

**Potenzialanalyse –  
Prozesssichere  
Herstellung  
lärmarmer Straßen  
in Betonbauweise  
OPB – Offenporiger Beton**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 185**

**bast**

# **Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärmarmer Straßen in Betonbauweise**

## **OPB – Offenporiger Beton**

von

Stephan Freudenstein  
Martina Bollin  
Martin Eger

Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau  
Technische Universität München

Nicolai Klein  
Thomas Kränkel

Centrum Baustoffe und Materialprüfung  
Technische Universität München

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 185**

**bast**

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

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

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

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

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 08.0243**  
Potenzialanalyse - Prozesssichere Herstellung lärmarmer Straßen in Betonbauweise (OPB – Offenporiger Beton)

**Fachbetreuung**  
Christoph Becker  
Alexandra Spilker

**Referat**  
Betonbauweisen

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

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-736-5

Bergisch Gladbach, Juni 2023

## Kurzfassung – Abstract

### **Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärmärmer Straßen in Betonbauweise (OPB – Offenporiger Beton)**

Die Sensibilität der Bevölkerung in Bezug auf Straßenlärm ist in den letzten Jahrzehnten zunehmend gestiegen. Die bisherige Standardbauweise von Betondecken ist Waschbeton, welche im Vergleich zum Referenzwert mit -2 dB(A) als lärmindernd angesetzt wird. Offenporige Deckschichten können hingegen eine Pegelminderung von bis zu 5 dB(A) bewirken.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde zunächst die Prozesskette bei der Herstellung von Offenporigem Beton (OPB) herausgearbeitet, um zukünftig einen prozessoptimierten Einbau bei dieser Bauweise zu gewährleisten. Hierzu wurden in einer Literaturrecherche Informationen früherer Versuchsstrecken gesammelt und ausgewertet.

Parallel dazu wurde, auf Grundlage einer bestehenden OPB-Rezeptur, eine im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit, bei Einhaltung der Anforderungen an die Festbetoneigenschaften, optimierte Rezeptur erstellt.

Anhand der Ergebnisse aus der Recherche sowie der Rezepturoptimierung wurde eine Versuchsstrecke auf einem Autobahnparkplatz in der Planung sowie der Ausführung begleitet. Bei der Herstellung der Versuchsstrecke wurden die Prozessparameter dokumentiert sowie die Frisch- und Festbetoneigenschaften bestimmt.

Im Anschluss an den Bau der Versuchsstrecke wurde die Umsetzbarkeit der im Vorfeld herausgearbeiteten Einzelprozesse analysiert und Anpassungen für zukünftige Baumaßnahmen mit OPB definiert. Zur weiteren Charakterisierung der Versuchsstrecke wurden entstandene Risse lokalisiert und durch regelmäßige in-situ Messungen überwacht. Zur Untersuchung der Materialeigenschaften des OPB wurden Bohrkern aus der Strecke entnommen.

Diese Daten bildeten die Eingangsdaten für eine Finite Elemente Simulation des Rissverhaltens in der OPB-Schicht. Dabei wurden die praxisrelevanten Beanspruchungen, wie Witterung und Verkehr als Beanspruchungen auf das System betrachtet.

Abschließend wurde ein allgemeines Monitoringkonzept für offenporige Betondecken erarbeitet. Dieses enthält die Ermittlung der für Fahrbahndecken üblichen Gebrauchseigenschaften sowie speziell für offenporige Systeme zu untersuchende Kennwerte. Zudem wurden Hinweise zur Anwendbarkeit standardisierter Verfahren gegeben.

### **Analysis of a potential process for reliable construction of quieter roads in concrete paving using pervious concrete**

The sensitivity of the population towards road noise has increased in recent decades. The current standard construction method for concrete pavements is exposed aggregate concrete, which reduces noise by 2 dB(A) compared to normal concrete pavement. Pervious concrete pavements, however, can reduce noise levels by up to 5 dB(A).

Within the scope of this research project, the process of pervious concrete production was first worked out in order to guarantee an optimized installation when using this construction method in the future. For this purpose, information from earlier test sections were collected and evaluated in a desk study.

At the same time, an optimized pervious concrete mix design was created on the basis of an existing mix design with regard to processability while complying with the required characteristics of the hardened concrete.

Based on the results of the desk study and the experimental mix design optimization, a test section on a highway rest area was accompanied during the planning and execution phase. On the test section, the process parameters were documented and the fresh and hardened concrete characteristics were determined.

Following the construction of the test section, the effectiveness of the individual process steps were analyzed with regard to their mode of operation. To further characterize the pavement material in the test section, cracks were localized and monitored and the material was examined using drill cores and on-site measurements.

These results formed the input data for a finite element simulation of the cracking behavior in the previous concrete layer. The practical stresses, such as weather and traffic, were considered as stresses on the system.

Finally, a general monitoring concept for use on pervious concrete pavements was developed. It contains the determination of typical performance characteristics for road pavements as well as performance characteristics specific to pervious pavements. In addition, information was provided on the applicability of standardized methodologies for pervious structures.

## Summary

### Analysis of a potential process for reliable construction of quieter roads in concrete paving using pervious concrete

#### Task definition

Concrete road pavements represent a durable and low-maintenance construction, especially on highly loaded traffic routes. At the same time, noise protection is becoming increasingly important, rising its relevance for noise-reducing road surfaces. With regard to noise protection requirements, only exposed aggregate concrete pavements are currently considered in the regulations for concrete construction as noise-reducing construction methods with a so-called DStrO correction value of -2 dB(A). Pervious road surfaces show a level reduction of up to 5 dB(A) compared to a similarly textured, dense surface. This results in the task of achieving a reliable producibility of pervious concrete (PC).

Within the framework of the research project "Analysis of a potential process for reliable construction of quieter roads in concrete paving using pervious concrete", the entire process chain was analysed and optimized based on findings from extensive literature research on previous test sections. At the same time, an optimized PC mix design was created based on an existing mix design. The focus here lay on a consistent workability right up to installation even with changing boundary conditions and sufficient hardened concrete characteristics to meet existing requirements.

Based on the results of this preliminary work, a test section on a motorway parking lot was accompanied in the planning and execution. Within the framework of this test, the determined characteristic values were implemented and their effectiveness was subsequently evaluated. Numerical simulations using the finite element method were used to generate extended insights into the crack behaviour of an open-pored top layer of concrete under practical loading by temperature, traffic and a combination of both.

#### Research methodology

Taking into account the special features of a pervious, novel concrete pavement, an overall

analysis of the process chain for the production of such a pavement was at first carried out. In particular, the aspects of concrete production in the context of the targeted adjustment of fresh concrete properties as well as transport, mixing, paving and sealing technology and after treatment were taken into account. As a result, the characteristic parameters and specifications for the above-mentioned processes were derived respectively determined for a process-optimized installation of the PC.

The experience gained so far in the production of demonstrators and test sections as well as the findings gained in the process chain analysis were applied and evaluated in a newly constructed test section on a highway rest area in southern Bavaria. Based on the process analysis and the resulting conclusions for the optimization of the individual processes, characteristic values for the construction of the test section were defined. To plan and coordinate the scheduled construction project, a concept for the construction of the test was developed in advance and coordinated with all involved project participants. This included the composition of the pavement structure, the paving and compaction technology to be applied and the concrete mix design to be used, which had previously been optimized in the laboratory on the basis of a reference provided by the customer. The main focus here was on improving the robustness of the highly sensitive concrete mix design. The mix design was further developed in the laboratory and tested under changing external conditions such as ambient temperature and humidity. Furthermore, the formulation had to meet the requirements placed on the hardened concrete.

Furthermore the necessary coordination with the client and the executing construction company was accompanied during the planning and documentation of the test section. The construction of the test section was accompanied, documented and evaluated in terms of construction operation, structural engineering and construction material on the basis of the determination of the relevant material parameters. The results of the initial, self-monitoring and control audits were analysed in the context of the effectiveness of the upstream process optimization. Supplementary investigations for the evaluation of the test section as well as the installation of temperature sensors and crack width measurements formed the basis for a modelling of the track with the finite element method. Finally, a

general concept for the monitoring of pervious concrete sections were developed.

## Test results

Characteristic parameters have been defined from the literature research and have found their way into the planning of the test section. It turned out that the paving of PC was carried out on pervious test section with a road paver with a modified high compaction screed on an existing sub-concrete layer. The information from the literature is mostly only empirical values without comparable research results. This contained only little information on the long-term behaviour, since most of the sections were only test fields or were already rebuilt after a few years of operation. The only section currently open to the public was apparently considered and showed popout from concrete pavement in some areas. This section is located on a highway rest area and was built in 2016.

The mix design to be optimized was first examined for its weak points under changing temperature and humidity conditions. Here, a soft and robust consistency could be determined, which was, however, strongly inclined to sedimentation of the cement paste and showed a too low void content. By reducing the water content and thus the volume of cement paste, a formulation was designed that meets the basic requirements of the PC with regard to processing and hardened concrete properties. This mix design was further developed by varying different additives. There were four recipes that were classified as suitable in principle. Due to the constant fresh concrete properties with good hardened concrete properties, a formulation with a partial volumetric replacement of the cement by limestone powder was defined for further investigations under different boundary conditions as previously selected. The recipe proved to be robust against fluctuations in humidity, whereas it showed poor processability at elevated temperatures. Due to the planned PC installation in the early morning hours, this was considered uncritical and the recipe for the test section was recommended.

The PC was initially installed on a test field for fine adjustment of the machines and the mix design, which was then dismantled immediately afterwards. On the following day, the main installation took place.

At the end of the test section installation, a suitable concrete was delivered, which was able to produce a homogeneous surface. In this case, the mix design closely corresponded to the laboratory mix design. During the main paving operation, strongly fluctuating fresh concrete properties were detected, after which the water content of the mix design was repeatedly adjusted at the mixing plant. Accordingly, the samples prepared for monitoring did not give a uniform picture. In general, the requirements regarding strength and void content were not met. This was confirmed by drill cores from the test section taken in addition.

In the course of the construction project, the researcher installed two measuring points to investigate the temperature profile in the road pavement construction. Over several months, the temperatures were recorded and evaluated over the entire construction of the road surface. Also a crack profile of the test section was created. Measuring pins were set at the cracks in the PC to measure the crack widths under different weather conditions. The data obtained on the test section were further used as input parameters for the calibration of the numerical simulation.

The numerical simulation was carried out with the finite element (FE) method and the program "ANSYS Workbench". The created 3D model shows the complete length and width of the test section. With this model, extended knowledge was gained regarding the practice-relevant load combination of temperature and traffic load. The crack development and the load bearing behaviour of a PC layer depends on many aspects, which were determined by changing the parameters during the simulation. Factors such as slab length, temperature difference, temperature gradient, thermal expansion coefficient and the properties of the base concrete are to be mentioned. The results from the simulation showed that a traffic load is not sufficient to form a crack in the PC, since only compressive stresses are present under traffic load in the PC. Under the investigated boundary conditions, the test section shows a predictable crack development over the existing transverse joints of the concrete blinding. In order to be able to give a prognosis for a long-term behaviour, the material parameters of the PC would have to be adapted to reflect a longer service life.

The monitoring concept developed comprises the general characteristics of road surfaces, which have been supplemented by the properties relevant for

PC surface. In addition to the usual properties for road pavements, such as grip, evenness and noise reduction potential, the concept also contains characteristic values to be determined specifically for PC, such as the degree of soiling and the associated cleaning requirements as well as the drainage properties. In addition, information was provided on any necessary adjustments to the measurement setup or the evaluation of the measurement data for PC. In this context, hints on the applicability of standardized procedures were explained.

### **Conclusion for practice**

The compilation of projects carried out that none of these sections were durable. However, it is hardly possible to make more precise statements about the long-term development of the sections, as these were usually not under traffic or were rebuilt directly after construction respectively after a few years. In addition, literature on the subject exists only to a very limited extent. The results of the literature research showed, however, that frequent popouts on the surface occur and that the cracks from the concrete blinding break through. Generally the grains break out in the area of the crack edge, because there is no support to the neighbouring grain any more. Regular long-term monitoring of PC sections would be essential for predicting material behaviour during operation.

The mix design showed a positive result in the laboratory with regard to the desired requirements. However, the experience gained has shown that the laboratory conditions cannot be transferred exactly to the production of the PC in the mixing plant and thus to practice. With regard to the robustness and processability of the mix design under practical conditions, it must be examined more closely in a large-scale trial by production in a mixing plant.

The experience gained with the test section shows that a close dialogue between machine technicians and concrete technicians is necessary in order to better coordinate the requirements and boundary conditions. In a closer cooperation it can be worked out how the consistency and workability of the concrete should be so that it can be paved on schedule and level with the machines.

It is thus recommended, that large-scale mixing trials and test sections should be built as part of further research projects. This allows the

coordination of the interaction between the PC material and the technological aspect, such as the placement method.

The knowledge gained in this research project about the PC construction method should serve as a basis for further research projects in order to establish this noise-reducing construction method as a standard construction method in the future.



## Inhalt

<b>Formeln</b> .....	13	4.1	Zielstellung.....	31
<b>1 Aufgabenstellung</b> .....	15	4.2	Definition einer Referenzrezeptur .....	31
1.1 Gesamtziel.....	15	4.3	Bewertung der eingesetzten Komponenten.....	31
1.2 Methodik des Vorgehens .....	16	4.4	Betonherstellung und Versuchsablauf .....	32
1.3 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung .....	16	4.5	Frischbetonuntersuchung an der Referenzrezeptur .....	32
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> .....	17	4.5.1	Untersuchung der Robustheit gegenüber Temperaturschwankungen.....	32
2.1 Allgemein .....	17	4.5.2	Untersuchung der Robustheit gegenüber Änderungen im Wassergehalt.....	33
2.2 Abgrenzung Offenporiger Beton und Dränbeton .....	17	4.5.3	Visuelle Mischungsstabilität und Hohlraumgehalt.....	33
2.3 Reifen-Fahrbahngeräusch .....	18	4.6	Rezepturoptimierung.....	34
<b>3 Zusammenstellung der Erfahrungen aus bereits erstellten Demonstratoren und Versuchsstrecken</b> .....	19	4.6.1	Reduktion des Leimgehalts.....	34
3.1 Versuchsstrecke BAB A 5, bei Durlach (Karlsruhe) - Bruchsal, 1994 .....	19	4.6.2	Zugabe von Microsilica .....	35
3.2 Hockenheimring, 2002 .....	19	4.6.3	Zugabe von Kalksteinmehl.....	36
3.3 Düren B 56, Erprobungsstrecke, 2002 .....	20	4.7	Festbetonuntersuchungen .....	37
3.4 Minnesota Road Research Project, 2009 .....	21	4.8	Rezepturempfehlung für den baupraktischen Einsatz an der PWC-Anlage Brunngras.....	38
3.5 Straßenbahn-Teststrecke in Brüssel, 2010 .....	22	4.8.1	Untersuchung der Robustheit gegenüber Änderungen im Wassergehalt.....	38
3.6 Bebenroth-Tunnel, 2013 .....	22	4.8.2	Untersuchung der Robustheit gegenüber Temperaturschwankungen.....	38
3.7 BASt OPB-Modellstraße – Halle 7, 2013 .....	22	4.9	Rezeptur für die Versuchsstrecke .....	39
3.8 Versuchsstrecke Mainz-Amöneburg, Dyckerhoff AG, 2013 .....	24	4.10	Zusätzliche Untersuchungen .....	39
3.9 Versuchsstrecke, PWC Silberbach Nord BAB A 6, 2016.....	25	<b>5</b>	<b>Prozesskette OPB</b> .....	40
3.9.1 Allgemeines .....	25	5.1	Unterlage des OPB .....	40
3.9.2 Offenporiger Beton .....	26	5.2	Einbau des OPB .....	41
3.9.3 Anschlüsse an die angrenzenden Flächen .....	28	5.2.1	Allgemeines .....	41
3.9.4 Begutachtung der OPB-Fläche .....	29	5.2.2	Einbau.....	41
3.10 duraBASt, 2017 .....	30	5.2.3	OPB-Einbau mit Straßenfertiger .....	42
<b>4 Optimierung der OPB-Rezeptur</b> .....	31	<b>6</b>	<b>Begleitung der Planung einer Versuchsstrecke mit OPB</b> .....	45
		6.1	Konzept Versuchsstrecke OPB, PWC-Anlage Brunngras.....	45

6.1.1	Motivation und Zielsetzung .....	45	7.3.8	Haupteinbau OPB (06.06.2018).....	63
6.1.2	Randbedingungen der Versuchsstrecke.....	46	7.3.9	Nachbehandlung.....	63
6.2	Konzepterstellung zur Planung und Ausführung der Baumaßnahme mit Offenporiger Oberbetonschicht.....	46	7.3.10	Auswaschen des oberflächlichen Zementleims .....	63
6.2.1	Allgemeine Informationen .....	46	7.3.11	Anschlussbereiche.....	64
6.2.2	Unterbeton .....	46	7.4	Materialüberwachung OPB .....	64
6.2.3	Haftbrücke.....	47	7.4.1	Allgemeines .....	64
6.2.4	Betonmischwerk.....	48	7.4.2	Probefeld.....	65
6.2.5	OPB Rezeptur.....	48	7.4.3	Haupteinbau.....	65
6.2.6	Probemischung OPB .....	48	7.5	Auswertung der Temperaturmessung .....	70
6.2.7	Einbau Probefeld OPB.....	48	7.6	Dokumentation der Rissentwicklung.....	71
6.2.8	Reinigung des Unterbetons .....	48	7.6.1	Einbau Messtechnik.....	71
6.2.9	Transport des OPB .....	48	7.6.2	Auswertung .....	72
6.2.10	Einbau des OPB .....	49	<b>8</b>	<b>Parameterstudie zur Rissentwicklung mit FEM</b> .....	73
6.2.11	Nachbehandlung.....	49	8.1	Motivation und Zielsetzung .....	73
6.2.12	Anschlussbereiche.....	50	8.2	FEM Simulation.....	74
6.2.13	Messstellen .....	51	8.2.1	Allgemeines .....	74
<b>7</b>	<b>Begleitung der Ausführung der Versuchsstrecke</b> .....	53	8.2.2	Materialdaten .....	74
7.1	Motivation und Zielsetzung .....	53	8.2.3	Verkehrslast .....	75
7.2	Unterlage und vorbereitende Maßnahmen.....	53	8.2.4	Temperaturbelastung .....	76
7.2.1	Frostschuttschicht .....	53	8.3	Das FEM-Modell .....	77
7.2.2	Schlitzrinne .....	54	8.3.1	Geometrie .....	77
7.2.3	Asphalttragschicht.....	54	8.3.2	Kontakte.....	77
7.2.4	Unterbeton .....	54	8.3.3	Vernetzung.....	78
7.2.5	Reinigung des UB.....	55	8.3.4	Lagerbedingungen .....	78
7.2.6	Einbau der Messtechnik.....	56	8.4	Verkehrslast .....	79
7.3	Einbau OPB .....	57	8.4.1	Kalibrierung.....	79
7.3.1	Allgemeines .....	57	8.4.2	Last .....	80
7.3.2	Ablauf.....	58	8.4.3	Ergebnis.....	80
7.3.3	Mischwerk .....	58	8.5	Temperaturbelastung .....	83
7.3.4	Haftbrücke.....	58	8.5.1	Kalibrierung.....	83
7.3.5	Einbaufertiger.....	59	8.5.2	Belastung .....	83
7.3.6	Einbaubohle .....	60	8.5.3	Ergebnis.....	84
7.3.7	Probefeldeinbau (05.06.2018) .....	60	8.6	Kombination Verkehrslast und Temperaturbelastung .....	86
			8.6.1	Allgemeines .....	86

8.6.2	Ergebnis.....	86	<b>11 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	103
8.7	Fazit .....	89	<b>Literatur.....</b>	106
<b>9</b>	<b>Konzept Eigenüberwachung und Monitoring .....</b>	90	<b>Bilder .....</b>	110
9.1	Motivation und Zielsetzung .....	90	<b>Tabellen.....</b>	113
9.2	Allgemeines .....	90		
9.3	Prüfungen zur Materialcharakterisierung.....	91		
9.3.1	Frischbetonprüfung .....	91		
9.3.2	Festbetonprüfung.....	91		
9.4	Streckencharakterisierung vor Verkehrsfreigabe.....	92		
9.5	Untersuchungen während der Betriebsphase .....	92		
9.5.1	Festigkeitsermittlung, Ermüdung .....	93		
9.5.2	Wasserdurchlässigkeit .....	93		
9.5.3	Längs- und Querebenheit .....	93		
9.5.4	Texturerfassung .....	95		
9.5.5	Rissaufnahme .....	95		
9.5.6	Griffigkeitsmessungen.....	95		
9.5.7	Lärmmessungen .....	95		
9.5.8	Tragfähigkeitsmessungen.....	96		
9.5.9	Reinigung der OPB Schicht .....	98		
9.5.10	Visuelle Begutachtung der Strecke.....	98		
<b>10</b>	<b>Erkenntnisse aus der Versuchsstrecke .....</b>	98		
10.1	Vorbereitende Tätigkeiten .....	98		
10.2	OPB-Rezeptur.....	98		
10.3	Mischen.....	99		
10.4	Transport.....	100		
10.5	Haftbrücke.....	100		
10.6	Maschinentchnik .....	100		
10.7	Nachbehandlung.....	101		
10.8	Oberflächenbehandlung.....	102		
10.9	Randbereiche der OPB-Fläche.....	102		
10.10	Aktueller Stand.....	103		
10.11	Zusammenfassung .....	103		



## Formeln

Symbol	Dimension	Erklärung
$\alpha$	[-]	Reibungsfaktor
$\alpha_T$	[1/K]	Temperaturdehnzahl
AK	[-]	Verbundfaktor
E	[N/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul (auch E-Modul)
$E_{v2}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Verformungsmodul
h	[mm]	Dicke der Schicht
k	[N/mm <sup>3</sup> ]	Bettungsmodul
L	[mm]	Länge
$\Delta L$	[mm]	Längenänderung
$\mu$	[-]	Reibungsbeiwert
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung meist als Biegezugspannung
$\Delta t$	[K/mm]	Temperaturänderung pro mm
$\Delta T$	[K]	Temperaturänderung



## 1 Aufgabenstellung

Betonfahrbahndecken stellen sehr dauerhafte und wartungsarme Oberbaukonstruktionen für den Straßenbau dar. Besonders auf hoch belasteten Verkehrswegen, bei denen die Anzahl an verkehrsbehindernden Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen während der vorgesehenen Nutzungsdauer von 30 Jahren auf ein Minimum reduziert werden sollte, weist die Beton- gegenüber der Asphaltbauweise Vorteile auf. Hinsichtlich der Anforderungen an den Lärmschutz sind im Regelwerk für die Betonbauweise derzeit nur Waschbetonfahrbahndecken als lärmindernde Bauweise mit einem sogenannten DStrO-Korrekturwert von -2 dB(A) verankert. Allgemein ist jedoch bekannt, dass offenporige Fahrbahnbeläge gegenüber einer gleichartig texturierten, dichten Oberfläche eine Pegelminderung von ca. -5 dB(A) aufweisen können. So kommen offenporige Deckschichten in der Asphaltbauweise mittlerweile standardisiert zur Anwendung. Um eine Alternative zu den offenporigen Belägen der Asphaltbauweise zu etablieren, wurden in der Vergangenheit im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben lärmindernde, offenporige Betonfahrbahnbeläge entwickelt und erprobt. Hiermit soll insbesondere den Straßenbauverwaltungen trotz steigender Anforderungen an den Lärmschutz der notwendige Gestaltungsspielraum bei der straßenbautechnischen Ausführung ermöglicht werden.

Eine zweischichtige Bauweise unter Verwendung eines speziellen offenporigen Betons (OPB) ist hinsichtlich der Betoneigenschaften, der Konstruktion und den zu verwendenden Einbautechnologien grundsätzlich von den standardisierten Bauweisen für Betonfahrbahndecken abzugrenzen. Im Zuge der bisherigen Forschungsaktivitäten zur Entwicklung eines offenporigen Betons für den Einsatz auf hochbeanspruchten Bundesautobahnen wurden – aufbauend auf der Entwicklung und labortechnischen Prüfung einer geeigneten Rezeptur – sowohl erste Demonstratoren als auch erste OPB-Versuchsstrecken hergestellt. Bei der Herstellung derartiger Versuchsfelder bzw. -strecken konnten jedoch noch Defizite in der Gesamtprozesskette aufgezeigt werden. Hier sind insbesondere eine hohe Sensibilität der Betonrezeptur gegenüber äußeren Randbedingungen zum Beispiel Witterung und Temperatur, die Lagerung der Ausgangsstoffe, der Betontransport sowie die Einbautechnik zu nennen. Hierbei ist insbesondere anzumerken, dass die OPB-Schicht aktuell nicht mit einem Gleitscha-

lungsfertiger, wie im konventionellen Betonstraßenbau üblich, sondern mit einem Straßenfertiger mit speziell entwickelter Hochverdichtungsbohle auf einen bereits erhärteten und gekerbten Unterbeton betoniert wird. Diese Besonderheiten beeinflussen die Prozesskette für die Herstellung eines Betonfahrbahnbelages mit OPB maßgeblich und verlangen daher eine grundlegend verschiedene Herangehensweise gegenüber dem konventionellen Betonstraßenbau.

Die Dauerhaftigkeit der Bauweise mit OPB konnte noch nicht abschließend nachgewiesen werden. Aus heutiger Sicht ist jedoch davon auszugehen, dass auch hinsichtlich der konstruktiven Aspekte weiterer Forschungsbedarf besteht. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen die Prozesskette zur Herstellung einer Oberbaukonstruktion unter Verwendung eines OPB unter Berücksichtigung der oben genannten Besonderheiten im Vergleich zu standardisierten, herkömmlichen Bauweise für Betonfahrbahndecken analysiert sowie daraus abgeleitete Möglichkeiten zur Optimierung an einem realen Praxisbeispiel untersucht und bewertet werden.

(Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017b)

### 1.1 Gesamtziel

In der vorliegenden Forschungsarbeit soll eine Optimierung der bisher verwendeten OPB-Rezeptur mit Schwerpunkt auf der Verbesserung der Frischbetoneigenschaften und eine Analyse der gesamten Prozesskette zur Erstellung einer Offenporigen Oberbetonschicht im Hinblick auf deren Optimierungspotenzial durchgeführt werden. Um zukünftig einen prozessoptimierten Einbau durchführen zu können, wird zunächst eine Recherche bezüglich bereits ausgeführter Projekte mit OPB bzw. Dränbeton durchgeführt. Nach der Entwicklung einer optimierten Betonrezeptur werden auf dieser Grundlage und basierend auf weiteren Recherchen bezüglich möglicher Maschinen- und Einbautechniken charakteristische Kenngrößen für die Betonherstellung und dessen Einbau abgeleitet und festgelegt.

Die gesamte Prozesskette soll so optimiert werden, dass die Offenporige Oberbetonschicht unter den am Einbauort vorherrschenden und wechselnden Einbaubedingungen zielsicher und praxistauglich hergestellt werden kann.

Die weiterentwickelte Betonrezeptur sowie die optimierte Prozesskette werden anschließend beim Bau einer Versuchsstrecke angewendet und deren Wirksamkeit bewertet. Durch numerische Simulationen mit der Methode der Finiten Elemente sollen erweiterte Erkenntnisse zum Rissverhalten der offenporigen Oberbetonschicht unter praxisrelevanten Beanspruchungskombinationen, wie Witterung und Verkehr, generiert werden. Um zukünftig den Zustand und die Gebrauchstauglichkeit zielgerichtet erfassen und dokumentieren zu können, mit dem Ziel langjährige Erfahrungen bezüglich der Dauerhaftigkeit Offenporiger Oberbetonschichten zu sammeln, wird nach der Fertigstellung der Versuchsstrecke ein Konzept zur systematischen Bewertung des Zustands der Fahrbahnkonstruktion mit OPB erarbeitet.

## 1.2 Methodik des Vorgehens

Unter Beachtung der Besonderheiten eines offenporigen, neuartigen Betonfahrbahnbelages soll zunächst eine gesamtheitliche Analyse der Prozesskette zur Herstellung einer derartigen Fahrbahndecke durchgeführt werden. Hierbei sind insbesondere die Aspekte der Betonherstellung im Kontext der zielgerichteten Einstellung von Frischbetoneigenschaften sowie des Transports, der Misch-, Einbau- und Verdichtungstechnik sowie der Nachbehandlung zu beachten und zu bewerten. Im Ergebnis sollen die für einen prozessoptimierten Einbau des offenporigen Betons charakteristische Kenngrößen und Festlegungen zu den oben genannten Prozessen abgeleitet beziehungsweise bestimmt werden.

Die bisher gesammelten Erfahrungen bei der Herstellung von Demonstratoren und Versuchsstrecken und auch die in der Prozessanalyse gewonnenen Erkenntnisse sollen bei einer weiteren, neu anzulegenden Versuchsstrecke in Südbayern, angewendet und bewertet werden. Hierbei sind – basierend auf der Prozessanalyse und den daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen – insbesondere die Möglichkeiten zur Optimierung einzelner Prozesse an einem Praxisbeispiel zu untersuchen. Zur Planung und Abstimmung der geplanten Baumaßnahme ist im Vorfeld ein Konzept zur Herstellung der Versuchsstrecke zu entwickeln und mit dem Bauherrn (Autobahndirektion Südbayern) sowie dem Auftraggeber (BAST) abzustimmen. Dieses Konzept hat neben den allgemeinen Planungsunterlagen

auch weitere Angaben der Gesamtprozesskette zu beinhalten:

- Die zu verwendende OPB-Rezeptur auf Basis festzulegender charakteristischer Frisch- und Festbetonkennwerte, welche durch Laborprüfungen zu belegen sind
- Den Aufbau der zweischichtigen Oberbaukonstruktion (wie unter anderem den Schichtenaufbau und die Fugenausbildung)
- Die anzuwendenden Einbau- und Verdichtungstechniken

Die weiteren Einzelprozesse sind bereits bei der Planung der Versuchsstrecke zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind während der Bauvorbereitung und Bauabwicklung die erforderlichen Abstimmungen mit dem Bauherrn und der ausführenden Baufirma zu treffen. Der Forschungsnehmer hat die Herstellung der Versuchsstrecke sowohl baubetrieblich, bautechnisch und baustofflich anhand der Ermittlung der maßgebenden Materialkennwerte (einschließlich der Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehaltes) zu dokumentieren und zu beurteilen. Die Ergebnisse der durch den Auftragnehmer durchzuführenden Erst-, Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen sind im Kontext der Wirksamkeit der vorgeschalteten Prozessoptimierung zu beurteilen. Ergänzende Untersuchungen zur Beurteilung der Einbauqualität (zum Beispiel Bestimmung des E – Modul und der Haftzug- und Verbundfestigkeit) führt der Forschungsnehmer in Abstimmung mit dem Auftraggeber durch. Durch den Einbau von Messtechnik sollen Erkenntnisse zur Rissentwicklung in offenporigen Betondecken gewonnen werden. Diese werden im Anschluss der Baumaßnahme für eine Parameterstudie auf Basis der Methode der Finiten Elemente verwendet. Nach Fertigstellung der Versuchsstrecke ist zudem ein Konzept für ein systematisches Monitoring zur Bewertung der Dauerhaftigkeit der Versuchsstrecke zu erarbeiten.

## 1.3 Wirtschaftliche, wissenschaftliche und technische Bedeutung

Eine Optimierung der Prozesskette steigert die Dauerhaftigkeit der Bauweise mit OPB und reduziert somit die Erhaltungskosten. Ein OPB, welcher vergleichbar lärmarm aber dauerhafter als eine offenporige Asphaltdeckschicht ist, kann in seiner Rezeptur und der Einbautechnik so verbessert wer-

den, dass eine breite Anwendung aufgrund der dann gegebenen Praxistauglichkeit möglich wird.

Des Weiteren ergeben sich durch den Einsatz offenporiger Oberbetonschichten zusätzlich zu den lärmreduzierenden Eigenschaften auch Vorteile bei der Verkehrssicherheit bei Niederschlagsereignissen. Das Regenwasser auf der Fahrbahn wird durch die offenporige Struktur des Belags abgeleitet und Sprühfahnen und Aquaplaning werden vermieden. Die Herstellung der Versuchsstrecke mit einer offenporigen Oberbetonschicht auf Grundlage der zuvor optimierten Prozesskette und Betonrezeptur unter wissenschaftlicher Begleitung führt zur Erweiterung theoretischer und praktischer Erfahrungen mit dem langfristigen Ziel der Aufnahme der Bauweise in das Regelwerk.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Allgemein

Dränbeton (DB) und Offenporiger Beton (OPB) sind haufwerksporige Betone die durch ihren hohen Hohlraumgehalt definiert sind. Die Beschaffenheit ergibt sich durch die ausschließliche Verwendung von ein oder zwei eng begrenzten Korngruppen (Ausfallkörnung). Dies wird als Einkornbeton bezeichnet. (HeidelbergCement AG, 2017)

Die Einzelkörner sind dabei nur an den Kontaktstellen durch eine dünne Zementsteinschicht miteinander verbunden. Dieser gegebenenfalls polymer- und faserverstärkte Zementstein sorgt für eine stabile und dauerhafte Verbindung zwischen den Einzelkörnern (RIFFEL, 2012).

Der Hohlraumgehalt ist dabei von der Kornform, der Korngrößenverteilung (Ausfallkörnung), dem Ansteifverhalten des Zementes sowie dem Energieeintrag in Abhängigkeit der unterschiedlichen Einbautechnologien (statisch, dynamisch) abhängig (EHRLICH & WIELAND, 2014).

Der oberflächenzugängliche Hohlraumgehalt, der für eine gute Dränagewirkung und Schallabsorption zur Lärmreduzierung nötig ist, sollte zwischen 15 – 25 Vol.-% liegen (RIFFEL, 2012).

Diese haufwerksporigen Betone werden zur Entwässerung von Verkehrsflächen sowie für die Minderung der Lärmemissionen im Straßenverkehr eingesetzt (HeidelbergCement AG, 2017). Die dauerhafte Abführung des Niederschlagwassers führt in der Folge zur Verminderung von Sprühfahnen und Aquaplaning-Gefahr in abflussschwachen Streckenbereichen.

### 2.2 Abgrenzung Offenporiger Beton und Dränbeton

Beim Dränbeton basiert der Systemaufbau auf einer durch alle Schichten vorhandene Wasserdurchlässigkeit. Durch die Wasserdurchlässigkeit liegt keine versiegelte Verkehrsfläche vor.

Anders verhält sich der Schichtaufbau beim OPB. Hier wird auf einen dichten Unterbeton, zumeist aus Beton, eine dünne, ca. 7 cm dicke, faserverstärkte und polymermodifizierte Schicht aus Beton aufgebracht (THIS-Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau, 2018). Die Hohlräume dieser Schicht führen zu einer Lärmimmissionsreduzierung aus dem Straßenverkehr, vergleichbar mit der Lärmmin-

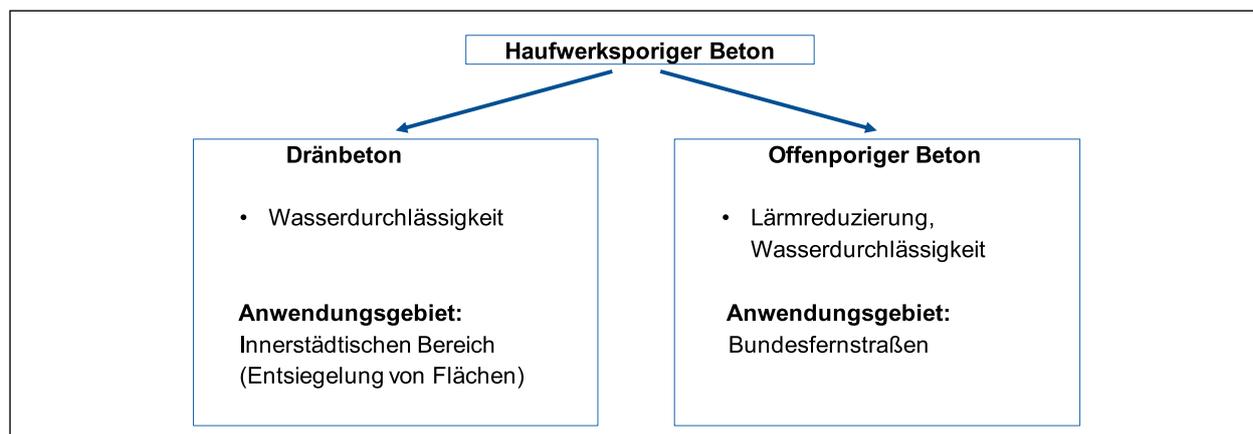


Bild 1: Abgrenzung Dränbeton und Offenporiger Beton

derung an Fahrbahnen mit offenporigem Asphalt (InformationsZentrum Beton GmbH, 2013).

Die Abgrenzungen von OPB zu dB sind in Bild 1 dargestellt.

Diese Unterscheidung wird im gesamten Bericht verwendet. In früheren Stadien der Entwicklung wurde nur von dB gesprochen. Weshalb in dieser Arbeit teilweise der Begriff OPB verwendet wird, während in der entsprechenden Literatur der Begriff Dränbeton verwendet wurde oder vice versa.

### 2.3 Reifen-Fahrbahngeräusch

Die Reduzierung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches wird konventionell durch eine gezielte Ausbildung von Oberflächentexturen und -eigenschaften erreicht.

Der Offenporige Beton zählt zum aktiven Lärm-schutz. Hierbei spielt die Geräuschminderung am Emissionsort eine zentrale Rolle. Beim OPB führt die texturunabhängige akustische Eigenschaft der Fahrbahndecke, der oberflächlich zugängliche Hohlraumgehalt in der Deckschicht, zu einer Schallpegelminderung durch Absorption. (RIFFEL, 2012)

Aufgrund der schallabsorbierenden Wirkung des offenporigen Fahrbahnbetons werden sowohl die Entstehung der Reifen-Fahrbahngeräusche als auch die Schallabstrahlung günstig beeinflusst.

Das Geräuschminderungspotenzial offenporiger Fahrbahnbetone kann bis zu sieben Dezibel betragen (THIS-Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau, 2018).

Die Entstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches ist ein komplexer Vorgang, der mit einer Vielzahl von Parametern und deren gegenseitigen Einflüssen beschrieben werden kann (siehe Bild 2).

Für die Entstehung des Rollgeräusches gibt es zwei Ursachen. Einerseits regt die Megatextur (Wellenlängenbereich 5 bis 50 cm) der Straßenoberfläche den Reifen zu tieffrequenten Schwingungen, zu einem Dröhnen, an, andererseits wird bei sehr geringer Makro- und Megatextur die Luft in der Reifenaufstandsfläche komprimiert und entweicht beim weiteren Abrollvorgang (Air-Pumping). Hierdurch werden in erster Linie hochfrequente Schwingungen erzeugt. (SIEBEL & EICKSCHEN, 1995)

Bei der Überrollung der Fahrbahnoberfläche, werden die Reifen durch den Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche in hörbare Schwingungen versetzt. Gleichzeitig wird die Luft unter dem Reifen verdichtet und entweicht in der Folge. Auch dieses sogenannte Air-Pumping trägt zur Geräuschentwicklung bei. Eine geschlossene Oberfläche der Fahrbahn reflektiert die entstehenden Schallwellen. Der Winkel zwischen Reifen und Fahrbahn wirkt dabei wie ein Horn und verstärkt die Rollgeräusche zusätzlich (BAST) (siehe Bild 3). Hat die Oberflächenschicht Hohlräume, kann die verdich-

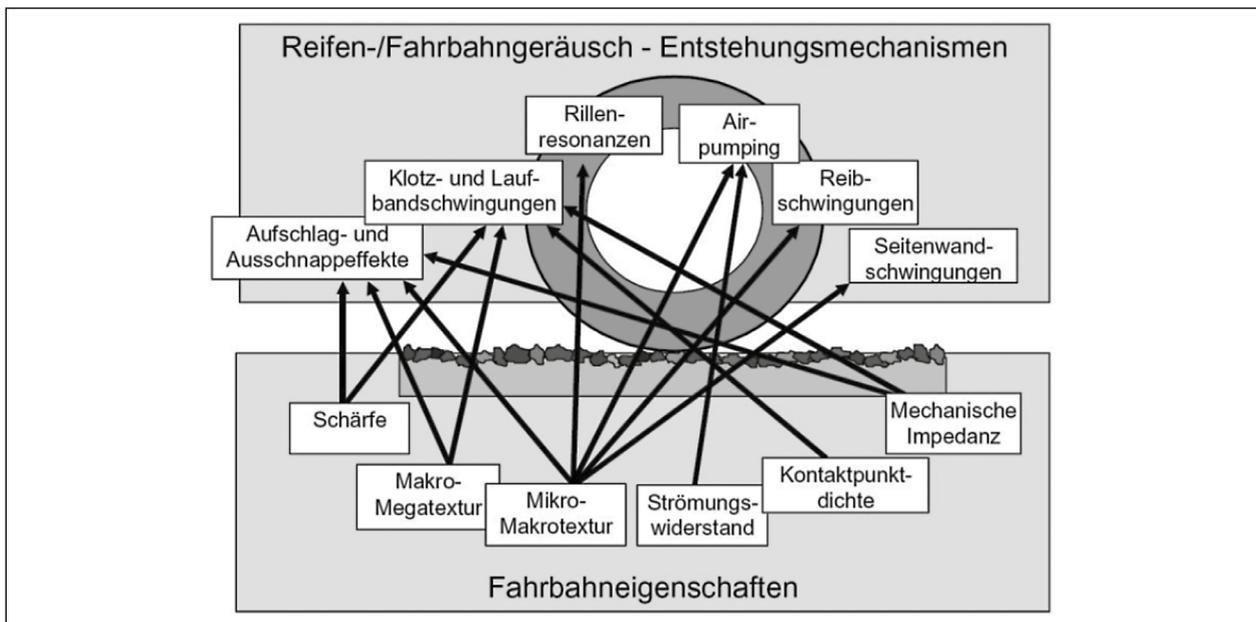


Bild 2: Entstehungsmechanismen Reifen-Fahrbahngeräusch (MÜLLER BBM)

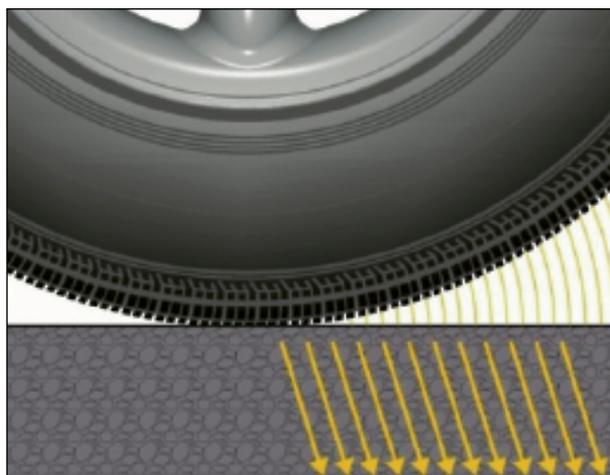


Bild 3: Horneneffekt beim Rollgeräusch (WIELAND & BECKER, 2018)

tete Luft zwischen Reifen und Oberfläche in die Fahrbahndeckschicht entweichen. Zusätzlich werden die Schwingungsgeräusche der Reifen in den offenen Hohlräumen weitgehend absorbiert (B\_I MEDIEN GmbH, 2016).

### 3 Zusammenstellung der Erfahrungen aus bereits erstellten Demonstratoren und Versuchsstrecken

In der Vergangenheit wurden bereits einige für Straßenfahrzeuge befahrbare Demonstratoren und Versuchsstrecken in Dränbeton oder mit offenporigen Oberbetonschichten zum Zwecke der Fortentwicklung und Verbesserung der Betonrezeptur und der einzelnen Einbauprozesse realisiert. Im Folgenden werden diese bereits ausgeführten Strecken aufgelistet und die dabei gesammelten Erfahrungen, soweit diese dokumentiert wurden und zugänglich waren, dargelegt.

Diese Zusammenstellung soll als Bewertungshintergrund für die im Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrags durchzuführende Analyse der Prozesskette und der neu zu planenden und auszuführenden Baumaßnahme mit OPB dienen. Dabei sind insbesondere aufgetretene Probleme bei der Planung und Ausführung sowie eingetretene Schäden an der Fahrbahn und deren Ursachen von Interesse.

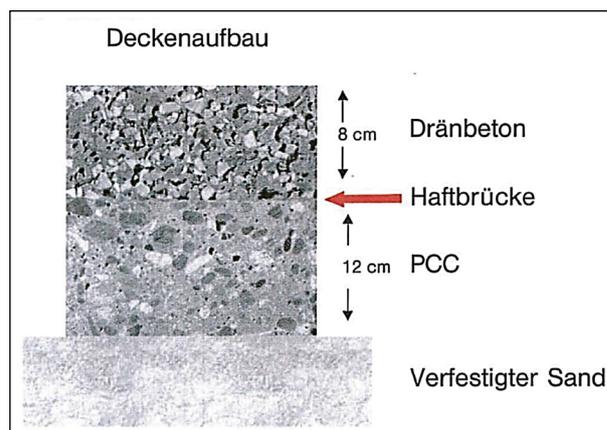


Bild 4: Aufbau der zweilagigen Betondecke (FELSCH et al., 2002)

#### 3.1 Versuchsstrecke BAB A 5, bei Durlach (Karlsruhe) - Bruchsal, 1994

Auf der BAB A 5 bei Durlach wurde im Jahr 1994 kunststoff-modifizierter offenporiger Beton als Fahrbahnbelag auf einer alten bestehenden Betontragschicht eingebaut (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004).

Weitere Informationen liegen nicht vor.

#### 3.2 Hockenheimring, 2002

Die im Folgenden aufgeführten Informationen zur Versuchsstrecke auf dem Hockenheimring wurden dem Artikel „Lärmindernde Straßenbeläge – Dränbeton am Hockenheimring“ (FELSCH, BÖHME & SCHWENNINGER, 2002) entnommen.

Im Juli 2002 wurde auf der neuen Rennstrecke des Hockenheimrings eine 700 m lange Querspange mit einer Breite von 7,50 m mit Dränbeton gefertigt.

Der geplante Fahrbahnaufbau mit einer Gesamtdicke von 20 cm entspricht keiner standardisierten Bauweise der RStO 01 (RStO 01). Die Unterlage bildet eine im Abstand von 5 m gekerbte Verfestigung, die im Mixed-in-Place-Verfahren hergestellt wurde. Der 8 cm dicke Dränbeton wurde auf einem 12 cm dicken Unterbeton aus PCC (Paver Compacted Concrete) gebaut (siehe Bild 4). Der Unterbeton wurde etwa 2 bzw. 3 Werktage vor dem Einbau des Dränbeton ausgeführt.

Der verwendete Dränbeton hat einen Zementgehalt von 340 kg/m<sup>3</sup> und einen Wasser-Zement-Gehalt

von 0,22 bis 0,26 [-] (siehe Bild 5). Der Hohlraumgehalt liegt bei etwa 25 Vol.-% mit Abweichungen von bis zu 3 Vol.-%. Des Weiteren wurden Verdichtungsgrade zwischen 97,2 und 101,1 % ermittelt. Zusätzlich wurde für eine bessere Haftung zwischen Zementstein und Splittkörnung ein polymerhaltiges Fließmittel in den Dränbeton gemischt.

Eine kunststoffmodifizierte Zementhaftbrücke der Herstellers Sika Addiment wurde zur Verbesserung des Haftverbundes des PCC und des Dränbetons unmittelbar vor dem Aufbringen des Dränbetons in die Unterlage eingebürstet. Durch das Einbürsten mit einem rotierenden Kehrwalzensystem wurde der Verbund, im Vergleich zum Aufsprühen oder anderen Verfahren, deutlich erhöht. Die Förderung zu den Auslassventilen (vor der Kehrwalze) auf dem Fertiger erfolgte in einem Umlaufsystem, bestehend aus Tank, Pumpe und Rohrleitung. Es wurden 2 - 3 kg/m<sup>2</sup> der Haftbrücke benötigt. Zur Vermeidung von Schäden im Haftbrückenfilm wurden für den Fertiger spikeartige Raupenkettens verwendet.

Im Unterbeton wurden die Fugen deckungsgleich mit den Kerben in der Verfestigung mit einer Tiefe von 5 cm geschnitten, dies entspricht circa 40 % der Deckenhöhe. Die Fugen wurden im Abstand von 5 m ohne Verdübelung ausgeführt. Ein Moosgummi in der Fuge sollte das Eindringen der Haftbrücke verhindern. Der Dränbeton wurde nicht gekerbt, um ein Ausbrechen der Gesteinskörnung an den Fugenrändern zu verhindern. Jedoch wurde davon ausgegangen, dass die Fugen aus dem Unterbeton in den Dränbeton durchschlagen werden. Dies wurde allerdings als unproblematisch eingestuft.

Der Einbau erfolgte mittels der Methode Schwimmende Einbaubohle unter Einsatz einer Hochverdichtungsbohle (SB 250 (300) TVP 2) mit Pressleistentechnik. Für den Einbau wurden beide Betonarten (PCC und Dränbeton) mit Muldenkippern aus

PCC	m <sup>3</sup> -Beton	
CEM I 32,5 R (Mainz)	330 kg	} Feuchteinwaage
0/2a Rheinsand	44 kg	
2/8 Rheinkies	517 kg	
8/16 Edelsplitt	786 kg	
Stahlfasern	40 kg	
LPS-B-2000	0,82 kg (0,25 % v. Zement)	
w/z	0,41	
Dränbeton	m <sup>3</sup> -Beton	
CEM I 32,5 R (Mainz)	340 kg	
5/8 Syenit Edelsplitt	1.557 kg (feucht)	
FM ADDIMENT	6,12 kg (1,80 %)	
w/z	0,22	

Bild 5: Betonzusammensetzung (FELSCH et al., 2002)

Stahl angeliefert. Während der 20-minütigen Fahrt von dem Mischwerk zur Baustelle wurde der Frischbeton mit Planen abgedeckt, um ein Austrocknen oder Verwässern zu vermeiden.

Der Unterbeton wurde bis zum Einbau des Dränbetons nass nachbehandelt und der Dränbeton wurde mit einem wasserhaltenden Vlies mehrere Tage abgedeckt.

### 3.3 Düren B 56, Erprobungsstrecke, 2002

Im Jahr 2002 wurde auf der Bundesstraße B 56 bei Düren eine OPB Erprobungsstrecke im Rahmen des Forschungsprojekts „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ errichtet.

Der Einbau des OPB wurde mit einem Straßenfertiger mit Kettenfahrwerk vom Typ VÖGELE SUPER 1800 durchgeführt. Eine modifizierte Hochverdichtungsbohle SB 250 TVP2 (Breite 7,50 m) wurde an den Fertiger angebaut. Stampfer, Bohlenballastierung, Bohlenvorderwand sowie die Grundeinstellung von Pressleisten und Stampfer lassen sich auf Dränbeton laut Hersteller optimal einstellen (Road News JOSEPH VÖGELE AG, 2004). In Bild 6 ist die Verdichtungsbohle abgebildet. Die Fahrbahndecke wurde fugenlos ausgeführt um Kornausbrüche in diesen Bereichen zu vermeiden (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004).

Die Aufbringung der Haftbrücke erfolgte maschinell. Diese Maschine umfasst einen Tank, in welchen die Haftbrücke während des Arbeitsvorgangs seitlich nachgefüllt werden konnte. (Road News JOSEPH VÖGELE AG, 2004) Bei dem entwickelten Konzept

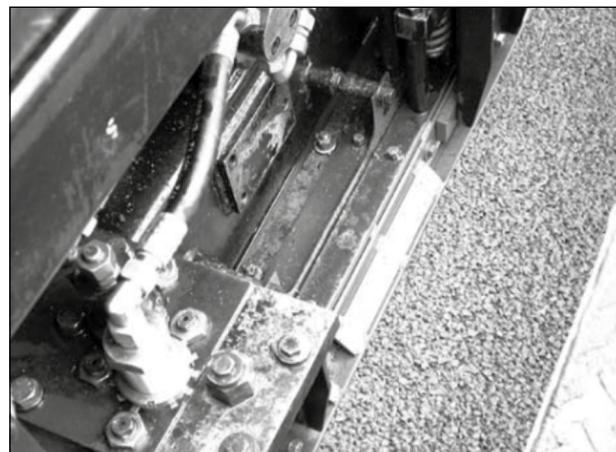


Bild 6: Verdichtungsbohle (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004)

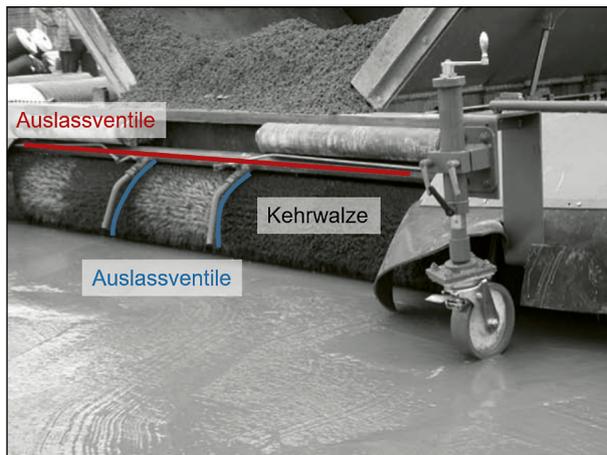


Bild 7: Kehrbürste zur Haftbrückenapplikation (in Anlehnung an Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004)

wurde in einem externen Mischer die Haftbrücke chargenweise gemischt (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004). Außerdem sorgte ein Rührwerk im Tank für die richtige Konsistenz der Haftbrücke. So lassen sich Arbeitsunterbrechungen vermeiden, die zu unerwünschten Übergängen führen. Haftbrücke und OPB werden in einem Arbeitsschritt eingebaut. Die Haftbrücke wurde durch eine Kehrwalze, die direkt vor dem Fertiger montiert wurden, auf der Oberfläche der Unterlage verteilt (siehe Bild 7). Damit der Haftbrückenfilm nicht durch das Kettenfahrwerk des Fertigers bei der Überfahrt zerstört wurde, ersetzte man die einzelnen Raupenplatten durch eine Spikes Konstruktion. (Road News JOSEPH VÖGELE AG, 2004)

Allerdings traten nach wenigen Jahren Nutzungszeit auf der Projektstrecke Probleme mit der Dauerhaftigkeit auf. Der Verbund zur Betonunterlage löste sich an mehreren Stellen, sodass in der Folge Risse aufgetreten sind. Dies führte zu Schäden in der Fahrbahn. Ein weiterer Schwachpunkt sei die Frost-Tausalz-Beständigkeit des offenporigen Gefüges und der Haftbrücke gewesen. Es konnte somit kein befriedigendes Ergebnis bezüglich der Dauerhaftigkeit erzielt werden. (Wacker Chemie AG, 2013)

Aufgrund der bereits genannten Problem musste nach circa fünfjähriger Liegedauer die Erprobungsstrecke ausgebaut werden. (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2015).

Auf dieser Erprobungsstrecke wurde eine messtechnische Pegelminderung von bis zu 7 dB(A) gegenüber einem dichten Referenzbelag gemessen (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004; RIFFEL, 2012).

Material	Menge [je m <sup>2</sup> ]	
Granit Gestein (9,5 mm)	1.334 kg	Ofentrocken
Sandanteil	134 kg	
Portland Zement	176 kg	
Flugasche	53 kg	
Hochofenschlacke	123 kg	
Cellulosefasern	0,9 kg	
Polypropylenfasern	0,9 kg	
Polycarboxylat, Betonverflüssiger	754 ml	
Luftporenbildner	355 ml	
Stabilisator	2.100 ml	
Latex-Polymer	2.100 ml	
w/z	0,29	

Bild 8: Betonzusammensetzung OPB (SCHAEFER et al.)

### 3.4 Minnesota Road Research Project, 2009

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens dem „Minnesota Road Research Project“ wurde die Leistungsfähigkeit von OPB auf einer Forschungsstrecke untersucht.

In einem Abschnitt dieser Forschungsstrecke wurde OPB auf einer Länge von 152 m auf zwei separaten Spuren eingebaut. Die nördliche Fahrbahn wird durch Verkehr belastet, die südliche Fahrbahn dagegen ist ausschließlich Umwelteinwirkungen ausgesetzt.

Der Unterbeton der Versuchsstrecke ist 165 mm dick. Die Plattenabmessungen betragen 6 m x 3,7 m. Die Fugen im Unterbeton sind mit Dübeln zur Querkraftübertragung versehen.

