Beton soll die Unterkonstruktion lagenweise aus einem Straßenreparaturbeton C30/37 hergestellt werden.

7.7.3 Herstellung des Deckschichtersatzes bzw. Betondeckenersatz

Beim Einbau der Deckschichtersatzmaterialien bzw. Betondeckenersatzmaterialien sind ggf. die Einbauhinweise der Hersteller zu beachten. Die Verarbeitungstemperatur und die Temperatur der Originalkonstruktion sollten bei wasserhaltigen Materialien (z. B. KMG-E, KMG-R und RepBeton) nicht unterhalb des Gefrierpunktes liegen. Bei Heißmischgütern darf die Temperatur der Originalkonstruktion nicht unter -5°C liegen. Der Deckschichtersatz mit Kaltmischgütern sollte mindestens in zwei Lagen erfolgen.

Der Deckschichtersatz in der Bohrkernentnahmestelle ist bei niedrigen Beanspruchungen mit emul-

siongebundenem Kaltmischgut (a) und bei hohen Beanspruchungen mit Heißmischgut (b) zu verschließen:

- a) Das emulsionsgebundene Kaltmischgut (KMG-E) wird in mehreren Lagen in die Bohrkernentnahmestelle eingebaut und mittels Bohrhammer mit Stampferplatte verdichtet. Die abschließende Lage ist so einzubauen, dass nach dem Verdichten eine leichte Überhöhung vorhanden ist. Beim Verdichtungsprozess ist darauf zu achten, dass das Kaltmischgut sowohl nach unten als auch zur Wandfläche hin gleichmäßig verdichtet wird.
- b) Das Heißmischgut ist während der Bohrkernentnahme in einem dafür geeigneten Mikrowellenofen auf die Einbautemperatur zu erwärmen. Nachdem die Temperierung abgeschlossen ist, kann das Heißmischgut in die Bohrkernentnahmestelle eingebaut werden. Ggf. sind Lufteinschlüsse mit einem Holzstößel auszutreiben.
- c) Der Betondeckenersatz erfolgt mit einem Straßenreparaturbeton C30/37.

8 Zusammenfassung

Die Ziele des Forschungsvorhabens waren der Entwurf einer Verfahrensanweisung für das Verschließen von Bohrkernentnahmestellen sowie die Entwicklung eines innovativen und anwendungsreifen Dokumentationskonzeptes für Bohrkernentnahmestellen.

Für die Erarbeitung des Entwurfes der Verfahrensanweisung wurden verschiedene Verschlussverfahren und -materialien labortechnisch evaluiert. Die labortechnische Evaluation berücksichtigt dabei die beiden wichtigsten Eigenschaften eines Bohrkernverschlusses: Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit.

Für die Untersuchungen der Dichtigkeit des Deckschichtersatz bzw. Betondeckenersatzmaterials wurde ein Verfahren entwickelt, das dem Prüfverfahren für Heißasphalt (Durchlässigkeit der Probekörper) aus der DIN EN 12697-19 [19] ähnlich ist. Mit diesem Verfahren wird geprüft, ob Wasser durch das Deckschichtersatzmaterial in die Unterkonstruktion des Bohrlochverschlusses eindringen kann.

Der Versuch zeigt, dass mit dem Straßenreparaturbeton, dem Heißmischgut und dem Reparaturbohrkern ein dichter Deckschichtersatz bzw. Betonde-

ckenersatz hergestellt werden kann. Diese Ergebnisse sind plausibel und entsprechen den In-situ-Beobachtungen. Anders sieht es bei beiden Kaltmischgutarten (KMG-E und KMG-R) aus, für welche die Undichtigkeit der untersuchten Materialien festgestellt wurde. Allerdings zeigte sich, trotz maschineller Verdichtung mittels Bohrhammer und Stampferplatte, ein auffällig anderes, offenporigeres Oberflächenbild als bei der Verdichtung in situ. Unter Berücksichtigung des Oberflächenbildes bei der Bewertung der Ergebnisse muss erwähnt werden, dass im Labor keine realitätsnahe Verdichtung erfolgen konnte.

Die Prüfung der Dauerhaftigkeit basiert auf dem Versuchsprinzip des einaxialen Druckschwellversuches. Der Versuch soll zeigen, wie sich die verschiedenen Verschlussvarianten unter der zyklischen Belastung verhalten. Dabei ist besonders auf eine ggf. stattfindende Setzung/Nachverdichtung und ggf. auftretende Schädigungen im Fugenbereich zwischen dem Deckschichtersatzmaterial und der Originalkonstruktion zu achten.