Die OPB Deckschicht wurde mit einer Dicke von 100 mm ausgeführt. Es wurden etwa 115 m<sup>3</sup> OPB für jeweils eine Fahrbahn benötigt. Der OPB wurde mit Fugen ausgeführt, welche an der gleichen Position wie im darunterliegenden Unterbeton angebracht sind.

Vor dem Überbau des Unterbetons wurde die Oberfläche sandgestrahlt und feucht gereinigt. Eine Haftbrücke wurde nicht aufgetragen.

In Bild 8 ist die Betonrezeptur des OPB abgebildet.

Der OPB wurde bei dieser Maßnahme mit einem Fahrnischer antransportiert. Die Gesteine waren beim Abladen mit Zementleim umhüllt und die Fasern waren durch das Mischen im Fahrnischer flächendeckend verteilt. Die OPB Schicht wurde auf eine bestehende Betondecke betoniert.

Eine Haftbrücke wurde nicht aufgetragen, die bestehende Decke wurde vor dem OPB-Überbau le-

diglich mit Wasser befeuchtet. Der OPB wurde von Hand eingebaut und die Oberfläche mit einem Walzenfertiger abgezogen. Dabei wurden 1,5 bis 5 m lange Abschnitte hergestellt, im Anschluss wurde der Walzenfertiger wieder etwa 1 m zurückgesetzt und nochmals neues OPB Material wurde aufgebracht. So wurde auf der kompletten Strecke verfahren.

Auf die Oberfläche wurde direkt nach der Herstellung flüssiges Nachbehandlungsmittel aufgesprüht.

Im Anschluss daran wurden die Fugen und die Randbereiche im OPB ausgeführt.

Anschließend hat man die Versuchsstrecke mit zwei aufeinanderliegenden Folien abgedeckt. Die Folien wurden gegen Verwehen gesichert und nach sieben Tagen entfernt.

Die Lufttemperatur beim Einbau des OPB der südlichen Spur lag zwischen 4 °C bis 12 °C. Die Betontemperatur lag bei 15 °C. Die nördliche Spur wurde 17 Tage später bei Lufttemperaturen zwischen 4 °C bis 11 °C hergestellt. Die Betontemperatur lag ebenfalls bei 15 °C.

Die beiden Spuren der Versuchsstrecke wurden mit einer Pressfuge aneinandergelagert, ohne zusätzliche konstruktive Maßnahmen.

Nach 10 Monaten (eine Winterperiode) wurde eine visuelle Kontrolle durchgeführt. An manchen Stellen traten Unregelmäßigkeiten im Fugenbereich auf, insgesamt wies die Strecke ein überwiegend gutes Erscheinungsbild auf. Dabei hatte die unbelastete Fahrbahn (südlich) ein besseres Erscheinungsbild als die belastete Fahrbahn (nördliche). Diese wurde bis zum Zeitpunkt der Begutachtung 3.092 Mal mit einem 36.300 kg schweren Fahrzeug befahren.

Der OPB hatte eine gute Drainagewirkung in vertikaler sowie in lateraler Richtung.

Die Lärmmessungen ergaben eine Lärmreduzierung im Bereich des Fahrbahnoberbaus mit OPB im Gegensatz zu herkömmlichen Betonfahrbahnen. Die befahrene Spur wies bei der Lärmmessung im März einen Wert von 98 dB(A) und im Juli einen Wert von 96 dB(A) auf. Somit war die Strecke ca. 4 dB(A) lauter, als die Fahrbahn die nicht unter Betrieb war. (SCHAEFER et al.)

### **3.5 Straßenbahn-Teststrecke in Brüssel, 2010**

Bei dem EU-Forschungsprojekt „Urban Track“ kam Offenporiger Beton als Schienen-Schallabsorber zum Einsatz. Dabei wurde der OPB zwischen den Tramschienen eingebaut (EHRLINGER, 2016).

Weitere Informationen zu diesem Projekt konnten nicht ausfindig gemacht werden.

### **3.6 Bebenroth-Tunnel, 2013**

Im Gegensatz zu den anderen bisher aufgeführten Projekten handelt es sich beim Bebenroth-Tunnel um einen Eisenbahntunnel mit Fester Fahrbahn. Es galt die Befahrbarkeit mit gummibereiften Rettungsfahrzeugen zwischen und neben den Schienen bei ausreichender Wasserdurchlässigkeit sicher zu stellen. Der Faktor der Lärmreduzierung stand hierbei nicht im Vordergrund.

Im Jahr 2013 wurde auf der Eisenbahnstrecke Göttingen – Bebra im Bebenroth-Tunnel (Länge 1.030 m) Dränbeton eingebaut.

Zwischen und neben den Schienen der Festen Fahrbahn besteht der circa 16 cm dicke Belag aus fugenlosem Dränbeton. Dies dient zum einen für die Befahrbarkeit für Rettungs- und Löschfahrzeuge, damit diese schnell und sicher zur Unglücksstelle vordringen können. Zum anderen kann durch den Dränbeton das anfallende Wasser (Schleppwasser, Kondensat, Wassereintritt an den Portalen) im Tunnel abgeleitet werden. (EHRLINGER, 2016)

Der Einbau des Dränbetons wurde mit einem Offset-Gleitschalungsfertiger durchgeführt.

Künftig könnte der OPB zusätzlich in seiner Funktion als hochwirksamer Schallabsorber auch im Bahnstreckenbereich eingesetzt werden (EHRLINGER, 2016).

### **3.7 BAST OPB-Modellstraße – Halle 7, 2013**

In der Großversuchshalle der BAST wurde 2013 ein großmaßstäblicher Demonstrator mit einer Straßenoberfläche aus OPB gebaut. Die Modellstraße hatte eine Länge von 15,84 m und eine Breite von 3,65 m. Der OPB wurde mit einer Dicke von 7 cm



Bild 9: Einbau des OPB (HOFMEISTER, 2017)

auf 22 cm Unterbeton hergestellt mit einer darunter befindlichen 30 cm Schottertragschicht.

Vor dem Einbau des OPB wurde der Unterbeton in drei Plattenfelder unterteilt und die Oberfläche für die nachträgliche Überbauung im Kugelstrahlverfahren präpariert.

Unmittelbar vor dem Einbau des OPB wurde eine hydraulisch gebundene, polymermodifizierte Haftbrücke mit einer Auftragsmenge von ca. 1,25 kg/m<sup>2</sup> aufgebracht.

Der Einbau (siehe Bild 9) des OPB erfolgte mit einem Straßenfertiger (Asphaltfertiger) und einer speziellen starren Hochverdichtungsbohle. (BECKER & WIELAND, 2017)

Eine optimale Einstellung der einzelnen Aggregate der Einbaubohle (Stampfen und Vibration) war, bedingt durch die kurze Einbaustrecke, nur schwer realisierbar. Die zielsichere Einstellung der Konsistenz des OPB stellte beim Einbau ein Problem dar.

Die Nachbehandlung des OPB erfolgte kombiniert mittels wassergesättigtem Vliesstoff und Folie über einen Zeitraum von 28 Tagen.

Zur Ermittlung der am Bauwerk erzielten Festigkeiten sowie zur Beurteilung des Betongefüges wurden Bohrkerne aus der Modellstraße entnommen. Im Ergebnis erfüllt der OPB die Vorgaben an die Festigkeit.

Die Untersuchungen am Bohrkern zeigten jedoch ein unregelmäßiges Porengefüge. Eine Zementsteinanreicherung im oberflächennahen Bereich des OPB, ergab eine Beeinträchtigung des akustisch wirksamen Hohlraumgehaltes sowie eine inhomogene Hohlraumverteilung. Der mittels Tauch-

wägung an Laborkörpern bestimmte zugängliche Gesamthohlraumgehalt lag bei durchschnittlich ca. 10 Vol.-%. Im unteren Bereich der Bohrkerne wurden Hohlraumgehalte von bis zu 18 Vol.-% ermittelt. Zur dreidimensionalen Bestimmung der Poren- bzw. Hohlraumverteilung innerhalb der OPB-Schicht am Festbeton wurden an gesonderten Proben computertomografische Untersuchungen durchgeführt (CT-Untersuchungen). Es zeigt sich, dass der Hohlraumgehalt tendenziell von oben nach unten ansteigt und prozentual zwischen 9 und 23 Vol.-% variiert.

Die Anreicherung des Zementleims an der Oberfläche kann folgende Gründe haben, wobei diese einzeln oder in Kombination auftreten können:

- zu hoher Leimgehalt
- zu weiche Betonkonsistenz
- zu niedrige Leimviskosität
- Einbautechnologie.

(BECKER & WIELAND, 2017)

Zusätzlich zu den Untersuchungen der Hohlraumverteilung über die Schichtdicke wurden Untersuchungen der Rauigkeit der Fahrhahnoberfläche sowie der Schallabsorption und der Griffigkeitsprognose durchgeführt (EHRlich & WIELAND, 2014).

Die Ergebnisse der Materialuntersuchungen zeigten hohe Festigkeiten aufgrund des zu geringen Hohlraumgehaltes. Erwartungsgemäß waren deutlich geringere Deflexionen an der verdübelten Fuge als an der unverdübelten Fuge erkennbar. Auch zeigten sich keine signifikanten Rissbildungen beziehungsweise Kornausbrüche an der Betonoberfläche und im Bereich der Querfugen. (EHRlich & WIELAND, 2014)

Die Analyse der Bohrkerne zeigt, dass durch die Vibration der Hochverdichtungsbohle der Zementleim an die Oberfläche transportiert wurde und dieser verschließt in der Folge die Poren. Im oberen Bereich des OPB ergibt sich somit eine fast dichte Struktur, im unteren Bereich hingegen lag der Hohlraumgehalt bei 18 % bis 20 % (siehe Bild 10).

Nach ausreichender Erhärtung des Betons wurde die Modellstraße dynamisch belastet. Die Beanspruchung durch Schwerverkehr wurde dabei mit der Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator (MLS 10) (Lastsimulator der BAST) aufgebracht. Während dieser mechanischen Beanspruchung

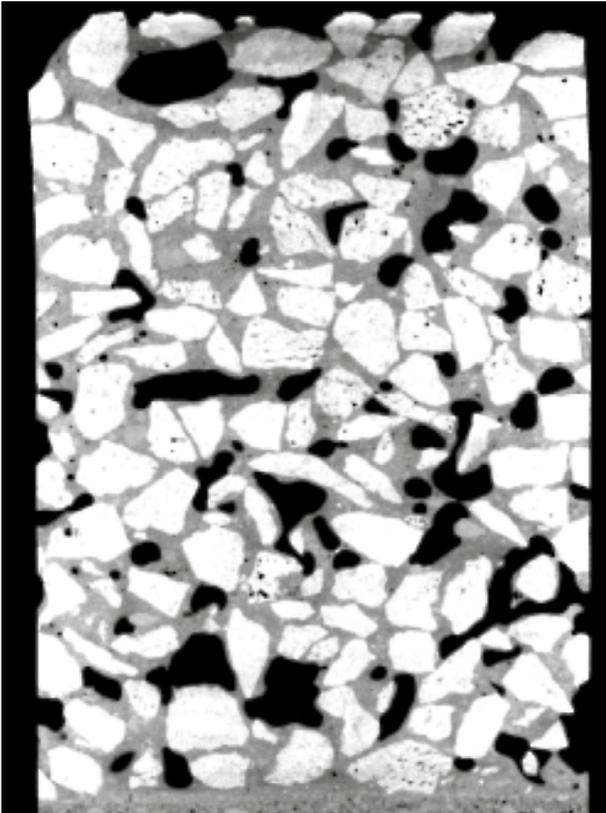


Bild 10: Hohlraumverteilung, CT Untersuchung (EHRlich & WIELAND, 2014)

wurden regelmäßig die Tragfähigkeit des Oberbaus messtechnisch ermittelt sowie der allgemeine Oberflächenzustand beurteilt und dokumentiert. Aufgrund der konstanten klimatischen Bedingungen in der Großversuchshalle ist eine gesonderte Betrachtung des Konstruktionsverhaltens bei gezielter mechanischer Beanspruchung möglich. (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2015)

### 3.8 Versuchsstrecke Mainz-Amöneburg, Dyckerhoff AG, 2013

Die aufgeführten Informationen zur Versuchsstrecke in Mainz-Amöneburg wurden dem Artikel „Dränbeton-Referenzstrecke realisiert“ (InformationsZentrum Beton GmbH, 2013) entnommen.

Auf dem Werksgelände der Dyckerhoff AG in Mainz-Amöneburg wurde im April 2013 im Rahmen eines umfangreichen Praxistests eine Versuchsstraße mit einer Decke aus polymermodifiziertem Dränbeton ausgeführt. Die Versuchsstraße weist eine Länge von 130 m und eine Breite von 4,90 m auf.

Die Versuchsstrecke dient als Zu- und Abfahrtsstraße von Pkws zum Parkplatz mit über 300 Stellplät-

Ausgangsstoff	kg/m <sup>3</sup>
CEM III/A 42,5 N und CEM II/B-S 52,5R	350
Wasser	70
Sika Control E-260	62
DOLANIT Typ 18	2
ViscoFlow 20	1,4
5 % Sand 0-2 mm	
<b>95 % Basaltspplitt 5-8 mm</b>	

Tab. 1: Betonrezeptur des OPB, Mainz-Amöneburg (VOGEL, 2018)



Bild 11: Einbau OPB (InformationsZentrum Beton GmbH, 2013)

zen. Dies entspricht etwa der Belastungsklasse Bk 1,0 einer Wohnstraße gemäß den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO).

Der Straßenaufbau des OPB besteht aus einer 23 cm dicken Dränbetonschicht auf einer wasser-durchlässigen Tragschicht ohne Bindemittel.

Dabei wurden zwei verschiedene Zemente eingesetzt. Auf einer Länge von circa 65 m wurde der OPB mit einem CEM III/A 42,5 N hergestellt und auf den übrigen circa 65 m der Teststrecke wurde der OPB mit CEM II/B-S 52,5 R ausgeführt. Die Rezeptur (siehe Tabelle 1) wurde vom Wilhelm Dyckerhoff Institut in enger Zusammenarbeit mit Wacker Chemie entwickelt und in Tests und Laborversuchen umfassend geprüft.

Den Einbau des Betons übernahm eine Asphaltstraßenbaukolonne der Bauunternehmung Albert Weil AG (Limburg-Offheim). Diese Kolonne wurde vor dem Einbau einen halben Tag geschult.

Als Einbaugerät kam ein modifizierter Asphaltstraßenfertiger zum Einsatz, der mit einer variablen, einstellbaren Ausziehbohle versehen wurde (siehe Bild 11). Durch eine Veränderung der Geometrie

der Bohlenteile wurden außerdem die Auflageflächen so dimensioniert, dass auf dem Belag keine nachteiligen Bohlenabdrücke sichtbar wurden. Darüber hinaus wurde die Anordnung der Verdichtungselemente so variiert, dass die komplette 23 cm dicke Betonschicht ausschließlich mit Tampertechnik verdichtet werden konnte. Um ein Absinken der Bohle zu verhindern, wurde schließlich an beiden Seiten des Straßenfertigers ein Rollensystem angebracht.

Durch die gut verarbeitbare Konsistenz des OPB ließen sich auf der gesamten Teststrecke sehr ebene Oberflächen realisieren. Auch die höhenmäßige Anpassung der Schachtringe und Hydrantenschieber in der Straße war in Handarbeit in hoher Qualität ausführbar.

In einer Langzeitstudie wird diese Teststrecke intern kontinuierlich analysiert und beobachtet. (InformationsZentrum Beton GmbH, 2013)

### 3.9 Versuchsstrecke, PWC Silberbach Nord BAB A 6, 2016

#### 3.9.1 Allgemeines

Im Herbst 2016 wurde auf der PWC-Anlage (Parkplatz mit WC) Silberbach Nord an der BAB A6, Richtungsfahrbahn Heilbronn, bei Ansbach im Rahmen eines Forschungsvorhabens der BAST und der Gütegemeinschaft Verkehrsflächen aus Beton e.V. eine Versuchsstrecke mit OPB ausgeführt. Die Versuchsstrecke befindet sich dort im Bereich der nördlichsten Fahrgasse der Lkw-Stellflächen und der daran angrenzenden Fläche für längsparkende Lkw (siehe Bild 12). Die ausführende Baufirma war die Leonhard Weiss GmbH & Co. KG.

Die Versuchsstrecke in OPB hat eine Einbaulänge von ca. 215 m auf einer Einbaubreite von 10 m. Der Einbau des OPB erfolgte in zwei Einbaustreifen (HOFMEISTER, 2017).

Die bei der Baumaßnahme gewonnenen Beobachtungen und Erkenntnisse sind aus dem unveröffentlichten Forschungsbericht Nr. 3573 des Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau der TU München entnommen (FREUDENSTEIN, WITT & EGER, 2016).

Der Unterbeton wurde auf einer Schottertragsschicht, mit einer Dicke von 22 cm eingebaut. Dies entspricht den Anforderungen der ZTV und TL Beton-StB mit einer Betonfestigkeitsklasse C30/37 und den Expositionsklassen F4, XM2, WS (BECKER & WIELAND, 2017). Der Einbau erfolgte maschinell in zwei Einbaubahnen. Die Durchfahrtsgasse wurde mit einem Gleitschalungsfertiger und die Fläche für längsparkende Lkw im Handeinbau ausgeführt.

Die Querscheinfugen mit einem Abstand von 5 m wurden mit einem Dübelabstand von 25 cm verdübelt sowie mit einer Kerbschnitttiefe von 60 mm und einer Kerbschnittbreite von 3 mm ohne Aufweitung der Fugenkammer und ohne Fugenfüllung ausgeführt. Es wurde ein Unterfüllstoff (Schlammschnur) in die Fuge eingedrückt, um das Eindringen von Feststoffen in die Fuge bis zur Überbauung zu verhindern (HOFMEISTER, 2017).

Die Längsscheinfugen im Bereich der Durchfahrtsgasse wurden verankert und gekerbt und die Längspressfuge am Übergang zum Längsparkstreifen wurde ebenfalls verankert ausgeführt. Die Dübel- und Ankerlage wurde an die Einbaudicke des Unterbetons von 22 cm angepasst.

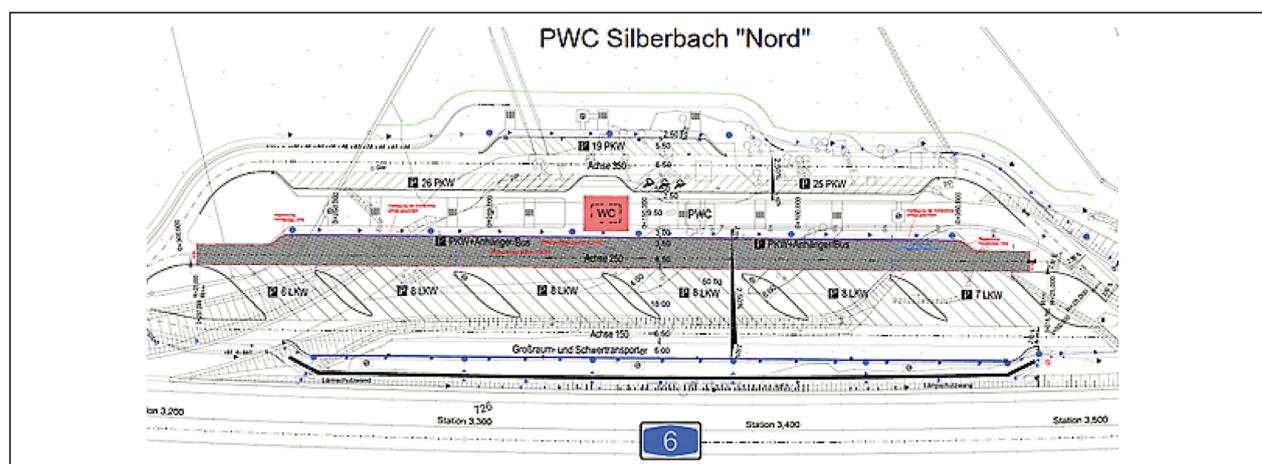


Bild 12: Übersicht der Versuchsstrecke (Autobahndirektion Nordbayern, 2016)

Zwischen Durchfahrsgasse und Lkw-Stellflächen wurde eine Raumfuge angeordnet. Entlang der Schlitzrinne am Rand der Betonbefestigung wurde zur Vermeidung von Schubspannungen im OPB auf voller Deckendicke eine Gleitfuge durch Aufbringen von Bitumen-Haftkleber als Trennlage realisiert.

### 3.9.2 Offenporiger Beton

Der OPB wurde auf der Baustelle in einer mobilen Mischanlage, die an der PWC-Anlage Silberbach Süd temporär aufgestellt wurde, gemischt (siehe Bild 13). Die benötigten Gesteinskörnungen und die Zuschlagsstoffe wurden vor Ort gelagert.

Die verwendete Rezeptur des OPB ist nachfolgend dargestellt:

Der Transport des OPB von der mobilen Mischanlage zur Versuchsstrecke auf der nördlichen PWC-Anlage wurde anfangs mit einem Fahrmischer, dann versuchsweise mit einem großen Radlader (Einbau erstes Probefeld, Temperaturen über 30 °C) und zuletzt mit Muldenkippern (finale Transportart für den Haupteinbau) durchgeführt.

Der Transport mit einem Fahrmischer hatte den Nachteil, dass der OPB aufgrund der Verwendung



Bild 13: Mobile Mischanlage zur Herstellung des OPB

Ausgangsstoff	kg/m <sup>3</sup>
Splitt 5/8 mm kubisch Bad Berneck	1723
CEM I 42,5 N Heidelberger Burglengelfeld	310
Dispersion Wacker Etonis 260	56
Zugabewasser (Frischwasser)	66
Fasern Lenzing Fibers Dolanit 18	2
Fließmittel Sika VF-30	0,1 – 05 M.% v.Z.
Verzögerer Sika VZ-10	0,2 – 0,8 M.% v.Z.
	0,31–1,55
	0,62–2,48

Tab. 2: Betonrezeptur OPB (HOFMEISTER, 2017)

eines älteren Fahrzeugs mit sehr abgenutzten Mischwendeln zu langsam entladen wurde, was zu verlangsamten Materialtransport und somit zu Stillständen des Fertigers führte.

Beim einmaligen Versuch des Transports mit dem Radlader hatte sich das Material in der Schaufel aufgrund fahrdynamischer Einwirkungen bereits auf dem Weg zum Fertiger entmischt (Sedimentation der leichteren Bestandteile). Diese Ladung Beton wurde im Zuge des Probefeldes trotzdem eingebaut, wies jedoch eine mangelhafte Beschaffenheit auf. Der weitere Transport mit Muldenkippern (4-Achsen, Stahlmulden) sicherte zwar den stetigen Materialfluss zum Fertiger, jedoch war ein optionales erneutes Aufmischen des OPB vor der Übergabe an den Fertiger wie beim Transport mit Fahrmischern somit nicht mehr möglich.

Eine zweiwöchige Mindestliegedauer des Unterbetons wurde vor dem Einbau des OPB eingehalten, damit der Großteil der Hydratation des Betons und die Rissbildung in den Fugen des Unterbetons abgeklungen war. Die Oberfläche des Unterbetons wurde am Vortag der Überbauung mit OPB zunächst abgekehrt, im Anschluss mit dem Kugelstrahlverfahren behandelt und als drittes mit dem Hochdruckwasserstrahlverfahren bei 800 bar gereinigt.

Vor dem Haupteinbau der OPB Versuchsstrecke wurden zwei Probefelder hergestellt um die Prozesskette zu testen und die einzelnen Komponenten, wie die Mischanlage und den Fertiger mit Einbaumannschaft, vor dem eigentlichen Einbau bestmöglich aufeinander abzustimmen.

Der erste Probereinbau erfolgte auf einer Länge von circa 50 m mit der vorgesehenen OPB Rezeptur auf dem bereits hergestellten Unterbeton. Dies war zwingend erforderlich, da die Rezeptur des OPB sehr witterungsanfällig war. Die Probefelder wurden nach der Fertigstellung zurück gebaut.

Während des Einbaus wurde unmittelbar vor dem Fertiger händisch eine Haftbrücke auf die Oberfläche des Unterbetons appliziert (siehe Bild 14). Dabei wurde darauf geachtet, dass ein maximaler Zeitraum von 20 Minuten zwischen dem Aufbringen der Haftbrücke und dem Einbau des OPB nicht überschritten wurde, um einen ausreichenden Verbund zwischen den beiden Schichten zu gewährleisten.

Der Einbau des OPB wurde mit einem modifizierten Asphaltfertiger (Typ Vögele Super 1900-2) und ei-

ner starren Hochverdichtungsbohle vom Typ TVP2 (Firma Wirtgen GmbH) durchgeführt (siehe Bild 15). Der OPB wurde in zwei Einbaustreifen eingebaut. Der erste Streifen wurde in einer Breite von 5,00 m hergestellt. Danach erfolgte ein einbaubedingter Rückschnitt der hergestellten Fläche, um an diese die zweite Einbaubahn ebenfalls mit einer Breite von 5 m zu betonieren.

An der Stoßstelle zweier Glättbleche in der Mitte der Grundbohle trat ein Höhenversatz auf, der sich als Unstetigkeitsstelle an der Oberfläche des OPB ab-



Bild 14: Manuelle Aufbringung der Haftbrücke vor Einbau des OPB



Bild 15: Einbau des OPB mit HV-Bohle



Bild 16: Partielle Bearbeitung der Oberfläche, Silberbach

zeichnet. Ebenfalls war der Aufbau der Anbauteile der Bohle nicht symmetrisch, was zu einem erschwerten Einbau führt, da die Maschine aufgrund des sich einstellenden Gegendrucks durch den mit den Schnecken verteilten Frischbeton sonst seitlich zu schieben beginnen würde.

Der gesamte Einbau wurde durch Fachleute für Einbautechnik der WIRTGEN GROUP begleitet. Das Einbaupersonal wurde vor Beginn in der Handhabung des Fertigers und der Hochverdichtungsbohle geschult.

Die Oberfläche wurde nachträglich partiell im Randbereich sowie an Unstetigkeitsstellen (augenscheinlich inhomogene Makrotextur) mit Glättern und Walzen bearbeitet (siehe Bild 16).

Die Hochverdichtungsbohle wurde mit folgenden Grundeinstellungen gefahren:

- Tamperhub: ca. 7 mm
- Tamperdrehzahl: ca. 1500 U/min
- Vibration: circa 45 Hz
- Pressleisten nicht in Betrieb

Diese Einstellungen wurden allerdings während des Einbaus variiert, um Schwankungen der Lufttemperatur und -feuchte und des OPB Materials (Konsistenzveränderungen) zu berücksichtigen.

Der OPB reagierte sensibel auf Witterungsveränderungen durch frühzeitiges Ansteifen.

Die einzubauende Dicke der OPB Schicht sollte planmäßig 7 cm betragen. Die tatsächliche Einbaudicke des OPB lag meist bei 5 cm.

Die offenporige Betondecke wurde nass nachbehandelt. Hierbei wurde dem Betoneinbau mit einem maximalen Abstand von einem Einbauabschnitt fol-



Bild 17: Abdeckung des OPB mit Vlies



Bild 18: Schlitzzinne mit Perforation

gend ein Vlies ausgebreitet und wiederholt genässt sowie mit einer Folie abgedeckt (siehe Bild 17).

Die Fugen des Unterbetons wurden im Zuge der Überbauung planmäßig nicht in den OPB übertragen, da der OPB fugenlos hergestellt und die Rissentwicklung im OPB (durchschlagende Risse) über die Liegedauer dokumentiert werden soll.

An der Versuchsstrecke wird durch die BAST ein fünf jähriges Monitoring durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist eine erste Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Oberbaukonstruktionen mit OPB unter Praxisbedingungen mit erhöhter mechanischer Beanspruchung infolge Lkw-Rangierverkehr vornehmen zu können. Hierbei gilt es u. a. Reflexionsrisse und ggf. auftretende Kornausbrüche in der Oberfläche zu erfassen und deren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit zu beurteilen. (BECKER & WIELAND, 2017)

Nach Aussage der BAST (C. BECKER, persönl. Mitteilung, 26.02.2018) wurden ergänzende Messungen zur Griffigkeit (Seitenkraft-Messverfahren), zur

Tragfähigkeit (Falling Weight Deflectometer) und zur Lärmemission mittels der Nahfeldmessung (CPX-Methode) durchgeführt.

Zur Entwässerung der OPB-Fläche wurde die Schlitzzinne auf Höhe der Unterkante des OPB perforiert (siehe Bild 18).

### 3.9.3 Anschlüsse an die angrenzenden Flächen

Die erste Einbaubahn wurde mittels einer Raumfuge an die Betondecke der angrenzenden Lkw-Stellflächen angeschlossen. Die als Raumfugeneinlage verbaute Holzweichfaserplatte wurde auf Höhe der Oberkante des Unterbetons ungleichmäßig abgestimmt. Darüber hinaus war das Weichfasermaterial wassergesättigt. Eine dauerhafte und funktionierende Raumfugenkonstruktion ist hier nicht gegeben.

Der offenporige Beton der ersten Einbaubahn wurde gegen die senkrechte Kante der Betondecke der Lkw-Stellflächen eingebaut. Das linke Seitenblech des Fertigers wurde auf der Oberkante der Betondecke der Lkw-Stellflächen geführt. Mit einem Handstampfer wurden Unebenheiten und Höhendifferenzen im Anschlussbereich zusätzlich nachgearbeitet und angeglichen. Zum Glätten der Oberfläche im Anschlussbereich wurde teilweise auch eine Rasenwalze eingesetzt.

Der Anschluss der offenporigen Betondecke der zweiten Einbaubahn an die erste Einbaubahn des OPB erfolgte zwei Tage nach Herstellung des ersten Einbaustreifens. Im Abstand von rund 50 cm vom Rand der ersten Einbaubahn wurde die offenporige Betondecke zuvor mittels Nassschnitt vollständig durchtrennt und der abgetrennte OPB-Streifen abgefräst.

Bei der Ausführung dieser Arbeiten traten unter anderem folgende Mängel auf:

- Fräsreste mit Dicken bis zu 1 cm
- Fräswülste mit Dicken bis zu 3,3 cm
- Trennschnitt bis in den Unterbeton durchgeführt

Weiter waren auf gesamter Einbaulänge im Anschlussbereich Fräsreste und verfestigte Schneid-schlamm zu verzeichnen. Aufgrund dieser Mängel sind Folgeschäden wie Rissbildung und Ausbrüche in der OPB-Schicht wahrscheinlich.

Der frische OPB wurde ohne weitere Vorbehandlung gegen die wasserhochdruckgereinigte Anschlusskante eingebaut. Das linke Seitenblech des Fertigers wurde auf der Oberkante der ersten Einbaubahn geführt. Mit einem Handstampfer wurden kleine Höhendifferenzen zwischen erster und zweiter Einbaubahn angeglichen.

Gegenüber der Oberkante der perforierten Bordrinne wurde die offenporige Betondecke 5 mm höher eingebaut. Im Anschlussbereich wurde händisch mit einer Kelle nachgearbeitet und mit der Rasenwalze geglättet.

Es hatte sich gezeigt, dass die Ausführung des Probefeldes notwendig war, um die Einstellung verschiedenster Parameter an der Mischanlage und dem Fertiger im Voraus vornehmen zu können. Die verwendete Rezeptur des OPB war unter den vorliegenden Randbedingungen anfällig gegenüber Temperatur. Ein Transport des Materials sollte nur mit Muldenkippern oder Transportbetonfahrzeugen mit neuen Mischwendeln erfolgen.

### 3.9.4 Begutachtung der OPB-Fläche

Eine Begutachtung der OPB-Fläche im Januar 2018 und Untersuchungen der BAST im Zuge des Monitorings der Fläche zeigen, dass der Zementleim des Materials im eingebauten Zustand zum Teil nach

unten abgelaufen ist und somit im unteren Bereich des OPB eine dichte Lage ohne Hohlräume erzeugt hatte. Durch die Sedimentation des Zementleims waren die Gesteinskörner in den oberen Schichten zum Teil nicht ausreichend mit Zementleim umgeben, wodurch es zu vermehrten oberflächlichen Kornausbrüchen kam.

Diese sichtbaren Mängel werden mit einem zu hohen Leimgehalt begründet. Über die Streckenlänge steigt der Hohlraumgehalt an, aber ob die Hohlräume im ausreichenden Maße miteinander verbunden sind, ist unklar. Nach Aussage der BAST wurde beim Einbau der OPB-Strecke der Gehalt an Zusatzmitteln in der Rezeptur im Laufe des Einbaus variiert.

Im Randbereich der OPB Fläche an die Lkw-Stellfläche kam es vermehrt zu Kornausbrüchen, da hier keine ausreichende Stützung der Randkörner durch Nachbarkörner vorhanden ist.

Die Querscheinfugen des Unterbetons haben nach mehr als einem Jahr Liegedauer in den OPB durchgeschlagen (Reflexionsrisse) und sind oberflächlich ca. alle 10 m (Paketreißen) sichtbar. Im Rissbereich sind Kornausbrüche erkennbar (siehe Bild 20).

Die Längsfugen im Unterbeton zeichnen sich ebenso im OPB als Längsrisse ab. In Bild 19 sind die mit OPB überbaute Längsscheinfuge (LSF) und Längs-

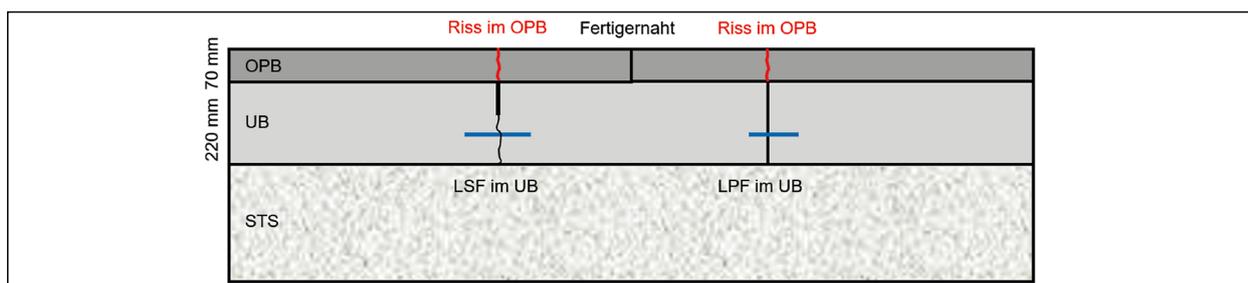


Bild 19: Lage der Längsfugen im Querschnitt

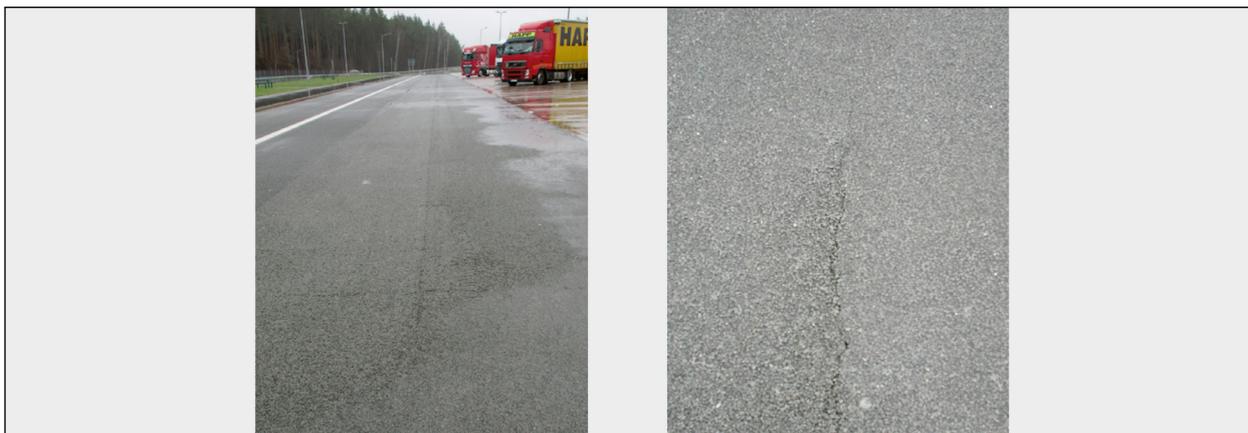


Bild 20: Links: Längsriss, Rechts: Querriss



Bild 21: Fertiger beim Einbau des OPB auf der duraBAST (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017c)

spressfuge (LPF) dargestellt. Einer der Längsrisse ist in Bild 20 sichtbar. Im Bereich der Längsrisse und der Längsnaht der beiden Einbaustreifen des OPB sind deutliche Kornausbrüche vorhanden.

Das Ausbrechen der Körner im Rissbereich (durchgeschlagene Risse aus dem Unterbeton) führt zu Folgeschäden und zum vermehrten Herauslösen von Gesteinskörner (Reißverschlusseffekt) (siehe Bild 20).

Im überwiegenden Bereich der Versuchsstrecke wird der OPB durch Rangieren der ausparkenden Lkw bei geringer Geschwindigkeit sowie Scherbeanspruchung durch die Lenkbewegungen mit erhöhten mechanische Beanspruchungen belastet.

### 3.10 duraBAST, 2017

Im Jahr 2017 wurde ein Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der BAST, am Autobahnkreuz Köln-Ost (BAB A3/A4), die sogenannte duraBAST, eröffnet. Dort werden neue Baustoffgemische, Bauweisen oder Bauverfahren im Maßstab 1:1 getestet und die Oberbauten können zeitraffend mit dem BAST-eigenen Mobile Load Simulator (MLS30) belastet werden. Die Testfelder unterliegen dauerhaft der realen Witterung. Somit sind die dort gewonnen Untersuchungsergebnisse auf andere Streckenabschnitte im Bundesfernstraßennetz übertragbar (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017a).

Eine dieser Teilflächen auf dem Areal wurde mit OPB gebaut (siehe Bild 21). Bei der Ausführung dieser Strecke wurde mit einem Straßenfertiger unter Verwendung verschiedenartiger Verdichtungsbohlen, wie zum Beispiel einer konventionellen, ausziehbaren Bohle und einer speziell modifizierten, starren Hochverdichtungsbohle (HV-Bohle), eingebaut. Beim Einbau ist bei der HV-Bohle zeitweise eines der Bohlensegmente ausgefallen.



Bild 22: Fertiggestellter OPB auf der duraBAST (LANGER, 2018)

Der Einbau erfolgte auf Grundlage einer modifizierten OPB-Rezeptur. Der Einbauversuch brachte neue Erkenntnisse zur Einbautechnologie sowie zur erreichbaren Einbauqualität (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017d).

Eine Begutachtung der fertigen Einbaufläche zeigt, dass das Material mit der ausziehbaren Bohle nur abgezogen wurde. Die Oberfläche des Einbaustreifens, der mit der HV-Bohle hergestellt wurde, weist im Vergleich augenscheinlich eine günstigere Makrotextur auf. Die an Bohrkernen aus den beiden Einbaustreifen ermittelten Werte des Hohlraumgehalts und die Spaltzugfestigkeit liegen in ähnlicher Größenordnung.

In Bild 22 ist der fertiggestellte OPB abgebildet.

Die Konsistenz des OPB war beim Einbau auf der duraBAST anfangs relativ weich. Der gemessene oberflächlich zugängliche Hohlraumgehalt liegt zwischen 14 - 15 % und ist über die Einbaudicke inhomogen verteilt. Das Drainagevermögen ist augenscheinlich gut. Die an Bohrkernen bestimmten Spaltzugfestigkeiten liegen zwischen 2 und 3 N/mm<sup>2</sup> und sind somit nicht zufriedenstellend.

## 4 Optimierung der OPB-Rezeptur

### 4.1 Zielstellung

Ziel dieses Arbeitspakets war es, eine möglichst robuste OPB-Rezeptur zu entwickeln. Robust bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die zu entwickelnde OPB-Rezeptur auch unter wechselnden äußeren Randbedingungen (wie zum Beispiel Umgebungstemperatur und Feuchteinfluss) vorgegebene Frischbetoneigenschaften (vor allem die Konsistenz und das Ansteifverhalten) zielsicher erreicht. Weiterhin muss die OPB-Rezeptur die gestellten Anforderungen an den Festbeton (Hohlraumgehalt zur Lärminderung, Festigkeit und Dauerhaftigkeit) sicher erfüllen.

### 4.2 Definition einer Referenzrezeptur

Als Grundlage für alle folgenden Untersuchungen dient die Rezeptur (siehe Tabelle 3) der Versuchsstrecke auf der PWC-Anlage Silberbach Nord (im Folgenden als Referenz bezeichnet), die vom Auftraggeber (BAST) zur Verfügung gestellt wurde. Basierend auf dieser Referenz, sollte im Labor des Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München eine optimierte offenporige Betonzusammensetzung entwickelt werden, die die Anforderungen an eine geringe Geräuschemission bei gleichzeitig hoher Festigkeit und Dauerhaftigkeit erfüllt. Aufgrund der Erfahrung beim Betoneinbau auf der Versuchsstrecke Silberbach (siehe Kapitel 3.9), bei der sich Änderungen der Witterungsbedingungen

	Zugabemenge	Rohdichte
[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]
Diabas 5/8 (kubisch, Bad Berneck)	1645	2865
CEM I 42,5 N (Ennigerloh)	330	3130
Acrylfasern (Dolanit 18)	2,00	1185
Fließmittel (Sika VF-30)	1,65	1050
Verzögerer (Sika VZ-10)	1,65	1110
Wasser	82,5	1000
Polymerdispersion (Etonis 260)	56,0	1060
Cellulose (MH300P2)*	0,50	1326
Rechnerischer Hohlraumgehalt	17,3 %	
w/z-Wert	0,32** (0,42)***	

\* Empfehlung des Auftraggebers  
 \*\* Wasseranteil der Polymersuspension berücksichtigt  
 \*\*\* Gesamte Polymersuspension berücksichtigt

Tab. 3: Referenzrezeptur

gen als größte Herausforderung herausgestellt haben, erfolgt die Optimierung mit dem Hauptaugenmerk auf die Robustheit der Betonzusammensetzung hinsichtlich der Änderungen der Umgebungstemperatur und dem Einfluss zusätzlicher Feuchte (z. B. Einbau während Regen). Aufgrund erster positiver Erfahrungen des Auftraggebers sollte der Einsatz von Cellulose im offenporigen Beton ebenfalls untersucht werden.

Mit dem zweiten w/z-Wert (Wert in Klammern) findet die Empfehlung des Datenblatts der Polymersuspension Berücksichtigung, den Anteil an Suspension zu 100 % auf den w/z-Wert anzurechnen.

### 4.3 Bewertung der eingesetzten Komponenten

Mit dem Diabas 5/8 wurde ein Splitt mit einer gezielt kubischen Kornform gewählt. Hierdurch sollte ein gleichmäßiges Porengefüge erreicht und somit ein gleichmäßiger Wasserabfluss bei Regenbelastung sowie eine erhöhte Schallabsorption während der Nutzungsphase erzielt werden.

Mit der Zugabe von Kunststofffasern sollte die Zugfestigkeit des Betons sowie dessen Frostwiderstand erhöht werden (HUANG, WU, SHU & BURDETTE, 2010; KEVERN, SCHAEFER, WANG, SULEIMAN & DEAN, 2008; WU et al., 2016). Durch die Einbindung der Fasern in die Zementsteinmatrix können diese nach dem Reißen des Zementsteins weiterhin Zugkräfte übertragen.

Auch die Polymerdispersion wurde zur Erhöhung der Druck- und Zugfestigkeit (CHEN, WANG, WANG & ZHOU, 2013; HUANG et al., 2010) sowie zur Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstands des Betons zugegeben (WU et al., 2016). Untersuchungen von WU et al. ergaben, dass durch die Zugabe von Polymerdispersion der Frostwiderstand maßgeblich erhöht werden kann. So wiesen Betone ohne Polymerdispersion nach 225 Frost-Tau-Wechseln (FTW) nach GT/B 50082-2009 (GT/B 50082-2009) ein Totalversagen auf, während die durch Zugabe von Polymerdispersion modifizierten Proben nach 300 FTW mit einem Masseverlust von ~17 % einen deutlich höheren Frostwiderstand besaßen. Durch die zusätzliche Zugabe von Kunststofffasern konnte der Masseverlust nach 300 FTW weiterhin auf ~12 % reduziert werden (WU et al., 2016).

## 4.4 Betonherstellung und Versuchsablauf

Die Betone wurden in einem Laborzwangsmischer mit einem maximalen Mischvolumen von 30 Litern hergestellt. Die Reihenfolge der Zugabe der Ausgangsstoffe und die Mischdauer sind in Tabelle 4 angegeben. Die Nassmischzeit betrug insgesamt zwei Minuten.

Die Prüfung der Konsistenz erfolgte 10, 30, 60 und 90 Minuten nach der Wasserzugabe mit dem Verdichtungsmaß nach DIN EN 123504 (DIN EN 12350-4:2009-08). Zudem wurde im Anschluss an die Bestimmung des Verdichtungsmaßes nach 90 Minuten der zugängliche Hohlraumgehalt der Mischung bestimmt. Hierzu wurden Zylinderformen ( $d = 100 \text{ mm}$ ;  $h = 200 \text{ mm}$ ) mit einer Auflast von  $440 \text{ kg/m}^2$  zunächst einlagig, später zweilagig verdichtet und das Volumen des verdichteten Betons in der Zylinderform bestimmt. Durch Aufgießen des Zylinders mit Wasser bis sich ein oberflächlicher Wasserfilm bildet und Wägung der aufgegossenen Wassermenge, wurde das verdrängte Luftvolumen ermittelt, welches dem zugänglichen Hohlraumgehalt entspricht. Zusätzlich wurden weitere Zylinderproben zur Bestimmung der Druck- und Spaltzug-

Vorgang	Dauer	Zeit ab Wasserzugabe
	[s]	[s]
Vormischen der trockenen Bestandteile	60	-
Wasserzugabe unter Mischen	30	0 - 30
Fließmittelzugabe unter Mischen	15	30-45
Verzögererzugabe unter Mischen	10	45-55
Weiteres Mischen	65	55-120

Tab. 4: Mischregime

festigkeit des Betons hergestellt. An der Rezepturempfehlung wurde zudem die Frostbeständigkeit des OPB in Anlehnung an das CDF-Verfahren ermittelt. Abweichungen zur Norm ergaben sich durch den Verzicht auf die seitliche Abdichtung und den Verzicht auf die Messung der inneren Schädigung des Betons mittels Ultraschallprüfung (DIN CEN/TS 12390-9).

## 4.5 Frischbetonuntersuchung an der Referenzrezeptur

### 4.5.1 Untersuchung der Robustheit gegenüber Temperaturschwankungen

Zunächst wurde die Referenz hinsichtlich der Entwicklung der Frischbetonkonsistenz in Abhängigkeit der Frischbeton- und Umgebungstemperatur charakterisiert. Dazu wurde die Referenz mit Frischbetontemperaturen von  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (Referenz) und  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  (jeweils  $\pm 2 \text{ K}$ ) hergestellt, gelagert und die zeitliche Entwicklung der Verarbeitbarkeit der Mischung zu den Zeitpunkten 10, 30, 60 und 90 Minuten nach Wasserzugabe quantifiziert.

Zum Erreichen der  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  wurden die Feststoffe zuvor für 24 h bei  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  gelagert und zusätzlich 50 % des Zugabewassers als Scherbeneis hinzugegeben. Nach der Herstellung wurde der Frischbeton zwischen den Prüfungen bei  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  um eine Erwärmung des Frischbetons zu verhindern, mit einer Folie abgedeckt, gelagert. Die Temperatur konnte auf  $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  eingestellt und gehalten werden.

Analog wurde für die Untersuchungen bei  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  das Material vortemperiert und der Frischbeton bei  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  abgedeckt gelagert. Die Ergebnisse der Verarbeitbarkeit über die Zeit sind in Bild 23 dargestellt.

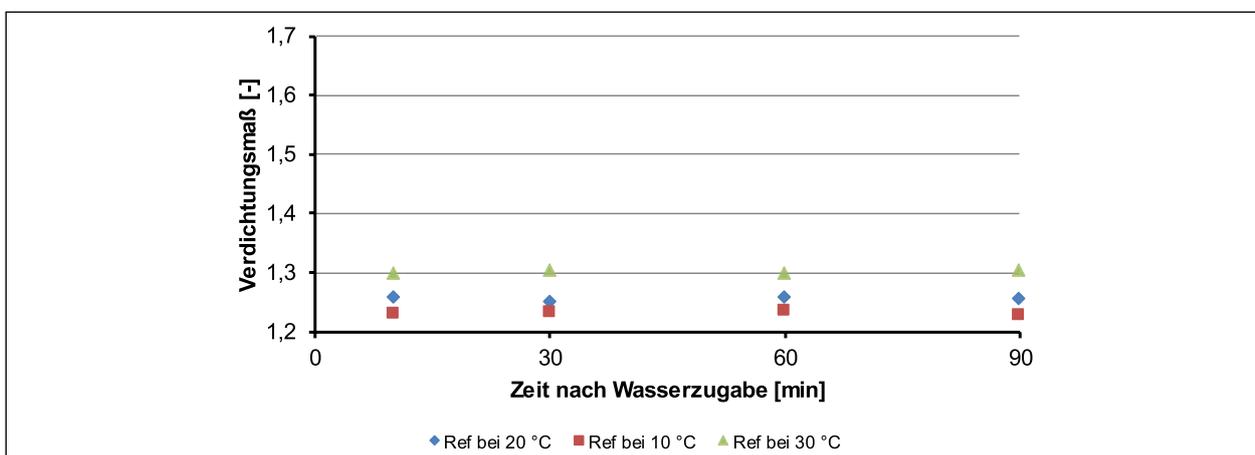


Bild 23: Verdichtungsmaß der Referenzmischungen bei  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  bis 90 min nach Wasserzugabe

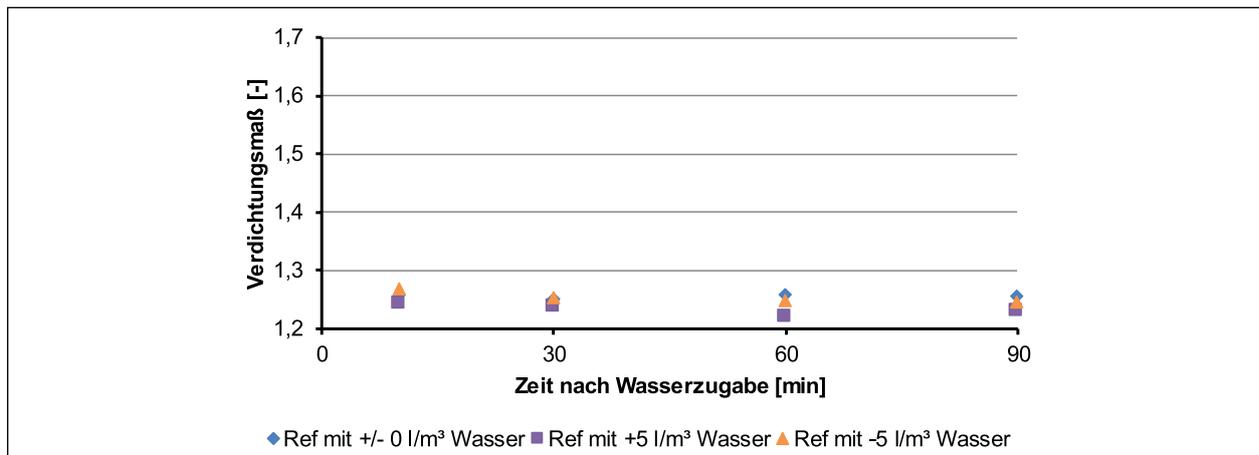


Bild 24: Verdichtungsmaß der Referenzmischungen mit  $\pm 5$  l/m<sup>3</sup> bis 90 Minuten nach Wasserzugabe

Die Temperatur konnte auf  $\pm 3$  °C eingestellt und gehalten werden.

Es wird deutlich, dass die gegebene Rezeptur eine ausreichende Robustheit im Bereich der untersuchten Temperaturschwankungen aufweist. Zwar ergibt sich bei einer Temperaturerhöhung auf 30 °C eine leicht steifere Konsistenz, diese liegt damit jedoch genau im für die Verarbeitung der offenporigen Betone fokussierten Bereich von 1,25 (Konsistenzklasse C2) bis 1,35 (Konsistenzklasse C1).

#### 4.5.2 Untersuchung der Robustheit gegenüber Änderungen im Wassergehalt

Im nächsten Schritt wurde die Robustheit der Referenzrezeptur hinsichtlich eines zusätzlichen Feuchteintrags bestimmt. Dazu wurde bei der Soll-Zusammensetzung (bei 20 °C  $\pm$  2 K) der Wassergehalt um 5 l/m<sup>3</sup> über-/unterdosiert und der Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Verarbeitbarkeit, wiederum bestimmt durch das nach DIN EN 123504 (DIN EN 12350-4:2009-08) bestimmte Verdichtungsmaß bis 90 Minuten (10, 30, 60 sowie 90 Minuten) nach der Wasserzugabe ermittelt.

Auch in dieser Versuchsserie weist die Verarbeitbarkeit über die gesamte Dauer nahezu konstante Werte auf (siehe Bild 24).

#### 4.5.3 Visuelle Mischungsstabilität und Hohlraumgehalt

Bei allen Referenzmischungen konnte eine Sedimentation des Zementleims festgestellt werden. Dies zeigte sich durch eine geschlossene Bodenplatte aus Zementstein an der Prüfkörperunterseite (siehe Bild 25). Des Weiteren wurde bei einzel-



Bild 25: Referenzprobe mit Sicht auf Bodenplatte (frontal)

ten Mischungen der Referenz der zugängliche Hohlraumgehalt (siehe 4.4) bestimmt. Mit Werten von unterhalb von 10 % liegt dieser deutlich unter den für den Lärmschutz benötigten 18 % und den in diesem Projekt angestrebten 18-22 %.

Mit diesen Erkenntnissen wurden folgende Problembereiche identifiziert:

- zu hoher Leimanteil
- zu geringe Viskosität des Bindemittelleims

Um diesen Problemen zu begegnen wurden mehrere Lösungsstrategien verfolgt. Zum einen wurde der Bindemittelleimgehalt der Betonrezeptur reduziert, zum anderen durch Betonzusatzstoffe und -mittel gezielt versucht, die Viskosität der Leimphase zu steigern.

## 4.6 Rezepturoptimierung

### 4.6.1 Reduktion des Leimgehalts

Um den benötigten Leimanteil zur Erreichung der mind. 18 % Luftporen zu ermitteln, wurde zunächst der Hohlraumgehalt der reinen Gesteinskörnung bestimmt. Dies erfolgte mit dem Packungsdichte-Versuch nach DE LARRARD (LARRARD, 1999). Hierbei wird ein Stahlzylinder mit einem Durchmesser von 160 mm mit 5,0 kg Gestein befüllt und mit einer Auflast von 19,5 kg stufenweise verdichtet, bis keine weitere Verdichtung erreicht wird. Über das gefüllte Zylindervolumen nach Verdichtung und der Rohdichte der Gesteinskörnung lässt sich der Luftgehalt innerhalb des Zylinders ermitteln. Für den verwendeten Diabas wurde eine Packungsdichte von 0,581 und demnach ein Hohlraumgehalt von 41,9 % bestimmt.

	Stoffmengen in [kg/m <sup>3</sup> ]		
	L1	L2	L3
Diabas 5/8	1645,00	1645,00	1645,00
CEM I 42,5 N	330,00	330,00	310,00
Acrylfasern (Dolanit 18)	2,00	2,00	2,00
Fließmittel (Sika VF-30)	3,00	3,40	3,50
Verzögerer (Sika VZ-10)	1,65	1,65	1,55
Cellulose (H300P2)	0,50	0,50	0,47
Wasser	50,00	56,00	40,00
Polymerdispersion (Etonis 260)	50,00	56,00	52,50
Rechnerischer Hohlraumgehalt	20,5 %	19,8 %	22,4 %
w/z-Wert	0,22* (0,30)**	0,24* (0,34)**	0,20* (0,30)**

\* Wasseranteil der Polymersuspension berücksichtigt  
 \*\* Gesamte Polymersuspension berücksichtigt

Tab. 5: Rezeptur mit reduziertem Leimgehalt (L)

Diese 41,9 % gilt es für den Beton auf Luft- und Leimanteil aufzuteilen. Da für die akustischen Eigenschaften und die Entwässerung lediglich der freizugängliche Hohlraumgehalt wirkt, wird der rechnerisch bestimmte Hohlraumgehalt mit einem leichten Puffer angesetzt.

Zur Untersuchung des Leimgehalts ohne weitere Veränderungen an der Rezeptur wurden drei Mischungen (L1, L2 und L3) entworfen (siehe Tabelle 5). Das Lieferwerk des Zements wurde hier für alle weiteren Versuche auf den Zement des voraussichtlichen Mischwerks (Heidelberger Zement CEM I 42,5 N aus Burglengenfeld) angepasst.