Die Bewertung der Dauerhaftigkeit der verschiedenen Verschlussvarianten erfolgt anhand der Kriechkurvenverläufe, die sich aus dem einaxialen Druckschwellversuch ergeben. Hierzu wurden charakteristische Stellen im Kriechkurvenverlauf definiert, das Ende der Konsolidierungsphase (nach 10.000 Zyklen) und das Versuchsende (nach 30.000 Zyklen). Zwischen diesen beiden Punkten, im quasi-linearen Teil der Kriechkurve, wurde die Steigung ermittelt. Im Allgemeinen entsprechen die Prüfergebnisse den Erwartungen. Es ist erkennbar, dass die Steigungen weitestgehend mit der Steifigkeit des Verschlusses korrelieren (je höher die Steigungen desto geringer die Steifigkeiten). Da es sich hierbei ebenfalls um ein experimentelles Prüfverfahren handelt, müssen bei der Bewertung einige Besonderheiten berücksichtigt werden. Die Oberfläche der Prüfkörper wurde nicht nachbehandelt (geschliffen, o. ä.), daher kann der Kriechkurvenverlauf Schwankungen und / oder Sprünge aufweisen. Im Zuge der Herstellung der Prüfkörper wurde versucht, eine möglichst gleichmäßige Verdichtung mittels Bohrhammer und Stampferplatte zu erreichen, die allerdings nicht überprüft werden konnte.

Obwohl die Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfung nicht statistisch abgesichert sind und die Reproduzierbarkeit der Prüfkörperherstellung nicht nachgewiesen werden konnte, zeigen sie eindeutige realitätsnahe Tendenzen und erscheinen damit

plausibel. Es ist ersichtlich, dass sowohl die absoluten Verformungen als auch die Steigungen der Kriechkurven mit der anzunehmenden Steifigkeit der Verschlussvarianten korrelieren. Dennoch bleibt zu bemerken, dass die Herstellung von Prüfkörpern für die Dauerhaftigkeitsprüfung sehr aufwendig ist und eine Reproduzierbarkeit nicht sichergestellt werden kann. Zu Wiederhol- und Vergleichspräzisionen des Verfahrens können keine Angaben gemacht werden.

Als Ergänzung zu den labortechnischen Untersuchungen wurden im Stadtgebiet von Wuppertal verschiedene Entnahmestellen mit acht verschiedenen Verschlussvarianten verschlossen. Die Zustandsentwicklung der Entnahmestellen wurde über 12 Monate kontinuierlich beobachtet und dokumentiert. Anhand der In-situ-Beobachtungen ist erkennbar, dass die Dauerhaftigkeit der Verschlüsse insbesondere von der fachgerechten und hochwertigen Ausführung des Verschlusses abhängig ist. Die Verschlüsse in den Versuchsfeldern in Wuppertal weisen nach zwölf Monaten Liegedauer keine Beschädigungen oder Veränderungen auf.

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse sowie der in der Praxis üblichen Rahmenbedingungen wurden in Absprache mit dem Auftraggeber eine Kaltmischgut- und eine Heißmischgutvariante ausgewählt, die auf dem duraBASt eingebaut und in einem Großversuch mit dem Mobile Load Simulator MLS30 belastet wurden. Dabei wurden das Versuchsfeld und die Bohrkernverschlüsse kontinuierlich mittels Falling-Weight-Deflectometer (FWD) und Querebenenmessgerät untersucht und die Veränderungen des Tragverhaltens sowie der Oberfläche dokumentiert.

Der Großversuch auf dem duraBASt mit dem MLS30 zeigte im Allgemeinen erwartungsgemäße Ergebnisse. Die Entnahmestellenverschlüsse beider untersuchten Varianten konnten der Beanspruchung von 1,6 Mio. Überrollungen standhalten. Es konnten keine Ausbrüche oder ein Totalversagen bei den Deckschichtersatzmaterialien festgestellt werden. Durch die volle Belastung in der Rollspur zeigten sowohl die Kaltmischgutvarianten als auch die Varianten mit Heißmischgut eine annähernd höhengleiche Setzung mit der Originalkonstruktion im Querprofil. Aufgrund der spurtreuen Belastung durch die Großversuchsanlage zeigten sich Mörtelverdrückungen bei der HMG-Variante im Bereich der Profilrillen der Reifen, die in der Praxis nicht zu erwarten sind. Bei den teilüberrollten Entnahme-

stellen wurden Verdrückungen in Richtung der nicht überrollten Teilfläche festgestellt. Die Verdrückungen waren bei der Kaltmischgutvariante stärker ausgeprägt als bei der Heißmischgutvariante.