Die Mischungen L1 und L2 verfolgen den Ansatz, den Leimgehalt allein durch schrittweise Reduktion des Wasserzementwertes, wiederum durch Reduktion der Menge des Anmachwassers bei konstantem Zementgehalt zu vermindern. Mit L3 wurde zusätzlich der Zementgehalt gesenkt.

Aufgrund des reduzierten Wassergehalts und der damit verbundenen erhöhten Steifigkeit konnten die Mischungen L1 und L3 die Vorgaben (Verdichtungsmaß von 1,25 – 1,35) bezüglich der Verarbeitbarkeit nicht erreichen (siehe Bild 26). Mischung L2 hingegen zeigte mit einem mittleren Verdichtungsmaß von 1,24 eine mit der Referenz vergleichbare Verarbeitbarkeit über die gesamte Verarbeitungsdauer.

	L1*	L2**	L3**
Zugänglicher Hohlraumgehalt [%]	25,5	19,4	23,2
Standardabweichung [%]	-	1,1	0,7
Differenz zum rechn. Hohlraumgehalt [%]	+4,7	-0,4	+0,8

\* Einzelmessung  
 \*\* Ergebnis aus drei Messungen

Tab. 6: Hohlraumgehalt der Mischungen L1-L3

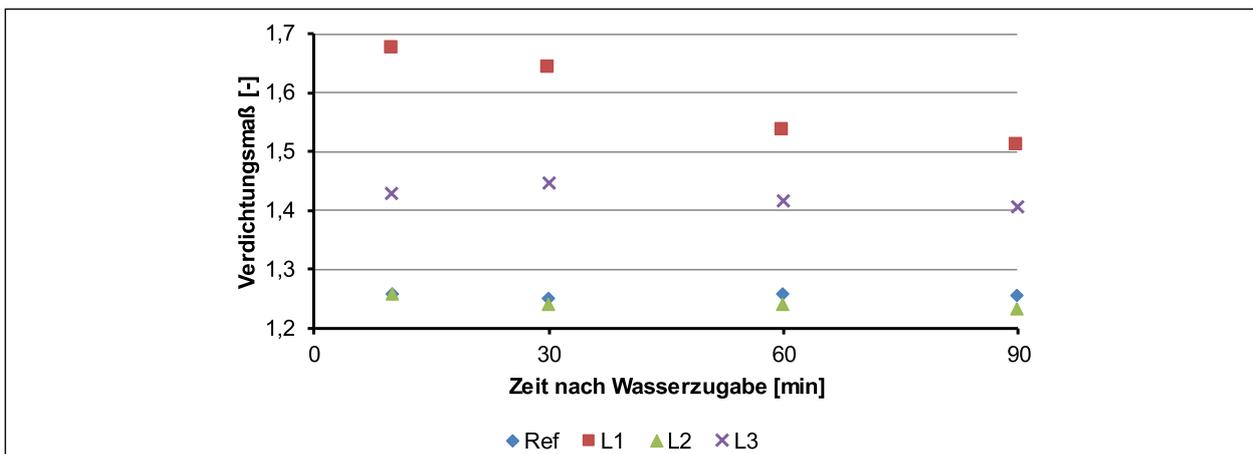


Bild 26: Verdichtungsmaß der Mischungen L1-L3 bis 90 Minuten nach Wasserzugabe

Die zugänglichen Hohlraumgehalte (siehe Kapitel 4.4) der Mischungen 1 und 3 erreichten, wie in Tabelle 6 ersichtlich, höhere Werte als die angestrebten max. 22 %. Der sehr hohe Wert für Mischung 1 ist primär auf die hohe Steifigkeit und damit schlechten Verdichtbarkeit zurückzuführen. Auch beim erzielten Hohlraumgehalt wurde mit Mischung 2 der Zielwert eingehalten.

#### 4.6.2 Zugabe von Microsilica

Da sich die Mischung L2 sowohl von der Konsistenz, als auch vom Hohlraumgehalt her als vielversprechend erwiesen hat, wurde diese als Basis für die weiteren Rezepturen verwendet. Als nächster Optimierungsschritt wurde ein Teil des Zements durch Microsilica (Silicastaub) ersetzt. Hierdurch wurde eine höhere Viskosität des Zementleims (BENAICHA, ROGUIEZ, XAVIER, JALBAUD, OLIVIER & BURTSCHHELL, 2015), als auch höhere Festigkeiten (ZHONG & WILLE, 2016) und eine bessere Dauerhaftigkeit gegenüber Frost- bzw. Frost-Tausalzeinwirkung erwartet (ZHONG & WILLE, 2018). Es wurden folgende Rezepturen verwendet (siehe Tabelle 7).

Für die Mischung S1 wurden pauschal 30 kg/m<sup>3</sup> Zement durch 30 kg/m<sup>3</sup> Microsilica ersetzt und die Menge an Suspension und Wasser anteilig verringert. Zusätzlich wurde der Fließmittelgehalt deutlich erhöht, um die Zielkonsistenz zu erreichen. Wie in Bild 27 ersichtlich konnte dies insbesondere für die frühe Verarbeitbarkeit nicht immer erreicht werden.

Um diesem Rechnung zu tragen wurde für die Mischung S2 ein Teil der Polymerdispersion durch

Wasser ersetzt und der Anteil an Fließmittel erhöht. Zudem wurde der Cellulosegehalt auf den Zementgehalt angepasst. Eine deutliche Verbesserung der Verarbeitbarkeit blieb bei diesen Anpassungen jedoch aus.

Aufgrund des sich über die Zeit ergebenden abfallenden Verdichtungsmaßes der Mischungen S1 und S2 wurden die Mischungen S3 und S4 ohne Zugabe von Cellulose hergestellt, dabei wurde für S3 zusätzlich die gesamte reduzierte Leimmenge volumetrisch durch Microsilica ersetzt und für S4 lediglich der reduzierte Zementanteil (siehe Tabelle 7 und Bild 27). Da auch hier die Verarbeitbarkeit über die Zeit abnahm, kann dieser Effekt nicht sicher auf die Cellulose zurückgeführt werden.

Mit Mischung S5 wurde eine Rezeptur mit deutlich besseren Verdichtungseigenschaften durch Erhöhung des Zugabewassers auf 65 kg/m<sup>3</sup> hergestellt.

Mit Ausnahme von Mischung S5 ergaben sich hierbei optisch trockene Mischungen, also Mischungen ohne feuchtem Glänzen. Die Verarbeitung lässt sich daher eher mit einem reinen Schüttgut, als mit einem klassischen Beton vergleichen.

Der Hohlraumgehalt befand sich, wie in Tabelle 8 abzulesen, für die Mischungen S3, S4 und S5 innerhalb des Zielbereichs.

Damit ergibt sich für die Mischung S5 ein insgesamt positives Bild. Jedoch muss für alle Microsilica Mischungen berücksichtigt werden, dass die Steifigkeit über die Zeit abnimmt. Dies kann im Hinblick auf Unregelmäßigkeiten im Bauablauf negative Auswirkungen auf die Festbetonqualität ha-

	Rezeptur in [kg/m <sup>3</sup> ]				
	S1	S2	S3	S4	S5
CEM I 42,5 N	300	300	300	300	300
Microsilica (RW Füller)	30	30	54	26	26
Acrylfasern (Dolanit 18)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Fließmittel (Sika VF-30)	3,80	4,00	3,80	3,80	4,50
Verzögerer (Sika VZ-10)	1,65	1,50	1,65	1,65	1,50
Cellulose (H300P2)	0,50	0,45	-	-	0,45
Wasser	50,75	55,00	50,75	55,00	65,00
Polymerdispersion (Etonis 260)	50,75	46,50	50,75	50,75	50,75
Rechnerischer Hohlraumgehalt [%]	21,7 [%]	20,6 [%]	19,8 [%]	20,4 [%]	19,3 [%]
w/z-Wert	0,24* (0,34)**	0,25* (0,34)**	0,24* (0,34)**	0,26* (0,35)**	0,29* (0,39)**

\* Wasseranteil der Polymersuspension berücksichtigt  
 \*\* Gesamte Polymersuspension berücksichtigt

Tab. 7: Rezepturen mit zusätzlichem Silicastaub (S)

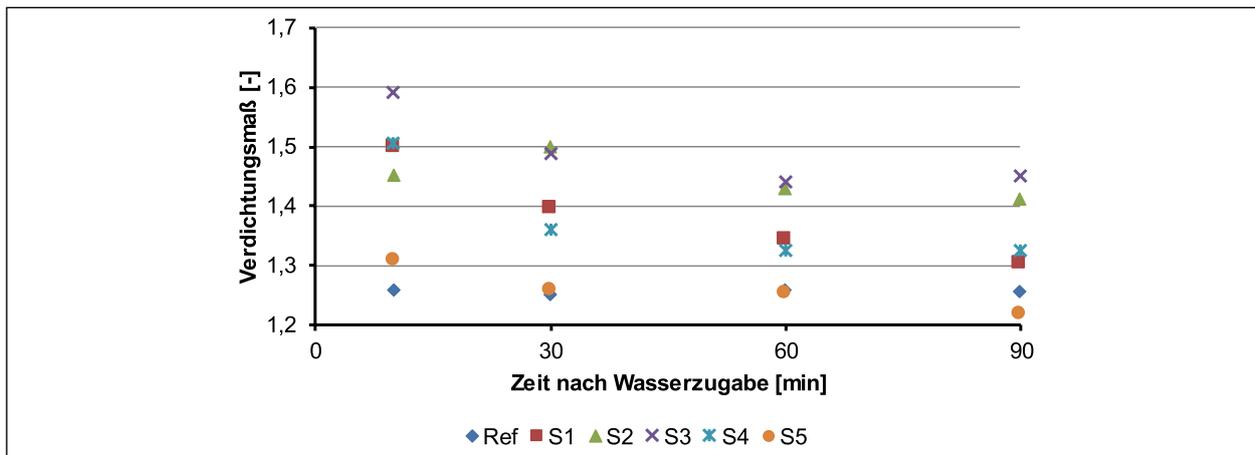


Bild 27: Verdichtungsmaß der Mischungen S1-S5 bis 90 Minuten nach Wasserzugabe

	S1*	S2*	S3*	S4*	S5*
Zugänglicher Hohlraumgehalt [%]	24,0	23,6	21,2	19,7	18,8
Standardabweichung [%]	1,0	0,4	0,7	0,6	0,5
Differenz zum rechnerischen Hohlraumgehalt [%]	+2,3	+3,0	+1,4	-0,7	-0,5
* Ergebnis aus drei Messungen					

Tab. 8: Hohlraumgehalt der Mischungen S1-S5

ben. Die Verwendung von Microsilica im Rahmen dieser Grundzusammensetzung wird daher nach aktuellem Stand nicht empfohlen.

#### 4.6.3 Zugabe von Kalksteinmehl

Als alternativer Betonzusatzstoff wurden drei Mischungen (siehe Tabelle 9) mit einem volumetrischen Ersatz von Zement durch Kalksteinmehl untersucht. Die Verwendung von Kalksteinmehl (KSM) dient dabei der Steigerung des Wasserrückhaltevermögens des Bindemittelleims durch Adsorption des Wassers auf der weitestgehend inerten Oberfläche des Kalksteinmehls und kann somit die Verarbeitbarkeit über die Zeit verbessern. Zudem wird die Packungsdichte des Zementleims und somit dessen Endfestigkeit verbessert. Jedoch verschlechtert sich durch die Verwendung des Kalksteinmehls die Frühfestigkeit des Betons, da sich dieses nicht an der Bildung frühfestigkeitssteigernder Phasen beteiligt.

Auch diese Mischungen orientieren sich an der Mischung L2. Für die Mischungen KSM1 wurden 30 kg/m<sup>3</sup> Zement durch volumetrisch gleichwertige 26 kg/m<sup>3</sup> Kalksteinmehl ersetzt. Es ergab sich eine über die gesamte Dauer von 90 Minuten gut verarbeitbare Mischung mit einem mittleren Verdichtungsmaß von 1,29. Mit der Mischung KSM2 wurde der w/z-Wert leicht gesenkt, um die Festigkeiten zu erhöhen. Es ergab sich dabei jedoch eine zu Be-

	Rezeptur in [kg/m <sup>3</sup> ]		
	KSM1	KSM2	KSM3
CEM I 42,5 N	300	300	270
Kalksteinmehl (sh compact)	26	26	53
Acrylfasern (Dolanit 18)	2,00	2,00	2,00
Fließmittel (Sika VF-30)	3,80	3,80	3,80
Verzögerer (Sika VZ-10)	1,50	1,50	1,50
Cellulose (H300P2)	0,45	0,45	0,41
Wasser	50,75	40,00	50,75
Polymerdispersion (Etonis 260)	50,75	50,75	50,75
Rechnerischer Hohlraumgehalt	20,8 [%]	21,9 [%]	20,8 [%]
w/z-Wert	0,24* (0,34)**	0,21* (0,30)**	0,27* (0,38)**
* Wasseranteil der Polymersuspension berücksichtigt			
** Gesamte Polymersuspension berücksichtigt			

Tab. 9: Rezepturen mit zusätzlichem KSM

ginn der Verarbeitungszeit sehr steife Mischung die vergleichbar zu den Silicamischungen an Verarbeitbarkeit hinzugewinnt. Für Mischung KSM3 wurde der Zementgehalt um weitere 30 kg/m<sup>3</sup> reduziert, dabei jedoch der Wassergehalt und die Polymerdispersion konstant gelassen. Dadurch ergab sich eine, mit einem mittleren Verdichtungsmaß von 1,26 gut verarbeitbare Mischung, die jedoch im unteren Bereich des Zielwerts für die Konsistenz liegt.

Auch die Hohlraumgehalte lagen für KSM1 und KSM3 im Zielbereich.

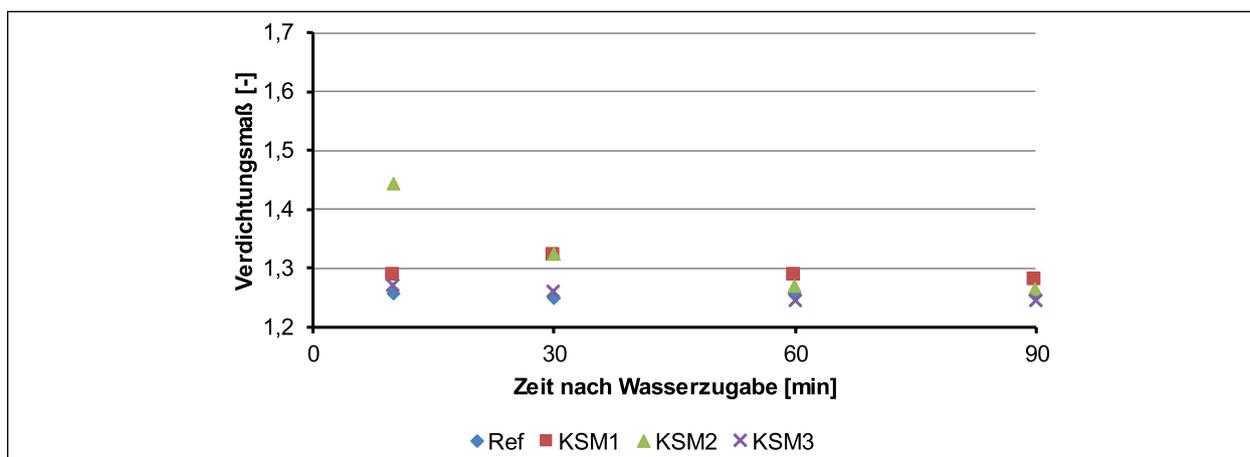


Bild 28: Verdichtungsmaß der Mischungen KSM1-KSM3 bis 90 Minuten nach Wasserzugabe

	KSM1*	KSM2*	KSM3*
Zugänglicher Hohlraumgehalt [%]	19,9	23,5	19,3
Standardabweichung [%]	0,9	0,7	0,5
Differenz zum rechnerischen Hohlraumgehalt [%]	-0,9	+1,6	-1,5
* Ergebnis aus drei Messungen			

Tab. 10: Hohlraumgehalt der Mischungen KSM1-KSM3

Bezüglich der Bestimmung des Hohlraumgehalts lässt sich abschließend feststellen, dass Mischungen mit einer guten Verarbeitbarkeit (L2, S5, KSM1 und KSM3) einen tendenziell niedrigeren Hohlraumgehalt als angenommen vorweisen. Mit 0,4 - 1,5 % Abweichung wird das Verfahren jedoch als ausreichend genau eingeschätzt.

#### 4.7 Festbetonuntersuchungen

Zusätzlich zu den Frischbetonuntersuchungen sind für die gut verarbeitbaren Mischungen L2, S5, KSM1 und KSM3 auch Festbetonuntersuchungen durchgeführt worden. Es wurden die Spaltzugfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen der oberen Zylinderscheiben in Anlehnung an die TP B-StB geprüft. Diese sind in Bild 29 den jeweiligen Hohlraumgehalten der Mischungen gegenübergestellt.

Während sowohl die Kalksteinmehlmischungen KSM1 und KSM3 als auch die Mischung mit ausschließlich reduziertem Leimgehalt L2 zusammen mit der Referenzmischung nach 7 Tagen ein Niveau der Spaltzugfestigkeiten von rund 2,5 MPa erreichen, konnten mit der Mischung S5 Festigkeiten von 2,9 MPa erreicht werden. Nach 28 Tagen egalisierten sich die Festigkeiten der Mischungen L2, S5 und KSM1 auf 3,2 - 3,3 MPa. Die Referenz und KSM3 blieben hingegen unter 3,0 MPa. Druckfes-

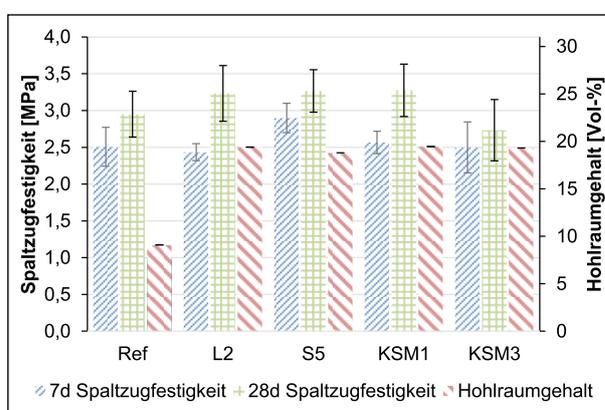


Bild 29: Vergleich Hohlraumgehalt und Spaltzugfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen

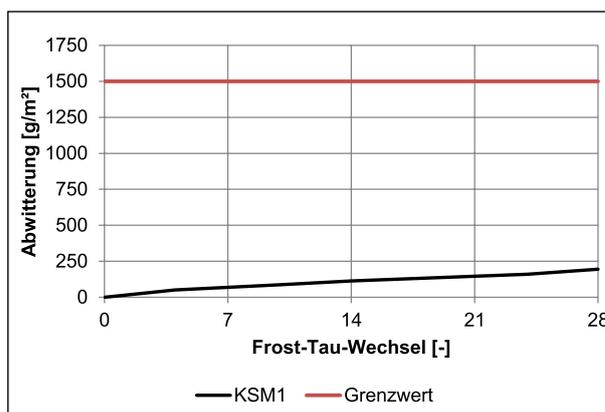


Bild 30: Abwitterung in Anlehnung an den CDF-Versuch des KSM1

tigkeiten konnten aufgrund der einlagigen Verdichtung zu Beginn des Projekts nicht aussagekräftig ermittelt werden. Für KSM1 ergab sich bei zweilagiger Verdichtung eine Zylinderdruckfestigkeit von 22 MPa.

Im Frostversuch in Anlehnung an das CDF-Verfahren ergab sich für die Mischung KSM1 eine Abwitterung von 195 g/m<sup>2</sup> (siehe Bild 30). Da bisher ein normativer Grenzwert zur Einordnung der Frostbe-

ständigkeit bezüglich der Abwitterung fehlt, wird auf das Merkblatt der BAW verwiesen, bei dem ein Grenzwert von 1500 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln einzuhalten ist (BAWMerkblatt). Dementsprechend ist der OPB als frostbeständig zu deklarieren.

## 4.8 Rezepturempfehlung für den bau-praktischen Einsatz an der PWC-Anlage Brunngass

Aufgrund der vorliegenden vielversprechenden Daten bezüglich der langfristigen Verarbeitbarkeit (nahezu konstantes mittleres Verdichtungsmaß von 1,29) und des Hohlraumgehalts (19,9 %) bei gleichzeitig guten Spaltzugfestigkeiten von 3,2 MPa wurde für die PWC-Anlage Brunngass die Rezeptur KSM1 empfohlen.

### 4.8.1 Untersuchung der Robustheit gegenüber Änderungen im Wassergehalt

Auch die Rezepturempfehlung wurde entsprechend Kapitel 4.4.2 auf ihre Robustheit gegenüber Schwankungen des Wassergehalts untersucht. Aufgrund des deutlich geringeren Gesamtwasserge-

halts (Referenz: 107 l/m<sup>3</sup>, KSM1: 73 l/m<sup>3</sup>) der Mischung erweist sich diese als empfindlicher gegenüber Veränderungen als die Referenzrezeptur (siehe Bild 31). Bei Wasserentzug liegt die Rezeptur mit Werten unter 1,35 weiterhin im gut verarbeitbaren Bereich. Überschusswasser führt hingegen zu einer deutlich weicheren Mischung. Mit einem mittleren Verdichtungsmaß von 1,23 wurde die Zielkonsistenz von ~1,30 knapp unterschritten. Dies lässt sich jedoch durch eine entsprechende Fließmitteldosierung anpassen. Da diese Mischungen im Labormaßstab hergestellt wurden und für die Anpassungen auf die Mischanlage eine Optimierung des Fließmittelgehaltes notwendig ist, wurde auf eine Anpassung im Labor verzichtet.

### 4.8.2 Untersuchung der Robustheit gegenüber Temperaturschwankungen

Die Untersuchungen zur zeitlichen Entwicklung der Verarbeitbarkeitseigenschaften in Abhängigkeit der Frischbeton- und Umgebungstemperatur bei 10 °C und 30 °C sind in Bild 32 abgebildet. Eine Verringerung der Temperatur hat kaum nennenswerten Einfluss auf die Verarbeitbarkeit.

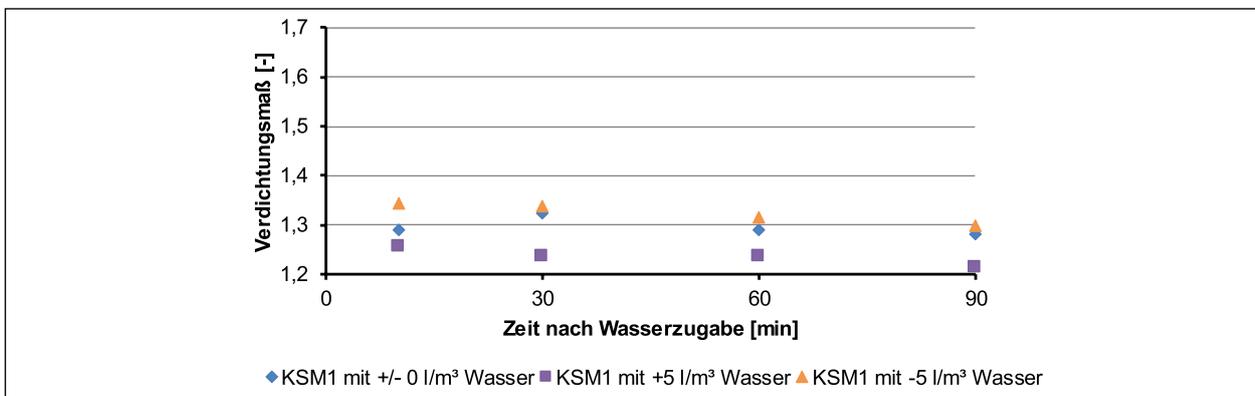


Bild 31: Verdichtungsmaß der Mischung KSM1 mit  $\pm 5$  l/m<sup>3</sup> bis 90 Minuten nach Wasserzugabe

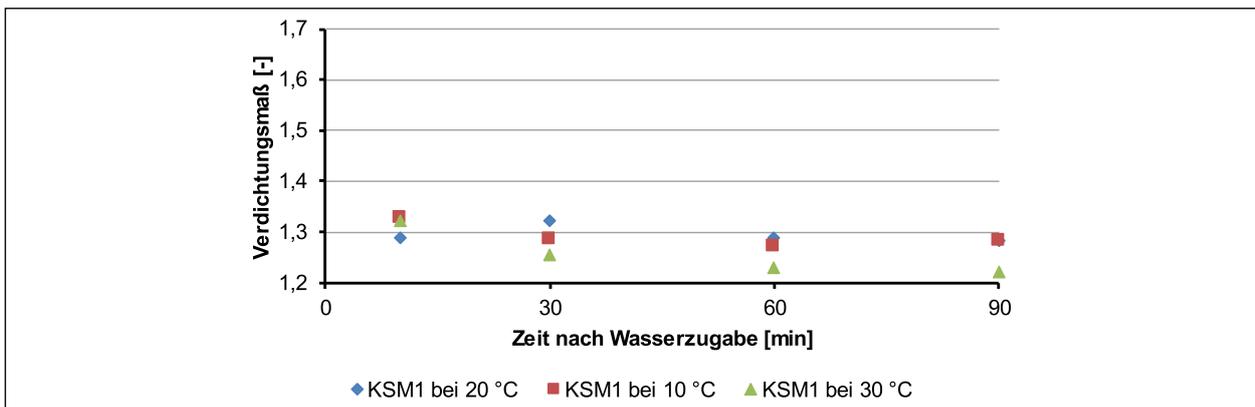


Bild 32: Verdichtungsmaß der Mischung KSM1 bei 10 °C, 30 °C und der Referenztemperatur von 20 °C bis 90 Minuten nach Wasserzugabe

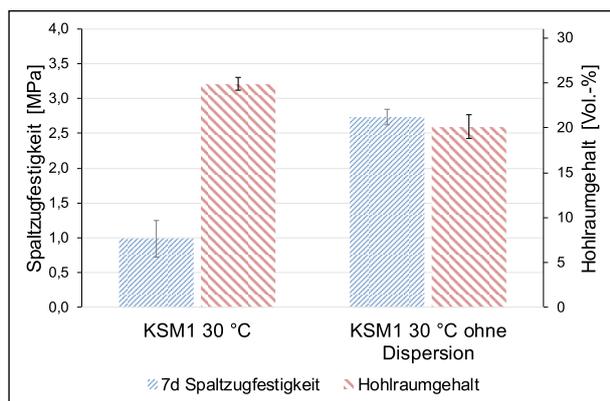


Bild 33: Vergleich Hohlraumgehalt und 7d Spaltzugfestigkeit mit und ohne Dispersionsmittel

Anhand der 30 °C-Mischung zeigt sich jedoch, dass die Konsistenzbestimmung über das Verdichtungsmaß nicht ausreichend ist. Während die Werte für eine sehr weiche Konsistenz sprechen, ergab sich haptisch eine krümelige Konsistenz. Hieraus ergibt sich weiterer Forschungsbedarf zur Wechselwirkung der eingesetzten Chemikalien sowie zur Art der Konsistenzprüfung.

Die Folgen für die Verarbeitbarkeit sind in Bild 33 ersichtlich. Durch die trockene Konsistenz lässt sich das Material nur bedingt verdichten, wodurch die resultierenden Festigkeiten unzureichend sind.

Bei ergänzenden Untersuchungen bei 30 °C ohne Polymerdispersion, bei gleichem w/z-Wert konnte kein derartiges Verhalten bei höheren Temperaturen festgestellt und somit eine ausreichende Festigkeit erreicht werden, siehe Bild 33. Zusammen mit den Ergebnissen der Referenz mit ihrem hohen Wassergehalt, bei denen keine nennenswerten Einflüsse der Temperatur festgestellt werden konnten, kann nicht ausgeschlossen werden, dass es bei 30 °C zu einer Wechselwirkung zwischen dem Fließmittel (PCE) und dem Dispersionsmittel kommt und in der Folge die Wirkung des PCEs somit verloren geht. Durch die geplante Betonage in den Morgenstunden wurde von keinem nennenswerten Einfluss auf die Versuchsstrecke ausgegangen.

#### 4.9 Rezeptur für die Versuchsstrecke

Die für das Bauprojekt Brunngas im Labor entwickelte Rezeptur setzt sich entsprechend Tabelle 11 zusammen.

Die Rezeptur weist gegenüber der Ursprungsrezeptur eine verminderte Neigung zum Sedimentieren

	Rezeptur in [kg/m <sup>3</sup> ]
	KSM1
CEM I 42,5 N	300
Kalksteinmehl (sh compact)	26
Acrylfasern (Dolanit 18)	2,00
Fließmittel (Sika VF-30)	3,80
Verzögerer (Sika VZ-10)	1,50
Cellulose (H300P2)	0,45
Wasser	50,75
Polymerdispersion (Etonis 260)	50,75
Rechnerischer Hohlraumgehalt	20,8 %
w/z-Wert	0,24* (0,34)**

\* Wasseranteil der Polymersuspension berücksichtigt  
 \*\* Gesamte Polymersuspension berücksichtigt

Tab. 11: Laborrezeptur für die PWC-Anlage Brunngas

des Zementleims auf. Als Folge entsteht ein homogeneres Korngerüst des offenporigen Betons mit gleichmäßigerem Hohlraumgehalt über die Höhe. In den Spaltzugfestigkeiten ergibt sich eine leichte Erhöhung der Werte von knapp 3,0 MPa auf 3,3 MPa.

Aufgrund des deutlich reduzierten Wassergehalts gegenüber der Referenz weist die entwickelte Rezeptur ein geringfügig schlechteres Verhalten bei veränderten Feuchtebedingungen auf. Dies lässt sich jedoch durch Anpassung des Fließmittelgehalts korrigieren. Das Temperaturverhalten bei hohen Temperaturen ist zum derzeitigen Stand nicht für die Praxis geeignet. Da die Betonage der PWC-Anlage Brunngas jedoch in den Morgenstunden stattfand, wurde hier mit keinen Schwierigkeiten gerechnet.

Bei der oben genannten Mischung handelt es sich um eine Labormischung. Aufgrund des größeren Volumens und der Änderung der eingebrachten Mischenergie wurden Anpassungen an der Zugabemenge des Wassers von 50,75 kg/m<sup>3</sup> auf 52,0 kg/m<sup>3</sup> durchgeführt.

#### 4.10 Zusätzliche Untersuchungen

Auf Wunsch des Auftraggebers (BASt) wurden zusätzliche Untersuchungen zum Auswaschzeitpunkt für das geplante Waschbetonpapier RSE01 durchgeführt. Hierzu wurden sechs Platten (300×300×40 mm<sup>3</sup>) der Mischung KSM1 hergestellt und unmittelbar mit dem Waschbetonpapier bedeckt. Zur Nachbehandlung der Proben wurde diese mit einem feuchten Jutetuch abgedeckt. Um



Bild 34: KSM1 Probekörper nach dem Auswaschen nach 24 h (links) und 120 h (rechts)

den Kontakt zwischen Waschbetonpapier und Frischbeton zu gewährleisten wurde zusätzlich eine Betonprobe mit gleichen Maßen aufgelegt. Je zwei der Proben sollten nach ein, fünf und sieben Tagen ausgeschalt und mit einem Hochdruckreiniger mit ca. 150 bar ausgewaschen werden. In Bild 34 sind die Ergebnisse des Auswaschens nach ein und fünf Tagen dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Wirkung des Waschbetonpapiers nach fünf Tagen und dementsprechend auch nach sieben Tagen zu stark nachgelassen hat, um ein Auswaschen zu ermöglichen. Kornausbrüche konnten durch den Auswaschvorgang nicht festgestellt werden.

## 5 Prozesskette OPB

Die Prozesskette zur Herstellung einer Fahrbahn mit offenerporiger Oberbetonschicht wird von Grund auf analysiert.

Auf Grundlage der vorgenommenen Modifizierungen der Rezeptur wird die Prozesskette in Bezug auf Optimierungsmöglichkeiten hin untersucht.

Die unterschiedlichen Möglichkeiten des Betontransports, wie der Transport mit dem Fahrmischer, dem Muldenkipper, dem Radlader oder einem Förderband, sollen dabei unter Berücksichtigung der Einflüsse auf den Baustoff, wie z. B. Entmischungen oder Austrocknung, betrachtet werden. Derzeit am Markt zur Verfügung stehende Mischtechniken, wie der Doppelwellen - Chargenmischer, und gängige Einbautechniken wie die Verwendung eines Fertigers zum Einbau von Asphalttschichten bzw. hydraulisch gebundenen Tragschichten mit Hochverdichtungsbohle, die als starre oder flexible Bohle ausgebildet werden kann, werden im Zuge der durchzuführenden Recherchen bewertet. In diesem Zusammenhang werden auch bisher nicht zur An-

wendung gekommene Einbau- und Verdichtungs-techniken wie der Einsatz eines modifizierten Gleit-schalungsfertigers nicht von vornherein ausgeschlossen.

Auch hier kann auf die Erfahrungen aus der wissenschaftlichen Begleitung der Herstellung der Pilotstrecke auf der PWC-Anlage Silberbach Nord zurückgegriffen werden.

### 5.1 Unterlage des OPB

Die Anforderungen an den Unterbeton sind den ZTV/TL Beton-StB zu entnehmen, werden aber durch nachfolgende Ausführungen geändert oder ergänzt.

Unregelmäßigkeiten und Unebenheiten des Unterbetons können sich auf die Nutzungszeit des OPB negativ auswirken. Aus diesem Grund ist beim Bau des Unterbetons auf eine profulgerechte Lage zu achten.

Der Unterbeton ist mit Längs- und Querscheinfugen zu versehen. Die Dübel- und Ankerlage müssen auf die reduzierte Deckenhöhe des Unterbetons angepasst werden, um ein Anschneiden der Dübel und Anker durch die Kerbschnitte zu vermeiden und eine ausreichende Querkraftübertragung im Bereich der Fugen zu erreichen.

Die Aufweitung der Kerbschnitte soll auf 6 mm begrenzt werden, Fasen werden nicht ausgebildet und die Fugen sollen mit Kaltvergussmaterial entsprechend TL Fug-StB verschlossen werden.

Bei der Versuchsstrecke in Silberbach wurden die Fugen im Unterbeton nicht vergossen. So konnte OPB-Material in den Kerbschnitt eindringen und diesen verunreinigen.

Die Überbauung des Unterbetons mit OPB sollte erst erfolgen, wenn eine ausreichende Druckfestigkeit erreicht, ein Großteil der Querscheinfugen gerissen sowie der Gehalt der Restfeuchte im Unterbeton auf einen für eine Überbauung akzeptablen Wert gesunken ist.

## 5.2 Einbau des OPB

### 5.2.1 Allgemeines

Beim Einbau von OPB ist die Lufttemperatur ein wichtiges Kriterium für eine erfolgreiche Bauausführung. Die Lufttemperatur beziehungsweise die Temperatur der Ausgangsstoffe sollen zum Betonierzeitpunkt zwischen 5 °C bis 25 °C liegen. Andernfalls sind besondere Maßnahmen (z. B. Anpassung der Rezeptur oder des Transportes) erforderlich. Bei Niederschlag sollte kein OPB Einbau durchgeführt werden. (M VV)

Der Einbau sollte in kompletter Breite erfolgen, um eine Längsnaht in der OPB-Fläche zu vermeiden. Diese Längsnaht musste einbautechnisch bedingt in der Versuchsstrecke in Silberbach ausgeführt. In diesem Bereich lassen sich vermehrt Kornausbrüche beobachten.

Der Einbau des OPB sollte möglichst kontinuierlich stattfinden, da jeder Einbaustopp zu Unebenheiten und Unregelmäßigkeiten an der Oberfläche führen kann.

### 5.2.2 Einbau

#### Reinigung des Unterbetons

Die Oberfläche des Unterbetons muss für einen besseren Haftverbund mit dem OPB, vor dem Auftragen der Haftbrücke bearbeitet werden. Die Oberfläche sollte mit dem Kugelstrahlverfahren behandelt werden. Der Zementleim wird dabei an der Oberfläche aufgerissen, sodass die Oberfläche der Gesteinskörnung frei gelegt wird. Somit wird der Haftverbund zwischen UB und OPB erhöht. Im Anschluss soll unter Einsatz der Drehjet-Technik die Oberfläche gereinigt werden. Da die Fugen im Unterbeton bereits hergestellt und vergossen sind, sind diese vor Beschädigungen zu schützen.

#### OPB Rezeptur

Die Betonfestigkeitswerte des OPB sind im Vorfeld auf die zu erwartende Verkehrsbelastung abzustimmen.

Da der Hohlraumgehalt der Bohrkern der vorangegangenen Projekte mit durchschnittlich unter 15 Vol.-% unter den angestrebten 18-22 Vol.-% lag, wurde bei der empfohlenen Rezeptur der Gehalt an Zementleim reduziert. Dies wurde durch die Reduktion des Zugabewassers erreicht, wodurch zusätzlich die Neigung des Zementleims zur Sedimentation reduziert und somit die Stabilität beim Transport auf Mulden erhöht werden konnten. Um ein ausreichendes Wasserrückhaltevermögen und damit eine langfristig bessere Verarbeitbarkeit zu erreichen, wurden 20 kg des Zements durch ein entsprechendes Volumen an Kalksteinmehl ersetzt.

#### Mischen des OPB

Bei der im Labor erstellten Rezeptur wurde im Labormaßstab die Verträglichkeit der Komponenten untereinander geprüft und aufeinander abgestimmt. Aufgrund des größeren Volumens und der Änderung der eingebrachten Mischenergie im Betonmischwerk werden Anpassungen des Fließmittelgehalts nötig sein. Ebenfalls müssen die Mischzeiten, im Vergleich zu den Mischzeiten im Labor, angepasst werden. Dabei sollte allerdings darauf geachtet werden, dass die Mischzeiten möglichst kurzgehalten werden, um einen übermäßigen Energieeintrag und somit eine Erwärmung des Frischbetons zu vermeiden. Vorab muss sichergestellt werden, ob das Betonmischwerk die einzelnen Komponenten beschaffen und sachgerecht lagern kann. Es muss technisch möglich sein die Komponenten dosiert, in der richtigen Menge und zum richtigen Zeitpunkt dem Mischvorgang zuführen zu können. Dabei sollten die einzelnen Komponenten möglichst automatisiert zugegeben werden, eine händische Zugabe sollte, wenn möglich, vermieden werden.

Eine möglichst genaue Dosierung der einzelnen Komponenten ist bei der OPB Rezeptur essenziell. Die Pumpe zur Förderung der Kunststoffdispersion sollte eine hohe Genauigkeit aufweisen, um eine sehr genaue Dosierung in der Mischtrommel gewährleisten zu können.

Die im Labor getestete Rezeptur mit den aufeinander abgestimmten Komponenten muss mit den identischen Materialien für den Einbau verwendet werden. Nur so ist es möglich im Nachgang einen Vergleich zwischen den Laborergebnissen und den Ergebnissen des Einbaus herstellen zu können.

#### Transport des OPB

Grundsätzlich ist ein Transport des OPB mit Betonmischfahrzeugen erwünscht, da das Material vor

der Übergabe in den Straßenfertiger nochmals aufgemischt werden kann. Allerdings besteht bei dieser Transportart die Gefahr, dass der Materialfluss nicht ausreichend ist, da die Konsistenz des OPB sehr steif ist und somit die Entladezeiten aus dem Mischfahrzeug erhöht sind. Dies würde zu einem Stillstand des Einbauprozesses führen, was dringend vermieden werden sollte. Um genügend Material anzutransportieren, können alternativ Transportmulden zum Einsatz kommen. Dabei besteht allerdings die Gefahr, dass bei einer instabilen OPB-Konsistenz das Material beim Transport entmischt wird. Die Gesteinskörnung und der Zementleim separieren sich dabei, was zu einer unzureichenden Einbauqualität führen würde, da der Zementleim die Gesteinskörner nicht mehr ausreichend ummantelt und somit die Gesteinskörner nicht mehr ausreichend zusammenhalten würde.

Eine weitere Problematik beim Einsatz von Fahrmaschinen ist die Tatsache, dass diese nicht an den Abdruckrollen des Straßenfertigers, aufgrund des vorhandenen Unterfahrerschutzes des Betonmischfahrzeuges, andocken können. Somit muss der Fahrmaschinist beim Entladen des Betons mit derselben Geschwindigkeit wie der Fertiger mitgefahren werden. Bei der Transportmulde hingegen kommen die Räder an den Abdruckrollen zum Anliegen und der Straßenfertiger schiebt das Fahrzeug.

Die Transportfahrzeuge sind so zu organisieren, dass eine kontinuierliche Materialversorgung mit möglichst geringen Standzeiten erfolgen kann (JOSEPH VÖGELE AG).

Auf einen kurzen Transportweg zwischen Mischwerk und Einbaustelle sollte ebenfalls geachtet werden, um einen beispielsweise durch hohes Verkehrsaufkommen verursachten Stillstand des Materialflusses zu verhindern.

Negative Auswirkungen langer Transportwege konnten bei der duraBAST-Versuchsstrecke beobachtet werden. Die Fahrzeit zwischen dem Mischwerk und der Versuchsstrecke war zu lang (über 45 min). Durch das hohe Verkehrsaufkommen verzögerte sich das Eintreffen des Betons zusätzlich. Diese Verzögerung des OPB-Antransportes führte zu vermehrten Stillständen des Fertigers.

Offenporige Betone sollen beim Transport sowohl vor Austrocknung als auch vor der Aufnahme von Niederschlagswasser geschützt werden (M dBt).

## Haftbrücke

Um den Haftverbund zwischen UB und OPB zu verbessern wird auf die Oberfläche des UB vor dem Einbau des OPB eine Haftbrücke aufgetragen. Die Menge, die pro Quadratmeter aufgebracht werden muss, sollte vorab definiert werden. Die Haftbrücke muss in die Oberfläche eingearbeitet werden, um Lufteinschlüsse zu vermeiden. Die Haftbrücke sollte unmittelbar vor dem OPB Einbau, abschnittsweise aufgebracht werden, um zu vermeiden, dass der Abbindeprozess bereits begonnen hat. Die Fahrspuren der Transportfahrzeuge müssen nachbearbeitet werden, damit die Haftbrücke vollflächig aufgetragen ist.

Die Maschinenteknik für eine maschinelle Applikation ist noch nicht ausgereift, weshalb die Haftbrücke in der Regel händisch mit Gummischiebern aufgetragen werden muss.

### 5.2.3 OPB-Einbau mit Straßenfertiger

#### Allgemeines

Für den Beginn des OPB-Einbaus wird empfohlen, in der Höhe der Einbaudicke des OPB, Kanthölzer unter die Bohle zu legen. Da die abgesenkte Bohle über ihr Schwimmverhalten eine gewisse Strecke benötigt bis sie die Höhenlage der Einbauschicht erreicht, wird sie so bereits auf dem Niveau der fertigen OPB-Oberfläche abgesetzt.

Für unvorhersehbare Einbaustopps sollte eine Abstellbohle vor Ort sein.

Der Einbau sollte möglichst kontinuierlich erfolgen, um Unregelmäßigkeiten in der Oberflächenebenheit zu vermeiden. Dabei ist eine Einbaugeschwindigkeit von mind. 1 m/min (Referenzwert Versuchsstrecke Silberbach) anzustreben. Da die Einbaugeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Vorverdichtung hat, sollte diese auf das einzubauende Material abgestimmt werden (JOSEPH VÖGELE AG).

#### Nivelliermittel

Zum Nivellieren der Einbauhöhe soll ein Schleppbalken (Länge: 0,80 m) zum Einsatz kommen, falls die Strecke in der Geraden verläuft und die Krümmungen im Anfangs- und Endbereich groß sind. Bei kleineren Radien müsste ein kürzerer Schleppbalken zum Einsatz kommen. Mit dem Schleppbalken werden Unebenheiten beim Abtasten der Höhenlage nicht übernommen (JOSEPH VÖGELE AG).

### Einbaubohle

Die Bohle eines Straßenfertigers wirkt beim Asphalteinbau mit ihrem Eigengewicht und der Energie der Verdichtungsaggregate auf das Mischgut ein und sorgt für die Vorverdichtung und Profilierung des einzubauenden Belages (JOSEPH VÖGELE AG) sowie zur Erzeugung einer gleichmäßig geschlossenen Oberflächenstruktur (WIRTGEN GROUP, 2018).

Es können generell zwei Bohlen unterschieden werden. Zum einen die Ausziehbohle die flexibel beim Einbau unterschiedlicher Breiten ist, zum anderen die starre Bohle, bei der der mechanisch verbreiterte Bohlenaufbau keine Spuren in der Oberfläche des einzubauenden Materials lässt. (WIRTGEN GROUP, 2018)

Für den Einbau des OPB mit einem Straßenfertiger kam meist eine starre Bohle zum Einsatz. Die starre Bohle besteht aus einer Grundbohle, welche mit starren Anbauteilen auf die benötigte Einbaubreite angepasst wird. Diese Anbauteile sollten möglichst symmetrisch auf beiden Seiten montiert werden, damit der Straßenfertiger gleichmäßig fährt und kein Drall in eine Richtung entsteht.

Die Bohle ist schwimmend gelagert, sodass die Einbaudicke lediglich über den Anstellwinkel bzw. die Höhe des Zugpunktes der Bohle verändert wird. Dadurch ist es ohne Eingriffe in die Steuerung möglich, Unebenheiten zu vermeiden. Jede Veränderung im Kräftegleichgewicht, z. B. durch mehr Widerstand durch das Einbaumaterial, bewirkt, dass die Bohle ihre Einbaulage ändert. (JOSEPH VÖGELE AG) Beim Einbau von OPB kann sich beispielsweise die Konsistenz des Frischbetons ändern. Steifere Rezepturen setzen der Bohle einen größeren Widerstand entgegen.

Der Einsatz einer Ausziehbohle wurde im Rahmen des Einbauversuchs auf der duraBAST im Vergleich zur starren Bohle getestet. Bei der Verwendung der Ausziehbohle führt die Mittelnaht der Bohle zu einer Unstetigkeitsstelle an der Oberfläche. Diese kann beim regulären Asphalteinbau mit Walzen bearbeitet werden. Da die Oberfläche des OPB nach dem Einbau nicht mehr bearbeitet wird, müssen hier anderweitige Vorkehrungen getroffen werden. So besteht beispielsweise die Möglichkeit über der Mittelnaht ein Abziehblech anzubringen. Die Ausziehbohle soll im Vergleich zur starren Bohle ähnliche Verdichtungsergebnisse aufweisen. Weitere Versuche

bezüglich eines OPB Einbaus mit einer Ausziehbohle liegen derzeit nicht vor.

### Einbaugeschwindigkeit

Die Einbaugeschwindigkeit beeinflusst den Wirkungsgrad der Verdichtungsaggregate auf die Oberfläche. Die Einbaugeschwindigkeit und die Materialvorlage müssen aufeinander abgestimmt sein um für eine ausreichende Beschickung zu sorgen. (JOSEPH VÖGELE AG, 2008)

### Seitenschild

Die Seitenschilder sind vertikal höhenverstellbar und liegen nicht auf den bereits bestehenden angrenzenden Flächen auf.

Diese Funktion kommt zum Einsatz, wenn die Randbereiche höher sind als die einzubauende Fläche. Die Schilder verhindern, dass das Mischgut beim Einbau seitlich ausweicht und sorgen für eine saubere Naht an der Fahrbahnkante. (WIRTGEN GROUP, 2018)

Unter die Seitenschilder des Straßenfertigers sollen aus Gründen der Kantenschonung der angrenzenden Flächen Kunststoffschienen (bzw. Schienen aus Teflon) angebracht werden. Somit kann die Seitenschalung schonender über die Flächen gleiten.

### Tamper

Der Tamper befindet sich an der Vorderseite der Bohle und stampft das Mischgut unter den Bohlenkörper. Dies dient der geregelten Materialzufuhr sowie der Vorverdichtung. Der Tamper bestimmt ebenfalls maßgeblich das Schwimmverhalten der Einbaubohle. Der Tamper wird durch eine Exzenterwelle in eine vertikale Auf- und Abbewegung versetzt. Der Tamper hat auf der gesamten Einbaubreite den gleichen Hub. (WIRTGEN GROUP, 2018)

Die Tampergeschwindigkeit ist an die Einbaugeschwindigkeit anzupassen (JOSEPH VÖGELE AG, 2008).

### Tamperhub

Der Tamperhub sollte über die gesamte Einbaubreite die gleiche Hubeinstellung aufweisen (JOSEPH VÖGELE AG, 2008). Die Einstellung des Hubes erfolgt durch Verdrehen der Exzenterbuchse (WIRTGEN GROUP, 2018).

Je größer der Tamperhub eingestellt ist, desto größer ist die Vorverdichtung und die Verdichtungstiefe. Somit sollte beim Einbau des OPB der Hub mög-

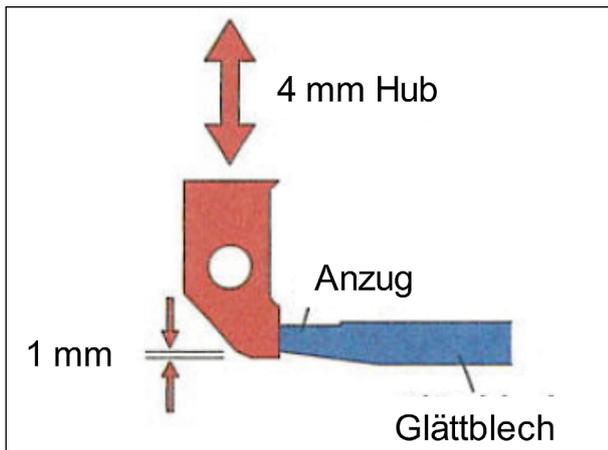


Bild 35: Einstellung Tamperhub (in Anlehnung an JOSEPH VÖGELE AG, 2008)

lichst groß eingestellt werden, da keine Endverdichtung mit Walzen erfolgt. (WIRTGEN GROUP, 2018) Der Tamperhub sollte auf die Einbaudicke angepasst werden. Ist der Tamperhub für die Einbaudicke zu groß gewählt, kann es zu einem negativen Anstellwinkel kommen, was zu einer offenen und rissigen Oberflächenstruktur führen kann. (JOSEPH VÖGELE AG, 2008)

Für dünne Einbaudicken wird ein Tamperhub von 4 mm empfohlen. Dabei steht der Tamper im unteren Umkehrpunkt maximal 1 mm tiefer als der Anzug (siehe Bild 35).

### Glättblech

Das Glättblech sorgt für eine gleichmäßige Belagsoberfläche. Die Vibration wird auf das Glättblech quer zur Fahrtrichtung durch eine Unwuchtwellen aufgebracht. (WIRTGEN GROUP, 2018)

Eine zu hohe Vibration des Glättblechs verschließt die Poren, da der Zementleim an die Oberfläche transportiert wird und somit der OPB seine angestrebten Eigenschaften verliert.

### Pressleisten

Die Pressleisten befinden sich hinter dem Glättblech und sind der Abschluss der Verdichtung durch die Bohle. Sie sind impulshydraulisch beaufschlagt. Die Pressleisten werden mit einer Frequenz von etwa 68 Hz und einem maximalen Druck von 130 bar hydraulisch betrieben. Es können auch zwei Pressleisten hintereinandergeschaltet sein. Beim Einsatz von Bohlen mit zwei Pressleisten ist eine geringere Nachverdichtung erforderlich. Da es beim OPB keine Nachverdichtung gibt, ist eine Bohle mit zwei Pressleisten (T2) zu empfehlen. (WIRTGEN GROUP, 2018)

### Oberflächenbearbeitung

Anzustreben ist eine hohlraumreiche Deckschicht, die nach dem Einbau mit dem Fertiger nicht mehr bearbeitet werden muss.

Die OPB-Schicht ist so zu verdichten, dass einerseits die erforderlichen Festigkeit erreicht und andererseits der von außen zugängliche Hohlraumgehalt nicht unterschritten wird (M DBT).

Bei der Versuchsstrecke in Silberbach war die Oberflächenqualität des OPB teilweise unzureichend. Aus diesem Grund wurde die Oberfläche an diesen Stellen händisch nachbearbeitet (Rasenwalze, Flügelglätter, Stampfer). Dies soll durch die verbesserte OPB-Rezeptur und einen prozessoptimierten Einbau vermieden werden.

### Nachbehandlung

Die Oberfläche ist grundsätzlich unmittelbar nach dem Einbau vor Niederschlag und zu schnellem Austrocknen zu schützen. Die Nachbehandlung kann durch Abdecken mit einem feuchten Vliesstoff erfolgen. Es sollte ein Material gewählt werden, dass die Eigenschaft hat, die Feuchtigkeit zu halten. Die Oberfläche sollte, der Witterung angepasst, mindestens 3 Tage lang feucht gehalten werden. Bei kühler Witterung oder bei einem zu erwartenden raschen Abkühlen des Frischbetons ist eine wärmedämmende Abdeckung zweckmäßig. (M VV)

Der Vliesstoff muss im Randbereich beschwert werden, damit der Wind die Abdeckung nicht verweht oder diese anhebt, wodurch es zu einer frühzeitigen Austrocknung der Oberfläche kommt.

Die Oberfläche sollte vor Verschmutzung geschützt und erst befahren und betreten werden, wenn sie ausreichend erhärtet ist.

### Oberflächenbehandlung

Um eine dauerhafte Griffigkeit der Fahrbahn zu erhalten, muss die verwendete Gesteinskörnung einen hohen Polierwiderstand aufweisen. Weiterhin wird ein hoher Frost-Tausalz-Widerstand für eine langlebige Konstruktion benötigt.

Untersuchungen der Griffigkeit an der Versuchsstrecke in Silberbach, ca. 2 Jahre nach dem Einbau, haben gezeigt, dass die Griffigkeitswerte deutlich abgemindert sind. Kurz nach dem Einbau des OPB wies die Oberfläche eine anforderungsgerechte Griffigkeit auf. Durch die Mikrorauheit des Zementleims wird diese Griffigkeit zu Beginn sicherge-

stellt. Der Zementleim umhüllt die Gesteinskörner komplett. Somit liegt die Oberfläche der Gesteinskörnung nicht frei. Nach häufigen Überrollungen durch die Fahrzeuge wird die Griffigkeit reduziert, da die Reifen den umhüllenden Zementleim polieren.

Aus diesem Grund muss an der Oberfläche des OPB der Zementleim entfernt werden, damit die Oberfläche die polierwiderstandsfähige Gesteinskörnung frei liegt und diese eine dauerhafte Griffigkeit gewährleisten kann. Nachbehandlungsmittel (Erstarrungsverzögerer), die beim Waschbeton eingesetzt werden, sind flüssig und werden auf die Oberfläche ausgesprüht. Diese Mittel können beim OPB nicht zum Einsatz kommen, da diese durch die hohlraumreiche Oberflächenstruktur in die OPB Schicht eindringen und die zementbasierte Bindung der Gesteinskörner auch in tieferliegenden Schichten zerstören würde.

Aus diesem Grund wurde der Einsatz eines Waschbeton-Nachbehandlungspapiers auf einem Teilstück der Strecke versuchsweise aufgebracht. Dies wird auf die Oberfläche des OPB gelegt und wirkt nur an der Oberfläche. Nach einem Tag kann das Papier entfernt und die Oberfläche ausgewaschen werden und die Oberfläche der Gesteinskörnung wird freigelegt.

## 6 Begleitung der Planung einer Versuchsstrecke mit OPB

### 6.1 Konzept Versuchsstrecke OPB, PWC-Anlage Brunngas

#### 6.1.1 Motivation und Zielsetzung

Im Rahmen des Forschungsprojektes soll eine OPB Versuchsstrecke betreut werden. Dabei werden im Zuge der Konzepterstellung die Unterlagen mit Inhalten zur Erstellung des Oberbaus mit OPB, die über die anerkannten Regeln der Technik hinausgehen, als ergänzende Planungsunterlagen zusammengestellt. Diese sind bei der Herstellung der Versuchsstrecke mit OPB durch den Auftragnehmer für die Bauleistung zu beachten. Dazu zählen beispielsweise Angaben zum zweischichtigen Konstruktionsaufbau, wie auszuführende Schichtdicken mit einzuhaltenden Toleranzen, die Ausführung des Anschlusses der Fahrbahn mit OPB an Rinnen und benachbarte Flächen, sowie Hinweise zur geeigneten Witterung während der Herstellung des OPB.

Die für die Ausführung benötigten Angaben zu den anzuwendenden Einbau- und Verdichtungstechniken und -geräten sowie Angaben zu anderen Einzelprozessen wie z. B. der Anlieferung und Lagerung der Einzelkomponenten des Baustoffgemisches werden zusammengestellt.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil dieses Konzepts ist die Angabe der auszuführenden Rezeptur des OPB, die auf Basis der zuvor im Labor durchgeführten Testmischungen und baustofflichen Beprobungen und Untersuchungen festgelegt wird.

Die im Konzept zur Planung und Ausführung enthaltenen ergänzenden Angaben zur Planung der Versuchsstrecke mit OPB werden dem Bauherrn der Versuchsstrecke in einem gemeinsamen Gespräch erläutert. In der Planungsphase wird der Forscher dem Bauherrn bei der Beantwortung von Fragestellungen, welche die Versuchsstrecke mit OPB betreffen, behilflich sein.

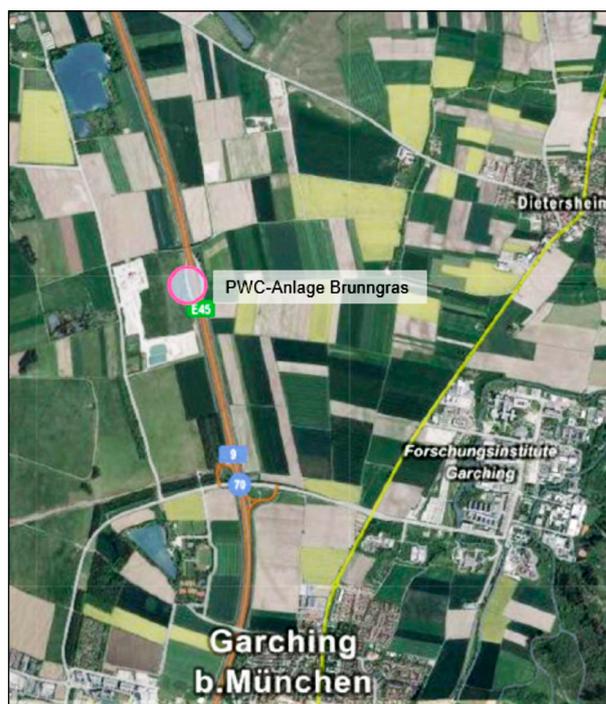


Bild 36: Lage der Versuchsstrecke (roter Kreis) (Bayerische Vermessungsverwaltung 2018, 2018)

7,0 cm	Betondecke (OPB)
19,0 cm	Betondecke (UB)
10,0 cm	Asphalttragschicht (ATS)
39,0 cm	Frostschuttschicht (FSS) ( $E_{v2} 120 = \text{MN/m}^2$ )
<b>75,0 cm</b>	<b>frostsicherer Gesamtaufbau</b>

Tab. 12: Straßenaufbau Versuchsstrecke (Freistaat Bayern Autobahndirektion Südbayern Dienststelle München, 2018)

In der Ausführungsphase wird der Forschungsnehmer die Besonderheit eines OPB-Einbaus dem Bauherrn und der ausführenden Baufirma anhand des Konzepts nochmals erläutern und im Rahmen der Bauvorbereitung beratend tätig werden und Fragestellungen den OPB-Einbau betreffend beantworten.

### 6.1.2 Randbedingungen der Versuchsstrecke

Die Versuchsstrecke befindet sich auf der PWC-Anlage Brunngras an der BAB A9 Nürnberg – München zwischen den Anschlussstellen Eching und Garching Nord, ca. 20 km nördlich von München (siehe Bild 36). Die Versuchsstrecke wird auf der Durchfahrtsgasse der PWC-Anlage zwischen der Stellfläche für Schwerlastverkehr und den Lkw-Stellflächen angeordnet.

In diesem Bereich sind erhöhte mechanische Beanspruchungen durch das Befahren der Lkw mit signifikanten Lenkbewegungen und entsprechend kleinen Radien auf den OPB zu erwarten. Die Randbedingungen der Versuchsstrecke sind mit der PWC-Anlage Silberbach vergleichbar.

Im Bereich der Versuchsstrecke wurde gemäß Belastungsklasse BK 100 der RStO 12 ein frostsicherer Gesamtaufbau von 75 cm geplant (siehe Tabelle 12).

## 6.2 Konzepterstellung zur Planung und Ausführung der Baumaßnahme mit Offenporiger Oberbetonschicht

Die in dieser Zusammenstellung aufgeführten Angaben beruhen auf den unter Kapitel 3 und 5 durchgeführten Recherchen zu vergangenen Demonstratoren und Versuchsstrecken und die daraus resultierende optimierte Prozesskette, sowie der Verbesserung der stofflichen Zusammensetzung der Betonrezeptur.

### 6.2.1 Allgemeine Informationen

Die Versuchsstrecke hat eine Länge von 180 m, eine Breite von 6,50 m (siehe Bild 37). Der OPB wird auf einer Fläche von 1.170 m<sup>2</sup> fugenlos ausgeführt.

### 6.2.2 Unterbeton

Die Anforderungen an den Unterbeton sind den ZTV/TL Beton-StB zu entnehmen, werden aber durch nachfolgende Ausführungen geändert oder ergänzt.

Die Fugen der angrenzenden Lkw-Parkfläche sind zur Vermeidung von Rissen an das Fugenraster der Betonfläche in der Durchfahrtsgasse anzupassen.

Im Abstand von 4,00 m wird der Unterbeton in Querrichtung, ohne Ausbildung der Fase, mit einer Breite von 3 mm gekerbt. Die Querscheinfugen werden mit einem Abstand von 25 cm verdübelt. Die Dübelachse liegt 11 cm über der Oberkante der Asphalttragschicht (siehe Bild 38).

In Längsrichtung wird der Unterbeton auf dem 6,50 m breiten Streifen, der mit OPB überbaut werden soll, mittig im Abstand von 3,25 m vom Rand der Durchfahrtsgasse bzw. der Stellfläche gekerbt werden. Auf ein Abfasen der Fuge wird hier ebenfalls verzichtet. In der Längsscheinfuge des Unterbetons sollen die Achsen der Anker 9 cm über der Oberkante der Asphalttragschicht liegen (siehe Bild 38). Alle Scheinfugen im Unterbeton der Versuchsstrecke werden mit einem 6 mm breiten Kerbschnitt ohne Fase hergestellt und mit einem Kaltverguss entsprechend TL Fug-StB verschlossen, damit während der Überbauung mit OPB kein Zementleim in die Fugen eindringen kann.

Auf die Herstellung einer Fase sollte verzichtet werden, da diese den Fugenschnitt vergrößert (siehe Bild 39).

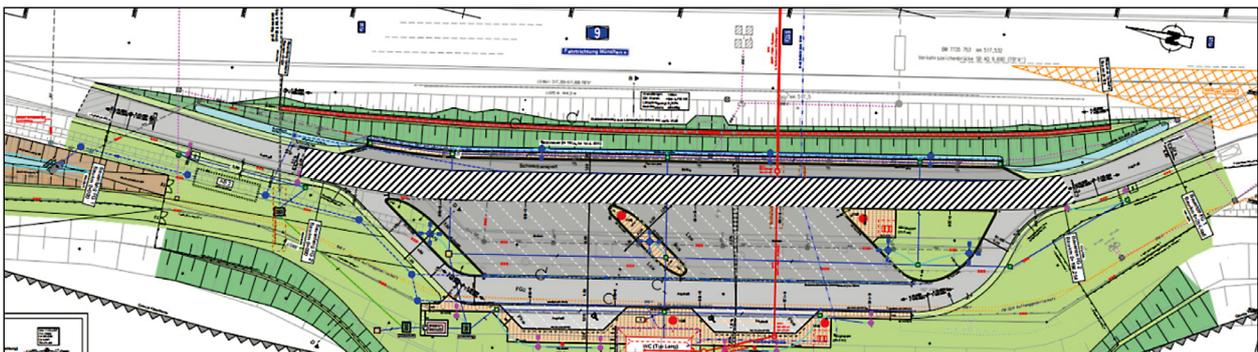


Bild 37: PWC-Anlage Brunngras, OPB Weiß/schwarz schraffiert (Freistaat Bayern Autobahndirektion Südbayern Dienststelle München, 2017)

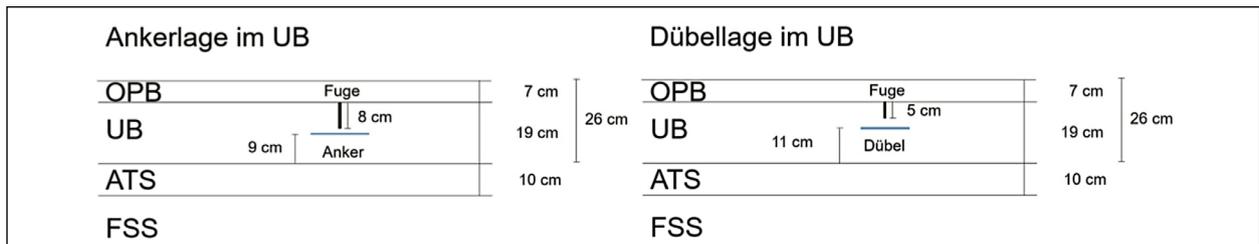


Bild 38: Anker- und Dübellage

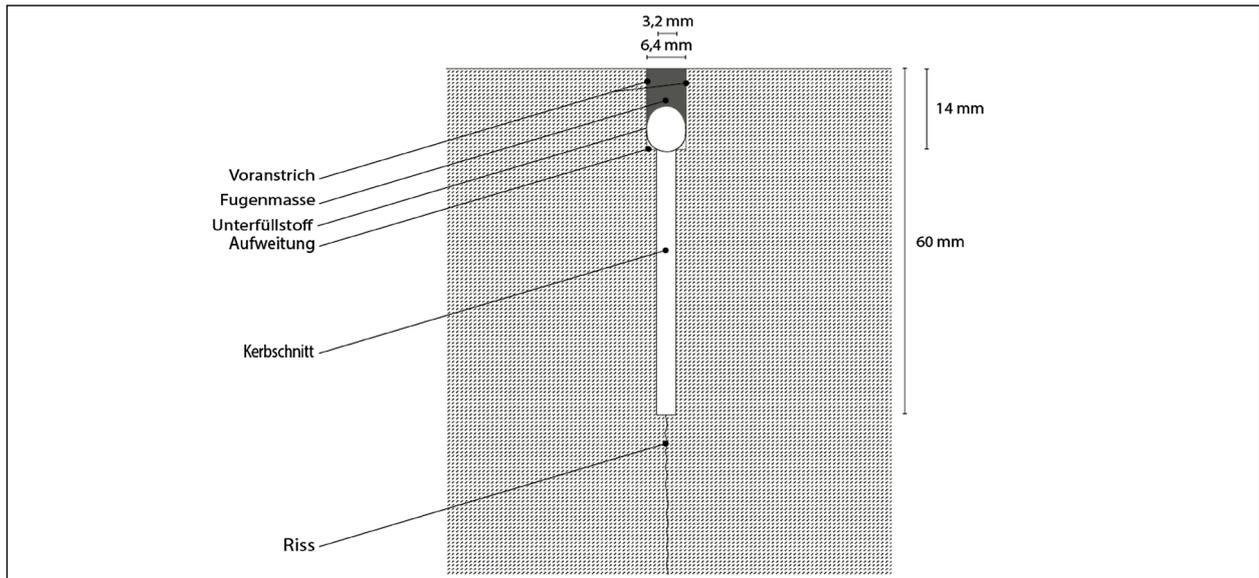


Bild 39: Fugenausbildung im Unterbeton

Nach Meinung des Arbeitskreises AK 8.3.1 „Fugen“ der FGSV e.V. müssen die Fugen mit einem Verguss abgedichtet werden, damit sowohl das Eindringen von Wasser im geplanten Nutzungszeitraum als auch das Eindringen von Bindemittel während der Überbauung mit OPB verhindert werden. Der Kaltverguss soll bis zur OK UB eingefüllt werden.

Die Überbauung mit OPB darf erst nach einer Liegedauer des Unterbetons von 28 Tagen erfolgen.

### 6.2.3 Haftbrücke

Die Haftbrücke ist kurz vor dem Einbau des OPB auf den Unterbeton aufzubringen. Dabei sollte die Haftbrücke abschnittsweise appliziert werden. Der Abbindevorgang darf zum Zeitpunkt der Überbauung mit OPB noch nicht begonnen haben, da sonst der Haftverbund zwischen Unterbeton und OPB nicht ausreichend hergestellt werden kann. Des Weiteren soll die Haftbrücke homogen und gleichmäßig aufgebracht werden und in die Oberfläche eingearbeitet werden um Luft einschließen zu vermeiden.

Die Applikationsmenge ist auf die Beschaffenheit der Unterlage (z. B. Rauheit, Oberflächenstruktur) abzustimmen. Die erforderliche Applikationsmenge sollte in einem Vorversuch vorab ermittelt werden. Eine wichtige Anforderung an die Haftbrücke ist einerseits die Verarbeitbarkeit und andererseits ein relativ langer Zeitraum bis zur Filmbildung von mindestens 60 Minuten. (RIFFEL, 2012)

Um einen dauerhaften Verbund zwischen Unterbeton und OPB sicherstellen zu können, ist sowohl für die Haftbrücke als auch für den Unterbeton, eine Haftzugfestigkeit von mindestens 1,5 MPa zwingend erforderlich. (RIFFEL, 2012)

Auf der Versuchsstrecke soll die Haftbrücke Sika „Mono Top-602“ zum Einsatz kommen. Beim Einsatz der Haftbrücke sollten die Herstellerangaben zur fachgerechten Anwendung beachtet werden.

Die Haftbrücke sollte grundsätzlich maschinell aufgebracht werden, zum Beispiel mit einer Membranpumpe. Allerdings gibt es derzeit noch keine funktionierende Maschinenteknik, um die Haftbrücke aufzutragen. Aus diesem Grund wird die Haftbrücke mit Gummischiebern bis maximal drei Meter vor den Fertiger aufgebracht. In den Fahrspuren des

Fertiger und der Lkw ist eine händische Nachbearbeitung erforderlich.

Um den aufgetragenen Haftbrückenfilm nicht zu beschädigen, könnten die Kettenfahrwerke des Fertigers mit spikeartigen Vorrichtungen versehen werden (FELSCH et al., 2002).

#### 6.2.4 Betonmischwerk

Das Betonmischwerk sollte sich möglichst nahe der Baumaßnahme befinden, damit lange Transportzeiten vermieden werden. Es soll somit auch ein stetiger Materialzufluss gesichert werden, damit durch äußere Umstände (zum Beispiel durch Staus) keine Verzögerungen in der Anlieferung entstehen.

Das Mischwerk muss über eine Polymerdispersionpumpe verfügen, damit die Polymere mit ausreichender Genauigkeit während des Mischprozesses dem Beton zugeführt werden können.

#### 6.2.5 OPB Rezeptur

Die Rezeptur wurde wie unter Kapitel 4 beschrieben festgelegt. Die Angaben zur Menge und zum Massenanteil beziehen sich dabei auf die Mengen für die Herstellung der Rezeptur im Labor (siehe Tabelle 13). Aufgrund des größeren Volumens und der Änderung der eingebrachten Mischenergie werden voraussichtlich Anpassungen des Fließmittelgehalts nötig sein.

#### 6.2.6 Probemischung OPB

Es soll eine Probemischung vor der Erstellung des Probefeldes mit der zuvor im Labor optimierten OPB-Rezeptur durchgeführt werden. Dies ist notwendig, um die labortechnisch bestimmten Eigenschaften des OPB in einem Betonmischwerk zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

#### 6.2.7 Einbau Probefeld OPB

Das Probefeld sollte etwa eine Woche vor dem Einbau des OPB auf einer Länge von 50 m (ca. drei Fahrmischer mit je 7 m<sup>3</sup> Ladung) außerhalb der Lage der geplanten beiden Messstellen (siehe Kapitel 6.2.13) auf dem Unterbeton der Versuchsstrecke in voller Breite von 6,5 m hergestellt werden. Hierbei soll der OPB auf die Einbaubarkeit überprüft werden, Voreinstellungen des Fertigers vorgenommen und die Transportkette des OPB analysiert werden. Dies soll außerdem zeigen, ob der Transport mit Fahrmis-

Rezepturempfehlung TUM:			
	Ausgangsstoffe:	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Masseanteil [kg/m <sup>3</sup> ]
Gesteinskörnung	Diabas 5/8 Bad Berneck (kubisch)	2865	1645,00
Zement	CEMI42,5 (Burglengenfeld)	3130	300,00
Zusatzstoffe	Sh compact (Kalksteinmehl)	2752	26,00
Fasern	Dolanit 18 (Acrylfasern)	1185	2,00
Zusatzmittel	Sika VF-30 (FM)	1050	3,80
	Sika VZ-10	1110	1,50
	Tylose H300P2 (Cellulose)	1396	0,45
Flüßigkeit	Wasser	1000	50,75
	Etonis 260	1060	50,75
w/z-Wert: 0,24    Leimgehalt: 21,1 Vol.-%			

Tab. 13: OPB Rezeptur PWC-Anlage Brunngas

chern möglich ist oder ob auf einen Transport mit Muldenkippern umgestellt werden muss, um einen zuverlässigen Materialfluss zu sichern.

Das Probefeld soll in einer Schichtdicke von 7 cm eingebaut und direkt nach der Herstellung wieder zurückgebaut werden.

#### 6.2.8 Reinigung des Unterbetons

Die Reinigung der Oberfläche des Unterbetons erfolgt zuerst durch das Entfernen der losen Bestandteile. Im Anschluss daran findet eine Kugelstrahl- (nach ZTV ING) und Drehjetreinigung statt. Die Fugen sollen vor der Kugelstrahlreinigung abgeklebt werden.

Diese Reinigungsprozesse sollen nach dem Rückbau des Probefeldes erfolgen.

#### 6.2.9 Transport des OPB

Der Transport des OPB soll nach Wunsch des Auftraggebers (BAST) mit Fahrmischern erfolgen. Es müssen zwingend neuere Fahrzeuge eingesetzt werden, da abgenutzte Mischwendeln bei der Übergabe des Betons an den Fertiger den erforderlichen Massenstrom nicht sicherstellen können. Für den Fall, dass sich der Transport mit Fahrmischern beim Einbau des Probefeldes als nachteilig herausstellen sollte, weil eine Sicherstellung des Materialflusses nicht gewährleistet werden kann, soll der Antransport mit abdeckbaren Muldenkippern (keine Aluminiummulden) erfolgen.

Die Transportzeit muss vor der Baumaßnahme berücksichtigt werden. Die maximal zulässige Zeit hängt von den Wetterbedingungen, der Zementart und den Zusätzen ab. Bei gemäßigteren Temperaturen kann längerer Transport möglich sein. Bei extremen Temperaturen sollte die Transportzeit reduziert werden.

Für einen gleichmäßigen Einbau ist eine ausreichende Anzahl an Transportfahrzeugen vorzuhalten, damit eine Einbauleistung des Fertigers von etwa 1 m/min angestrebt werden kann. Wiederholte Standzeiten des Fertigers und Unterbrechungen im Einbaufortschritt führen zu tendenziell schlechterer Einbauqualität.

### 6.2.10 Einbau des OPB

Der Einbau des OPB wird mit einem modifizierten Straßenfertiger der JOSEPH VÖGELE AG in einer Einbaubreite von 6,5 m durchgeführt. An diesen Fertiger wird eine starre, für den Betoneinbau konzipierte Hochverdichtungsbohle (SB 250 B - TVP2, Fa. JOSEPH VÖGELE AG), angeschlossen. Bei dieser Bohle kommen Tamper (T) (Stampfleisten), Vibration (V) des Glättbleches und zwei Pressleisten (P2) zum Einsatz. Diese Bohle wird eingesetzt, wenn keine Nachverdichtung, wie beispielsweise durch Walzen, mehr zum Einsatz kommt.

Diese starre Bohle muss an einen Straßenfertiger, der durch zusätzliche Hydraulikpumpen modifiziert wurde, angebaut werden (siehe Bild 40). Die Hochverdichtungsbohle (HV-Bohle) ist eine starre Bohle mit 2,5 m Grundbreite, die mit Anbauteilen (250, 500, 1.000 und 1.500 mm) auf eine maximale Einbaubreite von 7,50 m aufgerüstet werden kann (RIFFEL, 2012). Bei einer Verbreiterung ist immer auf Symmetrie des Anbaus zu achten, da die Maschine aufgrund des sich einstellenden Gegen-drucks durch den mit den Schnecken verteilten Beton sonst seitlich zu schieben beginnt, was schlechtere Einbauqualitäten mit sich bringt. Diese spezielle Bohle unterscheidet sich von einer herkömmlichen Bohle durch ein um 130 mm längeres Glättblech und stärkere Vibratoren.

Die optimale Einstellung des Fertigers kann erst vor Ort während des Einbaus erfolgen, da dies von der Konsistenz des Oberbetons, der Witterung und weiteren Faktoren abhängt. Ständiges Anhalten des Fertigers und Unterbrechungen des Einbaus lassen keine optimalen Einstellungen der Maschine und somit auch keinen optimalen Einbau zu.

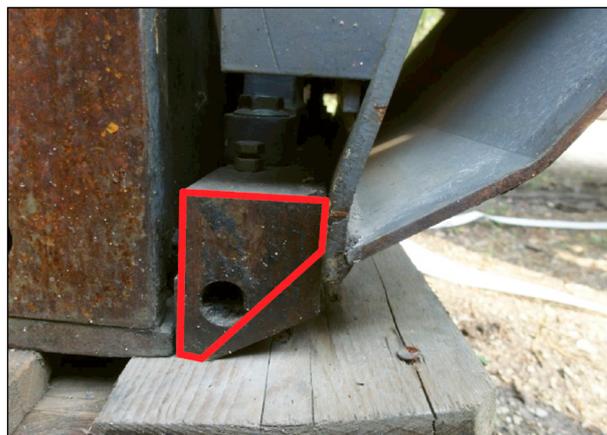


Bild 40: Hochverdichtungsbohle mit Tamper (HOFMEISTER, 2017)

Beim Anbau an den Bestand ist es zu empfehlen, unter der Seitenschalung Kunststoffschienen anzuordnen, um Kantenschäden während des Einbaus zu minimieren.

Das Einbaupersonal sollte vor dem OPB Einbau auf der Maschine geschult werden.

Die Höhe für den Einbau des OPB wird mit einem Ski als Nivelliermittel von den benachbarten Oberflächen (Schlitzrinne, Lkw-Stellfläche) abgelesen. Um eine profilgerechte Lage und Ebenföchigkeit der Oberfläche zu gewährleisten sollte der Ski auf einer ebenen Unterlage geführt werden.

### 6.2.11 Nachbehandlung

Zur Nachbehandlung bei in der Vergangenheit ausgeführten Demonstratoren und Versuchsstrecken mit OPB wurden ein feuchtes Vlies sowie eine Folie aufgelegt.

Griffigkeitsmessungen haben gezeigt, dass die Griffigkeitswerte auf den Demonstratoren und Versuchsstrecken einen nicht ausreichenden Wert aufweisen. Zur Verbesserung der Griffigkeit der OPB Oberfläche wird ein sogenanntes Waschbetonpapier von der Firma HEBAU GmbH zum Einsatz kommen. Dieses wird direkt nach Einbau des OPB auf die Oberfläche gelegt, mit einem befeuchteten Vlies abgedeckt und gegen Verrutschen und Abheben gesichert. Das Vlies muss dabei stets feucht gehalten werden. Nach ca. 24 h wird das Waschbetonpapier abgenommen und der oberflöchliche Zementleim entfernt. Hierbei reicht aus den Erkenntnissen aus Laborversuchen ein handelsüblicher Hochdruckreiniger mit bis zu 150 bar Wasserdruck. Eine gleichzeitige Absaugung des Wassers von der Oberfläche sollte stattfinden, damit die ausgewa-

schen Feinteile nicht in die Hohlräume gewaschen werden und so ungewollt den Hohlraumgehalt verändern.

Das Waschbetonpapier bewirkt eine oberflächliche Verzögerung des Abbindeprozesses der obersten Zementleimschicht (HEBAU GmbH). Somit ist die Mikrostruktur der Gesteinskörner an der Oberfläche der Offenporigen Betonschicht gegeben und die Griffigkeit wird erhöht.

Das Waschbetonpapier ist laut Herstellerangaben zur Herstellung von gewaschenen bzw. feingewaschenen Betonoberflächen (Beton-Gehwegplatten, Treppenstufen) geeignet. Aus diesem Grund sollten praxisgerechte Vorversuche, bei welchen das Herstellungsprozedere und die beabsichtigte Verwendung realitätsgetreu erfasst wird, durchgeführt werden. (HEBAU GmbH, 2015)

Die Wirksamkeit des Waschbetonpapiers muss nach Fertigstellung der Versuchsstrecke sowie bei Wiederholungsmessungen überprüft werden, da für den Anwendungsfall mit OPB keine Erfahrungen vorliegen.

### 6.2.12 Anschlussbereiche

#### Lkw-Stellfläche – OPB

Die Längspressfuge soll verankert hergestellt werden. Im Bereich der Fuge wird der OPB oberflächlich auf einer Breite von 10 mm und in einer Tiefe von 22 mm aufgeschnitten und mit PCC-Mörtel vergossen. Damit soll ein Ausbrechen der Körner im Randbereich verhindert werden, was unter anderem auf der PWC-Anlage in Silberbach beobachtet werden konnte (siehe Bild 41). Am Übergang zur Lkw-Stellfläche befindet sich der Hochpunkt in Querrichtung. Hier soll der OPB bündig zur Betonoberfläche der Stellflächen eingebaut werden.

Die Achse der Anker soll dabei 9 cm über der Oberkante der Asphalttragschicht liegen.

#### Schlitzrinne - OPB

Entlang der Schlitzrinne soll eine 10 mm breite Raumfuge, die bis zur Unterseite des Unterbetons ausgebildet wird, hergestellt werden. Die Raumfugeneinlage im OPB soll an die Schlitzrinne geklebt und im Bereich der seitlichen Einlauföffnung (Perforationen) der Schlitzrinne ausgespart werden (siehe dazu den anschließend skizzierten Bauablauf). Diese Öffnungen in der Schlitzrinne dienen der Wasserabführung aus der OPB Fläche in die Schlitzrinne.



Bild 41: Kornausrüche im Übergangsbereich, OPB - Lkw Stellfläche (Beton), PWC-Anlage Silberbach

ne. Somit kann das Niederschlagswasser direkt in die Schlitzrinne abgeführt werden und staut sich hier nicht auf.

Die Fugeneinlage ist an die Schlitzrinne zu kleben bzw. gegen Kippen zu sichern.

Der Tiefpunkt des OPB befindet sich im Übergangsbereich zur Schlitzrinne. In diesem Bereich soll der OPB 0,5 cm höher als die Oberkante der Schlitzrinne eingebaut werden. Dieser Überstand soll bewirken, dass das Oberflächenwasser direkt über die Schlitzrinne abgeführt wird und auch bei unvermeidlichen Einbautoleranzen in der Höhe keine negativen Auswirkungen bei der Entwässerung darstellt.

In Bild 42 ist der Bauablauf zur Herstellung der Raumfuge skizziert.

#### Asphalt – OPB – Asphalt

Im Übergangsbereich von Asphalt zu OPB beziehungsweise OPB zu Asphalt soll die Fuge mit einer heiß verarbeitbaren Fugenmasse vergossen werden.

Dabei soll die Fugenspalttiefe mindestens 40 mm und die Fugenspaltbreite 15 mm aufweisen.

Die Fuge ist schräg unter einem Winkel von  $80 \pm 5$  gon herzustellen (M VaB Teil 1).

Aufgrund der geometrischen Randbedingungen an der PWC-Anlage Brunngras soll der Übergangsbereich von Asphalt auf OPB auf Wunsch des Bauherrn (Autobahndirektion Südbayern) als verstärkte Betonplatte ausgeführt werden.

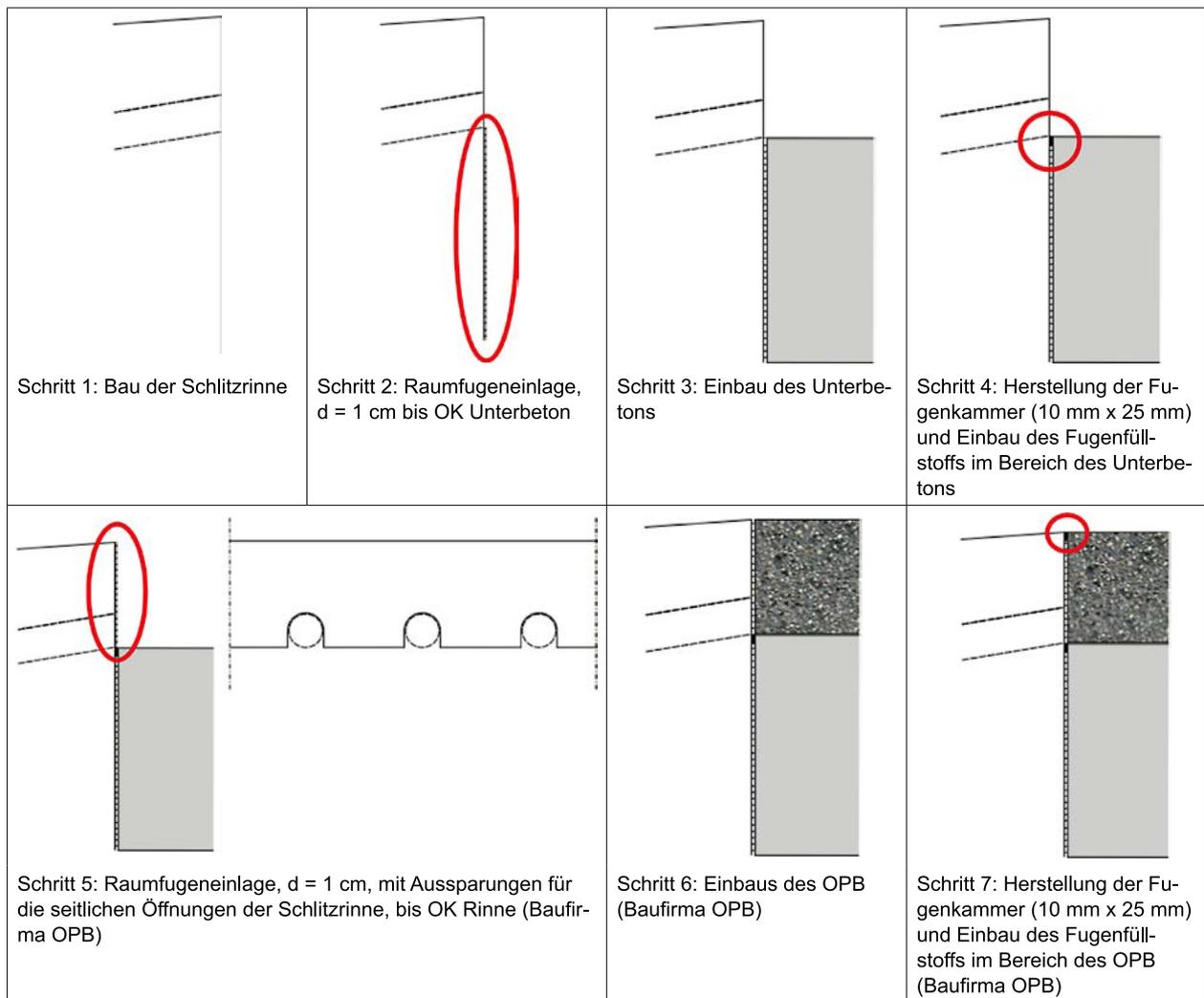


Bild 42: Bauablauf zur Herstellung der Raumfuge OPB-Schlitzrinne (R. SCHMERBECK)



Bild 43: Übergang Asphalt – OPB, Silberbach

### 6.2.13 Messstellen

Für die durchzuführende FE-Simulation werden die Temperaturverläufe im OPB sowie im Unterbeton und der Asphalttragschicht benötigt. Diese Temperaturwerte sind Eingabewerte für die FE-Simulation des Rissverhaltens im OPB.

Es sollen zwei Temperaturmessstellen im Bereich der Versuchsstrecke und eine Referenzmessstelle im Schwerlastparkstreifen eingerichtet werden.

Die Messstelle 1 sowie die Referenzmessstelle im Schwerlaststreifen sollen planmäßig 36 m (Stationierung 0+036) und die Messstelle 2 88 m (Stationierung 0+088) ab Beginn der OPB-Versuchsstrecke zu liegen kommen.

Die Temperatursensoren werden jeweils in der Asphalttragschicht, im Unterbeton und im OPB eingebaut (siehe Bild 44). Die Messtechnik zur Aufzeichnung der Messdaten wird neben der Versuchsstre-

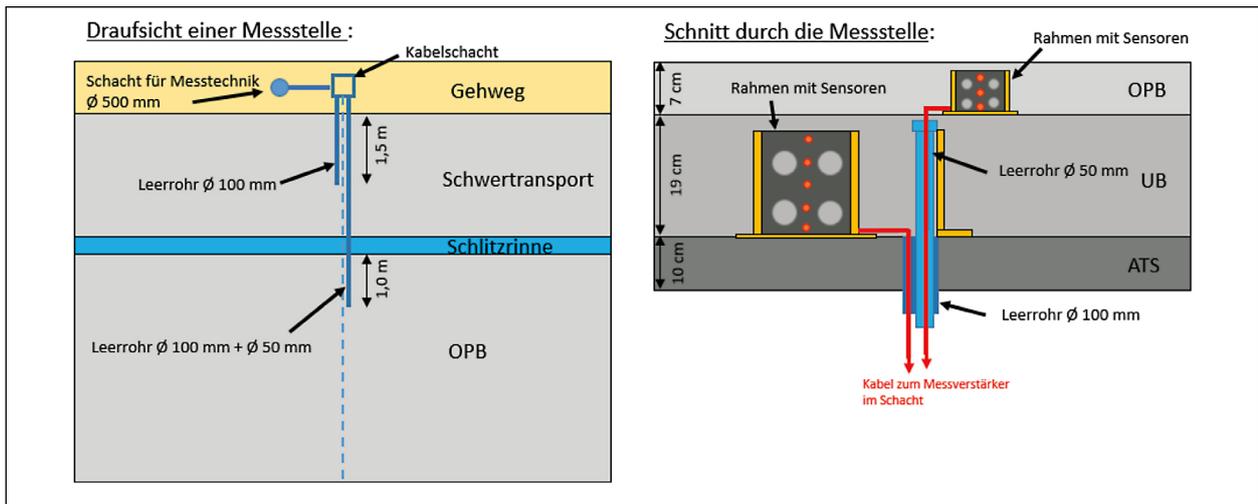


Bild 44: Lage der Leerrohre (links), Aufbau der Temperaturmessstellen (rechts)

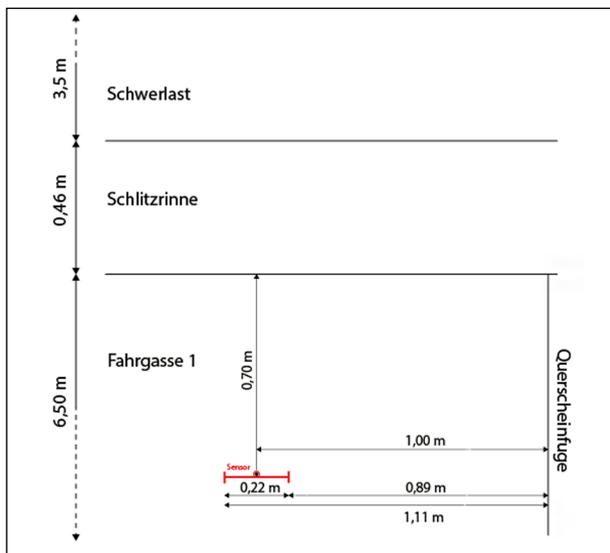


Bild 45: Positionierung der Messstelle 1 im OPB-Fahrgasse (Stationierung 0+036)

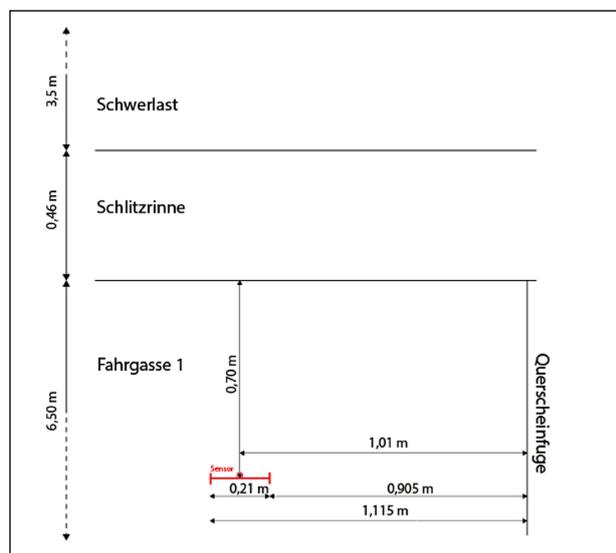


Bild 47: Positionierung der Messstelle 2 im OPB-Fahrgasse (Stationierung 0+088)

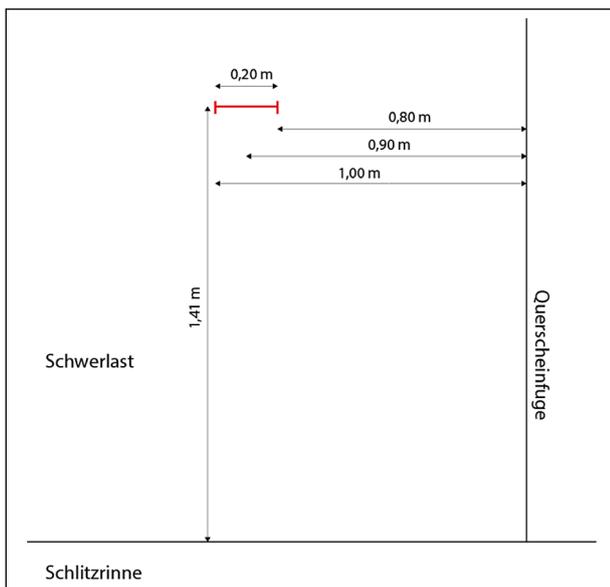


Bild 46: Positionierung der Referenzmessstelle im OPB-Fahrgasse (Stationierung 0+036)

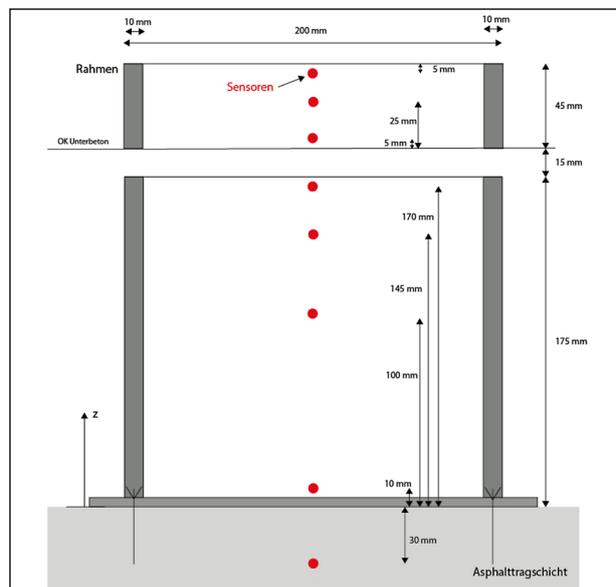


Bild 48: Lage der Temperatursensoren an den Messstellen der Versuchsstrecke

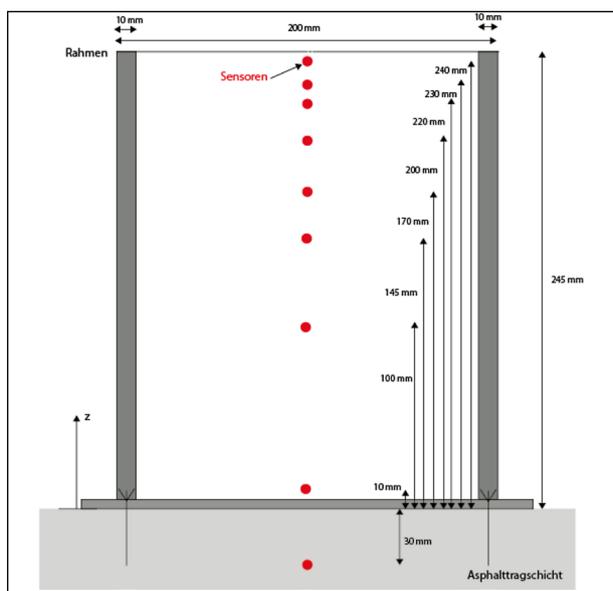


Bild 49: Lage der Temperatursensoren an der Messstelle im Schwerlastparkstreifen

cke in einem Technischacht mit Deckel verbaut. Zur Verlegung der Kabel, die von den Sensoren im Beton zur Messtechnik im Schacht verlaufen, werden durch die ausführende Baufirma Leerrohre unter der Asphalttragschicht in der Frostschutzschicht gemäß der Zeichnung der Forschungsnehmer verlegt (siehe Bild 44).

Die genaue Positionierung der Messstellen innerhalb der Versuchsstrecke sind den nachfolgenden Bildern zu entnehmen.

An den zwei Messstellen in der Versuchsstrecke werden in unterschiedlichen Höhenlagen Temperatursensoren eingebaut. Dabei wird ein Temperatursensor in die Asphalttragschicht, vier Temperatursensoren in den Unterbeton und drei Temperatursensoren in den Oberbeton eingebaut. Die genaue Sensorlage ist Bild 48 zu entnehmen. Dabei wird im Folgenden die z-Koordinate beginnend auf der Oberkante der ATS nach oben definiert.

Um die gemessenen Temperaturgradienten in der Versuchsstrecke mit den Gradienten der umliegenden Betonflächen vergleichen zu können, wird in den benachbarten Schwerlastparkstreifen eine weitere Messstelle mit einem Temperatursensor in der Asphalttragschicht und acht Temperatursensoren im Beton eingebaut (siehe Bild 49).

Die Daten der Temperatursensoren werden vor Ort durch einen Datenlogger erfasst und gespeichert. Das Zeitintervall für die Messungen wurde auf 15 Minuten festgelegt.

Zur Sicherstellung der Funktion der Messtechnik (z. B. Energieversorgung und Speicherplatz) und somit der Aufzeichnung der Parameter findet in regelmäßigen Abständen eine Überprüfung sowie eine Sicherung der Messaufzeichnungen statt.

## 7 Begleitung der Ausführung der Versuchsstrecke

### 7.1 Motivation und Zielsetzung

Während der Ausführung der Versuchsstrecke werden durch den Forschungsnehmer fortlaufend die baubetrieblichen Abläufe und die bautechnischen Ausführungen der einzelnen Schichten im Konstruktionsaufbau dokumentiert. Hierzu zählen die Vorbereitung des Untergrundes mit ausreichender Verdichtung, die Herstellung des frostsicheren Aufbaus in erforderlicher Dicke mit entsprechender Verdichtung sowie der Einbau der Tragschicht und der Einbau des Unterbetons und der offenporigen Oberbetonschicht.

Während des Einbaus des offenporigen Oberbetons werden einerseits die charakteristischen Frischbetoneigenschaften (Temperatur, Konsistenz und Hohlraumgehalt) bestimmt und andererseits baubegleitend Proben hergestellt, um die maßgebenden Festbetoneigenschaften charakterisieren zu können. Vor Ort werden rund 28 Tage nach der Herstellung zusätzlich die Haftzugfestigkeit des OPB (Verbund der obersten Kornreihe) sowie die Verbundfestigkeit der offenporigen Oberbetonschicht zum Unterbeton qualifiziert.

Nach der Fertigstellung der Versuchsstrecke wird die Wirksamkeit der im Konzept vorgeschlagenen und umgesetzten Prozessoptimierungen bewertet. Dazu werden die Dokumentation der Herstellung der Versuchsstrecke im Vergleich mit den im Konzept enthaltenen Maßnahmen analysiert und die im Rahmen der Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen erhaltenen Baustoffkennwerte mit den Prüfwerten der Labormischungen verglichen.

### 7.2 Unterlage und vorbereitende Maßnahmen

#### 7.2.1 Frostschutzschicht

Es wurden 5 statische Lastplattendruckversuche im Bereich der Versuchsstrecke auf der Oberseite der

Position	$E_{V1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V1}/E_{V2}$ [-]
1	97,8	231,8	2,4
2	102,1	226,7	2,2
3	96,1	208,6	2,2
4	73,9	204,0	2,8
5	110,3	229,0	2,1
Mittel	96,0	220,0	2,3

Tab. 14: Ergebnisse der Plattendruckversuche (B+P Baustoffprüfung, 2018)



Bild 50: Schlitzrinne mit Perforationen

Frostschutzschicht durchgeführt. Die Versuche wurden am 29.03.2018 nach DIN 18134 bei trockener Witterung und 4 °C durchgeführt.

Der erforderliche  $E_{V2}$ -Wert von 120 MN/m<sup>2</sup> wurde bei allen 5 Plattendruckversuchen eingehalten (siehe Tabelle 14). Das Mittel aus den 5  $E_{V2}$ -Werten liegt bei 220,0 MN/m<sup>2</sup> (B+P Baustoffprüfung, 2018).

Die Anforderung an das Verhältnis  $E_{V2}/E_{V1}$  liegt nach ZTV E-StB bei  $\leq 2,3$ . Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 dargestellt. Der Mittelwert der 5 Versuche liegt bei 2,3 (B+P Baustoffprüfung, 2018).

### 7.2.2 Schlitzrinne

Die Schlitzrinne, bestehend aus Fertigteilen (SR 30 U 40\*45, Fa. Rinninger Betonwaren), befindet sich im Bereich zwischen dem Schwerlaststreifen und der OPB Fläche. Die Rinnensegmente wurden bereits im Werk perforiert und im Anschluss auf der Baustelle eingebaut. Die Unterkante der Öffnungen soll 7 cm (Dicke der OPB-Schicht) unterhalb der Schlitzrinnenoberkante zu liegen kommen und den Wasserabfluss aus der OPB Schicht sicherstellen. Die Schlitzrinne befindet sich, orthogonal zur OPB Schicht, am Tiefpunkt. Die Höhenlage der Löcher (Solllage) variiert im Millimeter bis zu 1 cm Bereich (Istlage).



Bild 51: Einbau des Unterbetons mit Gleitschalungsfertiger

### 7.2.3 Asphalttragschicht

Die Asphalttragschicht wurde Anfang April 2018 aus AC 22TN mit Bitumen 50/70 hergestellt.

### 7.2.4 Unterbeton

Der Unterbeton unter der OPB Deckschicht wurde am 24.04.2018 mit einem Gleitschalungsfertiger durch die Berger Holding SE eingebaut (siehe Bild 51).

Der Unterbeton wurde mit einer Durchschnittsbreite von 6,55 m eingebaut. Die Einbaubreite variierte dabei zwischen 6,52 m und 6,57 m. Die Breiten wurden mit einem Maßband am 25.04.2018 aufgenommen.

Im Abstand von 4 m befinden sich Querscheinfugen, die mit einem Dübelabstand von 25 cm verdübelt sind. Die Höhenlage der Dübelachse sollte planmäßig 11 cm über der Asphalttragschicht liegen (siehe Kapitel 6.2.2). In der Ausführung wurden die Dübel in einer Höhe von ca. 9 cm über der Oberkante der Asphalttragschicht eingebaut (siehe Bild 52).

In Längsrichtung wird der Unterbeton auf dem ca. 6,50 m breiten Streifen, der mit OPB überbaut werden soll, mittig bei 3,25 m gekerbt. Auf die Herstellung der Fase wurde verzichtet. In der Längsscheinfuge des Unterbetons sollten die Achsen der Anker planmäßig 9 cm über der Asphalttragschicht liegen (siehe Kapitel 6.2.2). In der Bauausführung liegt die Ankerachse ca. 6,5 cm über der Oberkante der Asphalttragschicht (siehe Bild 53).

Alle Scheinfugen (Quer- und Längsfuge) im Unterbeton der Versuchsstrecke wurden ohne Ausbildung der Fase mit einer Breite von 3,2 mm gekerbt (siehe Bild 54) und im nächsten Schritt auf ca. 6,4 mm aufgeweitet. Die Fugen wurden anschlie-



Bild 52: Dübellege im Unterbeton



Bild 53: Ankerlage im Unterbeton

ßend mit einem Kaltverguss entsprechend TL Fug-StB verschlossen, damit diese während der Überbauung mit dem OPB vor eindringendem Zementleim geschützt sind.

### 7.2.5 Reinigung des UB

Die Reinigung der Oberfläche wurde auf der kompletten Versuchsstrecke vor dem Probeeinbau durchgeführt. Die Flächen des Probefeldes wurden am Tag vor dem Haupteinbau erneut gereinigt (05.06.2018).

In einem ersten Schritt wurde die Oberfläche mit einem Straßenreinigungsfahrzeug abgekehrt und anschließend im Hochdruck-Drehjet Verfahren mit



Bild 54: Ausführung des Kerbschnitts vor der Aufweitung



Bild 55: Reinigungsfahrzeug zur Oberflächenreinigung des UB



Bild 56: Kugelstrahlreinigung der UB Oberfläche

Heckabsaugung mit 300 bar gereinigt<sup>1</sup> (siehe Bild 55).

In einem zweiten Schritt wurde die Oberfläche mit der Kugelstrahl-Technik bearbeitet und gereinigt<sup>2</sup> (siehe Bild 56). Die Eindringtiefe der Stahlkugeln lag dabei bei unter 1 mm (Stahlkugel Durchmesser: 1-1,5 mm). Mit diesem Verfahren wird die Zement-

<sup>1</sup> Firma Steidel GmbH, Industrie- und Städtereinigung, Moosburg

<sup>2</sup> Firma Friedrich Oft GmbH & CoKG, Ottendorf-Okrilla



Bild 57: Handschleifgerät für die Randbereiche

schlempe, die sich an der Oberfläche durch den Herstellungsprozess abgelagert hat, aufgebrochen und die Gesteinskörnung liegt frei. Dadurch wird die Haftung zwischen UB und der Haftbrücke erhöht.

Die Fugen müssen während des Reinigungsprozesses nicht geschützt werden, da es sich bei dem Fugenmaterial (Kaltverguss) um ein dauerelastisches Material handelt, wodurch eine Schädigung der Fugenbereiche ausgeschlossen werden kann.

Die Randbereiche beispielsweise zur Schlitzrinne wurden mit einem Handschleifgerät abgeschliffen, da aus technischen Gründen dort die Kugelstrahlmaschine nicht eingesetzt werden kann (siehe Bild 57).

### 7.2.6 Einbau der Messtechnik

#### Einbau in Asphalttragschicht und Unterbeton

Die Temperatursensoren in der Asphalttragschicht werden in vertikale Bohrlöcher eingeklebt.

Die Temperatursensoren im Unterbeton werden in horizontale Bohrlöcher in einer schmalen Aufständerung aus Kunststoff verklebt. Diese wird vor dem Einbau des Frischbetons mit dem Gleitschalungsfertiger auf der Asphalttragschicht in einem Stahlrahmen befestigt (siehe Bild 58).

Die Kabel zum Verbinden der Temperatursensoren mit den Aufzeichnungsgeräten (Datenlogger) verlaufen in bereits vor dem Einbau der Asphalttragschicht verlegten Leerrohren bis zu einem Schacht, der zur Aufnahme der Messtechnik im Bereich des angrenzenden Gehwegs errichtet wurde. Mithilfe der eingebauten Messtechnik wird der zeitliche Verlauf des Temperaturgradienten in der Konstruktion bestimmt. Die Messtechnik ist dabei energieautark und läuft batteriebetrieben.



Bild 58: Messaufbau mit Leerrohr vor der Herstellung des UB



Bild 59: Messtechnik vor Überbauung mit UB



Bild 60: Freigelegtes Leerrohr

Die Lage und Höhe der Oberfläche der Asphalttragschicht und der einzelnen Sensoren wird vor dem Einbau des Unterbetons mittels Nivellement und GPS bestimmt.

Nach dem Einbau des Unterbetons wurden die Leerrohre, in denen die Kabel der Messtechnik für die OPB-Schicht geführt werden sollen, freigelegt (siehe Bild 60).

#### Einbau im OPB

Die Positionierung der Messtechnik erfolgt gemäß den Erläuterungen in Kapitel 6.2.13.

Beim Einbau der Sensoren im OPB wird entsprechend dem Einbau im Unterbeton verfahren (siehe Bild 61).

Um bereits unmittelbar nach dem Einbau des OPB die Temperaturen zu messen, wurde die Messtechnik direkt angeschlossen.

In Bild 62 ist die Messstelle abgebildet kurz vor dem Überbau mit dem OPB.

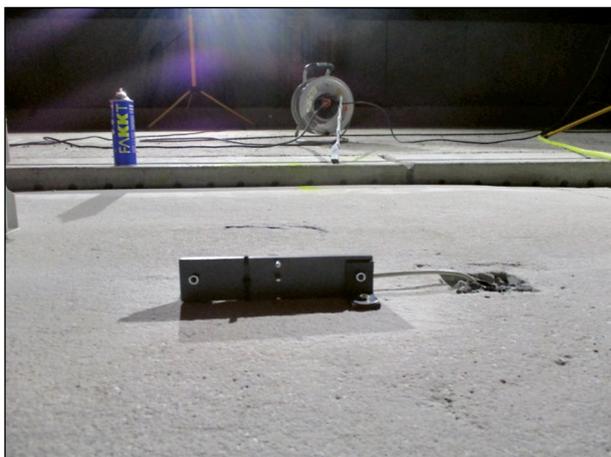


Bild 61: Messtechnik im OPB



Bild 62: Überbauung mit OPB

## 7.3 Einbau OPB

### 7.3.1 Allgemeines

Als ausführende Firma zum Einbau der Oberbetonschicht aus OPB wurde die Bauunternehmung Leonhard Weiss GmbH & Co. KG beauftragt.

#### Witterung

Für die Klimadaten wurde auf die Messstelle in Freising (48.41° Nord, 11.72° Ost) zurückgegriffen (Wetterstation Freising (LfL), 2018). Diese liegt etwa 20 km von der Versuchsstrecke entfernt.

Abgebildet sind die stündlich, 2 m über dem Boden, gemessenen Temperaturen (siehe Bild 63).

Die Höchsttemperatur während des Haupteinbaus lag bei 26 °C (Einbauende ca. 11 Uhr).

Während des OPB-Einbaus sowohl am 05.06.2018 (Probefeld) sowie auch am 06.06.2018 gab es keinen Niederschlag. Am 06.06.2018 kam es am Abend zu stärkeren Niederschlägen im Gebiet der Versuchsstrecke.

#### Einbauzeiten

Das Probefeld wurde am 05.06.2018 ab ca. 5 Uhr morgens bis ca. 9 Uhr betoniert.

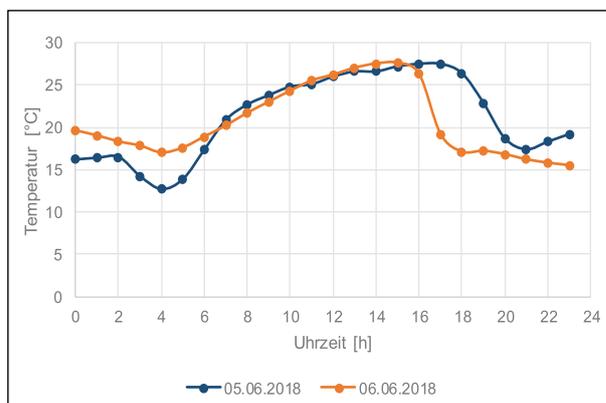


Bild 63: Temperaturwerte Probefeldeinbau und Haupteinbau (in Anlehnung an Wetterstation Freising (LfL), 2018)

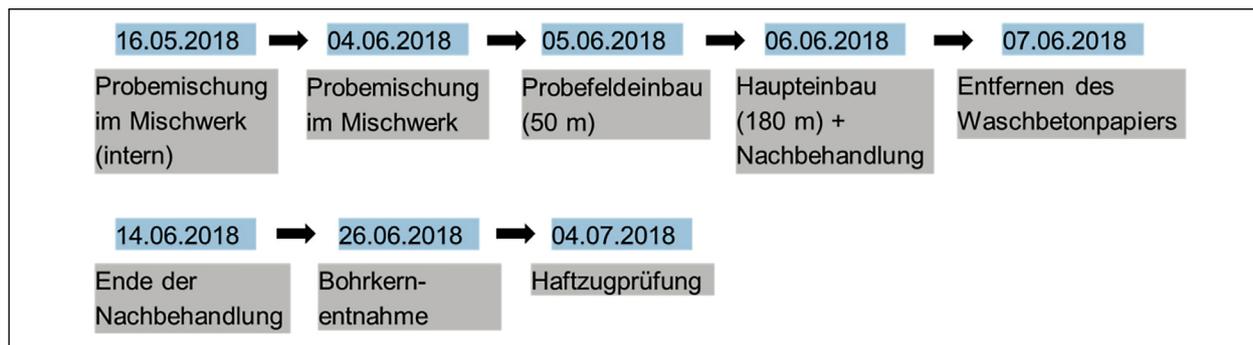


Bild 64: Schematischer Ablauf des OPB Einbaus

Der Haupteinbau fand am 06.06.2018 zwischen ca. 5 Uhr und ca. 11 Uhr statt.