Die Ergebnisse der FWD-Messungen lassen auf keine direkte Beeinflussung der verschlossenen Bohrkernentnahmestellen auf die Tragfähigkeit der umgebenden Straßenkonstruktion schließen.

Mit der Entnahme von Bohrkernen aus Straßenbefestigungen sowie der Prüfung der daraus gewonnenen Proben lassen sich eine Vielzahl von Informationen gewinnen. Damit diese Informationen dauerhaft und nachhaltig genutzt werden können, ist die Entwicklung eines technisch innovativen Dokumentationskonzeptes nötig. Hierzu wurde vom Auftraggeber eine Sensorlösung auf Basis der RFID-Technologie vorgeschlagen.

Die RFID-Technologie bietet die Möglichkeit einer berührungslosen Datenübermittlung zwischen einem Speichermedium (RFID-Transponder) und einem Lesegerät. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technologie ist, dass das passive Speichermedium keine eigene Stromversorgung benötigt. Somit ist es möglich, dass ein Speichermedium dauerhaft in den Verschluss einer Bohrkernentnahmestelle eingearbeitet werden kann und über die Nutzungsdauer der Straßenbefestigung zur Verfügung steht. Damit stehen auch die auf dem Speichermedium gespeicherten Daten über die Nutzungsdauer der Straßenbefestigung zur Verfügung.

Bei der Entwicklung des Dokumentationskonzeptes wurden sowohl die theoretischen Aspekte, wie die zu erfassenden und zu speichernden Informationen sowie die Datenverarbeitung als auch die technischen Anforderungen und die Machbarkeit untersucht. Dazu wurden verschiedene RFID-Transponder hinsichtlich verschiedener Kriterien ausgewählt und einer labortechnischen Evaluierung hinsichtlich der zu erwartenden Beanspruchungen beim Einbau des Transponders in den Verschluss unterzogen. Des Weiteren wurde ein Dokumentationskonzept inklusive einer grafischen Bereitstellung der Daten erarbeitet.

Zur Bewertung der Einsatztauglichkeit von RFID-Transpondern wurden drei verschiedene Typen auf ihre Wärmebeständigkeit bei Temperaturen bis 200°C und ihre Beständigkeit gegen indirekte Schlagbeanspruchung geprüft. Die Prüfung der indirekten Schlagbeanspruchung simuliert die wäh-

rend der Verdichtung auf den Transponder einwirkenden Kräfte. Die Prüfung erfolgt durch den Einbau eines Transponders in einen Marshall-Probe-körper mittels Verdichtung im Marshallverdichtungsgerät. Dabei wird gleichzeitig die Wärmebeständigkeit bis 140°C getestet. Die Prüfung auf Wärmebeständigkeit bis 200°C erfolgt durch den Einbau in einen Gussasphaltprobekörper.

Zur Prüfung der eingeschränkten Lesereichweite wurden die Transponder in verschiedenen Tiefen in Entnahmestellen eingebaut und Leseversuche durchgeführt. Diese Prüfung erfolgte sowohl In-situ als auch im Laboratorium.

Bei der Prüfung der eingeschränkten Lesereichweite konnten bis auf eine Ausnahme einheitlich positive Ergebnisse erzielt werden. Ein Transpondertyp konnte nach dem In-situ-Einbau in 30 cm Tiefe nicht mehr gelesen werden. Ob hierbei eine Beeinträchtigung aufgrund einer Beschädigung oder durch die Störung des überdeckenden Materials vorliegt, kann nicht mehr überprüft werden. Bis auf diese Ausnahme konnten alle Transponder nach dem Einbau gelesen werden. Die Ergebnisse berücksichtigen dabei auch Leseprüfungen zwei und zwölf Monate nach dem Einbau.