### 7.3.2 Ablauf

Bild 64 zeigt den chronologischen Ablauf der durchgeführten Einzelschritte des OPB-Einbaus auf der Versuchsstrecke.

### 7.3.3 Mischwerk

Das Mischwerk der Heidelberger Beton GmbH (Werk Eching, Garching Str. 35, 85386 Eching)



Bild 65: Mischwerk Heidelberger Beton



Bild 66: Fahrweg Mischwerk - Versuchsstrecke (Bayern Atlas, 2018)

(siehe Bild 65) lieferte den OPB für die Versuchsstrecke. Der Betontransport vom Mischwerk auf die Versuchsstrecke erfolgte über eine Baustellenzufahrt, somit war die Transportzeit unabhängig vom Verkehrsaufkommen auf dem umliegenden öffentlichen Straßennetz und lag bei etwa 5 min (siehe Bild 66).

### 7.3.4 Haftbrücke

Eine maschinelle Applikation der Haftbrücke war von Seiten des Auftraggebers vorgeschlagen. Allerdings war keine maschinelle Applikation möglich, da keine entsprechenden Geräte zur Verfügung standen. Aus diesem Grund wurde die Haftbrücke vor Ort in kleinen Mengen angerührt und händisch mit Gummischiebern aufgetragen. Dazu wurden für die 6,50 m breite Fläche und die vorhandene Einbaugeschwindigkeit 3 Arbeiter benötigt (siehe Bild 67).

Die verwendete Haftbrücke von Sika „MonoTOP - 602“ ist ein zementgebundenes, kunststoffmodifiziertes 1-Komponenten-Material.

Das vom Hersteller empfohlene Mischverhältnis wurde eingehalten (25 kg Sika MonoTop mit max. 9 kg Wasser (100:36)).

Die anfangs nach Herstellerangaben aufgebrauchte Menge der Haftbrücke von 2-3 kg/m<sup>2</sup> führte beim Probefeldeinbau zu einem Rutschen und einer leichten Schiefstellung des Fertiglers im Bereich des Bogens im Anfangsbereich der Versuchsstrecke, da die nötige Traktion durch das Kettenfahrwerk auf der Haftbrücke fehlte. Daraufhin wurde die Menge auf 1 kg/m<sup>2</sup> reduziert und so am Haupteinbautag auf der gesamten Versuchsstrecke aufgetragen.



Bild 67: Aufbringung der Haftbrücke

Auch im Bereich der Reifenspuren der Kipper wurde darauf geachtet, dass diese vor dem Einbau des OPB ausreichend mit der Haftbrücke bedeckt waren (siehe Bild 68). Zudem wurde darauf geachtet, dass die Haftbrücke immer frisch aufgebracht wurde. Hierzu wurde das Aufbringen der Haftbrücke an die Einbaugeschwindigkeit des Fertigers angepasst.



Bild 68: Nacharbeiten der Fahrspuren



Bild 69: Straßenfertiger OPB Einbau (1)



Bild 70: Straßenfertiger OPB Einbau (2)

### 7.3.5 Einbaufertiger

Zum Einbau des OPB wurde ein Straßenfertiger (SUPER 1800-3i) der Firma JOSEPH VÖGELE AG verwendet (siehe Bild 69 und Bild 70). Dieser wurde durch die ausführende Firma für dieses Bauvorhaben von der JOSEPH VÖGELE AG angemietet.

Das Seitenschild wurde mit angebrachten Kunststoffschienen modifiziert, um die Kanten im Anschlussbereich (Schlitzrinne, Lkw Stellfläche) zu schonen (siehe Bild 71). Hintergrund hierfür sind die beim OPB Einbau auf der PWC-Anlage Silberbach zum Teil beobachteten Schädigungen der Anschlussbereiche.

Die Abtastung der Höhe erfolgte auf der Seite der Schlitzrinne mit einem kurzen Höhentaster (kleinen Ski) (siehe Bild 72). Auf der gegenüberliegenden Seite (Anschluss an den Lkw-Parkplatz) wurde die Höhe über die Querneigung der Versuchsstrecke abgebildet, bezogen auf die Höhe der Schlitzrinne. Zusätzlich kam auch ein Ultraschall-Multi-Sensor



Bild 71: Modifiziertes Seitenblech mit Kunststoffschiene



Bild 72: Abtastung auf der Schlitzrinne



Bild 73: Abtasten auf dem Untergrund



Bild 75: Bohlensegment



Bild 74: Anfahrt mit Kanthölzern



Bild 76: Straßenfertiger mit angebauten Bohlensegmenten

zum Einsatz, der berührungslos den Untergrund als Referenzhöhe abtasten konnte (siehe Bild 73). Ursächlich dafür war, dass im Anfangs- und Endbereich der Versuchsstrecke eine Schalung gestellt werden musste, da dort die angrenzenden Flächen noch nicht hergestellt waren (siehe Bild 73).

Das Anfahren des Fertigers wurde auf Kanthölzern mit einer Dicke von 7 cm durchgeführt. Damit konnte der Fertiger auf die richtige Höhe eingestellt werden, wodurch Unebenheiten im Anfahrtsbereich vermieden wurden (siehe Bild 74).

### 7.3.6 Einbaubohle

Beim OPB-Einbau kam eine modifizierte starre Hochverdichtungsbohle des Typs SB 250 TVP2 (Fa. VÖGELE) zum Einsatz (siehe Kapitel 6.2.10).

Die starre Bohle besteht aus einem Grundelement mit einer Breite von 2,50 m und wurde mit einzelnen Segmenten auf die benötigte Breite angepasst (siehe Bild 75 und Bild 76). Die Anbauteile mussten we-

gen der definierten Segmentbreiten und der Gesamtbreite von 6,50 m asymmetrisch angebaut werden.

### 7.3.7 Probefeldeinbau (05.06.2018)

Der Probefeldeinbau startete um 5 Uhr morgens bei sonnigem Wetter mit Temperaturen von ca. 17 °C.

Die Haftbrücke wurde vor Ort gemischt und händisch appliziert.

Die zweite Betonlieferung wurde versuchsweise mit einem Fahrmischer antransportiert. Die Entladezeit betrug bei 4 m<sup>3</sup> OPB-Frischbeton ca. 4 min. Das Material wurde mit konstanter Geschwindigkeit aus dem Mischer entladen. Allerdings war die Konsistenz des Materials nicht zufriedenstellend. Der OPB war optisch matt und trocken der feuchte Glanz fehlte (siehe Bild 77). Aus diesem Grund wurde folgend sowie am Haupteinbautag der OPB ausschließlich mit Muldenkippern antransportiert.

Am Tag des Probefeldeinbaus war ein Muldenkipper im Umlauf.

Zu Beginn des Probefeldeinbaus sollten die Einstellungen der Bohle angepasst werden. Dabei wurden die Vibrations-, Tamper- und Pressleisteneinstellungen variiert bis augenscheinlich ein gutes Oberflä-



Bild 77: OPB nach Transport in Fahrmischer

chenbild entstand. Zu Beginn wurde die Vibration des Glättbleches ausgeschaltet. Bei dieser Einstellung sah die Oberfläche inhomogen und aufgerissen aus (siehe Bild 78). Daraufhin wurde die Vibration zugeschaltet und nach einiger Variation auf 70 % eingestellt. Der Übergang ab dem Einschalten der Vibration ist in der Bild 79 deutlich zu erkennen.



Bild 79: Variation der Vibration beim Probefeldeinbau

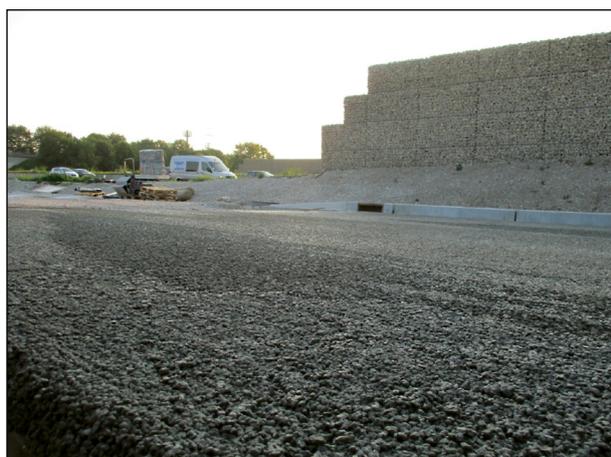


Bild 78: Oberfläche zu Beginn des Probefeldes

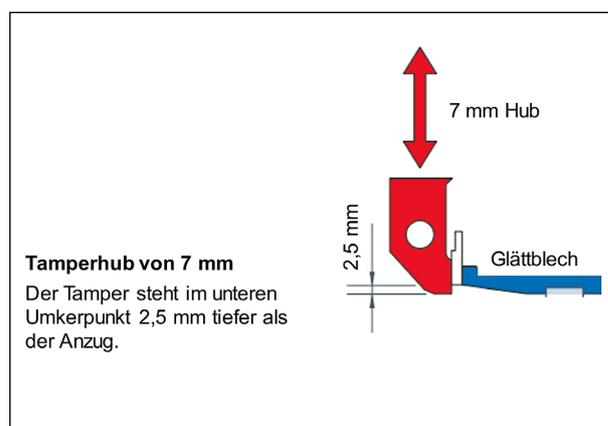


Bild 80: Einstellung Tamperhub (in Anlehnung an WIRTGEN GROUP, 2018)

Stationierung	Einbaugeschwindigkeit	Tamper		Vibration		Pressleiste	Kommentar
		[%]	[U/min]*	[%]	[U/min]*		
[m]	[m/min]	[%]	[U/min]*	[%]	[U/min]*	[bar]	
0	1	-	-	-	-	-	
3	1	75	1350	-	-	-	
4	1	100	1800	-	-	-	
7	1	60	1080	40	1440	-	
10	1	70	1260	50	1800	40	Oberfläche geschlossener (Mikrostruktur gleichmäßiger), vereinzelt dicht
16	1	70	1260	-	-	40	
21	1	70	1260	50	1800	40	Oberflächlich fehlen vereinzelt Körner in der obersten Kornreihe, Oberfläche teilweise aufgerissen
24	1	70	1260	25	900	40	Oberfläche augenscheinlich schlechter
28	1	70	1260	80	2880	40	
32	1	70	1260	70	2520	40	
36							Ende Probefeld

\* Umdrehungen/Minute

Tab. 15: Bohleneinstellungen beim Probefeldeinbau



Bild 81: Oberfläche des OPB beim Probefeldeinbau



Bild 83: Antransport des OPB



Bild 82: Rückbau des Probefeldes

Der Tamperhub wurde für eine große Vorverdichtung sowie Verdichtungstiefe auf 7 mm eingestellt (siehe Bild 80)

Die Modifikationen der Bohleneinstellung die im Verlauf des Einbaus des Probefeldes durchgeführt wurden sind in Tabelle 15 dargestellt.

Gegen Ende des Probefeldes wies die Oberfläche ein homogenes Erscheinungsbild auf (siehe Bild 81).

Nach der Herstellung des Probefeldes wurde es direkt zurück gebaut (siehe Bild 82).

Stationierung	Einbaugeschwindigkeit	Tamper		Vibration		Pressleiste
[m]	[m/min]	[%]	[U/min]*	[%]	[U/min]*	[bar]
0	1	70	1260	70	2520	40
61,5	1	70	1260	40	1440	40
127,5	1	70	1260	80	2880	40

\*Umdrehungen/Minute

Tab. 16: Bohleneinstellungen beim Haupteinbau

Datum	T <sub>max</sub>	T <sub>mit</sub>	T <sub>min</sub>	Niederschlag	Wind	Sonne
[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[m/s]	[h]
07.06.2018	26,0	18,6	13,3	0,2	5,9	7,0
08.06.2018	27,7	20,6	15,1	0,0	4,9	8,8
09.06.2018	26,8	20,6	15,5	0,0	5,3	8,8
10.06.2018	26,4	20,8	15,9	0,3	6,8	11,2
11.06.2018	28,8	21,1	14,5	0,3	9,3	9,3
12.06.2018	24,0	18,0	15,0	10,9	5,0	2,5
13.06.2018	15,3	13,4	12,0	4,9	5,5	0,0
14.06.2018	18,8	14,1	8,8	0,0	3,8	6,6

Tab. 17: Klimawerte im Zeitraum der Nachbehandlung (LMU, Fakultät für Physik, Meteorologie, 2018)

### 7.3.8 Haupteinbau OPB (06.06.2018)

Der Antransport des OPB erfolgte ausschließlich mit Muldenkippern (siehe Bild 83). Es waren drei Muldenkipper im Umlauf.

Die FertigerEinstellungen sind in Tabelle 16 dargestellt.

### 7.3.9 Nachbehandlung

Während der 8-tägigen Nachbehandlung wurden folgende Klimawerte in dem Meteorologischen Institut Garching im Oskar von Miller Turm (48.26° Nord, 11.66° Ost) gemessen (siehe Tabelle 17). Diese Messstation befindet sich etwa 3 km von der Versuchsstrecke entfernt. Bei dieser Station stehen zusätzlich Daten zum Niederschlag, der Sonnendauer sowie der Windstärke zur Verfügung.

Zur Nachbehandlung wurde direkt nach dem Einbau ein Vlies aufgelegt (siehe Bild 84). Dazu wurden 4 Rollen benötigt, die nebeneinander ausgerollt wurden. Das Vlies wurde durch in regelmäßigen Abständen aufgestellte Rasensprenger bewässert. Während der 8-tägigen Nachbehandlung wurde das Vlies stets feucht gehalten.

Angrenzend an die Lkw-Stellfläche wurde auf einer Breite von 1 m über die volle Länge der Versuchsstrecke ein Waschbetonpapier aufgelegt (siehe Bild 84). Das Waschbetonpapier wurde unmittelbar vor dem Vlies ausgerollt und stellte im Prozessablauf keine Behinderung dar.

### 7.3.10 Auswaschen des oberflächlichen Zementleims

Nach 24 h wurde in dem Bereich, wo das Waschbetonpapier aufgelegt war, mit einem handelsüblichen Hochdruckreiniger mit ca. 150 bar und einem Abstand von ca. 20 cm, zwischen Hochdrucklanze und Oberfläche, der oberflächliche Zementleim ausgewaschen (siehe Bild 85 und Bild 86).

Auf unterschiedlichen Flächen auf denen das Waschbetonpapier aufgelegt war, wurde der Hochdruckreiniger angesetzt und getestet, ob sich der oberflächliche Zementleim entfernen lässt. Im Anfangsbereich der Versuchsstrecke war der Oberflächenleim bereits deutlich erhärtet, sodass sich dieser nicht mehr entfernen ließ. Im Endbereich der Versuchsstrecke hingegen lösten sich noch relativ viele Gesteinskörner aus der Gesteinsstruktur, da die Festigkeit noch zu gering war. In einem Zwi-



Bild 84: Auflegen Vlies und Waschbetonpapier



Bild 85: Entfernen des Waschbetonpapiers



Bild 86: Auswaschen des oberflächlichen Zementleims



Bild 87: Oberfläche nach dem Auswaschen



Bild 88: Anschlussbereich zur Lkw-Stellfläche

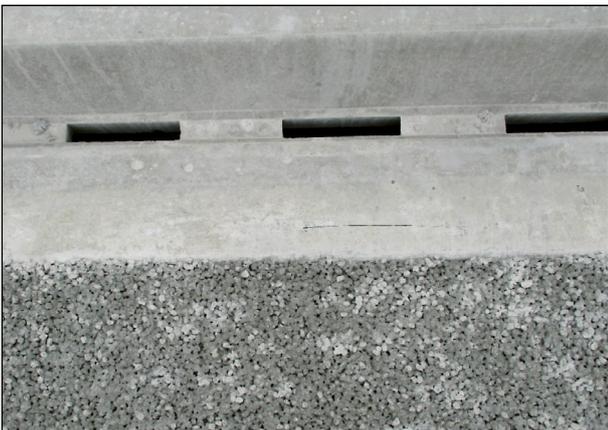


Bild 89: Anschlussbereich zur Schlitzrinne



Bild 90: Übergangsbereich zum Asphalt, geschnitten

schenbereich, in dem nur vereinzelte Gesteinskörner aus der Struktur gelöst wurden und sich augenscheinlich der oberflächliche Zementleim abtragen ließ, wurde auf einer Länge von ca. 20 m der oberflächlichen Zementleim entfernt. Nach visueller Einschätzung wurde festgestellt, dass kein vollflächiger Abtrag des Zementleims erfolgt ist (siehe Bild 87).

### 7.3.11 Anschlussbereiche

#### Anschlussbereich zur Lkw-Stellfläche

Der OPB im hochliegenden Anschlussbereich zur Lkw-Stellfläche wurde beim Einbau mit einer Pressfuge an die Stellfläche hergestellt. Im Nachgang wurde die Fuge auf eine Breite von 1 cm aufgeweitet und mit einem PCC-Mörtel vergossen.

#### Anschlussbereich zur Schlitzrinne

Der tiefliegende Anschlussbereich zu Schlitzrinne wurde beim Einbau mit einer Pressfuge ausgeführt. In diesem Bereich wurden keine weiteren Maßnahmen durchgeführt. Die vorgesehene Raumfuge ist im Unterbeton vorhanden, im OPB jedoch nicht.

#### Übergangsbereich zum Asphalt

Der Anfangs- und Endbereich des OPB wurde um einige Zentimeter zurückgeschnitten, um einen definierten Übergang zum angrenzenden Oberbau sicher zu stellen. Dieser Schnitt wurde als schräger Übergang von Asphalt auf Beton ausgeführt. Somit wird ein zeitgleiches Überrollen der Fuge mit beiden Rädern einer Achse vermieden.

## 7.4 Materialüberwachung OPB

### 7.4.1 Allgemeines

Im Rahmen des Vorhabens wurde der Beton baubegleitend sowohl im Betonmischwerk als auch auf der Baustelle untersucht. Hierbei wurden für das Testfeld jede und für das Hauptfeld ca. jede 2. Materiallieferung beprobt. Im Betonmischwerk erfolgte die Probenahme nach dem Mischvorgang und dem anschließenden Verladen vom Transportfahrzeug. Auf der Baustelle wurde der zu beprobende Beton aus dem Fertiger entnommen. Mit den Frischbetonproben erfolgten die in Tabelle 18 dargestellten Untersuchungen. Die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit erfolgt jeweils an einer oberen und unteren Scheibe des Probekörpers.

## 7.4.2 Probefeld

Um Fertiger und Mischung aufeinander anzupassen wurde im Rahmen des Probefeldeinbaus in mehreren Schritten die Rezeptur angepasst. In Tabelle 18 sind die vorgenommenen Anpassungen und in Bild 91 die zugehörigen Verdichtungsmaße zu sehen. Bei Mischung 1 (Fahrzeug 0) kam es zu einer Überdosierung des Fließmittels, weswegen diese bereits im Werk entsorgt wurde. Da Mischung 2 werkseitig als sehr weich eingestuft wurde, wurde für die nächste Mischung der Wassergehalt drastisch gesenkt. Durch die zwei unterschiedlichen Mischungen auf einem Fahrzeug ist eine genaue Zuordnung der Frischbeton Untersuchungsergebnisse zu einer Mischung nicht möglich. Fahrzeug 2 ist im Weiteren gesondert zu be-

	Betonmischwerk	Baustelle
Frischbetonuntersuchungen:		
Verdichtungsmaß	X*	X
Frischbetontemperatur	X*	X*
Probenherstellung für die Prüfung von:		
Druckfestigkeit	Würfel	Zylinder*
Spaltzugfestigkeit und Hohlraumgehalt*	Zylinder	Zylinder
Frost-Tausalzbeständigkeit (CDF-Test)	Würfel*	-
Biegezugfestigkeit	-	Balken*
*nur beim Hauptfeld		

Tab. 18: Versuchsprogramm der Materialüberwachung

Fahrzeugnr.	[-]	0*	1	2**	3-5	
Gesamtwasser	[kg/m³]	58,5	52,0	42,0	47,0	52,0
Fließmittel	[kg/m³]	12,39	3,78	3,78	3,78	3,78
* Im Mischwerk entsorgt						
** Transport mit dem Fahrmischer						

Tab. 19: Rezepturanpassungen beim Probefeld

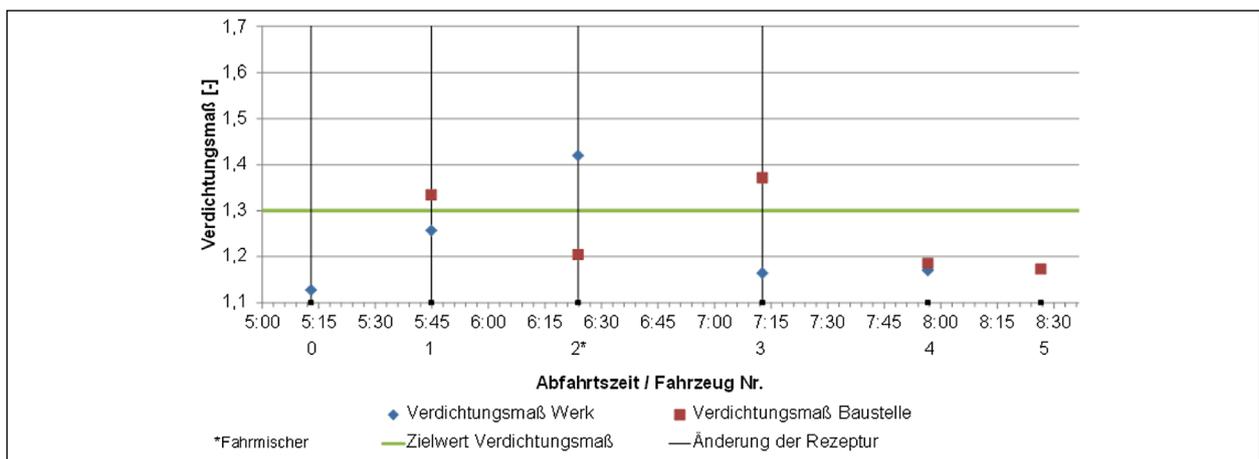


Bild 91: Verdichtungsmaß während der Herstellung des Testfelds

trachten, da hier testweise ein Fahrmischer zum Einsatz kam. Das hierbei ermittelte hohe Verdichtungsmaß im Werk beschreibt die schlechte Verarbeitbarkeit des Betons, wohingegen die Messdaten von der Baustelle als Schwäche des Verdichtungsmaßes bei körniger Konsistenz zu bewerten sind (siehe Kapitel 4.6). Ab Fahrzeug 3 wurde die Mischung baustellenseitig als brauchbar angesehen und beibehalten. Hierbei wichen die Fahrzeuge 4 und 5 jedoch stark von dem ursprünglich als Zielwert gesetzten Verdichtungsmaß von 1,3 ab.

In Bild 92 sind die Rohdichten, Druck- und Spaltzugfestigkeiten sowie die zugehörigen Hohlraumgehalte dargestellt. Es zeigt sich für die Mischungen, die vom Baustellenpersonal als gut eingestuft wurden, dass die Werte bezüglich der Rohdichte und des Hohlraumgehalts auf der Baustelle nahezu den Zielwerten entsprechen. Auch die Druckfestigkeit im Werk erreicht die angestrebten Werte, besitzt hierbei jedoch einen deutlich geringeren Hohlraumgehalt. Die Spaltzugfestigkeiten weisen lediglich Werte von rund 60 % des Zielwerts auf. Die Ursache für die erheblichen Abweichungen der Spaltzugfestigkeiten zwischen Labor und Feldproben konnte bislang nicht ermittelt werden.

In den eckigen Klammern sind die zur Mittelwertbestimmung eingesetzte Anzahl der Proben angegeben.

## 7.4.3 Haupteinbau

Der Haupteinbau des offenporigen Betons erfolgte am 06.06.2018 ab ca. 05:00 Uhr. Die Fahrzeit vom Betonwerk zur Baustelle betrug zwischen 3 und 8 Minuten. Bild 93 stellt die Abfolge der Ankunftszeiten der Lieferfahrzeuge auf der Baustelle dar. Es ist

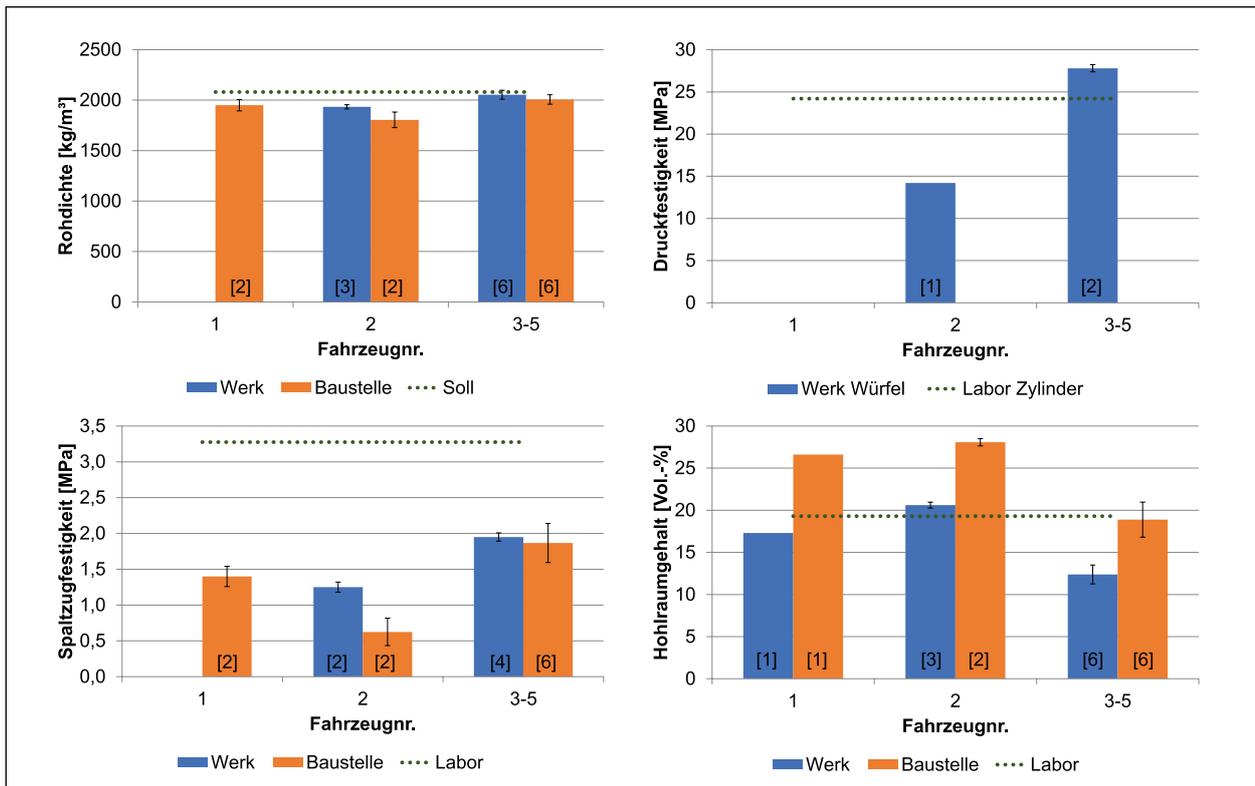


Bild 92: Rohdichte (links oben), Druckfestigkeit (rechts oben), Spaltzugfestigkeit (links unten) und Hohlraumgehalt, bestimmt an Frischbetonproben (rechts unten) der Hauptfeld Überwachung

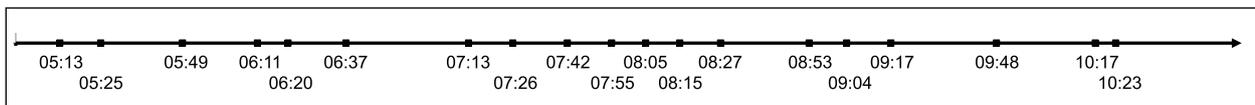


Bild 93: Zeitlicher Verlauf der Betonlieferungen



Bild 94: Ursachen für den Ausfall der Dispersionspumpe, in den Gebinden gebildete Haut (links) und der aus dem Ansaugschlauch entfernte Pfropfen (rechts)

ersichtlich, dass es zu wiederholten Lieferverzögerungen kam.

Als Ursachen für die Verzögerung sind technische Defekte sowie planerische Fehler zu nennen. So entstanden die ersten beiden Verzögerungen durch abwesendes Personal, das zur händischen Zugabe der Fasern und der Cellulose benötigt wurde und durch den Versuch das Mischvolumen von 2 m<sup>3</sup> auf

3 m<sup>3</sup> pro Mischung zu steigern. Alle weiteren Defizite sind auf anlagenseitige Defekte, wie die zeitweise Verstopfung der Dispersionspumpe durch Hautbildung der Dispersion (siehe Bild 94) und den zeitweisen Ausfall der Wasser- und Zusatzstoffwaage zurückzuführen.

Im Laufe des Betoneinbaus wurde aufgrund einer ungenügenden Verarbeitbarkeit des Betons (Liefe-

Fahrzeugnr.	[-]	1-4	5	6	7-9	10-13	14-16	17-19
Gesamtwasser <sup>1</sup>	[kg/m <sup>3</sup> ]	50,0	52,0	56,0	61,0	69,0	73,5	68,5
Angenommene Gesteinsfeuchte	[%]	1,1	1,1	1,1	0,5	0,0	0,0	0,0
	[kg/m <sup>3</sup> ]	18,3	18,3	18,3	8,3	0,0	0,0	0,0
Verzögerer	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,63	1,63	2,61	2,61	2,61	2,61	2,61
Fließmittel	[kg/m <sup>3</sup> ]	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	4,18	4,18

<sup>1</sup> Gesteinsfeuchte mit einberechnet

Tab. 20: Rezepturanpassung beim Haupteinbau

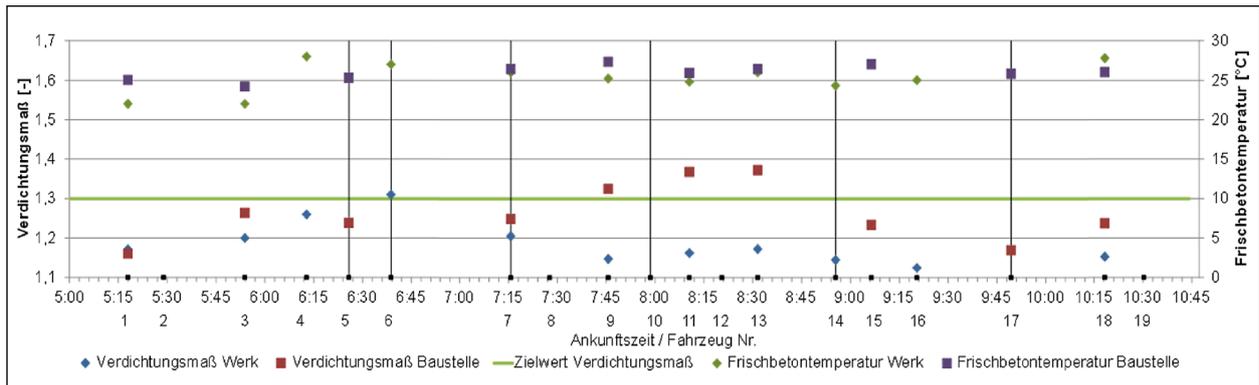


Bild 95: Verdichtungsmaß und Frischbetontemperatur während des Hauptfelds

zung zu steifen Materials) die Rezeptur mehrfach angepasst. Insbesondere erfolgte eine wiederholte Anpassung (i. d. R.: Steigerung) des Wassergehalts, sowie der Verzögerer- und Fließmitteldosierung. Die einzelnen Anpassungsschritte können Tabelle 20 entnommen werden.

Die Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen am Haupteinbau können Bild 95 entnommen werden. Es zeigt sich ein Verdichtungsmaß, das mit wenigen Ausnahmen weit unterhalb des angestrebten Verdichtungsmaßes von 1,30 lag. Dies hat bis zu Fahrzeugnr. 7 seine Ursache in einer sehr trockenen körnigen Konsistenz, bedingt durch die fälschlicherweise mit 1,1 % zu hoch angenommene Eigenfeuchte der Gesteinskörnung, durch die dem Beton bis zu ¼ der Gesamtwassermenge fehlte. Die angegebene weiche Verarbeitbarkeit liegt daher in der bereits aus dem Labor (siehe Kapitel 4.6) bekannten Schwäche des Verdichtungsmaßes bei körniger Konsistenz und lässt damit keinen Rückschluss auf die reale Verarbeitbarkeit zu.

Zudem wiesen die Frischbetone bereits in den frühen Morgenstunden (ab 6:00 Uhr) Temperaturen von bis zu 28 °C auf, was zusätzlich zur Reduktion der Verarbeitbarkeit beigetragen hat. Auch hier sind die niedrigen Werte des Verdichtungsmaß auf die Schwächen des Prüfverfahrens zurück zu führen.

Ab dem Fahrzeug 7 wurden durch eine Reduktion der angenommenen Gesteinskörnungsfeuchte und der zuvor sukzessiven gesteigerten Höhe des Wassergehalts Mischungen erreicht, die im Werk eine sehr weiche Konsistenz aufwiesen, diese aber bis zur Prüfung auf der Baustelle verloren und wiederum mit körniger Konsistenz geliefert wurden.

Durch eine weitere Steigerung des Wassergehalts und die gleichzeitige Reduktion der angenommenen Gesteinseigenfeuchte auf 0,0 % wurde ab Fahrzeug 10 eine Mischung erreicht, die im Werk sehr weiche Konsistenz aufwies, diese aber während des Transports nur teilweise verlor, sodass folglich ein steifer, aber nicht körniger Beton auf der Baustelle zur Verfügung stand. Für die Verarbeitung im Fertiger wurde diese Konsistenz von den am Baubeteiligten als zu steif angesehen.

Ab dem Fahrzeug 14 wurde durch die weitere Erhöhung des Fließmittel- und Wassergehalts eine Konsistenz erreicht, die auf der Baustelle verarbeitbar war. Diese lag jedoch, ähnlich zum Testfeld, weit unterhalb des Zielwerts des Verdichtungsmaßes von 1,30. Dabei konnte jedoch durch die kontinuierliche Erhöhung des Wassergehalts ein Absinken des Bindemittelleims beobachtet werden, welches auf eine Reduktion der Fließgrenze bei insgesamt zu geringer Viskosität zurückzuführen ist. Eine Anpassung des Fließverhaltens durch Erhöhung des

Fließmittelgehalts wäre somit voraussichtlich ziel-führender gewesen.

Zusätzlich gilt für alle Lieferungen, dass mögliche händische Nachdosierungen von Wasser über die Anpassungen aus Tabelle 20 hinaus weder hinsichtlich des Zeitpunkts noch hinsichtlich der Quantität der Zugabe vom Mischwerk dokumentiert oder im Chargenprotokoll vermerkt wurden, wodurch für die tatsächliche stoffliche Zusammensetzung aller Mischungen eine gewisse Unsicherheit besteht. Auch den Verlust der Verarbeitbarkeit zwischen dem Werk und der Baustelle bei einer Transportdauer von lediglich max. 15 min gilt es genauer zu betrachten. Da auch die wasserreicheren Mischungen ab dem Fahrzeug 10 dieses Verhalten aufwiesen, kann nicht alleine der niedrige w/z-Wert der Mischung, verantwortlich sein. Demnach müssen andere Vorgänge für den Verlust oder Entzug des Wassers als Ursache in Betracht gezogen werden. Eine Möglichkeit besteht in dem Entzug des Wassers durch die warme und trockene Gesteinskörnung, welche einen Teil des Wassers aufsaugt. Zwar bleibt die Feuchte dabei im Beton, steht dem Zementleim jedoch nicht mehr zum Fließen zur Verfügung. Des Weiteren ist ein Verlust des Wassers während des Transportes durch die Einwirkung hoher Temperaturen (direkte Sonneneinstrahlung) und den Fahrtwind aufgrund des offenen Transportfahrzeugs und des hohen Anteils luftberührter Oberfläche (Offenporigkeit des Betons) möglich. Dieses ließe sich durch eine Abdeckung mit feuchten Jutetüchern verhindern. Von einem Einsatz von Folien ist abzuraten, da hierdurch die Temperaturen weiter steigen und so ein Austrocknen begünstigen könnten.

Betrachtet man zudem die in Bild 96 dargestellten Rohdichten, Spalt- und Druckfestigkeiten sowie die Hohlraumgehalte der einzelnen Lieferchargen, zeigt sich auch hier ein entsprechendes Bild. Zwar wies insbesondere das erste Fahrzeug in Bezug auf die Druckfestigkeit ausreichend hohe Werte auf, alle weiteren Fahrzeuge bis zur Reduktion der angenommenen Eigenfeuchte der Gesteinskörnung bei Fahrzeug 7 lagen jedoch weit unter den Laborwerten. Ab Fahrzeug 7 wiesen die im Werk hergestellten Probekörper Druckfestigkeitswerte entsprechend den Laboruntersuchungen auf. Im Gegensatz zu den Laboruntersuchungen besaßen sie jedoch einen reduzierten Hohlraumgehalt (Reduktion bis auf rd. 10 %).

Die auf der Baustelle hergestellten Probekörper wiesen, analog zur Verarbeitbarkeit, eine fortschrei-

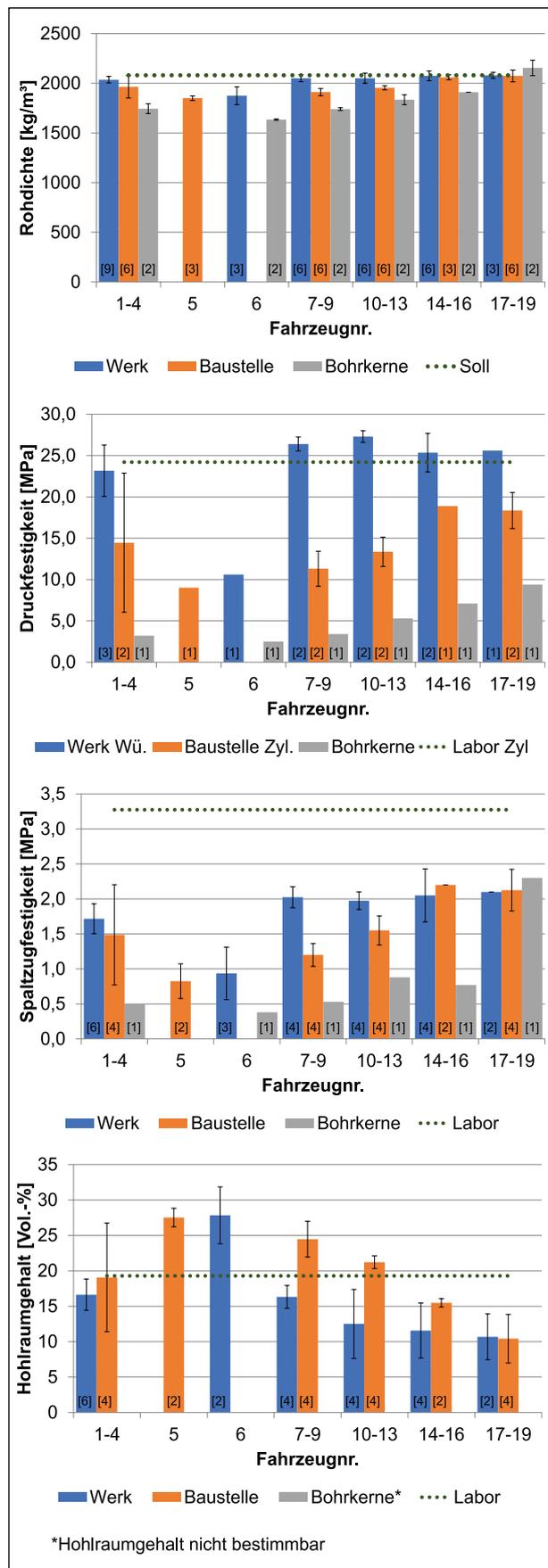


Bild 96: In absteigender Reihenfolge Rohdichte, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und Hohlraumgehalt, bestimmt an Festbetonproben der Hauptfeld Überwachung

tende Erhöhung der Druckfestigkeitswerte auf, blieben jedoch unter den Werten aus dem Labor. Vergleichbar verhalten sich auch die Spaltzugwerte mit dem Unterschied, dass bei diesen, wie bereits vom Testfeld bekannt, der Laborwert auch im Werk um gut 1/3 unterschritten wurde.

Die Ursache für die unterschiedlichen Festigkeiten lässt sich in der unzureichenden Verdichtung und damit der Rohdichte der Probekörper finden. So konnten insbesondere die ersten Betonmischungen aufgrund ihrer körnigen Konsistenz nicht in den angestrebten Verdichtungsgrad (ausreichende Packungsdichte des Betons) überführt werden, wohingegen mit der sehr weichen Konsistenz im Werk ein hoher Grad der Verdichtung (dichteste Packung) und somit ein relativ konstantes Festigkeitsniveau erreicht werden konnte. Durch die zusätzliche Zugabe von Fließmitteln und Wasser kam es in den folgenden Mischungen zum Absetzen des Zementleims und somit zum vollständigen Verschluss des unteren Betonbereichs, womit, trotz konstanter Rohdichte, eine ungleichmäßigere Hohlraumverteilung und ein Verlust an zugänglichem Hohlraumgehalt einhergehen. Dieser Ansatz stützt sich neben augenscheinlich dichtem Gefüge auf die Rohdichten und Hohlraumgehalte der Spaltzugproben im unteren und oberen Bereich. So wies die Rohdichte ab Fahrzeug 10 eine Differenz zwischen oberer und unterer Scheibe von rund  $80 \text{ kg/m}^3$  und dementsprechend der Hohlraumgehalt eine Differenz von im Mittel  $4,5 \%$  auf. Für die steiferen Betone auf der Baustelle zeigte sich mit steigender Verarbeitbarkeit eine Steigerung der Festigkeiten und Dichte bei gleichzeitiger Reduktion des Hohlraumgehalts.

Bei Betrachtung der Bohrkernergebnisse zeigen die Rohdichten, dass die Verdichtungsleistung für die

Betonkonsistenz nicht ausreichend war, um die gewünschte hohe Packungsdichte zu erreichen. Auch hier zeigt sich, dass mit weicher werdender Konsistenz der Verdichtungsgrad der Betone erhöht werden konnte, was wiederum zu einer Steigerung der am Bohrkern ermittelten Festigkeiten führte. Mit einer maximalen Druckfestigkeit von knapp  $10 \text{ MPa}$  lagen die Druckfestigkeiten der Bohrkernproben jedoch weit unterhalb der im Labor generierten, angestrebten Werte.

In den Diagrammen ist in eckigen Klammern die zur Mittelwertbestimmung eingesetzte Anzahl der Proben angegeben.

Getrennt von den obigen Daten werden die Biegezugfestigkeiten und Haftzugfestigkeiten (Bild 97) betrachtet, da hier nur eine sehr begrenzte Anzahl an Daten zur Verfügung steht. Auch in Bezug auf die Biegezugfestigkeit bleiben die Proben hinter den Erwartungen zurück. Auch wenn hier keine klaren Ziele gesteckt wurden, wurde mit Werten oberhalb der Spaltzugfestigkeit im Labor gerechnet. Die Prüfung der Haftzugfestigkeiten gestaltete sich als Herausforderung, da das vorbereitende Anbohren wiederholt mit einer Zerstörung der Oberfläche endete und somit die Prüfung oftmals nicht möglich war. Auch bei der Prüfung der Haftzugfestigkeit, die den Verbund zwischen den obersten Kornreihen abbildet, konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Die ursprünglich geplante Prüfung der Haftbrücke mittels Haftzugprüfung konnte aufgrund des frühzeitigen Versagens des OPB nicht zielführend durchgeführt werden.

Folgend sind in den eckigen Klammern die zur Mittelwertbestimmung eingesetzten Anzahl der Proben angegeben.

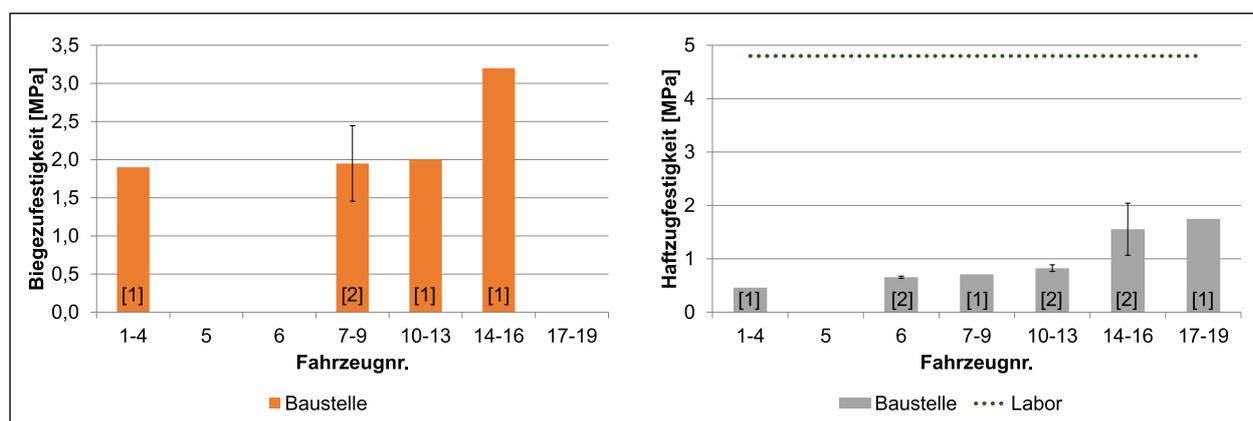


Bild 97: Biegezugfestigkeit (links) und Haftzugfestigkeit (rechts) der Hauptfeld Überwachung

Untersuchungen des Frostwiderstands ergaben für die im Werk hergestellten Proben ein fast durchweg positives Bild (Bild 98). Lediglich die beprobten Fahrzeuge 4 und 6 wiesen keinen ausreichenden Widerstand auf und die Untersuchungen mussten aufgrund von vermehrten Kornausbrüchen abgebrochen werden.

Ein anderes Bild zeigten hingegen die Bohrkern. Bei diesen kam es bei vier von sechs Mischungen bereits nach sieben Frost-Tau-Wechseln zu einem vollständigen Versagen der Probekörper (Bild 99). Ein ausreichender Frostwiderstand kann dem auf der Strecke eingebauten Beton somit nicht bescheinigt werden.

Für den Bauablauf lässt sich somit zusammenfassen, dass über den gesamten Bauabschnitt der OPB die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit nicht erreicht, wofür mehrere Gründe ausschlaggebend waren. Einerseits wurde werksseitig die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung nicht ausreichend kontrolliert, wodurch es anfänglich zu einem Wassermangel in den Mischungen kam. Die späteren Mischungen wiesen hingegen aufgrund hoher Lufttemperaturen sowie höherer Temperaturen der Ge-

steinskörnung erhöhte Frischbetontemperaturen auf. Beide Aspekte reduzieren dabei die Verarbeitbarkeit des Frischbetons.

Zudem war augenscheinlich zu erkennen, dass sich die Frischbetonkonsistenz des OPB in der kurzen Zeit vom Mischwerk bis zur Baustelle stark verändert hat. Dies wurde durch die Messung des Verdichtungsmaßes bestätigt.

Des Weiteren ergab die Analyse der Rohdichten, dass für den Beton der gelieferten Konsistenz keine ausreichende Verdichtung erreicht werden konnte, um die in der Rezeptur angestrebte Rohdichte zu erreichen.

Aufgrund der erwähnten Aspekte sowie der Probleme beim Mischen des OPB und den daraus resultierenden Stillständen des Fertigers, konnte der Bauablauf nicht gewährleistet werden, welches in den geringen Festigkeiten des OPB resultierte.

## 7.5 Auswertung der Temperaturmessung

Zur Erfassung der Temperaturgradienten über den Oberbau wurden auf der Versuchsstrecke zwei Temperaturmessstellen sowie im Schwerlaststreifen eine Referenzmessstelle (siehe 6.2.13) eingerichtet. Die Tempuraufzeichnung erfolgte im Zeitraum vom 06.06.2018 (Einbau OPB) bis 20.11.2018. In einem Zeitintervall von 15 Minuten wurden die Temperaturen an den drei Messstellen erfasst.

Beispielhaft ist im nachfolgenden Diagramm der Temperaturverlauf ausgewählter Messkanäle (Lage im OPB, UB und in der ATS) der Messstelle 1 über einen Zeitraum von 72 h ab dem Einbau des OPB

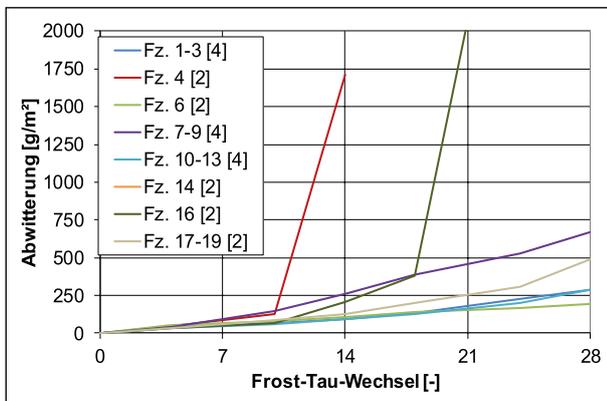


Bild 98: Ergebnisse der Frostprüfungen, im Werk hergestellte Probekörper

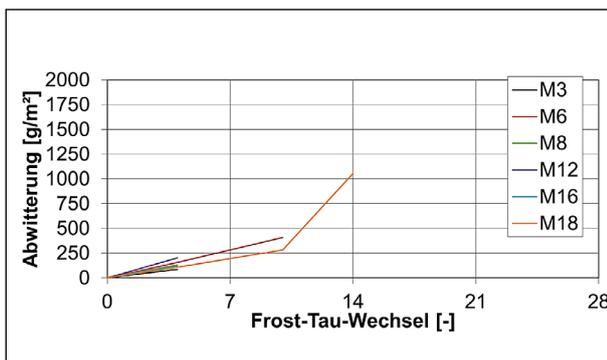


Bild 99: Ergebnis der Frostprüfung der aus der Strecke entnommenen Bohrkern (links) mit einem beispielhaften Versagensbild der Probe M12 (rechts)

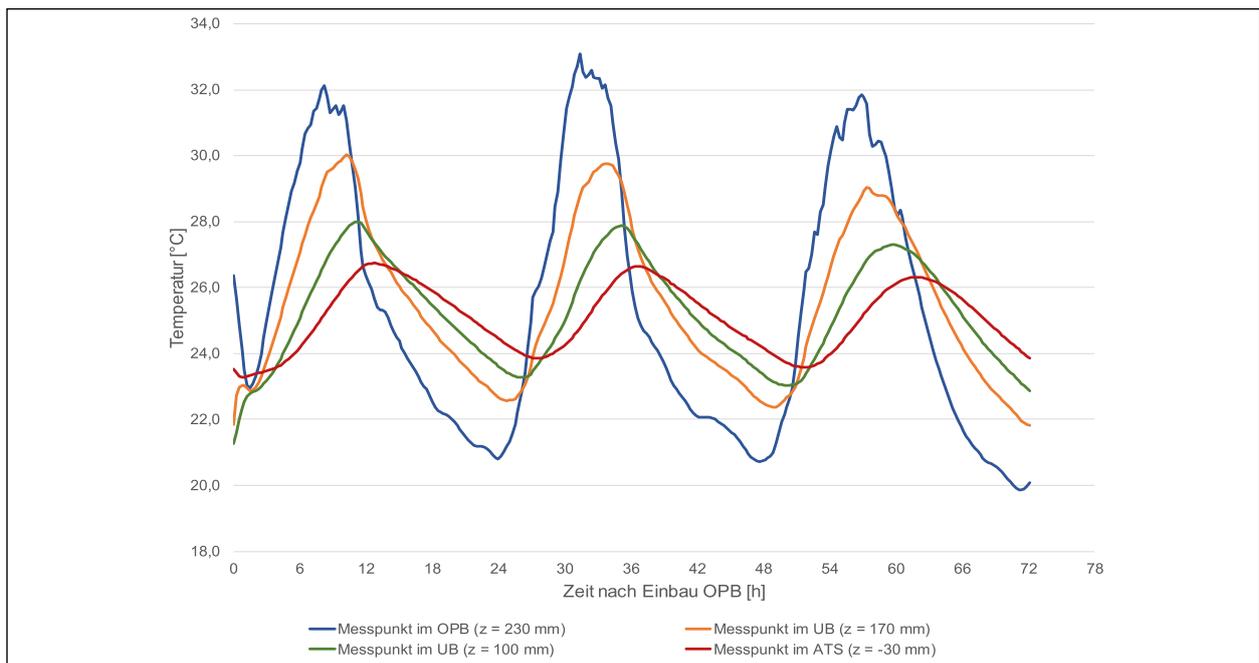


Bild 100: Temperaturverlauf nach Einbau OPB, ausgewählte Messkanäle, Messstelle 1

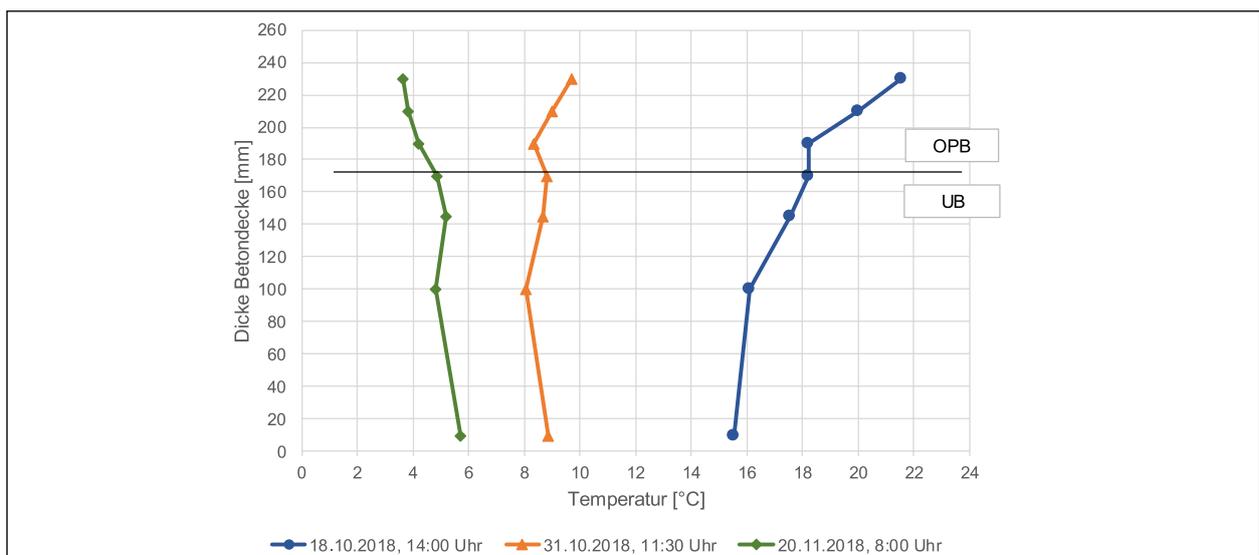


Bild 101: Temperaturprofil der Betondecke, Messstelle 1

abgebildet. Die z-Koordinate beginnt laut Definition Kapitel 6.2.13 auf der Oberkante der ATS.

Die Temperaturen über den Querschnitt (Temperaturprofil) zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten wurden beispielhaft im nachfolgenden Diagramm dargestellt (siehe Bild 101).

## 7.6 Dokumentation der Rissentwicklung

### 7.6.1 Einbau Messtechnik

Zur Dokumentation der Rissentwicklung und zur regelmäßigen Erfassung der Rissbewegungen im

OPB wurden Messbolzen im Bereich der Querschnittsfugen des UB auf der Oberfläche des OPB angebracht (siehe Bild 102). Die Rissbewegungen wurden mittels eines Setzdehnungsmessers (siehe Bild 103) dokumentiert. Die Temperatur der Luft sowie der OPB Oberfläche werden ebenfalls dokumentiert, um die Bewegungen in Abhängigkeit der Temperatur zu bewerten.

Die erfassten Daten bilden die Grundlage für die nachfolgenden numerischen Simulationen mithilfe der Finiten Elemente Methode zur Analyse der Rissentwicklung im OPB (siehe Kapitel 8).