Mit den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bereits auf dem Markt befindliche RFID-Transponder für den Einbau in Bohrkernentnahmestellen geeignet sind. Die Transponder bieten eine gute Möglichkeit der lokalen Datenspeicherung. Die Verknüpfung der Transponder mit einer Datenbankanwendung bietet die Möglichkeit eines umfassenden Datenzugriffs. Durch die Platzierung des Transponders im oberen Drittel der Asphalttragschicht steht dieser auch im Falle einer Deckenerneuerung noch zur Verfügung und kann somit noch nach Jahrzehnten Aufschlüsse über den Altbestand geben. Die Verortung per GPS-Koordinaten ermöglicht das Auffinden der Entnahmestelle bzw. des Transponders, selbst wenn die Entnahmestelle nicht mehr sichtbar ist.

Zum Abschluss des FE-Projektes wurde ein Entwurf einer Verfahrensweisung zum fachgerechten Verschließen von Bohrkernentnahmestellen erstellt. Der Entwurf der Verfahrensweisung soll die Grundlage für eine weitergehende Bearbeitung in den entsprechenden Gremien der FGSV bilden.

Literatur

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschrift für Asphalt (TP Asphalt-StB): Teil 27: Probenahme. Köln, 2012
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschrift für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (TP Beton-StB). Köln, 2010
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltstraßen (RSO Asphalt): In Bearbeitung, Entwurfsfassung. Köln, 2014
- [4] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz von Betonstraßen: In Bearbeitung. Köln
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen (TP B-StB). Köln, 2015
- [6] Hessen Mobil Straßen- und Verkehrsmanagement - Fulda: Leistungsverzeichnis Fahrbahnerneuerungsmaßnahmen LK Fulda in 2016. URL https://vergabe.hessen.de/Net-Server/TenderingProcedureDetails?function=_DownloadTenderDocument&TenderO-ID=54321-NetTender-15438a57da7-7c64bd1337219795&Document=Langtext.pdf – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [7] Landesamt für Straßenbau und Verkehr des Freistaats Sachsen: Ergänzende Regelungen der sächsischen Straßenbauverwaltung, Teil: Straßenbautechnik. URL http://www.list-sachsen.de/info/160302_Ergaenzende_Regelungen_Strassenbautechnik.pdf – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [8] Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr des Landes Sachsen-Anhalt: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Straßen- und Ingenieurbau für den Geschäftsbereich der Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt (ZTV-StB LSBB ST 17). Magdeburg, 2017
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Hinweise für Reparaturasphalt zur Schadstellenbeseitigung (H RepA): Entwurfsfassung. Köln, 2017
- [10] OLM, M. ; ÜBERSCHAER, K.: Probenahme - Asphalt / Bitumen (XVII. Straßenbau + Baustoffsymposium). Weimar, 26.03.2015
- [11] Instamak GmbH: Bohrlochverschluss auf Autobahnen, Landes- und Kommunalstraßen mit Instamak Reparaturasphalten. Selmsdorf, 2016
- [12] Asphalt Kleemann GmbH & Co.KG: Asphalt 2 Go - Die innovative Idee für eine unkomplizierte Lösung. URL <http://www.asphalt-kleemann.de/asphalt-2-go> – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [13] Ingenieurbüro Dipl.-Ing.(FH) Franz Hege- mann: Bitudrill Bitumen-Bohrstopfen zum Verschließen der Bohrlöcher bei Bohrkerngewinnung. URL <http://www.bitudrill.de/bohrungen-zur-bohrkerngewinnung.html> – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [14] Chemisch Technisches Laboratorium Heinrich Hart GmbH: Erfolgreiche Arbeitsplatzanalyse: Zügige Entnahme von Bohrkernen aus Fahrbahnbefestigungen. URL https://labor-hart.de/wp-content/uploads/2015/08/Artikel_Bohrkerne_aus_Fahrbahnbefestigungen.pdf – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [15] Landesamt für Bau und Verkehr des Freistaats Thüringen: Dienstanweisung Nr. 11/2012-33/5 Kontrollprüfungen an Asphalt - Probenahme. URL https://www.thueringen.de/imperia/md/content/tlsb/service/listen/2012/da_11_2012_33_5_0712.pdf – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [16] XtremeGN UG: RFID-Grundlagen: Das RFID Informationsportal. URL <https://www.rfid-grundlagen.de/> – Überprüfungsdatum 2018-10-11
- [17] Bundesanstalt für Straßenwesen: Verbundforschungsvorhaben PAST - Prozesssicherer Automatisierter Straßenbau: Schlussbericht der Bundesanstalt für Straßenbau. Bergisch Gladbach, 2013

- [18] Schreiner Group GmbH & Co. KG: Sprechende Straßen: Innovative Auslesung von RFID-Etiketten im Asphalt. Oberschleißheim, 2015
- [19] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt: Teil 19: Durchlässigkeit der Probekörper. Deutsche Fassung EN 12697-19:2012. Berlin, 2012
- [20] Deutscher Wetterdienst: Wetterlexikon: Niederschlagsintensität. URL <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101812&lv3=101906> – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [21] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt): Teil 25 B 1 „Einaxialer Duck-Schwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme“. Köln, 2012
- [22] VAN BOCHOVE, G. ; WACKER, B.: HEALROAD industrial upscaling and full scale demonstrator (HEALROAD Symposium). 27.03.2018
- [23] Bundesanstalt für Straßenwesen: Mobile Load Simulator MLS30. Bergisch Gladbach, 2017
- [24] WACKER, B. ; Referat GS3: Dimensionierung und Straßenaufbau: Messauftrag: Bohrkernverschluss (BV) duraBAST. Bergisch Gladbach, 2018
- [25] Deutscher Wetterdienst: CDC CLimate Data Center: Stundenwerte Messstation 02968. URL https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [26] Bezirksregierung Köln: Digitale Topographische Karte 1 : 10 000 (DTK10). URL https://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dtk10 – Überprüfungsdatum 2018-08-31
- [27] QGIS Entwicklungsteam: QGIS Geographisches Informationssystem: Open Source Geospatial Foundation Projekt. 2018
- [28] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04): Fassung 2018. Köln, 2018

Bilder

- Bild 2-1: Bohrkernentnahmestelle nach Fertigstellung (links) und nach 35 Monaten (rechts)
- Bild 2-2: Mit Heißmischgut verschlossene Bohrkernentnahmestelle nach 3 Monaten Liegedauer
- Bild 2-3: Portion Mikrowellenasphalt für das Verschließen einer Bohrkernentnahmestelle (obere 4 cm)
- Bild 2-4: Bitumen-Bohrstopfen
- Bild 2-5: Handstampfer Ø 100 mm (links), Schlaghammer mit Verdichtungsplatte Ø 200 mm (Mitte) und Ø140 mm (rechts)
- Bild 2-6: Transportable Mikrowelle zum Erhitzen der Asphaltportion [12] © Kleemann
- Bild 2-7: Probenahmefahrzeug mit integriertem Bohrgerät und Mikrowellenofen [14] © Labor Hart
- Bild 2-8: Stegbrüche zwischen den Bohrkernentnahmestellen
- Bild 3-1: Versuchsaufbau zur Prüfung der Dichtigkeit in Anlehnung an DIN EN 12697-19 [19]
- Bild 3-2: Dichtigkeitsprüfung mit Kaltmischgut; links: Versuchsaufbau, rechts: durchlaufendes Wasser während der Prüfung
- Bild 3-3: Schädigung des Asphaltkörpers im Bereich der Deckschichtplatte nach einem Vorversuch mit höherer Überspannung
- Bild 3-4: links: verdichtete Gesteinskörnung 8/11; rechts: Verdichtung von KMG-R mit einem elektrischen Bohrhammer mit Stampferplatte
- Bild 3-5: Grafische Darstellung der Kriechkurven der Dauerhaftigkeitsprüfung verschiedener Bohrlochverschlussvarianten
- Bild 3-6: Vergleich der Kriechkurven der Varianten mit Heißmischgut (HMG) als Deckschichtersatzmaterial
- Bild 3-7: Vergleich der Kriechkurven der Varianten mit emulsionsgebundenem Kaltmischgut (KMG-E) als Deckschichtersatzmaterial
- Bild 4-1: duraBAST im Autobahnkreuz Köln-Ost (BAB 3/4) © BAST