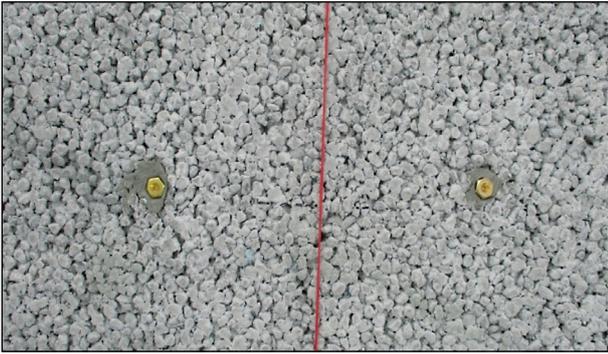


Bild 102: Messbolzen im OPB



Bild 103: Setzdehnungsmessgerät mit Kalibrierstab

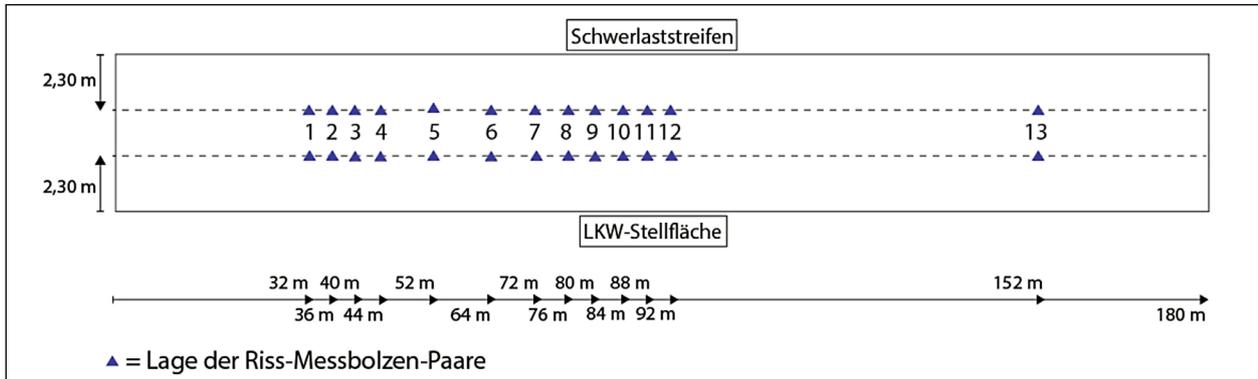


Bild 104: Draufsicht Anordnung der Messstellen

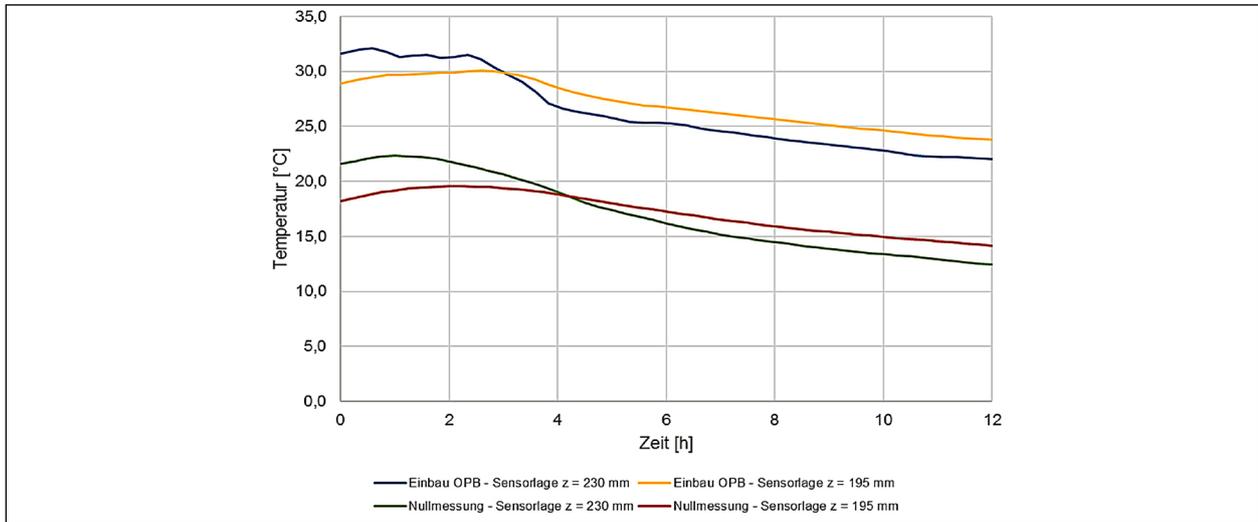


Bild 105: Temperaturverlauf; Einbau OPB (06.06.18) – Nullmessung (18.10.18); ab 14:00 Uhr

Insgesamt wurden auf der 180 m langen Versuchsstrecke an 13 ausgewählten und visuell detektierten Querrissen jeweils orthogonal zum Riss 2 Messstellen mit je zwei Messbolzen angebracht, d. h. 26 Messstellen wurden installiert. Die Messbolzen liegen jeweils 2,30 m vom Schwerlaststreifen beziehungsweise von der Lkw Stellfläche entfernt und haben einen Abstand von etwa 12,5 cm (der halben Kalibrierstab-Länge) zum Riss, der direkt über den Fugen des UB entstanden ist. Die Stationierungen der jeweiligen Messstellen können Bild 104 entnommen werden.

Erste Risse im OPB konnten im Herbst visuell detektiert werden. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Messbolzen in den OPB, jeweils beiderseits des Risses, eingebaut um an diesen Stellen die Rissbewegungen aufzunehmen.

### 7.6.2 Auswertung

Nach Setzen der Messbolzen wurde eine Nullmessung (18.10.2018) mithilfe des Setz-Dehnungsmessgerätes durchgeführt um einen Referenzwert für die Rissweiten zu definieren.

In Bild 105 sind die Temperaturen während des Einbaus des OPB sowie die Temperaturen bei der Nullmessung dargestellt. Der Nullpunkt der x-Achse des Diagramms liegt bei 14:00 Uhr (Beginn der Nullmessung).

Im Anschluss wurden zwei Wiederholungsmessungen (31.10.2018 und 20.11.2018) durchgeführt.

Durch die Differenzbildung der Messungen wird die Änderung der Rissweite berechnet.

In Tabelle 21 sind die Änderungen der Rissweite in Abhängigkeit der Temperatur dargestellt.

## 8 Parameterstudie zur Rissentwicklung mit FEM

### 8.1 Motivation und Zielsetzung

Zur Untersuchung des Rissverhaltens in der OPB-Schicht wurde mittels numerischer Simulationen ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell des Fahrbahnaufbaus erstellt, bestehend aus Frostschutzschicht, abgebildet mittels Bettungsmodul, Asphalttragschicht, Unterbeton und Offenporiger Oberbetonschicht unter Einsatz der FE-Software ANSYS. Die unterschiedlichen Schichten des Fahr-

Bezeichnung	1. Messung zu Nullmessung		2. Messung zu Nullmessung		2. Messung zu 1. Messung	
	Temperatur-differenz Oberfläche	Rissweiten Änderung	Temperatur-differenz Oberfläche	Rissweiten Änderung	Temperatur-differenz Oberfläche	Rissweiten Änderung
	rKI	rmml	rKI	rmml	rKI	rmml
Bolzen 1 an LKW-Stellfläche	-21,0	0,25	-24,0	0,3	-3,0	0,05
Bolzen 1 an Schlitzrinne	-19,1	0,3	-22,6	0,37	-3,5	0,07
Bolzen 2 an LKW-Stellfläche	-20,0	0,15	-23,6	0,14	-3,6	-0,01
Bolzen 2 an Schlitzrinne	-19,7	0,18	-22,8	0,22	-3,1	0,04
Bolzen 3 an LKW-Stellfläche	-21,3	0,26	-25,0	0,35	-3,7	0,09
Bolzen 3 an Schlitzrinne	-21,5	0,39	-24,8	0,38	-3,3	-0,01
Bolzen 4 an LKW-Stellfläche	-22,2	0,29	-25,9	0,33	-3,7	0,04
Bolzen 4 an Schlitzrinne	-20,7	0,29	-24,1	0,33	-3,4	0,04
Bolzen 5 an LKW-Stellfläche	-20,7	0,42	-24,9	0,53	-4,2	0,11
Bolzen 5 an Schlitzrinne	-19,3	0,36	-23,6	0,59	-4,3	0,23
Bolzen 6 an LKW-Stellfläche	-18,6	0,29	-24,0	0,33	-5,4	0,04
Bolzen 6 an Schlitzrinne	-18,7	-0,15	-23,3	-0,07	-4,6	0,08
Bolzen 7 an LKW-Stellfläche	-17,2	0,32	-23,8	0,39	-6,6	0,07
Bolzen 7 an Schlitzrinne	-18,1	0,24	-23,9	0,25	-5,8	0,01
Bolzen 8 an LKW-Stellfläche	-17,1	0,57	-23,7	0,76	-6,6	0,19
Bolzen 8 an Schlitzrinne	-17,3	0,11	-24,0	0,49	-6,7	0,38
Bolzen 9 an LKW-Stellfläche	-15,9	0,09	-22,7	0,22	-6,8	0,13
Bolzen 9 an Schlitzrinne	-16,6	0,3	-22,7	0,03	-6,1	-0,27
Bolzen 10 an LKW-Stellfläche	-17,2	0,16	-23,5	0,34	-6,3	0,18
Bolzen 10 an Schlitzrinne	-17,3	0,2	-23,3	0,24	-6,0	0,04
Bolzen 11 an LKW-Stellfläche	*	*	*	*	*	*
Bolzen 11 an Schlitzrinne	*	*	*	*	*	*
Bolzen 12 an LKW-Stellfläche	-25,8	fehlerhafte Messung	-23,8	0,35	2,0	fehlerhafte Messung
Bolzen 12 an Schlitzrinne	-25,2	fehlerhafte Messung	-23,2	0,36	2,0	fehlerhafte Messung
Bolzen 13 an LKW-Stellfläche	-15,9	0,38	-21,9	0,46	-6,0	0,08
Bolzen 13 an Schlitzrinne	-15,9	0,35	-22,2	0,41	-6,3	0,06

\* An Messstelle 11 ist keine Messung möglich, da diese nach dem Einbau mit der Fahrbahnmarkierung überzogen wurde.

Tab. 21: Änderung der Rissweite in Abhängigkeit der Temperaturänderung an der Oberfläche

bahnaufbaus wurden im FE-Modell einzeln abgebildet. Das Modell wurde anhand der in-situ erfolgten Messungen und theoretischen Berechnungen sowie mit Daten aus der Literatur kalibriert.

Nach erfolgter Modellerstellung folgten Parameterstudien zu Rissentwicklung und Rissverhalten, sowie Untersuchungen zum Einfluss von Lasten und Temperatur auf das Gesamttragverhalten und das Rissverhalten des Fahrbahnaufbaus.

Die FE-Modelle der numerischen Simulationen in diesem Forschungsprojekt basieren auf FEM-Simulationen, die im Rahmen einer Master's Thesis (ZEITLER, 2018) am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Technischen Universität München durchgeführt wurden.

## 8.2 FEM Simulation

### 8.2.1 Allgemeines

Zur Untersuchung der Rissentwicklung im OPB mittels numerischer Simulationen wird das FEM-Programm ANSYS Workbench in der Version 18.1 verwendet. FEM steht dabei für Finite Elemente Methode. Bei dieser Methode handelt es sich um eine Vereinfachung der Gesamtproblematik durch Zerlegung der meist komplexen Geometrie in kleine Teile, sogenannte Elemente. (GEBHARDT, 2014)

Im Zuge der Simulationen wurden drei Modelle mit identischer Geometrie und gleichen Randbedingungen aufgebaut, wobei das eine Modell zur Untersuchung von Spannungen infolge von einwirkenden Verkehrslasten dient und das andere Modell zur Untersuchung von Längenänderungen bzw. Rissentstehung und -verhalten infolge von Temperatureinwirkungen. In einer dritten Betrachtung wurden auf das Modell sowohl die Verkehrslast als auch die Temperaturbelastung aufgebracht um das Rissverhalten sowie die Spannungen zu betrachten, wenn diese Belastungen gemeinsam auftreten.

Zur Simulation der Rissentwicklung müssen zunächst die auf das System einwirkenden Lasten ermittelt und Temperaturgradienten in situ auf der Versuchsstrecke gemessen werden. Diese Daten dienen der Kalibrierung des Modells. Im Anschluss

können die daraus resultierenden Spannungen und Verformungen berechnet werden.

### 8.2.2 Materialdaten

Als Basis für numerische Simulationen wurden Materialdaten der einzelnen Schichten des Fahrbahnaufbaus benötigt.

Nicht für alle Materialdaten, die für die FE-Simulation benötigt wurden, wurden auf der Versuchsstrecke Werte ermittelt. Aus diesem Grund wurden auch auf Werte aus der Literatur zurückgegriffen.

Der Elastizitätsmodul der Asphalttragschicht wird für die Simulation entsprechend den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt, 2009) gewählt. Die temperaturabhängigen Werte können Tabelle 22 entnommen werden.

Die Betondecke im Bereich der Versuchsstrecke mit einer Dicke von 260 mm ist unterteilt in den UB, mit einer Dicke von 190 mm und OPB mit einer Dicke von 70 mm.

Der UB wird entsprechend den Anforderungen der „Technischen Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“ (TL Beton-StB 07) geliefert. Demnach muss der UB mindestens der Festigkeitsklasse C30/37 entsprechen (TL Beton-StB 07). Dies bedeutet der Beton weist eine Druckfestigkeit von 37 N/mm<sup>2</sup> und eine Biegezugfestigkeit der Kategorie F4,5, also mindestens 4,5 N/mm<sup>2</sup>, auf (TL Beton-StB 07). Weitere Materialkennwerte sind ein Elastizitätsmodul (E-Modul) von 33.000 N/mm<sup>2</sup>, eine Querdehnzahl  $\mu$  von 0,2 (RDO Beton 09) und ein Temperaturkoeffizient  $\alpha_T$  von  $1,0 \cdot 10^{-5}$  1/K (Eurocode 2, 2011). Als weiterer Materialkennwert ist die Wärmeleitfähigkeit des UB mit 2,1 W/(m\*K) (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007) angesetzt.

Für den OPB werden zur Kalibrierung des FEM-Modells und für die nachfolgenden numerischen Simulationen zum Rissverhalten jeweils die Minimal- (OPB<sub>min</sub>) und Maximalwerte (OPB<sub>max</sub>) der Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen der Versuchs-

Temperatur [°C]	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20
E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	26720	24464	21103	17853	15109	12811	10725	8637	6481

Tab. 22: Zuordnung Elastizitätsmodul - Temperatur für den Asphalt (Tragschicht) nach KIEHNE (RDO Asphalt, 2009)

strecke (siehe Kapitel 7.4) verwendet (siehe Tabelle 23).

Als weiterer Materialkennwert ist die Wärmeleitfähigkeit des OPB mit  $1,4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  (VDI, 2013) eingegangen. Es wurde die Annahme getroffen, dass der OPB dem Leichtbeton mit haufwerkporigem Gefüge mit nicht porigen Zuschlägen ähnlich ist.

### Bestimmung Temperaturdehnzahl $\alpha_T$ für den OPB

Die Temperaturdehnzahl wurde versuchsbasiert am Prüfamf für Verkehrswegebau der Technischen Universität München bestimmt. Dazu wurden an drei Messstellen an der Oberfläche eines OPB-Probekörpers, jeweils zwei Messbolzen aufgeklebt. Der OPB wurde nach Mischung KSM 1 (siehe 4.6.3) hergestellt. Die Abmessungen des Probekörpers betragen (L x B x H) 30 cm x 30 cm x 3 cm. Der Ab-

Materialparameter	Einheit	Minimal-Wert (OPB <sub>min</sub> )	Maximal-Wert (OPB <sub>max</sub> )
Druckfestigkeit Würfel	[N/mm <sup>2</sup> ]	10,6	27,8
E-Modul	[N/mm <sup>2</sup> ]	10400	31100
Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	1630	2210
Spaltzugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,4	1,4

Tab. 23: Übersicht verwendete Materialparameter OPB

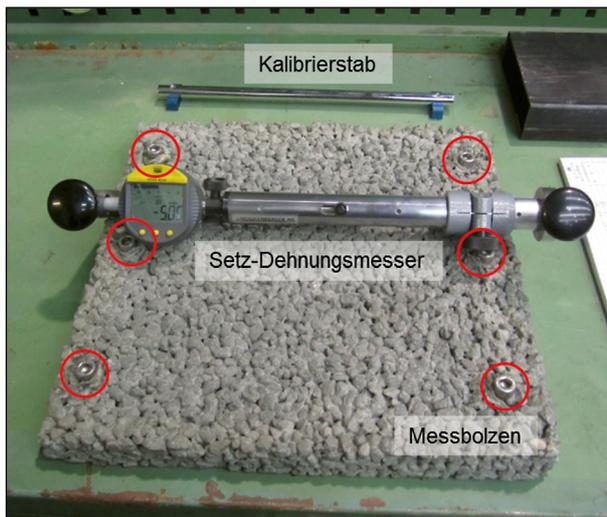


Bild 106: Probekörper zur Bestimmung der Temperaturdehnzahl

Temperatur $T_1$	Temperatur $T_2$	$\Delta T$ $T_2 - T_1$	Messstelle I $\Delta L$	Messstelle II $\Delta L$	Messstelle III $\Delta L$
[°C]	[°C]	[K]	[mm]	[mm]	[mm]
10	20	10	0,03	0,03	0,02
20	30	10	0,02	0,02	0,02
30	40	10	0,02	0,02	0,02

Tab. 24: Ergebnisse der Längenänderung der Messbolzen in Abhängigkeit der Temperatur

stand von zwei zueinander gehörenden Messbolzen entspricht dem Abstand des Kalibrierstabes (25 cm) (siehe Bild 106).

Zur Bestimmung der Temperaturdehnzahl wurde der OPB-Probekörper in einem Klimaschrank für jeweils eine Stunde bei der entsprechenden Prüftemperatur gelagert, damit die Temperaturdehnung des Probekörpers bis zum Zeitpunkt der Messung vollständig abgeschlossen war. Die Versuche erfolgten bei Temperaturen von 10 °C, 20 °C, 30 °C und 40 °C in ebendieser Reihenfolge. Die Änderung der Abstände der Messbolzen wurde mit einem digitalen Setz-Dehnungsmesser durchgeführt (siehe Bild 106).

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen können Tabelle 24 entnommen werden.

Aus der Längenänderung kann mit der nachfolgenden Formel die Temperaturdehnzahl berechnet werden.

$$\alpha_T = \frac{\Delta L}{\Delta T * L}$$

Die Ergebnisse für  $\alpha_T$  können Bild 107 entnommen werden.

Aufgrund dieser Messungen wird die Temperaturdehnzahl des OPB für die FEM-Simulation zu  $8,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$  gewählt.

### 8.2.3 Verkehrslast

Durch numerische Simulation soll das Verformungsverhalten des Schichtenaufbaus mit OPB durch Verkehrslasten untersucht werden. Dazu wird eine Toplast mit 50 kN, die der Radlast einer normierten 10 Tonnen-Achse eines Lkw entspricht, auf einer Lasteinwirkungsfläche mit Radius 150 mm auf der Oberfläche der OPB-Schicht aufgebracht.

Zusätzlich wurde der Einfluss einer überladenen Achse oder eines Schwertransportfahrzeugs unter Berücksichtigung eines Dynamikzuschlags durch eine Toplast von 75 kN auf das Modell untersucht.

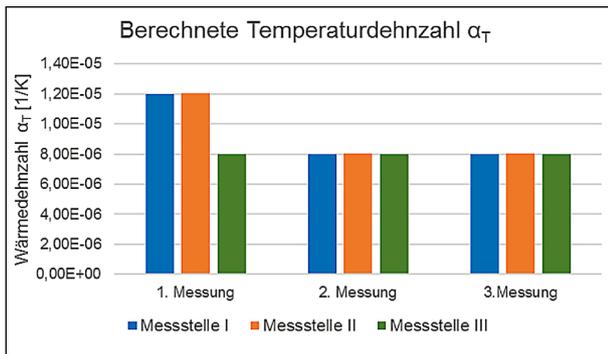


Bild 107: Berechnete Temperaturdehnzahlen

### Kalibrierung der Modelle

Die zur numerischen Simulation verwendeten Modelle müssen anfangs an Messwerten oder theoretischen Berechnungen kalibriert werden. Die Berechnungen wurden mithilfe der Mehrschichtentheorie unter Zuhilfenahme des Programms BISAR durchgeführt.

Bei BISAR (Bitumen Structures Analysis in Roads) handelt es sich um eine Software zur Berechnung verschiedener Spannungen, Dehnungen und Verschiebungen unter der Einwirkung von statischen Toplasten in einem unendlich ausgedehnten, elastischen Mehrschichtensystem (Analytische Rechenverfahren im Verkehrswegebau Vorlesung 2018). Obwohl das Programm für die Anwendung auf Bitumen-Systeme konzipiert wurde, können durch die Variation der Eingabeparameter auch Betondeckensysteme abgebildet werden.

Es wurden die in Tabelle 25 genannten Eingabeparameter gewählt:

Es wurden insgesamt drei Berechnungen ausgeführt. Für den E-Modul der OPB-Schicht wurden dabei der Minimalwert mit 10.400 N/mm<sup>2</sup> und der Maximalwert mit 31.100 N/mm<sup>2</sup> der Laboruntersuchungen eingesetzt.

Die Auswertung der Lasteinwirkung (Betrachtung der Biegezugspannungen) in Höhe von 50 kN auf eine Lasteinwirkungsfläche mit Radius 150 mm erfolgt für die drei oben genannten Varianten zum einen in Lasteinwirkungsflächenmitte und zum anderen am Rand der Lasteinwirkungsfläche.

### 8.2.4 Temperaturbelastung

#### Allgemein

Der Baustoff Beton dehnt sich bei Erwärmung aus und zieht sich bei Abkühlung zusammen. Wird die

Schicht	Dicke [mm]	E-Modul [mm]	Querdehnzahl [-]
OPB	70	Siehe Tabelle 23	0,20
UB	190	33.000	0,20
ATS	100	7.000	0,35
FSS	-	120	0,50

Tab. 25: Materialwerte für die Berechnung mit BISAR

se Verformung behindert entstehen Spannungen. Zugspannungen können zu Rissen in der Betondecke bzw. der fugenlos hergestellten offenporigen Oberbetonschicht führen.

Eine über den Querschnitt konstante Temperaturänderung führt an gefugten /gerissenen Systemen zu einer Längenänderung. Die Temperatur des Betons ist normalerweise nicht über die Plattenhöhe konstant, wodurch Verwölbungen in der Betonplatte entstehen, welche zusätzliche Verdrehungen der Fugen- oder Rissflanken verursachen.

#### Temperaturmessungen (in-situ)

Als Basis zur Kalibrierung der FE-Modelle werden die gemessenen und ausgewerteten Temperaturdaten aus Kapitel 7.5 verwendet. Als Eingabewerte werden dabei nur die Ergebnisse der Messstelle 1 berücksichtigt. Die Ergebnisse von Messstelle 2 dienen als Redundanz.

Für die weitere Berechnung sind vor allem die Temperaturdaten vom Zeitpunkt der Rissmessungen von Interesse. Dabei wurden bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen die Rissweiten der in den OPB durchgeschlagenen Risse gemessen (siehe Kapitel 7.5).

#### Messung der Rissöffnung (in-situ)

Die durch Temperaturänderungen induzierten Änderungen der Rissweiten werden detektiert und mit der aktuellen Luft- und Oberflächentemperatur zusammengeführt (siehe Kapitel 7.5).

#### Theoretische Betrachtung der Rissweite

Zur Kalibrierung des Modells zur Untersuchung der Temperatureinwirkung werden die Längenänderungen des Systems sowohl aus in-situ-Messungen als auch aus Handrechnungen bestimmt.

Die Berechnung der Längenänderung  $\Delta l$  erfolgt mit der Formel:

$$\Delta l = \alpha_T * L * \Delta T$$

In Abhängigkeit der Länge der „OPB – Körper“ und der Temperaturänderung kann die Rissweite bestimmt werden. Wichtig ist dabei, dass  $\Delta l$  immer die gesamte Längenänderung eines OPB-Körpers angibt. Betrachtet man also einen Riss zwischen zwei OPB-Körpern, die an keiner Seite gehalten werden, beträgt die Rissgrößenänderung  $0,5 \cdot \Delta l_1 + 0,5 \cdot \Delta l_2$ .

Zum Zeitpunkt der Berechnung liegen die Ergebnisse der Nullmessung und von zwei Wiederholungsmessungen vor, die in der händischen Berechnung berücksichtigt werden. Bei der Berechnung wird von einer OPB-Temperatur von  $20,0 \text{ °C}$  (gemessener Durchschnittswert der OPB-Schicht bei der Nullmessung) ausgegangen sowie einer Abkühlung auf  $9,0 \text{ °C}$  (gemessene Temperatur des obersten Temperatursensors bei der 1. Messung) auf der Oberseite bzw. auf  $7,0 \text{ °C}$  (angelehnt an die gemessene Temperatur bei 1. Messung) auf der Unterseite der OPB-Schicht.

Setzt man die bekannten Werte aus Tabelle 26 in die oben genannte Formel ein, erhält man eine Längenänderung von  $0,286 \text{ mm}$  an der Oberseite bzw.  $0,338 \text{ mm}$  an der Unterseite des OPB.

## 8.3 Das FEM-Modell

### 8.3.1 Geometrie

In der Draufsicht wurde ein  $180 \text{ m}$  langer Streifen mit einer Breite von  $6,5 \text{ m}$  modelliert (Abmessungen der Versuchsstrecke). Die Endbereiche werden als verstärkte Platte abgebildet (siehe Bild 108). Der Unterbeton wird entsprechend dem Fugenplan in einzelnen Platten mit den Abmessungen  $4,00 \text{ m}$  und  $3,25 \text{ m}$  im FE-Modell abgebildet. Der OPB wird

Parameter	Wert
$\alpha_T$	$8,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
$L$	$3,25 \text{ m}$
$\Delta T$	$11 \text{ K}$ bzw. $13 \text{ K}$

Tab. 26: Werte für die Berechnung der Längenänderung

entsprechend der visuell aufgenommenen Risse (Rissaufnahme am 18.10.2018) (siehe Bild 108) in Streifen mit einer Breite von  $6,25 \text{ m}$  und unterschiedlicher Länge (Rissabstände) aufgeteilt. Dabei wurden Rissabstände zwischen  $4$  bis  $12 \text{ Meter}$  detektiert. Aus den Rissabständen lässt sich erkennen, dass nicht alle Querscheinfugen des UBs in den OPB durchschlagen. In der nachfolgenden Darstellung sind die Rissabstände mit Angabe der Stationierung (ab Beginn der OPB-Fläche) abgebildet.

Die Radien der Strecke im Ein- und Ausfahrtsbereich wurden vernachlässigt, da diese aufgrund des veränderten Fahrbahnaufbaus (verstärkte Platten) und den Auswirkungen des Randeinflusses nicht in ausreichendem Maß kalibriert werden können, um aussagekräftige Daten zu liefern.

Das komplette Geometrie-Modell im Programm ANSYS kann Bild 109 entnommen werden.

### 8.3.2 Kontakte

Im Modell müssen zwischen sich berührenden Volumenkörperflächen Verknüpfungen in Form von Kontakten eingefügt werden. Diese Kontakte definieren das Verhalten der in der Fläche aufeinander treffenden Elemente und Knoten.

Für den Kontakt von OPB zu OPB entlang der Risse (siehe Bild 108) wird ebenso wie für den Kontakt entlang der Fugen des Unterbetons ein reibungsbe-

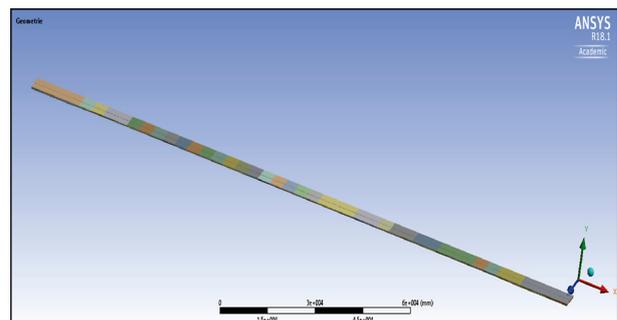


Bild 109: Verwendete Geometrie in ANSYS Workbench

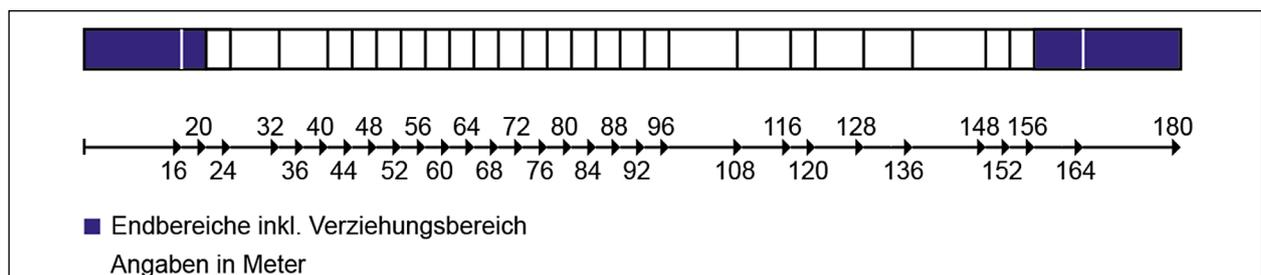


Bild 108: Draufsicht, visuelle Rissaufnahme im OPB

hafteter Kontakt gewählt. Die Haftbrücke zwischen Unterbeton und OPB wird durch einen vollständigen Verbund (Kontakt der Knoten an der Schichtgrenze durch „Gemeinsam Nutzen“) dieser beiden Schichten dargestellt. Zwischen Unterbeton und Asphalttragschicht wird ebenfalls ein reibungsbehafteter Kontakt gewählt.

### 8.3.3 Vernetzung

Durch die Vernetzung wird jeder Volumenkörper in einzelne Elemente zerlegt. Je feiner die Vernetzung bzw. das Netz gewählt wird, desto genauer werden die Ergebnisse. Eine engmaschige Vernetzung erhöht die Knotenzahl und somit auch die Berechnungsdauer.

Bei der Netzerstellung sollte darauf geachtet werden, dass die gewählten Elementgrößen immer ein Vielfaches voneinander betragen, um einen Versatz der Elementgrenzen an Volumenkörpergrenzen zu vermeiden, da dies zu ungewollten Sprüngen im Spannungs- und Verformungsverlauf führt.

Um die Rechenzeit des FEM-Modells dennoch so gering wie möglich zu halten wurde ein Bereich in der Mitte des Streckenabschnitts enger vernetzt als die danebenliegenden Platten. Wie in Bild 110 ersichtlich, erstreckt sich der enger vernetzte Bereich über die komplette Breite der Versuchsstrecke im Bereich einer Querscheinfuge im Unterbeton, da in diesem Bereich Spannungsspitzen sowie Verschiebungsmaxima zu erwarten sind.

Zusätzlich dazu wird der Bereich um die Lastfläche nochmals enger vernetzt, um bei der Ausgabe der Ergebnisse eine höhere Genauigkeit zu erreichen.

### 8.3.4 Lagerbedingungen

Die beiden Enden der zu simulierenden Strecke werden in Fahrtrichtung fest eingespannt, da die stärker ausgebildeten Endfelder einer Verschiebung in Längsrichtung entgegenwirken sollen.

Die Seiten in Längsrichtung zur Lkw-Stellfläche sowie die zur Schlitzrinne, werden elastisch gelagert. Die laterale elastische Lagerung bildet dabei die Nachbarkörper ab, die eine gewisse Gegenkraft zur Verschiebung in Querrichtung darstellen. Die Bewegung in Längsrichtung sowie nach unten und oben sind davon nicht beeinflusst.

Die FSS wird, wie unter Kapitel 8.2.2 erläutert, als elastische Lagerung mit einer Basissteifigkeit dargestellt, die zuvor an den Ergebnissen der theoretischen Berechnung kalibriert wurde.

Bild 111 und Bild 112 fassen die obengenannten Lagerbedingungen schematisch im Längsschnitt und Querschnitt zusammen.

Als weitere Randbedingung wird die Erdanziehungskraft auf das Modell aufgebracht. Diese wirkt mit der voreingestellten Größe von  $9806,6 \text{ mm/s}^2$  und wird für die Berücksichtigung des Eigengewichts benötigt.

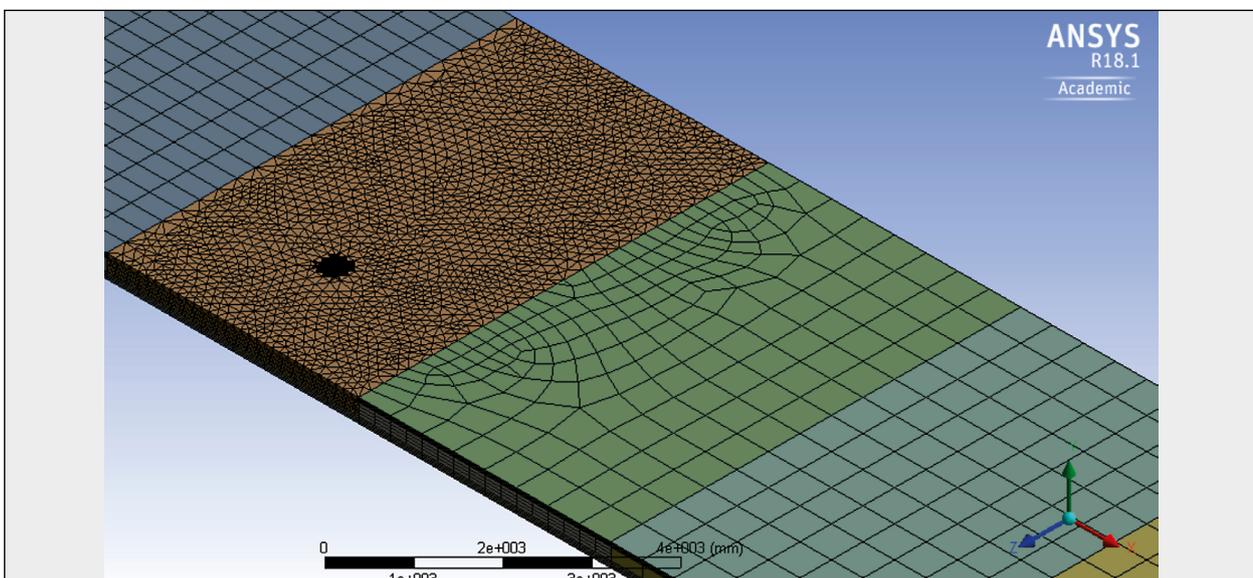


Bild 110: Ausschnitt Vernetzung, Draufsicht

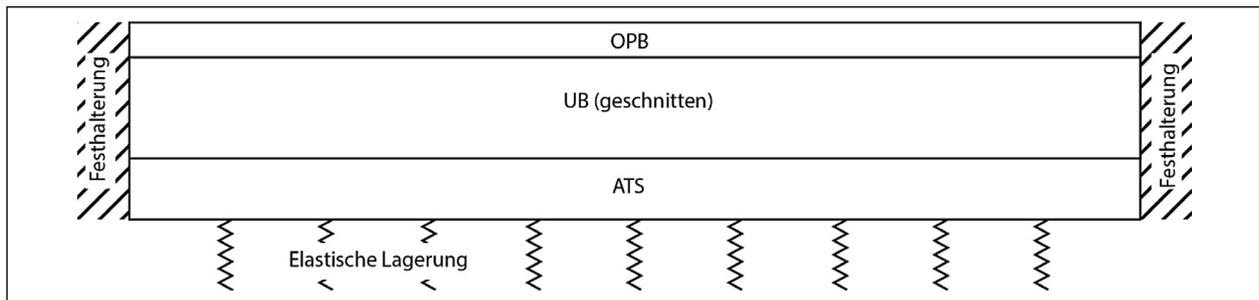


Bild 111: Lagerbedingungen der Versuchsstrecke im Längsschnitt

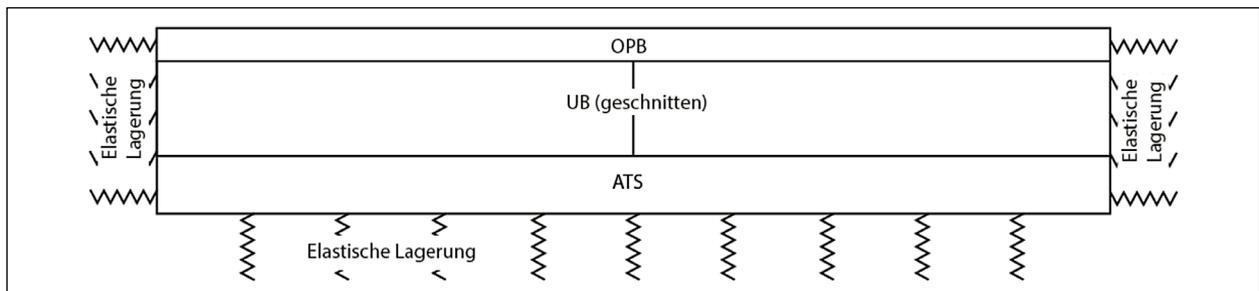


Bild 112: Lagerbedingungen der Versuchsstrecke im Querschnitt

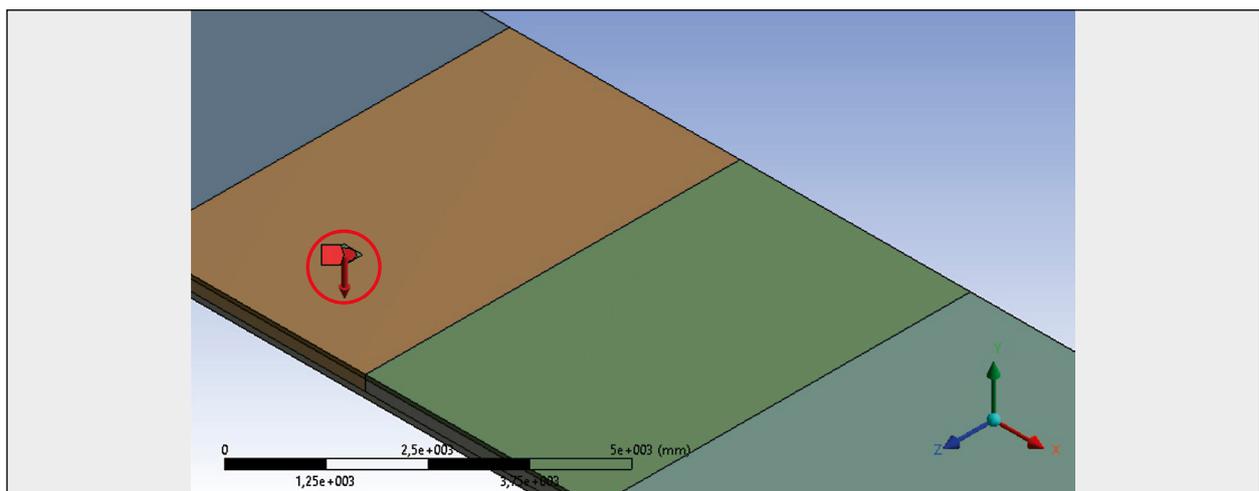


Bild 113: Anordnung der Lastfläche, rot markiert

## 8.4 Verkehrslast

Um eine Belastung durch eine Verkehrslast zu simulieren, muss zunächst eine Kreisfläche auf die Geometrie des OPB aufgeprägt werden, die als Lasteinwirkungsfläche dient. Die Fläche wird über dem Plattenmittelpunkt einer UB-Platte platziert (siehe Bild 113).

Des Weiteren wurden die in der Geometrie vorhandenen Risse programmtechnisch verklebt, um das Verhalten des OPB im Gesamten als durchgängige Schicht zu untersuchen. Bei der sogenannten Verklebung werden die einzelnen Körper so verbunden, dass sie in der Simulation als ein Körper betrachtet werden. Der OPB wird also ohne Riss dargestellt.

### 8.4.1 Kalibrierung

Zur Kalibrierung werden die Werte aus Kapitel 8.2.3 verwendet. Es wird eine Last von 50 kN in Plattenmitte aufgebracht und die Basissteifigkeit der elastischen Lagerung mittels Parameterstudie in ANSYS ermittelt.

Bei der durchgeführten Parameterstudie werden die maximalen und minimalen Normalspannungen in x-Richtung in Plattenmitte sowie in x- und z-Richtung am Plattenrand entlang eines senkrechten Pfades in Abhängigkeit der Basissteifigkeit betrachtet. Als Zielwerte für die Parameterstudie werden die jeweils maximalen und minimalen Spannungen gewählt.

### 8.4.2 Last

Bei der numerischen Simulation werden auf die Lastflächen sowohl 50 kN sowie 75 kN aufgebracht. Dabei entspricht 50 kN eine Achslast von 10 t, somit einer Lkw-Standardachse. Bei 75 kN wird eine Überladung des Lkw oder eine ungleichmäßige Lastverteilung sowie Dynamik berücksichtigt.

Die Lasteinwirkungsfläche hat eine Kreisform mit einem Radius von 150 mm. Dies entspricht bei einer Last von 50 kN einem Kontaktdruck von  $0,7 \text{ N/mm}^2$  und bei einer Last von 75 kN einem Kontaktdruck von  $1,06 \text{ N/mm}^2$ .

Da der genaue E-Modul der OPB-Schicht unbekannt ist, werden diese zwei Lastfälle auf zwei verschiedene Modelle aufgebracht. Die Modelle unterscheiden sich allein in den Materialparametern der OPB-Schicht, wobei sowohl die maximalen sowie die minimalen Werte aus den Versuchsergebnissen verwendet werden.

### 8.4.3 Ergebnis

Bei der Auswertung wird das Augenmerk auf die Biegezugspannungen gelegt. In Bild 114 sind die Biegezugspannungen in dem Ausschnitt der Versuchsstrecke zu sehen, auf den eine vertikale Kraft von 75 kN auf der OPB-Oberfläche, in Plattenmitte einer UB-Platte wirkt.

Die Ausgabe der Ergebnisse in ANSYS erfolgt, wie bei der Kalibrierung, entlang von Pfaden (siehe Bild 115). Dabei ist es nicht möglich, beide Werte der Schichtgrenze ausgeben zu lassen. Von ANSYS wird standardmäßig der Wert der oberen Schicht ausgegeben. Der Wert für die untere Schicht wird aus den folgenden Werten linear ergänzt. Die Pfade liegen jeweils in der Mitte der Lastfläche sowie am Rand der Lastfläche. Die Biegezugspannungen in Längsrichtung werden in ANSYS als Normalspannung in x-Richtung ausgegeben.

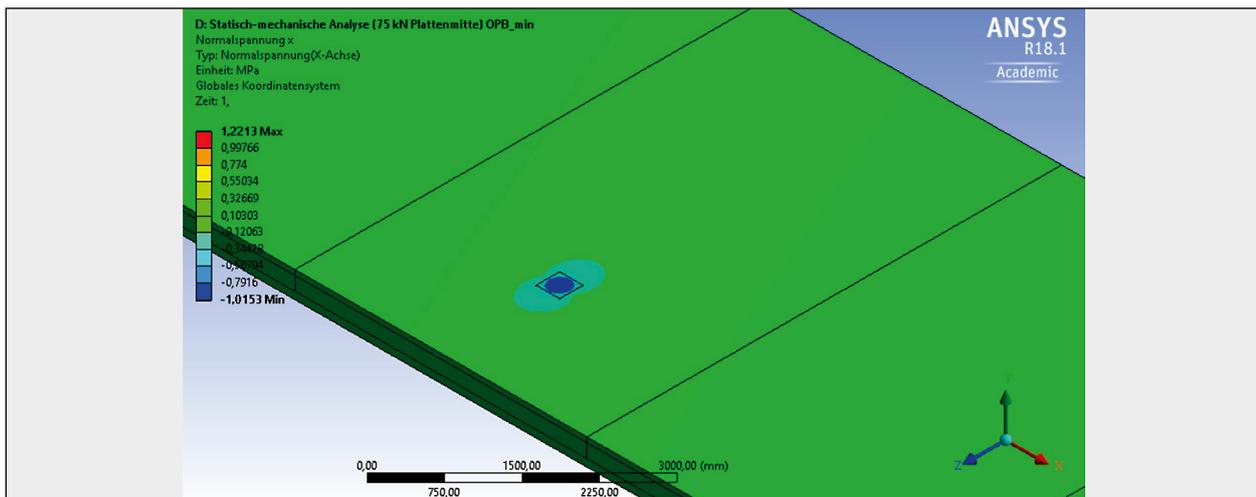


Bild 114: Biegezugspannungen in Längsrichtung, Last 75 kN, Plattenmitte

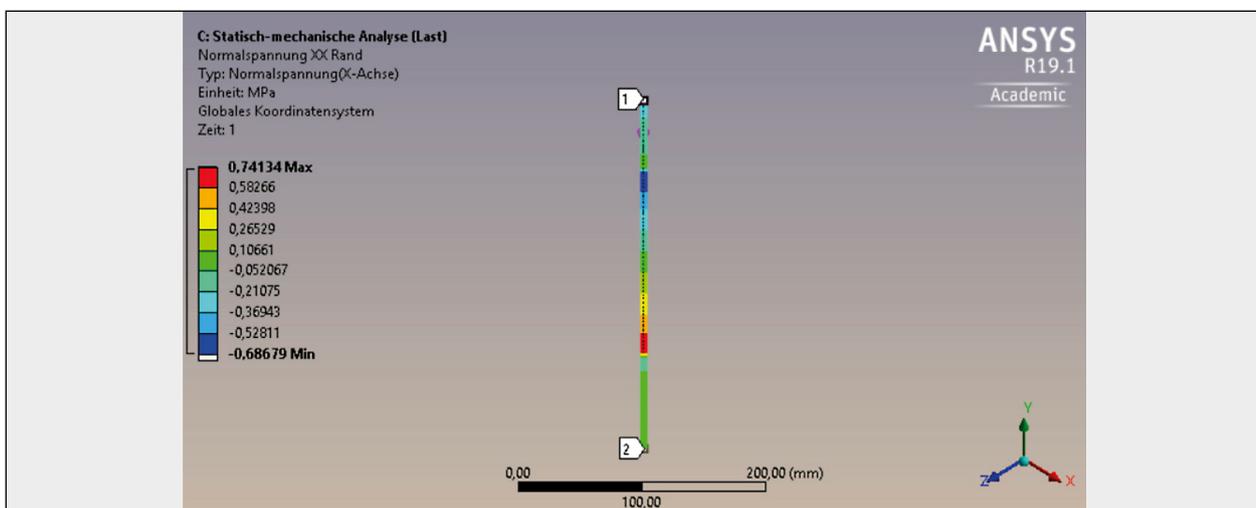


Bild 115: Ausgabe Biegezugspannungen entlang eines Pfades, Plattenmitte

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt mithilfe von Diagrammen, welche die Biegezugspannung entlang der oben beschriebenen Pfade über die Querschnittshöhe darstellen. Eine negative Spannung entspricht einer Druckspannung, eine positive Spannung entspricht der Zugspannung. Entlang der horizontalen Achse ist die Dicke des gesamten Querschnitts dargestellt. Die Schichtgrenzen, erkennbar durch senkrechte Sprünge im Spannungsverlauf, sind dementsprechend bei 70 mm und 260 mm.

Bei der Betrachtung der Biegezugspannungen in Plattenmitte (siehe Bild 116) wird deutlich, dass sich alle acht untersuchten Lastfälle prinzipiell gleich verhalten. Es wurden bei der Betrachtung die Last variiert (50 kN und 75 kN), die Position der Auswertung (Lastachse und am Rand der Lastfläche) sowie die Eingangswerte der OPB-Schicht (Maximal- und Minimalwert).

Im OPB entsteht eine Druckspannung, die sich je nach Betrachtungspunkt (Lastachse, -rand) und Lastgröße unterschiedlich stark, jedoch in keinem Fall komplett abbaut. Die Druckspannung im UB ist größer als die des OPB an der Schichtgrenze, baut sich jedoch über die Dicke des UB ab. Die Nulllinie liegt etwas oberhalb der Schichtmitte, die bei etwa 195 mm liegt. Daraus ergibt sich, dass die Zugspannungen an der Unterseite des UB größer als die Druckspannungen an der Oberseite des UB sind. Im Modell wurde zwischen der ATS und dem UB kein Verbund angesetzt somit ist an der Oberseite wie erwartet Druck und an der Unterseite Zug.

Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Spannungsverläufe wird deutlich, dass in der ATS bei allen acht Lastfällen kaum Unterschiede zu finden sind. Im Lastfall „OPB<sub>min</sub>, 75 kN, in der Lastachse“ sind die Spannungen betragsmäßig am größten, im Fall „OPB<sub>max</sub>, 50 kN, am Lastrand“ am kleinsten. Die Differenz der Druckspannungen liegt bei 0,053 N/mm<sup>2</sup>, bei den Zugspannungen bei 0,078 N/mm<sup>2</sup>.

Das Verhältnis mit den betragsmäßig größten Spannungen im Lastfall „OPB<sub>min</sub>, 75 kN, in der Lastachse“ und dem Lastfall „OPB<sub>max</sub>, 50 kN, am Lastrand“ ist im kompletten Querschnitt erkennbar. Dies lässt sich dadurch erklären, dass einerseits 75 kN eine größere Last ist und, dass andererseits die Spannungen in der Mitte der Lasteinwirkungsfläche größer ausfallen als an deren Rand.

Während die Spannungen im OPB, im Lastfall „OPB<sub>min</sub>“ jeweils unter denen im Fall „OPB<sub>max</sub>“ bleiben, gibt es im UB Abweichungen dazu. Durch die geringeren Spannungen im OPB mit minimalen Werten fällt die Übertragung in den UB stärker aus. Wodurch sich dort im Fall „OPB<sub>min</sub>“ stärkere Spannungen einstellen als im Fall „OPB<sub>max</sub>“. Auch unterscheiden sich die Höhe des Nulldurchgangs in den betrachteten Fällen. Bei der Betrachtung des „OPB<sub>max</sub>“ liegt die Nulllinie zwischen 225 mm und 230 mm, dies entspricht etwa der Mitte des gesamten Betonoberbaus bestehend aus UB und OPB, die bei 230 mm liegt. Die Nulllinie liegt in diesem Fall deshalb mittig im gesamten Betonoberbau, weil die Werte des „OPB<sub>max</sub>“ sehr nah an denen des UB liegen, beispielsweise ist der E-Modul des UB bei 33.000 N/mm<sup>2</sup> und der des „OPB<sub>max</sub>“ bei 31.000 N/mm<sup>2</sup>. Weiterhin ist die Querdehnzahl identisch. Dies wird im Diagramm sichtbar durch den geringen Sprung zwischen UB und OPB mit einer durchschnittlichen Größe von 0,014 N/mm<sup>2</sup>.

Im Gegensatz dazu fällt unter anderem aufgrund des mehr als dreimal so großen E-Moduls des UB im Vergleich zum „OPB<sub>min</sub>“, der Sprung zwischen UB und OPB mit „OPB<sub>min</sub>“ deutlich größer aus. Im Durchschnitt liegt der Sprung bei 0,40 N/mm<sup>2</sup>. Durch die deutliche Schichttrennung verschiebt sich auch der Nulldurchgang der Spannungen im UB weiter in Richtung der Schichtmitte des UB.

Die Knicke, die in den Kurven zu erkennen sind, sind auf die Vernetzung zurück zu führen. Der Knick entsteht dabei jeweils am Knoten einer Elementgrenze.

Die Krümmungen, die unter anderem für den Versatz zwischen Schichtmitte und Nulldurchgang in der ATS verantwortlich sind, resultieren aus der numerischen Methodik. Bei der Berechnung von Spannungen zum Beispiel nach der Methode Westergaard wird entweder der Wert an der Schichtgrenze berechnet und durch eine gerade Linie verbunden oder aus einem Diagramm abgelesen. In beiden Fällen werden den Berechnungen mehrere Vereinfachungen zu Grunde gelegt. Bei der numerischen Berechnung hingegen wird für jeden Elementknoten die Lösung bestimmt, sodass diese in Abhängigkeit der Elementgröße genauer sein kann.

Aus der FE-Simulation wird deutlich, dass in keinem der Fälle durch die Verkehrslast Zugspannungen im OPB entstehen und somit auch keine Gefahr der Rissbildung im OPB herrscht. Im Bereich der Haft-

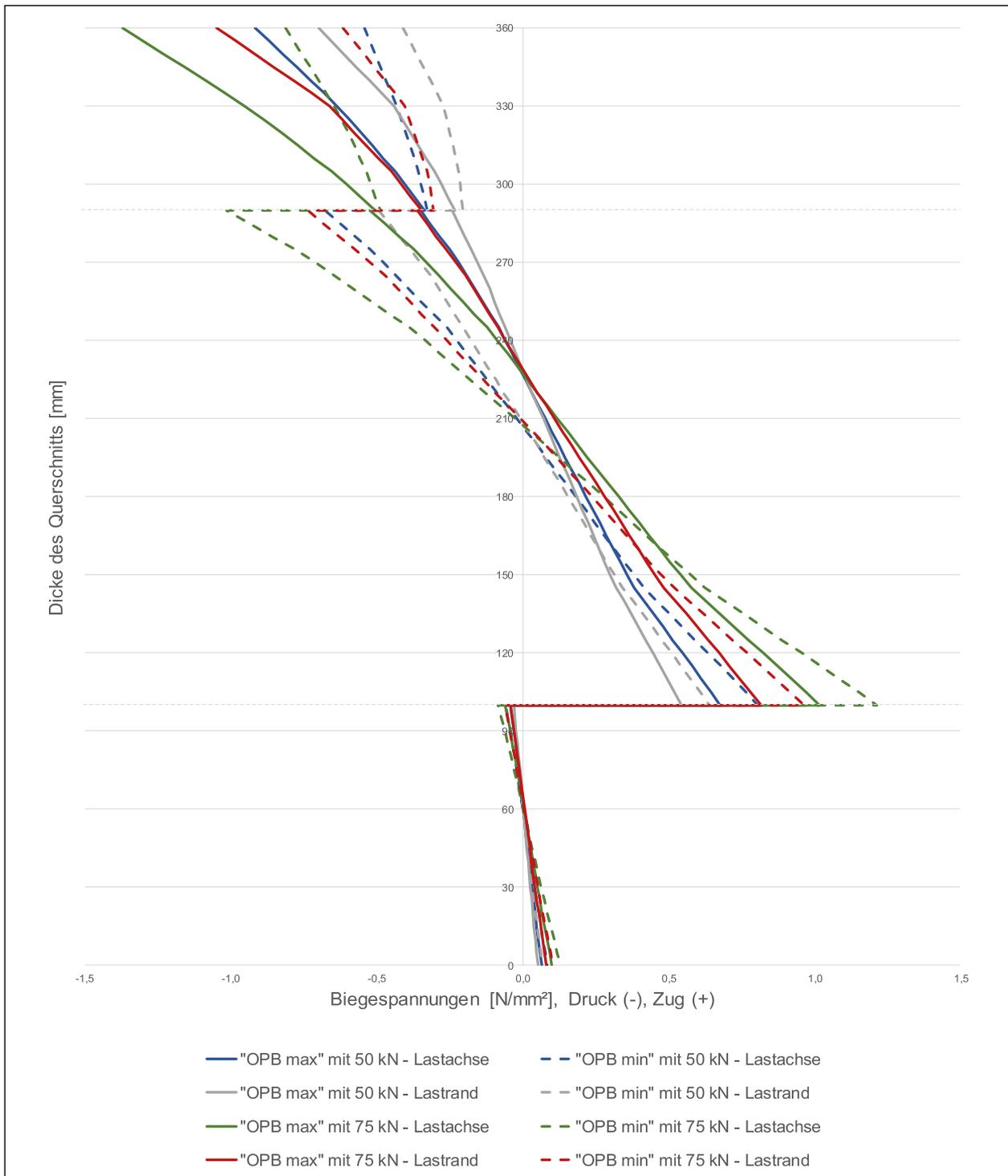


Bild 116: Darstellung der Biegezugspannung, Last Plattenmitte über den Querschnitt

brücke sind keine Relativbewegungen der beiden Platten, bestehend aus OPB und UB, zu erkennen, sodass diese nur mit dem Spannungsunterschied an der Schichtgrenze belastet wird. Dieser ist bei der Verwendung von „OPB<sub>max</sub>“ wie bereits beschrieben minimal und kann vernachlässigt werden. Bei Verwendung von „OPB<sub>min</sub>“ ist ein deutlich größerer Spannungsunterschied auszumachen, der in allen simulierten Fragestellungen einen Maxi-

malwert von 0,52 N/mm<sup>2</sup> aufweist. Dieser Wert muss von der verwendeten Haftbrücke aufgenommen werden.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird deutlich, dass die aufgebrachte Verkehrslast keine Auswirkungen auf die Rissbildung im OPB hat, da bei einer aufgebrachten Last in Plattenmitte keine Zugspannungen im OPB auftreten.

## 8.5 Temperaturbelastung

Die Temperaturbelastung wird im Programm ANSYS in einem vorgelagerten System, der sogenannten thermisch-stationären Analyse, erzeugt und auf das Modell aufgebracht. Die Berechnung der Verformungen erfolgt mittels statisch-mechanischer Analyse.

### 8.5.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Modelle erfolgte durch Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der Handrechnung und den Ergebnissen der in-situ-Messungen.

Zunächst wurde versucht die Ergebnisse der Handrechnung und der in-situ-Messung direkt im Modell zu verwenden, um den E-Modul mithilfe einer Parameterstudie des OPB zu kalibrieren.

Für die Kalibrierung wurde ein verkürztes Modell verwendet. Um einem über die komplette Querschnittsbreite vorhandenen Riss in der OPB-Schicht zu simulieren, wurden zwei Volumenkörper durch ein Kontaktelement zwischen den sich berührenden Stirnflächen miteinander verbunden. Die beiden OPB-Körper sind jeweils an der Außenseite eingespannt gelagert und wurden durch eine Temperaturlast abgekühlt (siehe Bild 117). Die Fuge (Riss) zwischen den beiden Volumenkörpern sollte sich durch Verkürzung der Körper öffnen.

In Bild 117 ist der entstehende Riss deutlich erkennbar, da sich im Vergleich zum unverformten Modell, das in Grau dargestellt ist, die beiden Platten deut-

lich zurückziehen. Der äußere Rand bleibt an Ort und Stelle (Einspannung) und hat damit eine Verschiebung in x-Richtung von 0 mm (hier grün dargestellt). Die beiden inneren Ränder hingegen ziehen sich betragsmäßig gleich zurück. Die unterschiedliche Farbgebung resultiert daraus, dass sich die linke Platte in negative x-Richtung zurückzieht (minimale Verschiebung = maximale negative Verschiebung in Dunkelblau), wohingegen sich die rechte Platte in positive x-Richtung zurückzieht (max. Verschiebung in Rot).

Zusätzlich zu den bekannten Werten aus den vorhergegangenen Simulationen, werden hierzu noch die Anfangs- sowie Endtemperaturen benötigt. Als Anfangstemperatur des OPB wird, wie in der Handrechnung, auf voller Dicke eine Temperatur von 20 °C gewählt. Die Oberseite des OPB wird auf 9 °C abgekühlt, die Unterseite auf 7 °C. Auch diese Werte entsprechen denen der Handrechnung und lehnen sich damit an die vor Ort gemessenen Temperaturen an.

Für die Simulation der Rissweite im OPB wird ange-  
setzt, dass die Fugen im UB geöffnet sind.

### 8.5.2 Belastung

Bei der Berechnung der Temperaturbelastung werden real gemessene Temperaturunterschiede herangezogen (siehe Kapitel 7.5). Es wird sowohl die Rissentwicklung zwischen der Nullmessung und der ersten Messung betrachtet als auch zwischen der ersten und zweiten Messung. Dadurch werden zwei unterschiedliche Temperaturdifferenzen unter-

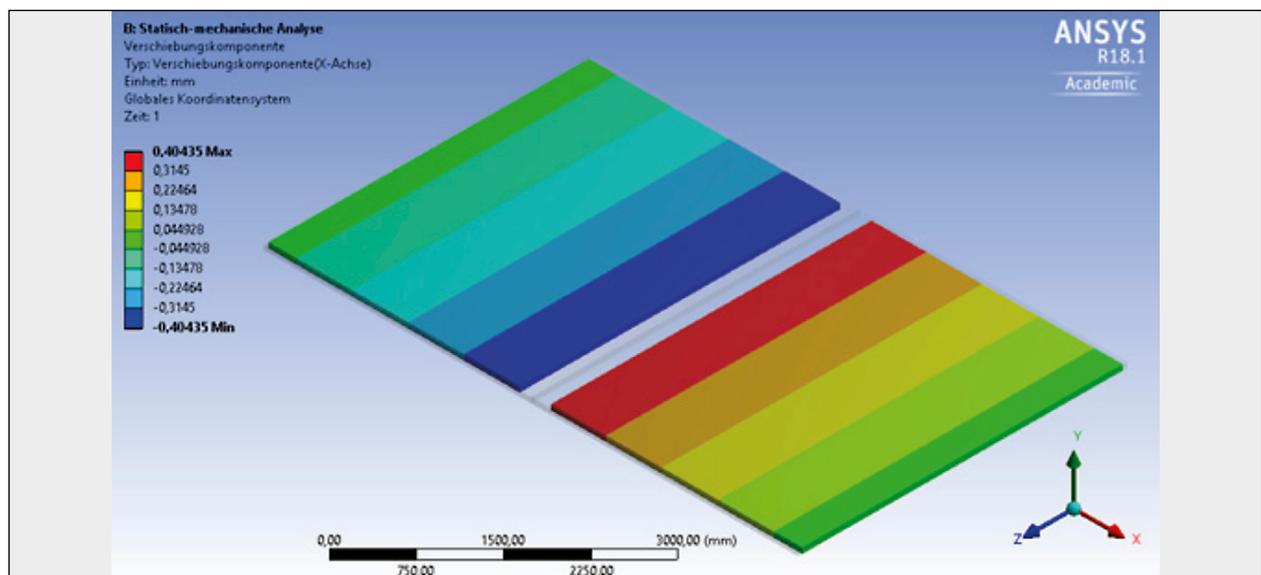


Bild 117: Verkürztes Modell zur Kalibrierung des E-Moduls

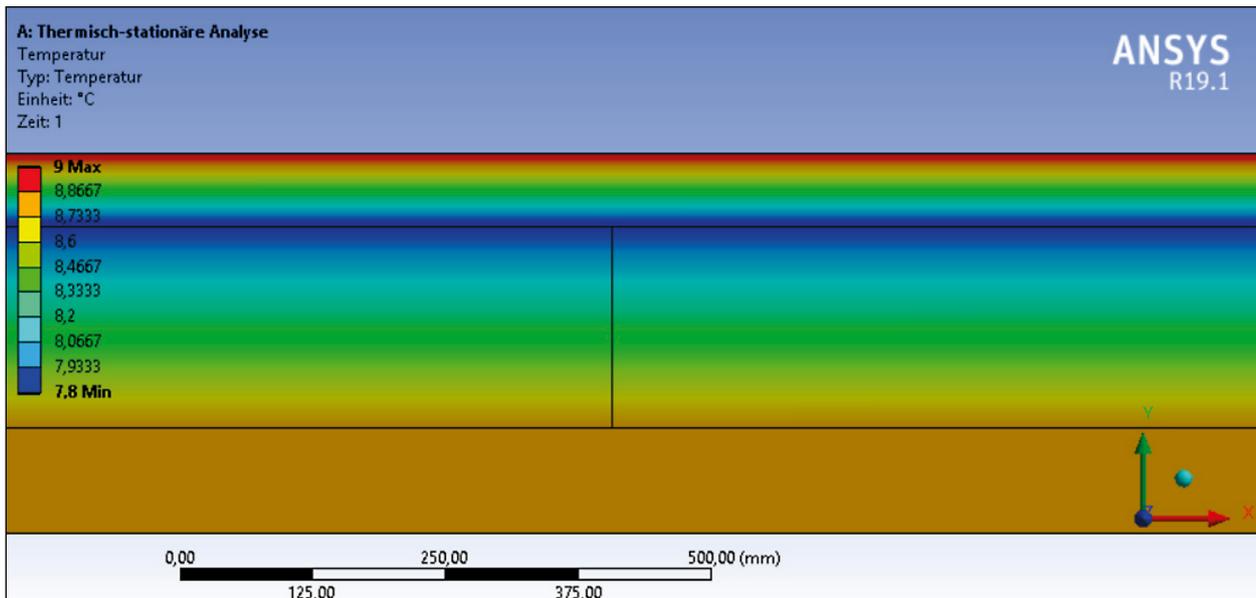


Bild 118: Temperaturverlauf über den Querschnitt zum Zeitpunkt der 1. Messung Uhrzeit 11:30 Uhr

sucht, um Rückschlüsse auf das Temperaturverhalten bei verschiedenen Temperaturunterschieden durchzuführen. Zu den in der Realität gemessenen Temperaturprofilen hat man die Rissweiten im OPB gemessen.

Als Anfangstemperatur für die Schichten wird die über die Schicht durchschnittlich gemessene Temperatur gewählt. Die aufgebrachte Temperatur (Temperaturprofil) entspricht den Messwerten aus der in-situ-Temperaturmessung (siehe Kapitel 7.5). Dabei wird als Wert für die Oberfläche des OPB die Temperatur von dem obersten Sensor im Messrahmen verwendet, welcher im vorliegenden Fall (1. Messung, 11:30 Uhr) bei 9 °C liegt. An der Schichtgrenze zwischen OPB und UB wird auf die Unterseite des OPB eine Temperatur von 7,8 °C aufgebracht und an der Schichtgrenze von UB und ATS auf die Unterseite des UB eine Temperatur von 8,8 °C. Der Temperaturverlauf kann Bild 118 entnommen werden.

Um das Rissverhalten des OPB zu untersuchen, wird die Temperaturdehnzahl des UB variiert. Damit wird untersucht, welchen Einfluss die Rissentwicklung und Änderung der Rissweite im UB auf die Rissentwicklung im OPB hat. Als Werte für die Temperaturdehnzahl werden die Werte  $0,8 \times 10^{-5}$  1/K als Untergrenze des Betons der Festigkeitsklasse C30/37,  $1,0 \times 10^{-5}$  1/K als Richtwert (Eurocode 2, 2011) und  $1,3 \times 10^{-5}$  1/K als Obergrenze speziell für Straßenbeton (RDO Beton 09) gewählt. Des Weiteren werden verschiedene aufeinander folgende Risse im Modell betrachtet.

### 8.5.3 Ergebnis

Bild 119 zeigt den Spannungsverlauf in x-Richtung unter Temperaturbelastung im ungerissenen Zustand der Versuchsstrecke. Die Temperaturbelastung entspricht der Temperaturänderung zwischen der Nullmessung (18.10.2018 14:00 Uhr) und der 1. Messung (31.10.2018 11:30 Uhr). Wie in Bild ersichtlich ist, nehmen die Spannungen im OPB in Querrichtung an denen Stellen zu, an denen der darunterliegende UB Querscheinfugen aufweist. Dieses Simulationsergebnis bestätigt das Verhalten des OPB in der Realität, in der der OPB über den Querscheinfugen aufgrund der Überschreitung der Zugfestigkeit im OPB gerissen ist. Aus diesem Grund wird für die weitere Simulation ein gerissenes Modell mit den vor Ort aufgenommenen Rissen (vgl. Bild 108) verwendet.

Bei der Betrachtung des Modells beim Abkühlen verkürzen sich die Platten wie erwartet und die Risse öffnen sich (siehe Bild 120). In dem Bild sind nur der OPB sowie der UB im verformten und unverformten Zustand abgebildet.

Zur Auswertung des Rissverhaltens werden die Rissweiten an verschiedenen Stellen ausgegeben. Es wurden in Abhängigkeit der in-situ dokumentierten Rissabstände (4 m bis 12 m) die OPB-Volumenkörper im Modell abgebildet. Im UB wird das vorhandene Fugenraster von 4 m beibehalten. Die Längenänderung (Änderung der Rissweite) der Volumenkörper wird im Modell in der Mitte des Risses am Rand der jeweiligen angrenzenden Volumenkörper ausgegeben. Die Rissweite ergibt sich aus

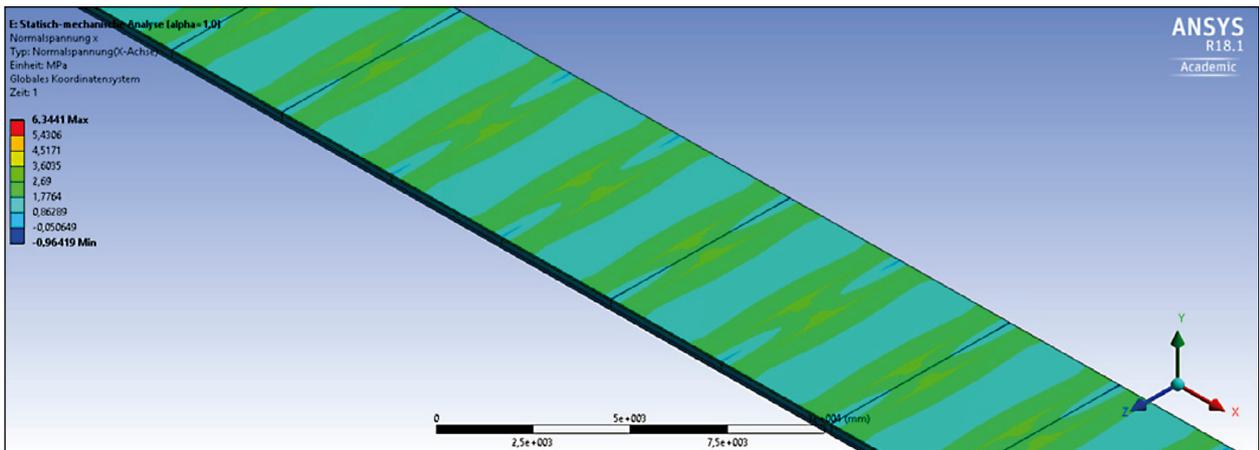


Bild 119: Ausschnitt Spannungsverlauf in x-Richtung bei Temperaturbelastung im ungerissenen OPB

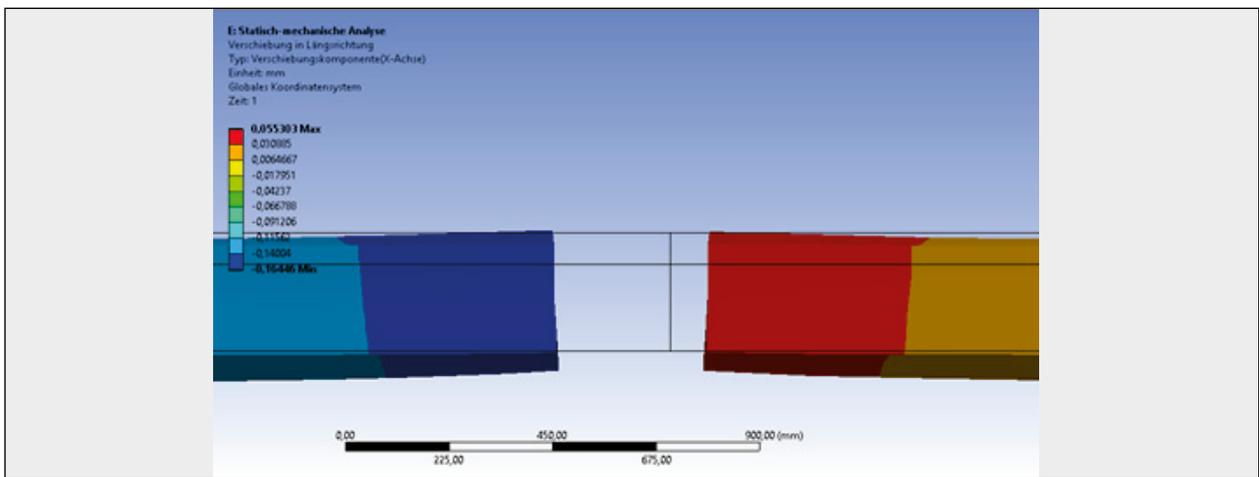


Bild 120: Ausschnitt Verformung von zwei OPB-Abschnitten im Rissbereich mit UB-Platten (überhöhte Darstellung)

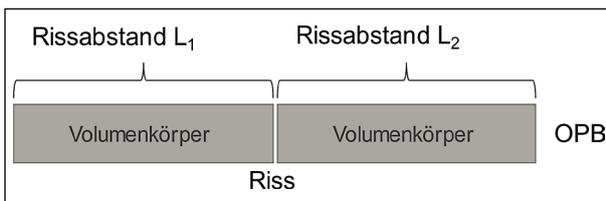


Bild 121: Schematische Darstellung des Rissabstands

Kombination	L <sub>1</sub> [m]	L <sub>2</sub> [m]
1	4	4
2	4	8
3	4	12
4	8	8
5	8	12

Tab. 27: Kombinationen der Rissabstände im OPB

der Addition der beiden Längenänderungen der Volumenkörper.

Für die Auswertung wurden nur Risse im mittleren Bereich (Stationierung 0+092 – 0+128) der abgebildeten Versuchsstrecke betrachtet, damit die Einflüsse der Einspannungen im Randbereich des Modells unberücksichtigt bleiben.

Für die Ermittlung unterschiedlicher Rissweiten wurden verschiedene Kombinationen der Rissabstände im OPB simuliert. Dabei werden zwei angrenzende Volumenkörper simulationstechnisch durch einen Riss getrennt (siehe Bild 121). Dabei variieren die Rissabstände (Länge der Volumenkörper, L<sub>1</sub> und L<sub>2</sub>) in Abhängigkeit der vor Ort gemessenen Rissabstände (Tabelle 27). Die durch die FE-Simulation theoretisch ermittelten Rissweiten im OPB sind in Abhängigkeit von  $\alpha_T$  im UB sowie der Rissabstände im OPB in Bild 122 dargestellt. Ebenfalls werden die Rissweiten in Abhängigkeit des Zeitpunktes der unterschiedlichen Rissmessungen dargestellt. Dabei werden die Rissweiten von der 1. Messung (31.10.2018) zur 2. Messung (20.11.2018) sowie von der Nullmessung (18.10.2018) zur 1. Messung abgebildet (Bild 122).

Im Diagramm (siehe Bild 122) sind sowohl die Ergebnisse für die drei verschiedenen Temperaturdehnzahlen des UB, die fünf verschiedenen Rissabstände sowie die beiden Simulationsreihen, die

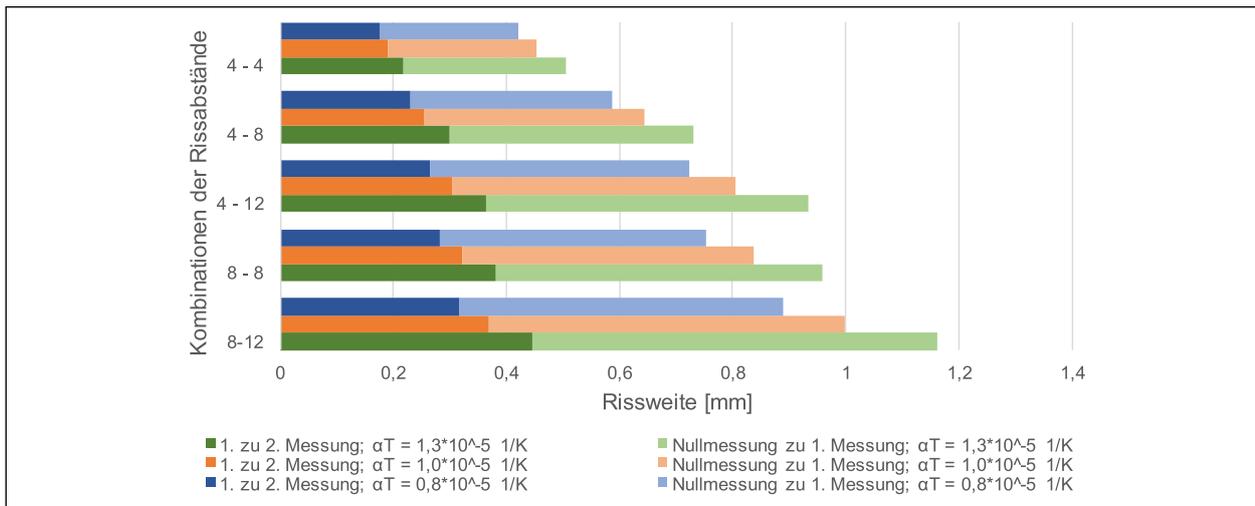


Bild 122: Rissweiten im OPB in Abhängigkeit der Rissabstände und der Temperaturdehnzahl des UB

sich durch die Temperaturdifferenz unterscheiden, dargestellt.

Mit steigendem  $\alpha_T$  im UB vergrößert sich die Rissweite im OPB, da die Längenänderung von  $\alpha_T$  abhängig ist. Verringert man die Temperaturdehnzahl des UB von  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$  auf  $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$  so nimmt die Rissweite des OPB im Schnitt um 10 % ab. Bei Erhöhung der Temperaturdehnzahl des UB von  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$  auf  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$  öffnen sich die Risse um durchschnittlich 16 %.

Eine Betrachtung der unterschiedlichen Kombinationen zeigt, dass mit steigendem Rissabstand in der OPB-Schicht die Rissweiten zunehmen. Dies lässt sich ebenfalls mit der Formel (siehe Kapitel 8.2.4) für die Berechnung der Längenänderung erklären, da die Längenänderung nicht nur von der Wärmezahl linear abhängt, sondern auch von der Länge des zusammenhängenden OPB-Abschnitts.

Außerdem zeigt Bild 122, dass die Rissweiten beim Vergleich Nullmessung zur 1. Messung größer sind. Das liegt daran, dass in diesem Fall der Temperaturgradient größer ist als beim Vergleich 1. Messung zur 2. Messung.

Aufgrund des Paketreißen im OPB treten bei einer Abkühlung der Umgebungstemperatur nur Längenänderungen im bereits bestehenden Riss am Ende des Pakets auf. Auf Basis einer 4 m Plattenlänge im UB führt ein Rissabstand im OPB von 12 m Länge bei gleichem  $\alpha_T$  zu einer 3-fachen Änderung der Rissweite. Bei einem Rissabstand von 8 m verändert sich die Rissweite um das Doppelte.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Rissweiten im OPB nicht nur von den Materialpara-

metern des OPB sowie der Temperaturdifferenz abhängig sind, sondern auch von der Rissentwicklung und Nullspannungstemperatur des Unterbetons.

## 8.6 Kombination Verkehrslast und Temperaturbelastung

### 8.6.1 Allgemeines

Bei der folgenden Simulation wird nun die Verkehrslast zusammen mit der Temperaturbelastung auf das System aufgebracht. Als Verkehrslast wird eine Last von 50 kN am Plattenrand der UB-Platte aufgebracht (siehe Bild 123). Als Temperaturbelastung wird die Temperaturdifferenz zwischen der Nullmessung und der 1. Messung der Rissweiten analog zu Kapitel 8.5 aufgebracht. Verwendet wird das Modell mit bereits gerissenem OPB mit den Materialparametern „OPB<sub>max</sub>“.

Für die Auswertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Einwirkungsdauer der Verkehrslast der Einwirkungsdauer der Temperatur entspricht. In der Realität würde dies beispielsweise einem über eine längere Dauer parkenden Lkw mit zugleich auftretender Temperaturdifferenz entsprechen.

### 8.6.2 Ergebnis

Die Rissweiten aus der Kombination der Verkehrslast sowie der Temperaturbelastung sind in Bild 124 dargestellt. Dabei wurde im Simulationsmodell die Kombination der Plattenlänge 4 – 4 aus Kapitel 8.5 gewählt. An Position 1 (siehe Bild 124) wurde die linke Seite des Risses mit einer Verkehrslast von 50

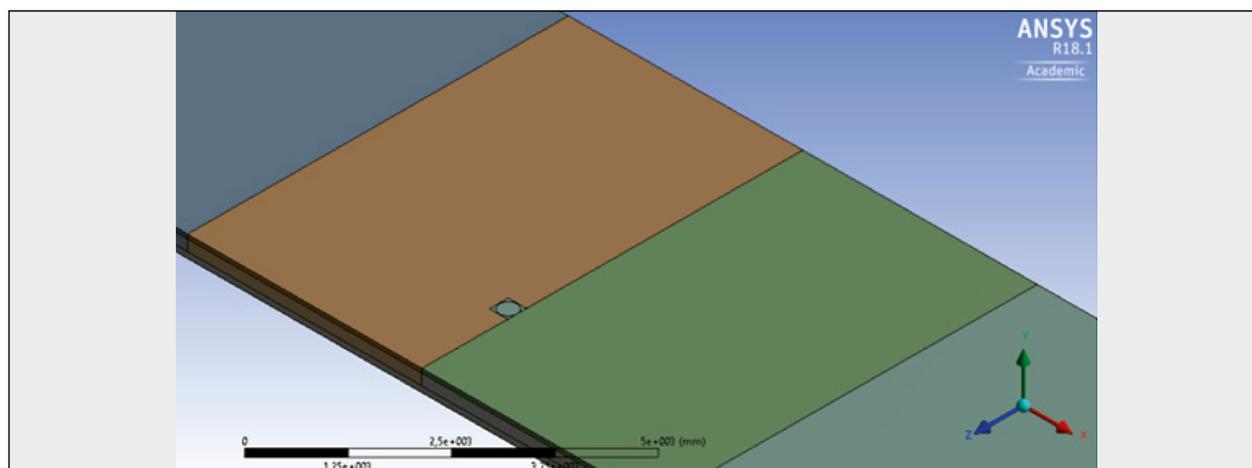


Bild 123: Anordnung der Lastfläche am Plattenrand

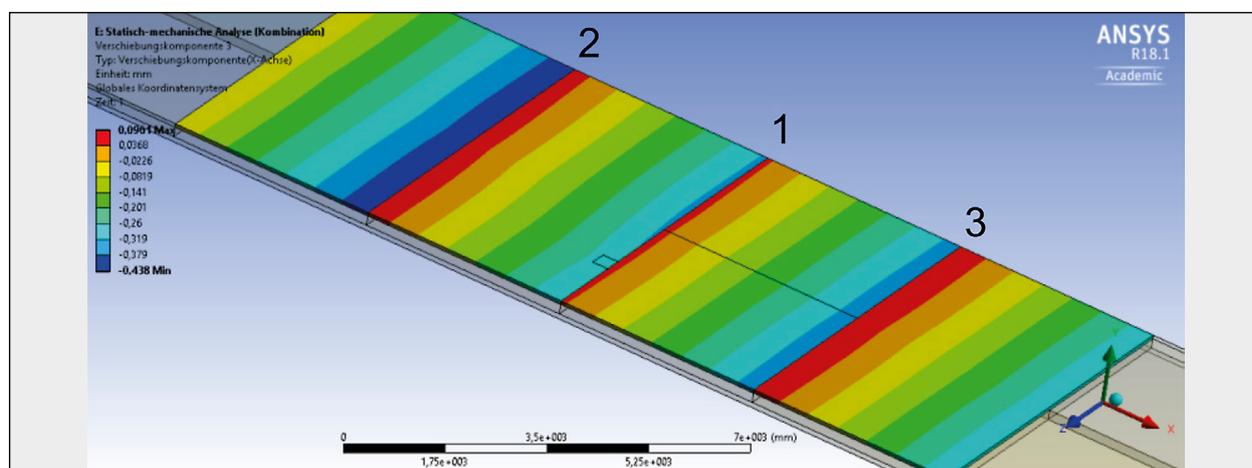


Bild 124: Darstellung der Rissweiten Verkehrslast und Temperaturbelastung

kN belastet. Es zeigt sich, dass an Position 2 die Rissweite beeinflusst wird, an Position 3 hingegen nicht. Dabei zeigt sich, dass die Horizontalbewegung am belasteten Rand wesentlich geringer ausfällt als am unbelasteten, da die Verkehrslast eine Bewegung an dieser Stelle behindert (Position 1). Der Riss an Position 2 ist deutlich größer als an einem Vergleichsris unter derselben Temperaturbelastung ohne Einfluss der Verkehrslast. Die Abweichung der Länge in Fahrbahnmitte des OPB beträgt + 0,07 mm zum unbelasteten Vergleichsris. Dieser Einfluss lässt sich durch die Verkehrslast erklären. Die belastete Platte wird durch die Last an dieser Stelle festgehalten, wodurch sie sich am entsprechenden Rand weniger stark zusammenziehen kann und der direkt angrenzende Riss kleiner ist (Position 1). Der nachfolgende Riss wird dadurch nicht beeinflusst, da die Last auf diese Platte keinen Einfluss hat.

Da die Kontraktion der Platte auf einer Seite durch die Verkehrslast behindert wird, fällt sie auf der ge-

genüberliegenden Seite um dieses Maß stärker aus, wodurch ein größerer Riss entsteht.

Ein Vergleich der Spannungsverläufe in Querrichtung (siehe Bild 125) am belasteten und unbelasteten Riss zeigt, dass die Verkehrslast einen deutlichen Einfluss auf den Spannungsverlauf hat.

Am unbelasteten Riss nehmen die Spannungen im OPB zunächst zu, bevor sie nach einem Sprung an der Materialgrenze im UB wieder abnehmen (siehe Bild 125). Der Sprung an der Grenze von OPB und UB resultiert aus den unterschiedlichen Temperaturdehnzahlen sowie dem E-Modul.

Das gegensätzliche Verhalten der Spannungen, zunehmend im OPB, abnehmend im UB, hat seinen Ursprung im Temperaturverlauf der 1. Messung. Dabei nimmt die Temperatur im OPB von 9,0 °C an der Oberseite des OPB zu 7,8 °C an der Schichtgrenze zwischen OPB und UB ab, woraufhin sie im UB wieder bis zum Wert von 8,8 °C an der Schichtgrenze von UB zu ATS steigt. Durch die höhere Ab-

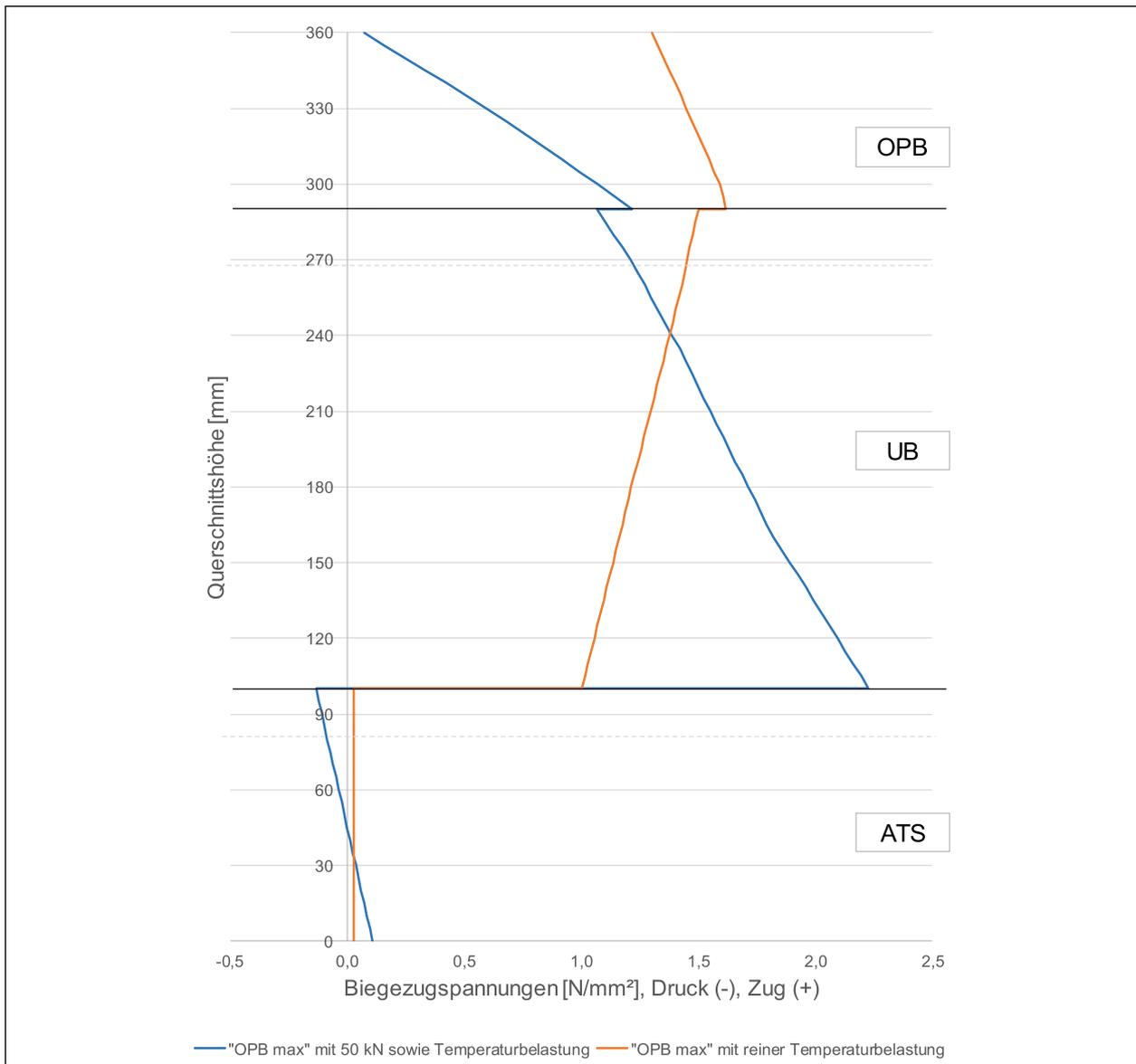


Bild 125: Biegezugspannungen an der Fuge in Querrichtung

kühlung im OPB entstehen höhere Zugspannungen, die dann im UB wegen der geringeren Abkühlung wieder abnehmen. An der Schichtgrenze von UB und ATS ist wiederum ein Sprung zu erkennen, der aus dem reibungsbehafteten Kontakt resultiert. Die geringeren Zugspannungen in der ATS sind alleine das Ergebnis der Abkühlung der ATS in Kombination mit den Einspannungen an den Enden.

An der belasteten Fuge ist eine Überlagerung der Spannungen aus Verkehrslast und Temperaturbelastung zu erkennen. Die Spannungen im OPB beginnen nahe der Nulllinie und bauen sich bis zum Maximalwert von  $1,2 \text{ N/mm}^2$  auf. Der steilere und im Vergleich zu den Verläufen aus Kapitel 8.4.3 nach links verschobene Verlauf der Kurve im OPB resultiert, wie bereits erwähnt, aus der Überlagerung der

beiden Einflüsse. Durch die Verkehrsbelastung, die nur Spannungen im Druckbereich hervorruft, wird die gesamte Kurve nach links in den Zugspannungsbereich verschoben. Im UB steigen die Zugspannungen nach einem Sprung, der auf die unterschiedlichen Temperaturdehnzahlen zurückzuführen ist, weiter. In dieser Schicht überwiegt der Spannungszuwachs aus der Verkehrslast den Spannungsabfall aus dem positiven Temperaturgradienten. Nach einem Sprung zwischen UB und ATS wegen des fehlenden Verbunds der beiden Schichten treten in der ATS aufgrund der Verkehrslast geringe Druckspannungen auf, die zu Zugspannungen werden.

Im Vergleich der Spannungsverläufe mit und ohne Verkehrslast, wird der Einfluss dieser deutlich.

Durch die Verkehrslast werden die Zugspannungen im OPB und im Großteil der ATS verringert, sodass dadurch ebenfalls die Wahrscheinlichkeit von Rissen in Längsrichtung zusätzlich zu den bereits vorhandenen Querrissen reduziert wird. Die statische Biegezugfestigkeit des „OPB<sub>max</sub>“, der für die vorliegenden Simulationen verwendet wurde, beträgt 3,2 N/mm<sup>2</sup> und wird in keinem der simulierten Fälle überschritten. Auch im UB, der an der Unterseite der Schicht durch die Verkehrslast stärker belastet wird als ohne, wird die Biegezugfestigkeit, die im UB durch die Biegezugfestigkeitsklasse F4,5 definiert ist, statisch nicht überschritten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Verkehrslast sowohl die Rissentwicklung als auch die Spannungsverläufe im System beeinflusst. Allerdings sind beide Einflüsse im hier simulierten Umfang eher unbedeutend. Die Rissentwicklung wird in der gesamten Größe nicht beeinflusst, sondern nur an einzelnen Stellen, wodurch einige Risse größer werden als an unbelasteter Stelle bzw. an dem Riss mit Last kleiner. Auch bei der Spannungsbetrachtung sehen die Unterschiede zwar gravierend aus, bei Betrachtung der Werte allerdings fällt auf, dass die maximalen Biegezugspannungen der verschiedenen Schichten deren Biegezugfestigkeiten nicht überschreiten.

## 8.7 Fazit

Die Auswertung der FE-Simulation zeigt, dass die Rissentwicklung und das Tragverhalten einer offenen Oberbetonschicht von vielen Aspekten abhängig ist.

Besonders bei der Rissentwicklung können Faktoren wie Plattenlänge (UB), Rissabstand (OPB), Temperaturdifferenz sowie -gradient, Temperaturdehnzahl und die Eigenschaften des UB identifiziert werden. Als weiterer Einfluss ist auch eine andauernde Verkehrslast zu berücksichtigen, die eine lokale Beeinflussung der Rissentwicklung darstellt. Die Rissentwicklung im Gesamtsystem wird dabei allerdings nicht beeinflusst.

Die Verkehrslast allein ist nicht ausreichend, um Risse entstehen zu lassen. Wie die Ergebnisse der Simulationen zeigen, entstehen unter einer Verkehrslast im OPB nur Druckspannungen.

Dass die Temperaturbelastung ausreicht, um Risse entstehen zu lassen, ist aus der Versuchsstrecke

cke bereits bekannt, da diese zum Zeitpunkt der Messungen noch nicht für den Verkehr freigegeben war und somit keine nennenswerten Verkehrsbelastungen darauf aufgebracht waren.

Bei einem Verbund zwischen UB und OPB ist die Belastung umso geringer, je näher die Materialeigenschaften des OPB an denen der UB-Schicht liegen. Auch die Spannungsverläufe unterscheiden sich je nach verwendetem OPB stark. Ist der Verbund jedoch gelöst, zeigt sich ein deutlich geringerer Einfluss der OPB-Eigenschaften auf den Spannungsverlauf im OPB. Dennoch ergibt sich in allen Fällen aus der Verwendung von schlechteren OPB-Parametern, also aus der Verwendung von „OPB<sub>min</sub>“, eine höhere Belastung des UB und der ATS als bei „OPB<sub>max</sub>“.

Betrachtet man die Verkehrslast in Kombination mit einer Temperaturbelastung, wirkt sich diese mildernd auf die aus der Abkühlung resultierenden Spannungen aus. Dieser Effekt ist sowohl im OPB als auch in den oberen Zentimetern des UB zu beobachten. In dem darunterliegenden UB-Bereich verstärkt die Verkehrslast die Zugspannungen allerdings. Auch in der ATS ist der ausgleichende Effekt nur im oberen Bereich zu beobachten, bevor die Spannungen im unteren Bereich verstärkt werden.

Bei den untersuchten Randbedingungen weist die Versuchsstrecke insgesamt eine vorhersehbare Rissentwicklung über den vorhandenen Quertungen des UB und ein gutes Tragverhalten auf. Eine Prognose für ein gutes Langzeitverhalten kann dadurch jedoch nicht abgegeben werden. Einerseits müssen dafür in der Simulation die Materialparameter an einen Beton mit längerer Liegedauer angepasst werden, andererseits stellt die Simulation einen Optimalfall dar. Ob dies allerdings der Situation vor Ort entspricht, hängt von vielen Kriterien ab. Zum einen stellen die Proben, die als Grundlage für die Materialeigenschaften des OPB dienen nur einzelne Stichproben dar, zum anderen sind viele der Eigenschaften auch von der Einbauqualität abhängig. Diese wirkt sich beispielsweise auf den Schichtenverbund zwischen OPB und UB, auf den Verbund zum Rand oder auf Kornausbrüche an der Oberfläche des OPB aus. All diese Faktoren können an lokalen Stellen oder sogar global, also die gesamte Versuchsstrecke betreffend, von den Annahmen abweichen, sodass dies in der Simulation angepasst werden müsste.

Wann die Rissentwicklung beginnt, kann mit den vorliegenden Daten ebenfalls nicht bestimmt werden. Unter Vorlage der zweiten Nullspannungstemperatur könnte die Temperatur ermittelt werden, bei der die Zugfestigkeit des OPB überschritten wird und der OPB reißt. Diese Prognose wird aber nicht mit den Beobachtungen vor Ort übereinstimmen, da sich im Modell die Spannungen im gesamten betrachteten Modellabschnitt synchron über den UB-Fugen entwickeln und dementsprechend alle Risse zeitgleich entstehen würden. Wie aber die Rissaufnahme zeigt, war dies vor Ort nicht der Fall, da es unterschiedlich große OPB-Platten gibt. Diese Tatsache ist auf die unterschiedlichen Rahmenbedingungen vor Ort zurückzuführen. So kann unabhängig von der Einbauqualität festgestellt werden, dass sich die Nullspannungstemperatur über die Länge der Versuchsstrecke verändert, da die Umgebungstemperatur beim Einbau über die Dauer dieses Vorgangs stark gestiegen ist.

Für weiterführende Aussagen bedarf es zusätzlicher Untersuchungen. Dazu gehören Untersuchungen für anknüpfende Aussagen zur Rissentwicklung und zum Tragverhalten. Zur Kalibrierung des Elastizitätsmoduls beispielsweise werden Informationen über den Spannungsverlauf vor Ort benötigt. Dies wäre für weitere Untersuchungen dahingehend von Vorteil, dass nicht mehr mit verschiedenen Materialvariationen gerechnet werden müsste, sondern die genauen Werte des OPB benutzt werden könnten.

Aufbauend auf den im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten FE-Simulationen können zukünftige Fragestellungen zu beispielsweise Schichtdickenänderungen oder zum Verbundverhalten an den Schichtgrenzen untersucht werden.

## 9 Konzept Eigenüberwachung und Monitoring

### 9.1 Motivation und Zielsetzung

Dieses Monitoringkonzept soll sowohl zur Überwachung der gebauten Versuchsstrecke als auch als Empfehlung für zukünftige Baumaßnahmen mit OPB eingesetzt werden.

Zur weiteren Beobachtung und kontinuierlichen Zustandserfassung der Versuchsstrecke wurde ein

Konzept erarbeitet, das die systematische Bewertung der Dauerhaftigkeit der Fahrbahnkonstruktion mit OPB ermöglicht.

Die Aufnahme eines Fahrbahnaufbaus mit neuartigen Baustoffen in das Deutsche Regelwerk setzt gute und langjährige Erfahrungen mit diesem Aufbau voraus. Um diese Erfahrungen zielgerichtet erfassen und dokumentieren zu können, wird ein Konzept zur Bewertung der Dauerhaftigkeit der Versuchsstrecke erarbeitet.

Dieses Konzept beinhaltet eine Zusammenstellung sinnvoller und zielführender Beprobungen und Untersuchungen zur Beurteilung des Betonoberbaus, um eine Dokumentation sowie eine Zustandserfassung des Fahrbahnzustandes während der Nutzungsdauer zu ermöglichen. Die Dauerhaftigkeit von verkehrssicherheitsrelevanten Parametern wie Griffigkeit, Entwässerung und die zeitliche Entwicklung der Lärminderungseigenschaften werden dabei berücksichtigt.

### 9.2 Allgemeines

Zur Auswahl geeigneter Messverfahren stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Dabei wird zwischen zerstörenden und zerstörungsfreien Methoden unterschieden. Zerstörende Verfahren sind für eine Langzeitüberwachung nur bedingt geeignet, hierfür sollten zerstörungsfreie Prüfungen zur Anwendung kommen.

Bei einigen Prüfungen werden Bohrkern aus der Strecke benötigt. Falls sich dies nicht vermeiden lässt sollte das Verschließen der Bohrlöcher besonders sorgfältig erfolgen, da sich bei offenporigem Beton besondere Schwierigkeiten bezüglich des Füllmaterials ergeben. Zum einen soll das offenporige System erhalten bleiben und zum anderen darf es zu keinem Abfließen des Verfüllmaterials in die umgebenden Hohlräume kommen. Aus diesem Grund wird zum Verfüllen ebenfalls ein offenporiger Beton empfohlen. Es sollte eine möglichst umfassende Grundcharakterisierung an separat hergestellten Probekörpern des eingebauten Materials über die Anforderungen aus der ZTV Beton-StB 07, um darüber hinaus den Bedarf an Bohrkernproben zu minimieren.

Die herkömmlichen Prüfmethode an dichten Betonfahrbahndecken kommen derzeit auch beim Oberbau aus OPB zum Einsatz. Allerdings können

die Ergebnisse einiger Prüfungen beispielsweise die der Griffigkeitsmessung an OPB nicht direkt mit dichten Fahrbahndecken verglichen werden. Eine Validierung ist derzeit noch nicht möglich da keine ausreichende Datenbasis zur Verfügung steht. Die empfohlenen Prüfungen an offenporigen Fahrbahndecken aus Beton sind nachfolgend aufgeführt.

### 9.3 Prüfungen zur Materialcharakterisierung

#### 9.3.1 Frischbetonprüfung

Um einen problemlosen Einbau des offenporigen Betons zu gewährleisten, ist zunächst dessen Konsistenz zu charakterisieren. Aus Sicht der Produktionskontrolle und für schnelle Anpassungen bietet sich hierbei die Prüfung direkt an der Betonmischanlage an. Da jedoch die Konsistenz am Fertiger der entscheidende Faktor ist, wird empfohlen, diese ebenfalls zusätzlich auf der Baustelle zu bestimmen.

Es gilt den für den Einbau von OPB im Fertiger optimalen Konsistenzbereich zu ermitteln, auf welchen die Rezeptur hin angepasst werden sollte. Die Ergebnisse der Bestimmung des Verdichtungsmaßes spiegeln zum Teil nicht die angestrebte Verarbeitbarkeit eines offenporigen Systems wieder. In weiterer Forschung sollte somit zunächst näher untersucht werden, inwieweit die Bestimmung des Verdichtungsmaßes aussagekräftige Ergebnisse zur Bewertung der OPB-Konsistenz liefert.

Neben den obligatorischen Konsistenzmessungen sollte aufgrund der Erfahrung der Temperaturempfindlichkeit des Systems die Frischbetontemperatur bei jeder Lieferung sowohl im Werk, als auch auf der Baustelle geprüft werden. Zudem empfiehlt es sich, an vereinzelt Betonproben den Hohlraumgehalt, beispielsweise durch Aufgießen eines bekannten Volumens mit Wasser zu bestimmen. Hierzu sollte jedoch zunächst untersucht werden, in wie weit sich die Praxisverdichtung der Einbaugeräte mit der Verdichtungsleistung am Rütteltisch oder mit einem alternativen Verdichtungsverfahren vergleichen lässt.

#### 9.3.2 Festbetonprüfung

Neben der Untersuchung der Frischbetonkennwerte empfiehlt es sich zur flächigen Charakterisierung des Betons in regelmäßigen Abständen

Probekörper zur Bewertung der Druckfestigkeit nach DIN EN 123903 und der Spaltzugfestigkeit nach TP B-StB sowie eventuell zusätzlich, als Grundlage für FE-Simulationen, Proben zur Bestimmung des statischen E-Moduls nach DIN EN 12390-13 herzustellen. Anhand dieser Prüfungen können Abweichungen der Mischungen von den geplanten Soll-Kennwerten festgestellt und somit mögliche Schwachstellen in der Strecke frühzeitig erkannt und gesondert bewertet werden. Die Proben sind vor der Festigkeitsermittlung auf ihren Hohlraumgehalt nach TP B-StB oder durch geeignete alternative Methoden zu prüfen. Optional können zusätzlich die Wasserdurchlässigkeit in grober Anlehnung an die ASTM D508416a, die ursprünglich für die Bestimmung des Durchflusses durch poröse Materialien entwickelt wurde sowie der Schallabsorptionsgrad nach DIN EN ISO 105342 geprüft werden. Da an offenporigen Betonen der Widerstand gegen Frost-Tausalz-Angriff nicht über die Prüfung des Mikro-Luftporengehalts abgeschätzt werden kann, empfiehlt es sich, diesen ebenfalls stichprobenartig zu prüfen.

Aufgrund des offenporigen Gefüges des Materials bedarf es dabei der in DIN CEN/TS 12390-9:2016 für den CDF-Test geforderten seitlichen Abdichtung des Probekörpers zur Sicherstellung einer einaxialen Feuchteaufnahme nicht. Hierdurch entfallen auch die dadurch möglichen Verfälschungen der Messwerte durch Anhaftungen an oder abschnittsweiser Ablösung der Abdichtung.

Für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit sind in der ASTM D508416a mehrere Verfahren beschrieben. Den einfachsten Aufbau stellt die „falling head“ Methode dar. Dieses Verfahren wurde im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte (CHANDRAPPA & BILIGIRI, 2016; KIA, WONG & CHEESEMAN, 2018) so angewendet, dass über ein transparentes Rohr eine Wassersäule auf einen seitlich abgedichteten Probekörper gebracht und die Durchflusszeit zwischen zwei Messmarken bestimmt wird (siehe Bild 126).

Die Bestimmung des Schallabsorptionsgrades nach DIN EN ISO 105342 erfolgt mithilfe eines Impedanzrohrs (siehe Bild 127). Hierbei wird der Probekörper an das Ende des luftdichten Rohrs eingebaut und von der gegenüberliegenden Seite durch eine Schallquelle mit ebenen Schallwellen beaufschlagt. Durch zwei Mikrofone, die in der Nähe des Probekörpers angebracht sind, lässt

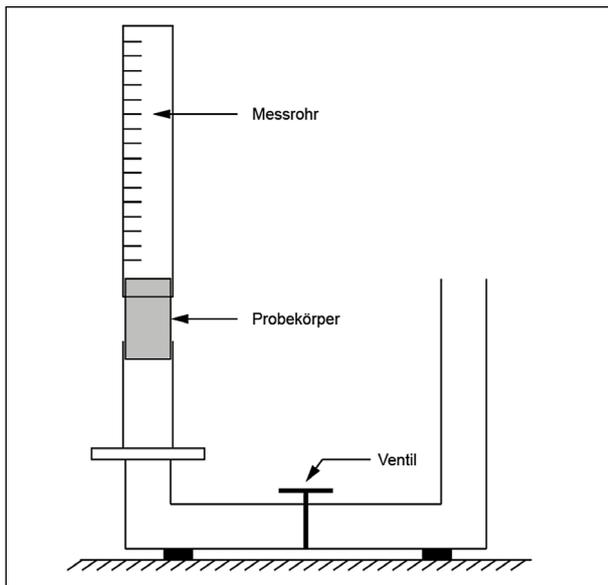


Bild 126: Skizze eines Messaufbaus zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach dem „falling head“ Prinzip (in Anlehnung an CHANDRAPPA & BILIGIRI, 2016)

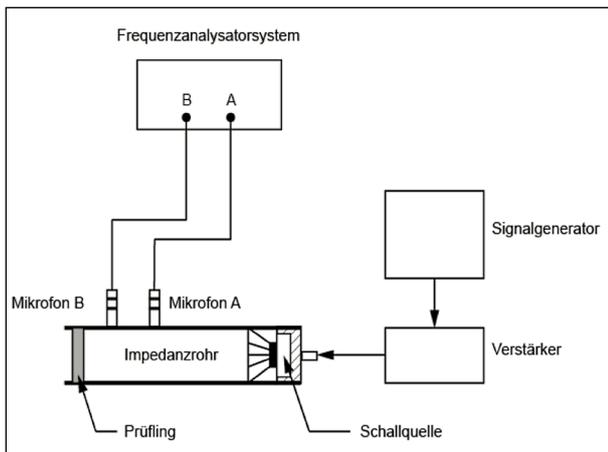


Bild 127: Impedanzrohr zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades (Anlehnung an DIN EN ISO 10534 2:2001-10)

sich der Absorptionsfaktor und das Impedanzverhältnis des Probekörpers ermitteln.

## 9.4 Streckencharakterisierung vor Verkehrsfreigabe

Für Untersuchungen, die eine Probenentnahme aus der gebauten Strecke erfordern, wird aus den zuvor genannten Gründen empfohlen, diese auf ein Minimum zu reduzieren. Vereinzelt Vergleichsuntersuchungen, ob die mithilfe der separat hergestellten Probekörper bestimmten Festbetonkennwerte mit den Eigenschaften der gebauten Strecke übereinstimmen, sollten dennoch durchgeführt werden. Aufgrund der Dicke des Oberbetons von ledig-

lich wenigen Zentimetern ist ein Vergleich anhand der Spaltzugfestigkeit praktikabel. An den hierzu entnommenen Proben sollte, vor der Festigkeitsprüfung eine zerstörungsfreie Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit und des Schalldämmmaßes sowie zwingend des Hohlraumgehalts erfolgen.

Lediglich bei ungenügender Übereinstimmung der ermittelten Kennwerte zwischen den gesondert hergestellten Proben und den aus der Strecke entnommenen Proben empfiehlt es sich, die Strecke intensiver zu beproben und auch weitere Eigenschaften wie die Druckfestigkeit sowie den FrosttausalzWiderstand anhand von entnommenen Bohrkernproben zu bewerten. Eine Bewertung des E-Moduls anhand von Bohrkernproben ist aufgrund der geringen Schichtdicke des Oberbetons (in diesem Vorhaben 7 cm) nicht ohne weiteres möglich.

Zudem sollte bei der Herstellungsvariante Frisch-auf-Fest, also dem Einbau des frischen Oberbetons auf einen bereits erhärteten Unterbeton mit einer dazwischen aufgetragenen Haftbrücke, der Verbund zwischen Unter- und Oberbeton mittels Haftzugprüfung untersucht werden. Auf diese Weise können eventuell aufgetretene Mängel der Haftbrücke identifiziert werden. Hierzu sind Bohrungen mit einem Durchmesser von mindestens 50 mm bis mindestens 10 mm tief in den Unterbeton durchzuführen und anschließend nach Befestigung der Prüfstempel auf der Oberfläche die Haftzugfestigkeit zu ermitteln. Kommt es hierbei zum Versagen des Oberbetons ist von einer höheren Haftzugfestigkeit der Haftbrücke, als die gemessene Haftzugfestigkeit des Oberbetons auszugehen. Es sollte daher ein Grenzwert definiert werden, der bei der Haftzugprüfung zur Haftzugfestigkeit unabhängigen vom Versagensort im Material ist. Es empfiehlt sich, die Prüfung der Haftzugfestigkeit vor Ablauf der Gewährleistung zu wiederholen.

Vor dem Rückbau sollten die oben genannten Beprobungen in einem größeren Umfang ergänzend durchgeführt werden. Dadurch lässt sich das Langzeitverhalten und der Zustand der Strecke zum Ende der Betriebszeit abbilden.

## 9.5 Untersuchungen während der Betriebsphase

Innerhalb der Betriebsphase sollten zerstörende Versuche vermieden werden.

Vom Forschungsnehmer wird empfohlen, während der Betriebsphase folgende Wiederholungsmessungen durchzuführen, um die Dauerhaftigkeit der Versuchsstrecke nachzuweisen und technische Daten für die zukünftige Bauweise zu gewinnen.

### 9.5.1 Festigkeitsermittlung, Ermüdung

Um ein Ermüden des Betons abschätzen zu können, können nach ausreichender Belastungsdauer, beispielsweise vor Ende der Gewährleistungsfrist, erneut Proben zur Ermittlung der residualen Spaltzugfestigkeit entnommen werden. Diese sind vor der Prüfung auf ihren Hohlraumgehalt zu prüfen.

Inwieweit an offenporigen Betonen Ermüdungserscheinungen untersucht und bewertet werden können, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts nicht betrachtet und kann somit nicht abgeschätzt werden.

### 9.5.2 Wasserdurchlässigkeit

Um den Grad der Verschmutzung zu Beginn sowie in regelmäßigen Abständen während der Betriebsphase zu kontrollieren empfiehlt sich die Messung der Wasserdurchlässigkeit. Von einer zerstörenden Untersuchung der Wasserdurchlässigkeit ist aufgrund der schlechten Verschleißbarkeit von Bohrlöchern im OPB abzusehen. Um die Entwässerungseigenschaften des offenporigen Betons zu prüfen, könnte eine angepasste Variante des Ausflussmessers nach MOORE (siehe Bild 128) angewandt werden.