- Bild 4-2: Schema der Belastungsfläche mit Verschlussvarianten H und L und MLS30 Rollspur (grau)
- Bild 4-3: Versuchsfeld nach dem Einbau der Verschlussvarianten
- Bild 4-4: Messpunkte für die Querebenenmessungen
- Bild 4-5: Positionen und Bezeichnungen der Messpunkte für FWD-Messungen
- Bild 4-6: Betriebszeiten des MLS30 © BAST
- Bild 4-7: Tageshöchst- und Tiefsttemperaturen der Messstation Köln-Stammheim [25]
- Bild 4-8: Nummerierung der Bohrkernentnahmestellen
- Bild 4-9: Querebenenprofil ohne Bohrkernentnahmestelle (Position 2,00 m) © BAST
- Bild 4-10: Querebenenprofil Position L1 © BAST
- Bild 4-11: Position L1 nach 1.600.000 Überrollungen © BAST
- Bild 4-12: Querebenenprofil Position H1 © BAST
- Bild 4-13: Position H1 nach 1.600.000 Überrollungen © BAST
- Bild 4-14: Querebenenprofil Position H4 und L4 © BAST
- Bild 4-15: Position H4 nach 1.600.000 Überrollungen © BAST
- Bild 4-16: Deflexionsmulde Messpunkt 8 für die Messreihen 1 bis 11
- Bild 4-17: D_o , Luft- und Oberflächentemperatur an den Messpunkten 7, 8 und 9 für die Messreihen 1 bis 11
- Bild 4-18: Deflexionsmulde in Messpunkt 11 für die Messreihen 1 bis 11
- Bild 4-19: D_o , Luft- und Oberflächentemperatur an den Messpunkten 11, 12 und 13 für die Messreihen 1 bis 11
- Bild 4-20: Deflexionsmulde in Messpunkt 31 für die Messreihen 1, 2, 3, 5, 8, 10, 11
- Bild 4-21: D_o , Luft- und Oberflächentemperatur an Messpunkt 31 für die Messreihen 1, 2, 3, 5, 8, 10, 11
- Bild 4-22: Deflexionsmulde in Messpunkt 181 bzw. 189 für die Messreihen 1, 2, und 11
- Bild 4-23: Deflexionsmulde in Messpunkt 191 bzw. 199 für die Messreihen 1, 2, und 11
- Bild 4-24: Entnommene Bohrkernscheibe an Position H1 (KMG)
- Bild 4-25: Entnommene Bohrkernscheibe an Position L5 (HMG)
- Bild 5-1: Vorausgewählte RFID-Transponder (Typ 1 links, Typ 2 Mitte, Typ 3 rechts)
- Bild 5-2: RFID-Handcomputer mit Dipolantenne
- Bild 5-3: RFID-Transponder nach dem Ausbau aus den Marshall-Probekörpern (Typ 1 links, Typ 2 Mitte, Typ 3 rechts)
- Bild 5-4: RFID-Transponder in Bohrkernentnahmestellen vor dem Verschließen (links: Typ 2 bei 300 mm unter OK Asphalt; rechts: Typ 3 bei 150 mm unter OK Asphalt)
- Bild 5-5: Schema des Dokumentationskonzepts
- Bild 5-6: GIS-Oberfläche mit Kartenfenster (links) und Abfrageergebnis (rechts) [27]
- Bild 5-7: Darstellung von Bohrkernentnahmestellen auf einer Karte (Kartengrundlage DTK10) als Export aus dem GIS-System [27]
- Bild 6-1: Versuchsfeld 1 (komplett verschlossen) und Versuchsfeld 4 (Unterkonstruktionen)
- Bild 6-2: Bilddokumentation der in-situ-Beobachtungen des Versuchsfeldes 1 am Döppersberg in Wuppertal
- Bild 6-3: Bilddokumentation der in-situ-Beobachtungen des Versuchsfeldes 4 am Döppersberg in Wuppertal

Tabellen

- Tab. 3-1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dichtigkeitsprüfung für Deckschichtersatzmaterialien
- Tab. 3-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dauerhaftigkeitsprüfung der Bohrlochverschlussvarianten
- Tab. 4-1: Zeitpunkte der Querebenen- und FWD-Messungen sowie der Aufnahme von Oberflächenbildern
- Tab. 4-2: Messreihenbezeichnung mit Anzahl der Überrollungen sowie Luft- und Oberflächentemperaturen
- Tab. 5-1: Eigenschaften der vorausgewählten RFID-Transponder

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2017

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

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke

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

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

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

Durner

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

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

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

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

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

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

Alisov, Wistuba

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

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungsrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum

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

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

Schellenberg

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

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

Mollenhauer

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

2018

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

Wistuba, Isailović

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

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

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehlung

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

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

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

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

Durner

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

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

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

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

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

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

Skakuj, Balck, Bechedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

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

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

Dumer

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

2020

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

Bechedahl, Koppers, Schrödter

€ 15,50