Mit dem Ausflussmesser nach Moore wird eine Wassersäule in einen transparenten Zylinder mit einem Durchmesser von 50 mm aufgebracht und die Zeit gemessen, die die Betonoberfläche zum Entwässern des Wasservolumens zwischen zwei Messmarken benötigt. Um ein Anheben des Zylinders durch den Wasserdruck zu verhindern, ist der Zylinder mit Auflastgewichten versehen. Während das Verfahren prinzipiell zur Charakterisierung der Makrotextur angewendet werden kann, lässt sich dieses durch kleine Anpassungen auch für die Bewertung der Entwässerung offenporiger Systeme verwenden. Um ausschließlich die Entwässerung im Material zu bewerten, muss eine oberflächliche Entwässerung unterbunden werden. Dementsprechend ist die Unterseite des Auflastgewichts mit einem elastischen, wasserdichten Material (bspw. Moosgummi) zu versehen (siehe Bild 129). Da das Aufbringen der Wassersäule durch die schnelle Entwässerung des Systems nur erschwert möglich

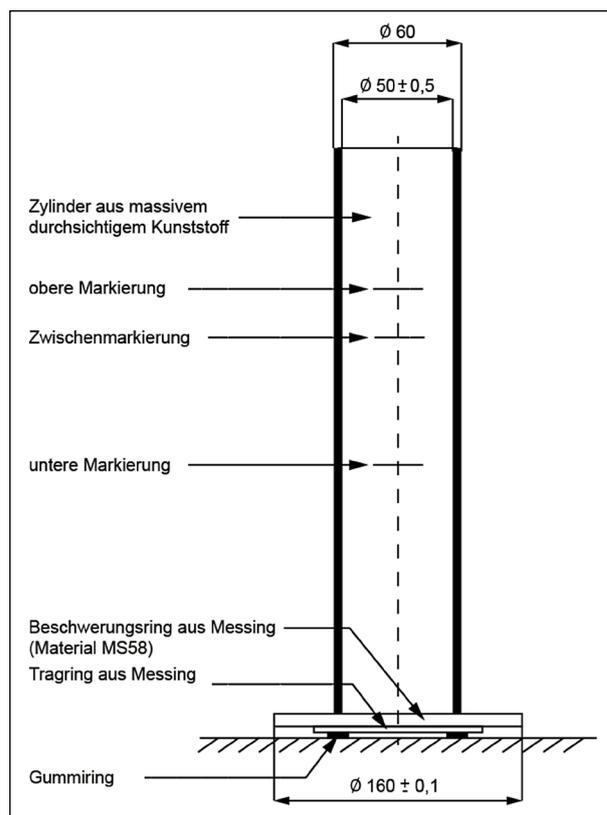


Bild 128: Aufbau eines Ausflussmessers nach MOORE (in Anlehnung an DIN EN 13036-3:2002)

ist, ist dies auf einem dichten Untergrund aufzubringen der auf der Oberfläche gezogen wird. Hierdurch kommt es zu anfänglichen Verwirbelungen und daher zu einem unregelmäßigen Durchfluss. Es empfiehlt sich daher die ursprüngliche Wassersäule deutlich höher als die erste Messmarke einzustellen.

Zur Bewertung der Durchflusszeiten liegen bisher keine Erfahrungen vor. Somit liegt bisher lediglich eine qualitative Bewertung der Entwässerungsfähigkeit und, bei zeitlich gestaffelter Anwendung, des Verschmutzungsgrades der untersuchten Strecke vor.

### 9.5.3 Längs- und Querebenheit

Die messtechnische Erfassung der Ebenheit soll im Längsprofil und im Querprofil gemäß den Vorgaben der TP-Ebenen oder in Anlehnung daran, z. B. durch berührungslose Messungen, erfolgen. Die Messungen sollen jedes zweite Jahr wiederholt werden.

Die Messung der Ebenheit im Längsprofil, dient zur Erfassung der Lage der tatsächlichen Fahrbahnoberfläche entlang der Straßenachse. Somit lassen sich Abweichungen zur idealen Lage der Oberfläche und Veränderungen zur Nullmessung ermitteln.

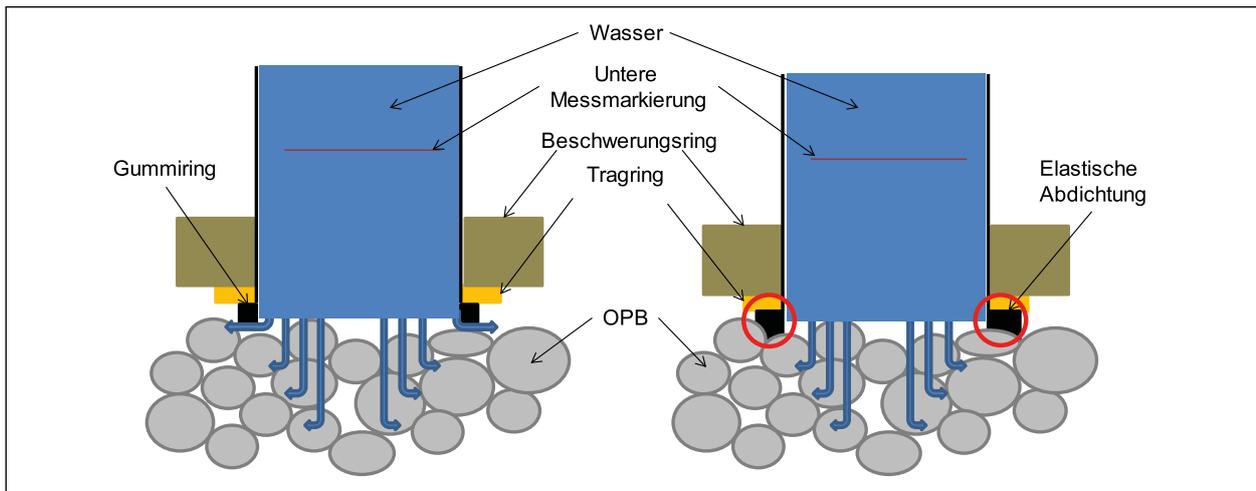


Bild 129: Schemazeichnung eines angepassten Prüfaufbaus des Durchflussmessers nach MOORE



Bild 130: Messfahrzeug MEFA (BAST)

Zur Erfassung der Ebenheit im Querprofil sollen in regelmäßigen Abständen entlang der Versuchsstrecke die Lage und Ebenheit der Fahrbahnoberfläche anhand von Querprofilen erfasst werden. Dies dient der Überprüfung der profilgerechten Lage und Detektion von Veränderungen im Zeitraum der Liegedauer gegenüber der Nullmessung.

Es wird empfohlen die Aufnahme der Ebenheit im Längs- und Querprofil mitfahrenden, berührungslosen Messsystemen, wie diese für Befahrungen zur „Zustandserfassung und -bewertung von Straßen“ (ZEB) verwendet werden, durchzuführen. Die BAST betreibt für die ZEB-Befahrungen beispielsweise das so genannte Messsystem MEFA (Multifunktionales Erfassungssystem zur Fahrbahnoberflächenanalyse). Das Messsystem MEFA ist ein kombiniertes Ebenheitsmessfahrzeug zur gleichzeitigen Messung der Längs- und Querebenheit auf Straßen (siehe Bild 130). Gleichzeitig können aber auch Aufnahmen von Fahrbahnoberflächenbildern, zur Beurteilung der Substanzmerkmale (Oberfläche), gemacht werden. (BAST)

Die Längsebenheit wird durch jeweils 4 Lasertriangulationssensoren nach dem Verfahren der Mehrfachabtastung, dem High-Speed-Road-Monitoring-Verfahren (HRM), mit einer Messbasislänge von 1,8 m bzw. 3,6 m erfasst. Die Lasersensoren sind unter dem Fahrzeugboden in der Rollspur des rechten Vorderrades des Messfahrzeuges an einem starren Messbalken, der vom Fahrzeug schwingungstechnisch entkoppelt ist, senkrecht nach unten gerichtet montiert. In Intervallen von 10 cm werden Messwerte ermittelt, aus denen sich das Längsprofil zusammensetzt. (BAST)

Die Querebenheit wird ebenfalls mittels Lasertriangulation erfasst. Der Laser ist zentrisch am Fahrzeugheck in einer Höhe von ca. 3 m angeordnet. Fahrzeugschwankungen werden während des Scanvorgangs durch ein Inertialsystem bestehend aus Kreisel-, Beschleunigungs- und Neigungssensoren ausgeglichen. (BAST)

Bei diesem Messverfahren besteht ein Querprofil aus ca. 800 Messpunkten, die über eine Breite von

4 m mit jedem Scan erfasst werden. Pro Sekunde werden 800 Querprofilscans, unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit des Messfahrzeugs, aufgenommen. Im Ergebnis liegt ein auf Grundlage der Messdaten statistisch aufbereitetes, horizontbezogenes Querprofil je 1 m Fahrstrecke vor. Somit kann eine Beurteilung der Querebenheit anhand der Kennwerte Spurrinnentiefe, Fiktive Wassertiefe in den Spurrinnen sowie Querneigung erfolgen. (BAST) Bei einem offenporigen Oberbeton muss die Auswertemethodik dieses Messverfahrens allerdings optimiert werden, da es aufgrund der hohlraumreichen Oberfläche zu Fehlinterpretationen des Oberflächenprofils kommen kann.

Die Erfassung des Oberflächenbildes erfolgt mit zwei Zeilenkameras (Auflösung 2048 Pixel), die links und rechts am Fahrzeugheck in einer Höhe von ca. 2,5 m montiert sind. Diese Kameras nehmen, unterstützt durch eine rote LED-Beleuchtung (siehe Bild 130 links), synchron die Fahrbahnoberfläche in Zeilen (1,26 mm x 4,6 m) auf, wodurch ein theoretisch unendlich langes, 4,6 m breites Bild der Fahrbahn entsteht. Zusätzlich wird synchron zum Oberflächenbild ein Farb-Frontbild aufgenommen. Mithilfe der Oberflächenbilder können die unmittelbar an der Oberfläche sichtbaren Substanzschäden, wie z. B. Längs-/Querrisse und Kornausbrüche, ermittelt werden. (BAST)

#### 9.5.4 Texturerfassung

Die Ermittlung der Oberflächencharakteristika mittels Laserprofilometer, Sandfleckverfahren oder Ausflussmesser nach Moore dienen der Beschreibung der Makrotextur zur Gewährleistung einer ausreichenden Entwässerung über die Oberfläche. Aufgrund des offenporigen Gefüges erfolgt die Entwässerung beim OPB innerhalb des Materials, wodurch eine Charakterisierung der Makrotextur nicht benötigt wird. Zudem lassen sich sowohl das Sandfleckverfahren als auch der Ausflussmesser aufgrund von Materialverlusten ins Innere der offenporigen Betonschicht nicht anwenden. Auch der Einsatz eines Laserprofilometers ist als problematisch anzusehen, da es durch die oberflächlichen Hohlräume zu starken Schwankungen in den Messwerten kommt.

#### 9.5.5 Rissaufnahme

Bei einer jährlichen Zustandserfassung werden die Risse visuell erfasst und dokumentiert. Dabei kön-

nen Rissabstände aufgezeichnet und in einem Plan dargestellt werden. Hierdurch kann die Entwicklung der Rissbildung über die Liegedauer der Strecke detektiert werden.

Hierbei gilt es unter anderem Reflexionsrisse und gegebenenfalls auftretende Kornausbrüche in der Oberfläche zu erfassen und deren Einfluss auf die Dauerhaftigkeit zu beurteilen. Um die Kornausbrüche im Rissbereich genauer zu erfassen können Fotos gemacht werden, durch die eine mögliche Zustandsänderung abgebildet werden kann.

Die Rissaufnahme sollte bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen durchgeführt werden, da die Rissweite temperaturabhängig ist.

Die Rissweiten können wie unter Kapitel 7.6 ebenfalls in regelmäßigem Turnus gemessen werden.

#### 9.5.6 Griffigkeitsmessungen

Zur Bewertung der Griffigkeit empfiehlt sich die regelmäßige Untersuchung der Teststrecke mit dem SKM-Fahrzeug entsprechend der TP-Griff-StB. Hierbei wird an einem schräglaufenden Rad das Moment aufgezeichnet, welches durch den Versuch des Reifens, sich in Fahrtrichtung auszurichten, entsteht. Dieses ist abhängig von der Reibung zwischen dem Reifen und der Fahrbahn und gibt somit Aufschluss über die Griffigkeitseigenschaften. Die Messung erfolgt standardisiert mit einem Wasserzufluss von 53 l (bei 80 km/h) kurz vor dem Messreifen. Aufgrund der entwässernden Eigenschaften des OPB wird hierbei der angestrebte rechnerische Wasserfilm von 0,5 mm nicht erreicht, wodurch ein Vergleich zwischen der Messung gefügedichter und offenporiger Deckschichten nur bedingt möglich ist. Eine Einordnung des OPB in die für Verkehrsflächen aus Beton festgelegten Grenzwerte nach ZTVBeton StB 07 ist daher als kritisch zu beurteilen.

#### 9.5.7 Lärmmessungen

Das Hauptargument zum Einsatz offenporiger Fahrbahndeckensysteme sind ihre lärmindernden Eigenschaften. Zur Bewertung des Lärminderungspotenzials bieten sich die Messverfahren CPX (close proximity) nach DIN EN ISO 11819-2 (DIN EN ISO 11819-2:2017-10) und SPB (statistical pass-by) (DIN EN ISO 11819-1:2002-05) an.

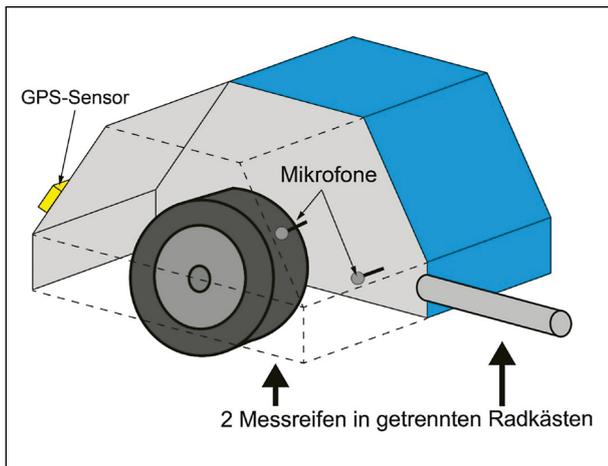


Bild 131: Aufbau des CPX-Messanhängers (in Anlehnung an MÜLLER BBM, 2019)

Bei der CPX-Messung wird mithilfe eines Messanhängers (siehe Bild 131) das direkte Reifenfahrbahngeräusch aufgenommen. Hierzu sind mindestens zwei Messmikrofone pro Reifen innerhalb eines gegen Außenlärm und Reflexionen gedämmten Radkastens untergebracht. Geprüft wird mit zwei unterschiedlichen Reifen (Pkw und Lkw) und typischerweise bei 40 km/h, 50 km/h, 80 km/h und/oder 100 km/h. Anhand der dabei emittierten Rollgeräusche lässt sich der frequenzabhängige Schalldruckpegel ermitteln. Aufgrund der Möglichkeit, die unterschiedlichen Frequenzen zu betrachten und der kontrollierten Messbedingungen, kann durch eine wiederholte Messung die Veränderung des Frequenzbereichs durch eine Verschmutzung der Fahrbahn erfasst werden.

Es empfiehlt sich, diese Messungen direkt nach der Herstellung der Strecke sowie anschließend in einem regelmäßigen Turnus von beispielsweise zwei Jahren durchzuführen. Auch eine genauere jahreszeitliche Erfassung zur Bewertung der unterschiedlichen Verschmutzungscharakteristika wäre im Rahmen eines Forschungsprojekts denkbar.

Mit der SPB-Messung „Statistische Vorbeifahrt“ nach DIN EN ISO 11819-1 wird die Schallemission von passierenden Fahrzeugen statistisch ausgewertet. Hierbei wird in einem Abstand von 7,5 m zur Fahrstreifenmitte der Vorbeifahrtsschallpegel einzelner Fahrzeuge bei quasi konstanter Geschwindigkeit ermittelt. Da es sich bei der Teststrecke um einen Autobahnparkplatz handelt, ist von keinen konstanten Geschwindigkeiten auszugehen. Dieses Problem ließe sich durch kontrollierte Vorbeifahrten lösen. Hierzu wäre jedoch eine längere Vollsperrung des Parkplatzes nötig, um eine ausrei-



Bild 132: Belastungsfahrzeug mit Benkelman-Balken

chende Anzahl an Vorbeifahrten zu ermöglichen. Durch die alternative Messung mit dem CPX-Anhänger wird das SPB-Verfahren für die vorliegende Strecke als nicht zu favorisieren erachtet.

Die Ermittlung des Schalldämmmaßes mittels Impedanzrohr, wie es für die Bewertung von Bohrkernen und separat hergestellten Probekörpern zu empfehlen ist, lässt sich nicht zerstörungsfrei auf einer Teststrecke anwenden, da bei der Bestimmung ein abgeschlossener Raum, d. h. ohne seitlichen Schallverlust benötigt wird. Punktuelle Eigenschaften lassen sich jedoch durch die Messung des Strömungswiderstands nach DIN EN 29053 ermitteln.

### 9.5.8 Tragfähigkeitsmessungen

Die Tragfähigkeitsmessung ist ein wichtiger Bestandteil der strukturellen Analyse von Verkehrsflächenbefestigungen. Die Messung der Verformung ist der Zustandsindikator für die Bewertung der Tragfähigkeit. Die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Messverfahren können nicht direkt miteinander verglichen werden. Es werden quasistatische Messverfahren und dynamische Messverfahren unterschieden.

Dabei kann die Tragfähigkeit einer Betondecke zum einen mit dem Benkelman-Balken sowie mit dem Falling Weight Deflectometer durchgeführt werden. Falls Einsenkungsmessungen auf Fahrbahnen aus Betondecken durchgeführt werden, so sind gesonderte Regelungen bezüglich der Geräteausführung und der Messdurchführung zu treffen. (FGSV, 2014 AP Trag Teil B 1) Die Tragfähigkeitsmessung sollte nach 28 Tagen nach der Herstellung und dann in einem zwei jährigen Turnus durchgeführt werden.

### Benkelman-Balken (Quasistatisches Messverfahren)

Das Last-Verformungsverhalten der Fahrbahnbefestigung und des Untergrundes wird über die Einlenkung des Fahrbahnaufbaus bestimmt. Die Einlenkung, die durch eine statische Radlast des Belastungsfahrzeuges (Lkw) an der Oberfläche der Fahrbahn hervorgerufen wird, wird mit dem Benkelman-Balken während der Entlastung der Messstelle ermittelt (siehe Bild 132). Die dabei gemessene Rückverformung der Fahrbahnkonstruktion entspricht näherungsweise dem elastischen Verformungsanteil des Fahrbahnaufbaus. (FGSV, 2014 AP Trag Teil B 1)

Ein Standard-Benkelman-Balken (siehe Bild 133) besteht aus einem Traggestell mit drei höhenverstellbaren, gelenkig gelagerten Füßen, diese bilden die Messbasis. An diesem Traggestell ist ein vertikal beweglicher, waagebalkenartiger Tastarm mit Messspitze montiert, der in seinem Dreiteilspunkt gelenkig gelagert ist. Über diesen Tastarm werden die Vertikalbewegungen des Messpunktes von der Tastarmspitze auf eine Messuhr und einen elektronischen Wegaufnehmer am gegenüberliegenden Ende des Tastarmes übertragen. Die Messuhr und der Wegaufnehmer sind über eine Klemmvorrichtung an der Messbasis befestigt. (FGSV, 2014 AP Trag Teil B 1)

Durch das Belastungsfahrzeug wird eine definierte Belastung aufgebracht. Der Benkelman-Balken wird so eingerichtet, dass die Tastarmspitze an dem Messpunkt ist. Sobald sich das Belastungsfahrzeug entfernt (in Schrittgeschwindigkeit), wird die Messwerterfassung automatisch gestartet. Die Einlenkung sowie die Rückverformung des Oberbaus wird mittels Tastarm und Wegaufnehmer mit Messuhr erfasst.

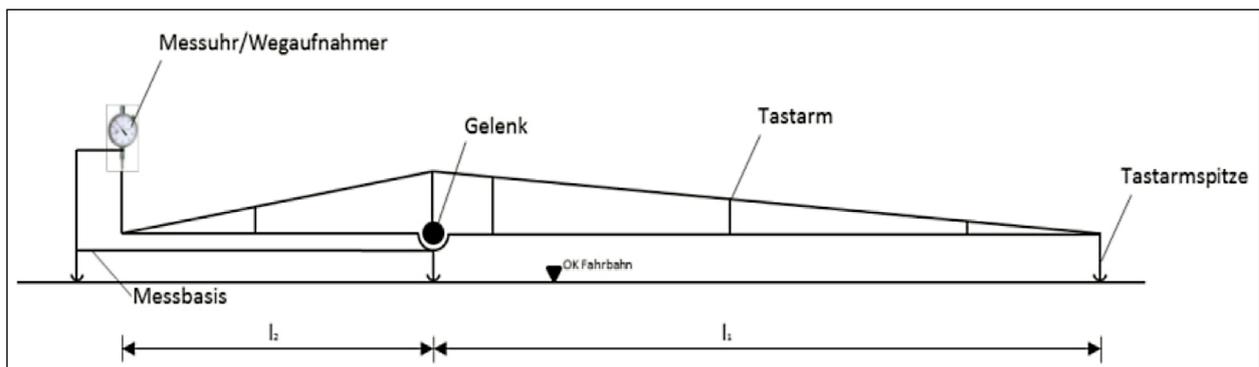


Bild 133: Standard-Benkelman-Balken (Skizze), (in Anlehnung an(FGSV, 2013; FGSV, 2014 AP Trag Teil B 1)

### Falling Weight Defelctometer (Dynamisches Messverfahren)

Bei dem Falling Weight Deflectometer (FWD) handelt es sich um ein dynamisches Messverfahren, das zerstörungsfrei zur Tragfähigkeitsermittlung auf Straßenbefestigungen eingesetzt werden kann. Bei dem FWD handelt es sich um eine Funktionsweise bei der ein Fallgewicht aus einer festgelegten Höhe fallen gelassen wird (CICKOVIC, 2018). Die Fallhöhe sowie das Fallgewicht können entsprechend des Untersuchungsziels angepasst werden (FGSV, 2013). Dieses prallt auf ein Feder-Dämpfer-System, welches den Impuls auf eine Lastplatte aus Stahl mit einem Durchmesser von 300 mm leitet. Die Einlenkung die in vertikaler Richtung durch den Aufprall des Fallgewichts auftritt wird mit Geophonen gemessen und anhand der Verformungskurve ausgewertet (siehe Bild 134). (CICKOVIC, 2018)

Abhängig von dem Untersuchungsziel werden die Lage der Messpunkte sowie der Messpunktabstand definiert (FGSV, 2013).

Bei den beiden oben genannten Methoden handelt es sich um zerstörungsfreie Prüfungen mit denen

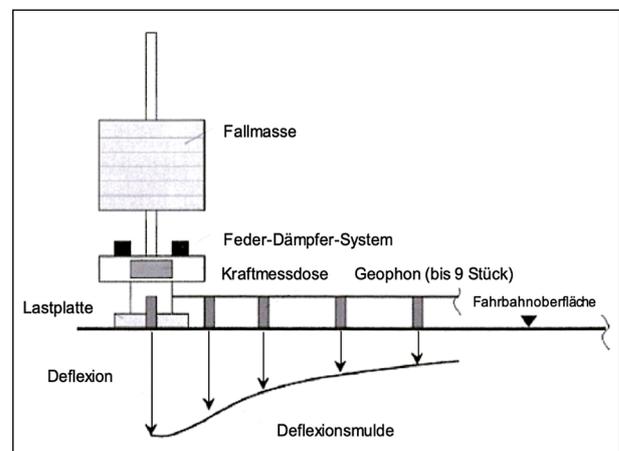


Bild 134: Prinzip des FWD (in Anlehnung an FGSV, 2013)

Änderungen über die Zeit beobachtet werden können.

### 9.5.9 Reinigung der OPB Schicht

In ausreichenden Abständen sollte eine Reinigung der Oberfläche stattfinden. Dabei sollten die Hohlräume, die im Laufe der Zeit, beispielsweise durch Reifenabrieb verschmutzen, gereinigt werden damit der lärmreduzierende Effekt sowie die Wasserdurchlässigkeit der offenporigen Oberflächenstruktur weiterhin bestehen bleiben.

Die Reinigung sollte regelmäßig durchgeführt und zu Beginn der Betriebsphase eingeplant werden. Diese routinemäßige Reinigung könnte in einem Abstand von einem Jahr durchgeführt werden, allerdings sind im Rahmen des Vorhabens keine Untersuchungen dazu erfolgt. Für außerplanmäßige Verunreinigungen kann dieser Abstand im Bedarfsfall verringert werden. Zur genauen Bestimmung der maximalen zeitlichen Abstände bedarf es ausführliche Untersuchungen. Der Grad der Verschmutzung kann indirekt über Lärmmessungen und Messungen zur Wasserdurchlässigkeit bestimmt werden.

Die Reinigung des OPB kann mit Maschinen durchgeführt werden, die auch für die Reinigung von OPA eingesetzt werden. Die Drehjetreinigung mit Heckabsaugung arbeitet mit einem Wasserdruck von ca. 240 bar, um die Verschmutzungen aus den Hohlräumen zu entfernen. Die Heckabsaugung saugt im Anschluss das Wasser direkt mit den darin enthaltenen Verunreinigungen ein. Ob es durch die Reinigung der Oberfläche zu einer Schädigung der obersten Kornreihe kommt sollte im Anschluss visuelle geprüft werden.

Untersuchungen durch VOGEL et al. (VOGEL, 2018) ergaben, dass die ursprüngliche Entwässerungsleistung des OPB durch die Drehjetreinigung nahezu vollständig wiederhergestellt werden kann.

Auch die CPX-Messungen auf der Versuchsstrecke Silberbach Nord (PWC-Anlage) (siehe Kapitel 3.9) liefern nach einem Jahr Liegedauer und einer Oberflächenreinigung Werte zwischen 83 dB(A) bis 92 dB(A). Bei der Erstmessung nach 28 Tagen Liegedauer und einer ungereinigten Oberfläche wurden mit der CPX-Messung Werte zwischen 88 dB(A) bis 93 dB(A) gemessen. (WIELAND & BECKER, 2018)

### 9.5.10 Visuelle Begutachtung der Strecke

Eine regelmäßige visuelle Begutachtung der Strecke sollte durchgeführt werden, um frühzeitig Änderungen an der Oberfläche wie zum Beispiel Risse, Kornausbrüche, Mängel in der Fahrbahnoberfläche, sowie die Beurteilung der Verschmutzung durch mechanische und witterungsbedingte Belastungen zu detektieren.

## 10 Erkenntnisse aus der Versuchsstrecke

### 10.1 Vorbereitende Tätigkeiten

Die Perforationen in der Schlitzrinne sollten in ihrer Höhenlage exakt ausgeführt werden. Dabei muss die Unterkante der Aussparung (Bohrung) auf der Höhe der Oberkante des UB zu liegen kommen. Eine zu tiefe Lage der Abflussöffnungen hat zur Folge, dass diese vom UB teilweise bedeckt werden und somit kann ein sicheres Abfließen des Oberflächenwassers durch den OPB in die Schlitzrinne nicht mehr gewährleistet werden. Eine zu hohe Lage der Aussparung führt ebenfalls zu einer mangelhaften Entwässerung und somit zu einem Anstauen des Wassers in der OPB-Schicht führt. Hierdurch besteht eine erhöhte Gefahr von Frostschäden.

### 10.2 OPB-Rezeptur

Aus den Beobachtungen während des Einbaus der Versuchsstrecke ergeben sich für die Weiterentwicklung des Materials eine Reihe weiterer Fragestellungen.

Die Analyse der Mischprotokolle hat gezeigt, dass die Betonlieferungen von Seiten des Mischwerks nicht mit der geforderten Rezeptur übereinstimmen. Aus diesem Grund ist ein Vergleich der Ergebnisse der Laborprüfungen und der Untersuchungen der Versuchsstrecke nicht in vollem Umfang möglich.

Es hat sich gezeigt, dass sich die im Labor erstellte Rezeptur und deren Herstellung nicht problemlos auf das Mischwerk übertragen lassen. Es empfiehlt sich daher im Rahmen weiterer Forschungsvorhaben ausführliche Vergleiche zwischen Labormischungen und großmaßstäblichen Mischungen vorzunehmen.

Die Temperaturen am Einbautag lagen trotz des frühen Einbaubeginns bereits bei über 20 °C und stiegen bis Einbauende bis auf knapp unter 30 °C an. Die Eignung der Rezeptur sollte durch weitere Forschung auf diese erhöhten Betoneinbautemperaturen auf der Baustelle durch erweiterte Laboruntersuchungen sichergestellt werden. Dabei sollte ebenfalls die Auswirkung erhöhter Eingangstemperaturen der Komponenten auf die Änderungen der Betoneigenschaften untersucht werden.

Ebenfalls sollten im Labor Mischungen mit variierender Gesteinsfeuchte sowie mit warmer, vollständig getrockneter Gesteinskörnung durchgeführt werden, um den möglichen Einfluss des Wasserentzugs labortechnisch zu prüfen.

Zudem gilt es gezielt zu untersuchen, worauf der Konsistenzverlust zwischen Mischwerk und Baustelle zurückzuführen ist und wie dieser effektiv verhindert werden kann. Während des Baus haben Untersuchungen des Verdichtungsmaßes gezeigt, dass der Beton im Mischwerk zu weich und nach dem Transport auf die Strecke zu trocken war. Rezepturseitig sind hierbei aufgrund des wasserarmen Charakters des OPBs die Einflussmöglichkeiten begrenzt. So ließen sich hauptsächlich Anpassungen an den Mengen und der Art der verwendeten Zusatzmittel (beispielsweise den Einsatz eines Konsistenzhalters) durchführen. Da sich im Labor keine Auffälligkeiten abgezeichnet haben, sollte dies im Rahmen von Testmischungen im Mischwerk untersucht werden.

Die OPB-Rezeptur muss an die jeweilige Transportmethode angepasst werden. Die Art des Transportfahrzeuges (Fahrmixer, Kipper) sowie die gegen Austrocknung ergriffenen Schutzmaßnahmen haben einen Einfluss auf die Frischbetonkonsistenz. Um diesen Einfluss realitätsnah abzubilden und zu untersuchen, sollten Test-Transportfahrten mit den jeweiligen Transportmethoden durchgeführt werden.

### 10.3 Mischen

Beim Mischen der OPB-Rezeptur in der Mischanlage wurde deutlich, dass eine unter Labormaßstäben entwickelte Rezeptur, die ihre Tauglichkeit im Labor nachgewiesen hatte, nicht direkt auf eine Mischanlage übertragen werden kann. Es sind anfangs Testmischungen im Mischwerk mit entsprechenden Untersuchungen nötig, um bei Bedarf Anpassungen vornehmen zu können.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass ein Mischwerk mit der Vielzahl an Komponenten, für die teilweise keine maschinellen Zugabetechniken verfügbar sind, an seine Grenzen stößt. Daraus ergeben sich zwei Ansätze für die weitere Entwicklung von Rezepturen für offenporigen Beton. Zum einen wären anlagentechnische Anpassungen für die Zugabe viskoser Flüssigkeiten (Dispersion) und die Möglichkeit weitere Kleinstmengen an Feststoffen automatisiert zuzugeben (Fasern/Cellulose) nötig. Da hiermit jedoch die Anzahl möglicher Mischwerke, auf wenige für diesen Anwendungsfall optimierten Anlagen begrenzt werden würde, wäre dieses Vorgehen für eine Etablierung des OPB eher hinderlich. Damit wäre, zumindest vorläufig, eine genauere Betrachtung der Betonzusammensetzung notwendig, um die Zahl der Bestandteile auf ein nötiges Minimum zu reduzieren. Insbesondere ist hier der Bedarf an Dispersionslösung, Cellulose und Fasern zu prüfen.

Sollte sich die Polymerdispersion als unabdingbar erweisen, so empfiehlt es sich, eine Ersatzpumpe bereitzustellen um bei einem Ausfall einen längeren Stillstand des OPB-Einbaus zu verhindern. Bei Verwendung einer separaten Pumpe zur Zugabe der Polymerdispersion sollte ebenfalls darauf geachtet werden, dass ein Ansaugschlauch und kein Druckschlauch beim Ansaugen der Dispersion zum Einsatz kommt da sich dieser bei einem entstehenden Unterdruck nicht zusammenzieht, wodurch der Durchfluss gewährleistet bleibt.

Um einen wasserarmen Beton herstellen zu können, ist die Prüfung der Gesteinsfeuchte unabdingbar. Diese gilt es in regelmäßigen Abständen wiederholt zu erfassen um auf eventuelle Änderungen rezepturseitig rechtzeitig reagieren zu können. Insbesondere gilt dies bei Just-in-Time-Lieferungen. Zusätzlich ist auf eine gleichmäßige Lagerung der Gesteinskörnung zu achten. Zu bevorzugen ist hier eine dauerhafte Verschattung, um die Gesteins- und damit die Frischbetontemperatur niedrig zu halten. Es hat sich zudem gezeigt, dass die Lagerung der Zusatzmittel bei direkter Sonneneinstrahlung die Nutzbarkeit des Mittels stark einschränken kann.

Die Lagerbedingungen der einzelnen Komponenten sollten dem Material angepasst sein. Diese sollten vorab auf dem Beiblatt oder über den Hersteller angefragt und auch berücksichtigt werden. Beispielsweise ist darauf zu achten, dass die Polymerdispersion nicht in der Sonne gelagert wird. Hierbei

kommt es zu einer Hautbildung an der Oberfläche, die zu Verstopfungen der Schläuche führt und somit die Zufuhr des Materials blockieren kann.

Während des Mischens des OPBs wurde anhand des Kamerabildes aus dem Mischer eine visuelle Bewertung der Konsistenz vorgenommen. Bei augenscheinlichen Bedarf erfolgte eine Wasserzugabe. Diese wurde im Mischprotokoll weder aufgeführt noch mengenmäßig erfasst.

Die Mischzeit sollte wegen des steigenden Energieeintrags und der damit einhergehenden Erhöhung der Frischbetontemperatur nicht über ein nötiges Maß hinaus verlängert werden.

Eine Reduzierung der Komponenten wie in Kapitel 10.2 aufgeführt führt zu einer Mischzeit Reduzierung. Dies würde den Prozessablauf praxistauglicher machen.

## 10.4 Transport

Der OPB-Transport fand entgegen der Planung nur bei einer Fahrt mit einem Fahrmischer statt. Das Material, das vom Fahrmischer angeliefert wurde, war in einem für den Einbau unzureichenden Zustand. Es war bereits sehr trocken und hatte augenscheinlich nicht die benötigte Konsistenz eines OPB. Aus diesem Grund wurden die weiteren Transportfahrten mit Kippern durchgeführt. Zudem benötigt das Entladen aus dem Fahrmischer mehr Zeit als von einem Kipper. Dies sollte für weitere Versuchsstrecken und einen kontinuierlichen Materialfluss berücksichtigt werden.

Bei den offenen Kippern konnte bereits bei der kurzen Fahrzeit von etwa 5 min beobachtet werden, dass sich die Konsistenz des Materials verändert. Eine Möglichkeit dies zu vermeiden wäre das Abdecken des Transportfahrzeugs mit einem feuchten Jutetuch oder ähnlichem, um den Beton vor Austrocknung und Verdunstung des Wassers im OPB durch (Fahrt-)Wind und Sonne oder bei Niederschlag vor Verwässerung zu schützen. Da das OPB-Material einen geringen Wassergehalt bei hoher zugänglicher Oberfläche besitzt, kann es bereits nach kurzer Zeit zu Veränderungen in der Konsistenz kommen.

In einer gezielten Untersuchung könnten die Auswirkungen auf einen OPB-Transport in Kippern mit und ohne Abdeckung verglichen werden.

Die maximale Transportzeit ist abhängig von den Witterungsbedingungen, der Zementart und den Betonzusatzstoffen. Die Betonkonsistenz sollte ständig beobachtet werden, zum einen beim Verlassen der Mischanlage, zum anderen beim Erreichen der Baustelle.

## 10.5 Haftbrücke

Bei der Versuchsstrecke wurde die Haftbrücke händisch appliziert. Dies ist sehr personal- und somit kostenintensiv. Eine händische Aufbringung ist somit auf längeren Strecken nicht realisierbar. Anzustreben wäre eine maschinelle Applikation.

Bei den Versuchsstrecken am Hockenheimring sowie in Düren auf der B 56 wurde das Auftragen der Haftbrücke in den maschinellen Einbau des Straßenfertigers integriert. Dabei kam ein Tank mit angeschlossenem Rohrsystem zum Einsatz. Über Auslassventile wurde die Haftbrücke aufgesprüht und die integrierten Bürsten verteilten diese gleichmäßig auf dem Unterbeton. Mit einer solchen Konstruktion ist ein Nacharbeiten in den Fahrspuren der Anlieferungsfahrzeuge sowie des Fertigers nicht mehr nötig.

## 10.6 Maschinentechnik

Beim OPB-Einbau wird derzeit auf die Einbautechnik eines Asphaltfertigers zurückgegriffen. Da bei einem Asphalteinbau die Verdichtung hauptsächlich durch Walzen stattfindet und diese beim OPB-Einbau bisher nicht zum Einsatz kommen, ist die Verdichtungsleistung nicht ausreichend.

Die Einbautechniker und die Betontechniker sollten in Zukunft enger zusammenarbeiten, da die benötigte Konsistenz des Betons von der Einbautechnik abhängig ist.

Der Einbau auf der Versuchsstrecke in Brunngas erfolgte mit einer starren Hochverdichtungsbohle. Bei dieser Bohle lässt sich die Einbaubreite nicht variieren. Dies führte beim Einbau dazu, dass in Abschnitten, die die Breite der Einbaubohle überschreiten keine maschinelle Verdichtung in den Randbereichen stattfand. Aus diesem Grund würde sich bei einem Einbau mit diesen Randbedingungen, der Einbau mit einer Ausziehbohle anbieten. Diese hat eine große Flexibilität beim Einbau unter-

schiedlicher Arbeitsbreiten (WIRTGEN GROUP, 2018). In weiteren Untersuchungen müsste die Einsetzbarkeit einer Ausziehbohle untersucht werden.

Bei den Auswertungen der aus der Strecke entnommenen Probekörpern sind geringe Festigkeiten ermittelt worden. Diese Tatsache könnte darauf zurückgeführt werden, dass die gewählte Hochverdichtungsbohle keine ausreichende Verdichtungsleistung liefert. Hierdurch kann die optimale Packungsdichte der Gesteinskörnung nicht erreicht werden, wodurch weniger Kontaktpunkte zwischen den Körnern und somit ein geringerer Lastabtrag gewährleistet wird. Dieser Rückschluss kann auch gezogen werden, wenn die Werte der Rohdichten betrachtet werden, die sehr gering ausfielen. Diese sollten nach den Untersuchungen im Labor bei ca.  $2000 \text{ kg/m}^3$  liegen, lagen jedoch bei den Bohrkernen bei  $1700 \text{ kg/m}^3$ . Das heißt weniger Material wurde eingebaut.

Die Vibration hat einen großen Einfluss auf die Verdichtung bei geringen Einbaudicken. Da die Größe der Vibrationsfrequenz dafür sorgt, dass eine geschlossene, ebene Oberfläche gebaut wird (JOSEPH VÖGELE AG, 2008), sollte man hinterfragen, ob im Hinblick auf eine offenporige Struktur des OPB, die Vibration auch bei zukünftigen Maßnahmen zum Einsatz kommen sollte. Die verwendete Einbautechnik, sowie Verdichtungsmethode und Verdichtungsgrad sind entscheidende Faktoren im Hinblick auf Tragfähigkeit, den Hohlraumgehalt, sowie auf die Ebenheit der Fahrbahn. Aus diesem Grund sollte in diesem Bereich eine intensive Forschung stattfinden.

Sollte weiterhin der Einbau des OPBs mit einer Hochverdichtungsbohle erfolgen, so sollten ausführliche Versuche durchgeführt werden, bei denen Änderungen an den Einstellungen der einzelnen Komponenten des Fertigers vorgenommen werden. Anhand von Bohrkernen sollte verglichen werden, welche Änderungen dadurch im eingebauten Zustand eintreten.

Der Fertiger sollte so auf das OPB-Material abgestimmt werden, dass eine glatte, gleichmäßige Oberfläche entsteht die nicht mehr nachbearbeitet werden muss, da eine händische Nacharbeitung immer zu einer Inhomogenität an der Oberfläche führt.

Die starre Bohle wird mit Anbauteilen verbreitert. Bei der Versuchsstrecke konnten die Anbauteile bei

einer Einbaubreite von 6,50 m nicht symmetrisch angebaut werden. Das führt dazu, dass der Fertiger nicht ganz gerade läuft und einen leichten Drall bekommt.

Grundsätzlich sollte der Einbau mit der derzeitigen Methode neu durchdacht und analysiert werden. Auch der Einsatz von Gleitschalungstechnik oder die Entwicklung alternativer Techniken sollte in Betracht gezogen werden.

## 10.7 Nachbehandlung

Auf der Versuchsstrecke kam ein Drainagevlies zur Nachbehandlung der OPB-Fläche zum Einsatz. Dieses wurde regelmäßig mit Wasser befeuchtet.

Das Auflegen des Vlieses erfolgte händisch. Die Rollen wurden auf die OPB-Oberfläche aufgelegt, und anschließend ausgerollt. Dabei musste die Bahn der Rolle wiederholt korrigiert werden. Diese Art des Ausrollens hatte zur Folge, dass direkt nach der Betonage die Oberfläche betreten werden musste. Das Betreten der Fläche sowie das Hantieren mit der Rolle führten dazu, dass die Oberfläche beschädigt wurde, wodurch Verdrückungen entstanden. Aus diesem Grund ist eine maschinelle Aufbringung unumgänglich. Ein Ansatz dazu wäre eine an eine Nachlaufbühne angebrachte Abrollmechanik, die das Vlies direkt im Anschluss an den OPB-Einbau abrollt.

Ein zweiter Punkt ist die Bewässerung des Vlieses. Die bei der Versuchsstrecke verwendeten Rasensprenger mussten ebenfalls händisch aufgestellt werden wodurch erneut die junge Betonfläche betreten wurde. Zusätzlich benötigte es eine Wasserzufuhr zu jedem Sprenger. Aufgrund der geringen Wasserspeicherung des Materials sowie den Witterungsverhältnissen musste in regelmäßigen Abständen bewertet werden, ob das Vlies feucht genug ist oder neu bewässert werden muss. Insgesamt ist das Vorhaben als sehr aufwändig und nur bedingt im Großmaßstab einsetzbar.

Das Oberflächenerscheinungsbild hat sich nach dem Entfernen des Vlieses als uneben und nicht homogen abgezeichnet, mit Löchern an einigen Stellen. Dies lässt sich auf das frühe Betreten der Fläche sowie das Geraderücken der Vliesrolle zurückführen.

Zielführender wäre hier die Weiterentwicklung herkömmlicher Nachbehandlungsmittel für den Einsatz auf offenporigem Material.

## 10.8 Oberflächenbehandlung

Das Ausrollen des Waschbetonpapiers auf die OPB-Fläche erfolgte händisch. Dies ist personalaufwendig und die frisch betonierte Oberfläche musste dafür betreten werden. Der Radius im Streckenverlauf, führte dazu, dass es beim Ausrollen eine Wellenbildung des Papiers gab. Daraus resultierte, dass das Papier nicht komplett auf dem OPB aufliegt. Somit konnte die vorgesehene Wirkung nicht sichergestellt werden. Ebenfalls war es nicht möglich den genauen Zeitpunkt zu definieren zu dem das Waschbetonpapier entfernt und die Oberfläche ausgewaschen werden muss, um den oberflächlichen Zementleim zu entfernen. Der Zeitpunkt des Auswaschens ist abhängig vom Beton, der Witterung und der Auswaschart. Wenn das Auswaschen zu früh erfolgt besitzt der Beton noch keine ausreichende Festigkeit, wodurch Gesteinskörner mit ausgewaschen werden. Wenn die Erhärtung des Betons hingegen zu weit fortgeschritten ist, lässt sich der Zementleim nicht mehr entfernen.

Ein weiteres Problem ist die Umsetzung in die Praxis. Da die derzeitige maximale Breite des Waschbetonpapiers bei etwa 1,5 m liegt, müssen mehrere Rollen nebeneinander verteilt werden, auf die zusätzlich das feuchte Vlies verlegt werden muss. Die Rollenbreite sollte auf die Einbaubreite angepasst werden. Das Vlies sollte direkt an das Waschbetonpapier angebracht werden, um eine Hohllagenbildung der beiden Materialien zu vermeiden und einen Arbeitsschritt beim Verlegen einzusparen.



Bild 135: Randbereich mit PCC-Mörtel

Das Auswaschen erfolgte händisch mit einem Hochdruckreiniger. Bei dem Auswaschprozess muss wiederholt über die selbe Stelle gegangen werden, wodurch der Vorgang zeitaufwendig und in der Praxis nicht realisierbar ist. Das Auswaschen müsste maschinell mit einer Direktabsaugung erfolgen, um das Wasser mit dem ausgewaschenen Zementleim zu entfernen.

## 10.9 Randbereiche der OPB-Fläche

In den Randbereichen der OPB-Fläche ist eine oberflächliche Gesteinslockerung zu erkennen. An den Bereichen zu der Schlitzrinne und der Lkw-Parkfläche können die Gesteinskörner sehr leicht herausgelöst werden. Es ist zu erkennen, dass vor allem im Randbereich an die Lkw-Stellfläche mehr lose Gesteinskörner vorhanden sind.

Da der Einbau mit einer starren Bohle durchgeführt wurde, kann die Breite der Bohle nicht während des Einbaus auf die Einbaubreite angepasst werden. Vor Ort musste an die bereits fertig gestellten, angrenzenden Flächen angebaut werden. Die Einbaubreite variierte und war teilweise breiter als 6,50 m. Die starre Bohle konnte diese Randbereiche nicht ausreichend verdichten, weshalb diese händisch mit einer Kelle verdichtet wurden.

Der Radius in den Anfangs- und Endbereichen sowie die Querneigung zur Schlitzrinne hin hat zur Folge, dass sich der Fertiger zur Schlitzrinne hinbewegt und der Abstand von der Bohle zur Lkw-Stellfläche vergrößert wird, wodurch der Bereich in dem keine Verdichtung stattfindet breiter wird.



Bild 136: Randbereich zum Asphalt

Im Bereich am Übergang OPB zu Lkw-Stellfläche parken die langsam fahrenden Lkw ein und rangieren. Dort treten dementsprechend erhöhte Schubkräfte auf. Dieser Randbereich wurde mit einem PCC-Mörtel vergossen. Zwar sind in dem Bereich des PCC-Mörtels keine Kornausbrüche zu beobachten allerdings treten diese vermehrt im angrenzenden OPB auf (siehe Bild 135).

Die Übergangsbereiche zu den Asphaltbereichen wurden mit einem bituminösen Material ausgeführt. In diesen Bereichen sind keine Schadensbilder zu erkennen (siehe Bild 136). Dieser Bereich wird gerade überfahren und unterliegt keinen Schubbeanspruchungen.

### 10.10 Aktueller Stand

Nach einer Liegedauer von 10 Monaten wurde bei Begehungen der Strecke und einer visuellen Begutachtung deutlich, dass sich die obersten Kornreihen gelöst haben und eine dichte Zementleimschicht sichtbar wird (siehe Bild 137). Das lässt darauf zurück schließen, dass der Zementleim beim Einbau im noch flüssigen Zustand abgesunken ist. Dies führt dazu, dass die akustisch wirksame Schichtdicke reduziert wird, da der Hohlraum mit Zementleim gefüllt ist.

### 10.11 Zusammenfassung

Für den Bauablauf lässt sich somit zusammenfassen, dass der Beton die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit nicht erreichte, wofür mehrere Komponenten ausschlaggebend waren. Einerseits wurde

werksseitig die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung nicht ausreichend berücksichtigt, wodurch es zu einem Wassermangel in der Mischung kam. Andererseits wurde die Gesteinskörnung in warmen Zustand verwendet und somit die Frischbetontemperatur erhöht. Zusätzlich wurde der Beton nicht den Umgebungsbedingungen (Sonne und Fahrtwind) entsprechend transportiert, um einen Verlust an Betonfeuchte während des Transports zu verhindern. Des Weiteren konnte mit der gewählten Hochverdichtungsbohle keine ausreichende Verdichtungsleistung aufgebracht werden, um den Beton der gelieferten Konsistenz adäquat zu verdichten. Aufgrund dieser sowie der Verzögerungen im Materialfluss, konnte der kontinuierliche Bauablauf nicht gewährleistet werden, was zu einer verminderten Produktqualität des eingebauten Betons führte. Dies hatte zur Folge, dass die durch die Mischung erreichten Festigkeiten weit abseits der Labor- beziehungsweise Zielwerte lagen. Damit wäre ein frühzeitiger Abbruch und Rückbau der Strecke sinnvoll gewesen, um im Anschluss die Fehler zu eruieren und neu zu beginnen.

Aufgrund der Diskrepanz zwischen Labor und Praxis sind weitere Teststrecken auf größeren, nicht öffentlichen Flächen zu empfehlen. Auf diesen können Versuche im Großmaßstab zur Abstimmung der Einbautechnik und des Frischbetons mit der Möglichkeit des einfachen Rückbaus und der anschließenden Anpassung durchgeführt werden. Zudem ermöglicht dies den Einsatz von (eventuell) schädigender/zerstörender Prüftechnik zur Charakterisierung des Materialverhaltens, wie beispielsweise dem MLS (Mobile Load Simulator) und somit genauere Informationen über die dauerhafte Tragfähigkeit des Gesamtsystems zu erhalten.



Bild 137: OPB PWC-Anlage Brunngas, nach 10 Monaten Liegezeit

## 11 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens ist in mehreren aufeinanderfolgenden Stufen erfolgt. Diese wurden wiederum in Teilaufgaben auf insgesamt 5 Meilensteine untergliedert. Alle Arbeitsschritte zielen auf eine praxisnahe Optimierung der Gesamtprozesskette zur Herstellung von offenporigen Betonstraßen im zweischichtigen Aufbau, sowie die Überwachung deren dauerhaften Funktionstüchtigkeit ab. Alle Untersuchungen wurden dabei derart durchgeführt, dass eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Praxis gewährleistet ist.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Potenzialanalyse für eine prozesssichere Herstellung einer offenporigen Oberbetonschicht auf einer Versuchsstrecke durchgeführt. Infolgedessen wurde eine Optimierung der bisher verwendeten OPB-Rezeptur im Hinblick auf die Verbesserung der Frischbetoneigenschaften und somit die Robustheit der Rezeptur durchgeführt. Ebenfalls wurde die Rezeptur auf den benötigten Hohlraumgehalt zur Lärmreduzierung optimiert. In einem weiteren Schritt wurde die Prozesskette auf ihr Optimierungspotenzial hin analysiert.

Im Vorfeld wurde eine Literaturrecherche bezüglich bereits durchgeführter Versuchsstrecken vorgenommen, die mit OPB oder Dränbeton ausgeführt wurden. Bei dieser Recherche wurde durch die Ableitung und Festlegung charakteristischer Kenngrößen die Prozesskette erarbeitet. In Zusammenarbeit mit Maschinen- und Einbautechnikern wurden charakteristische Kenngrößen für den Einbau des OPB als Oberbetonschicht definiert. In Zusammenarbeit mit einem Betontechnologen wurde die Rezeptur im Hinblick auf die großmaßstäbliche Herstellung im Mischwerk überarbeitet. Unter der Zuhilfenahme der analysierten Kenngrößen wurde in Abstimmung mit dem Bauherrn und der ausführenden Firma, die Planung sowie die Ausführung der Versuchsstrecke begleitet. Durch die Bewertung der Wirksamkeit der definierten Prozesskette konnten die Prozesse aufbereitet werden, die noch einer Weiterentwicklung benötigen.

Im Rahmen der Begleitung der Ausführung der Versuchsstrecke fand eine Materialüberwachung der Baustoffe am Mischwerk sowie auf der Versuchsstrecke statt. Die hergestellten Probekörper wurden im Nachhinein beprobt und ausgewertet.

Im Zuge der Baumaßnahme wurden durch den Forschungsnehmer zwei Messstellen zur Untersuchung der Temperaturverteilung in der Fahrbahndecke eingebaut. Über mehrere Monate wurde das Temperaturprofil über den kompletten Straßenoberbau aufgezeichnet sowie ausgewertet. Außerdem wurde ein Rissprofil der Strecke aufgenommen. An den sich einstellenden Rissen im Oberbeton wurden Messbolzen gesetzt um die Rissweiten zu unterschiedlichen Witterungsbedingungen zu messen. Die in der Versuchsstrecke gewonnenen Daten, die mittels eingebauter Messtechnik erfasst wurden, konnten weiterführend für die Kalibrierung der durchgeführten numerischen Simulation eingesetzt werden. Die numerischen Simulationen wur-

den mit der FE-Methode durchgeführt. Dabei wurde ein 3D-Modell der Versuchsstrecke mit dem Programm ANSYS Workbench erstellt. Mit diesem Modell wurden erweiterte Erkenntnisse bezüglich der praxisrelevanten Beanspruchungskombinationen von Temperatur- und Verkehrsbelastung gewonnen.

Im Anschluss an den Bau der Versuchsstrecke wurde ein Monitoringkonzept erstellt. Dieses Konzept dient der systematischen Bewertung des Zustandes der Fahrbahnkonstruktion, um während der Betriebsphase die OPB Oberbetonschicht ausreichend genau beurteilen zu können. Dabei wurden die für die Dauerhaftigkeit der Verkehrssicherheit relevanten Aspekte wie Griffigkeit und Wasserdurchlässigkeit der OPB-Schicht sowie die Entwicklung der Lärmemissionen aufgeführt.

Die Optimierung der OPB-Rezeptur hat von labortechnischer Seite sehr gut funktioniert. Allerdings haben die gewonnenen Erfahrungen gezeigt, dass sich die Laborbedingungen nicht exakt auf eine Herstellung des OPB im Mischwerk übertragen lassen. Im Hinblick auf die Robustheit und Verarbeitbarkeit der Rezeptur unter Praxisbedingungen muss diese in einem großmaßstäblichen Versuch, also in einem Mischwerk, genauer betrachtet werden. Nur so ist es möglich außerhalb des Labors einen zuverlässigen Baustoff zu entwickeln, der auch unter Praxisbedingungen stabil ist. Neuartige Baustoffe wie Acrylfasern kommen bei dem OPB ebenfalls zum Einsatz. Bei diesen muss in Zusammenarbeit mit den Mischwerken an der Zugabemethode gearbeitet werden. Bei dem Zusatzstoff Polymerdispersion und dem Fließmittel wird eine Wechselwirkung mit den weiteren Zusatzmitteln vermutet. Dies müsste allerdings noch erforscht werden. In diesem Bereich fehlt eine intensive labortechnische Untersuchung. Ein weiterer Aspekt, der eine genauere Betrachtung benötigt, ist, wie sich die Eigenschaften der Polymere auf erhöhte Temperaturen während des Einbaus auswirken.

Zur Erhöhung der Festigkeit könnte der Mischung Sand hinzugegeben werden. Dazu müsste allerdings ausführliche Untersuchungen durchgeführt werden um die Wirksamkeit zu überprüfen und ausschließen zu können, dass der Sand den Hohlraumgehalt nicht maßgeblich reduziert.

Die Zusammenstellung bisher durchgeführter Projekte zeigt, dass die Dauerhaftigkeit bei keinem dieser Versuchsstrecken gegeben war. Allerdings ist es

kaum möglich genaues über die Langzeitentwicklung der Strecken zu sagen, da diese meist rückgebaut wurden und sich nur in sehr geringem Umfang Literatur auffinden lässt. Die Ergebnisse der Literaturrecherche zeigten allerdings, dass es zu häufigen Kornausbrüchen an der Oberfläche kommt und die Strecken nach relativ kurzer Zeit zurückgebaut wurden. Bevorzugt brechen die Körner im Bereich des Rissrandes aus, da dort keine Stützung zum Nachbarkorn mehr vorhanden war. Dieses Ausbrechen der Körner führt zu Folgeschäden und zum vermehrten Herauslösen von Gesteinskörner (Reißverschluss effekt). Vor allem die Problematik des ausreichenden Hohlraums zur Lärmreduzierung und die gegenüberstehende Dauerhaftigkeit muss in Zukunft noch weiter analysiert werden. Die Kornausbrüche vor allem in den Rissbereichen müssen weiterhin betrachtet werden. Dabei sollte vor allem der Zementleim der, die Gesteinskörner verbindet betrachtet werden.

Es wird daher empfohlen, dass mit weiteren Forschungsprojekten großmaßstäbliche Mischversuche und Probestrecken gebaut werden. Somit kann das Zusammenspiel des OPB-Materials und der Einbautechnik aufeinander abgestimmt werden.

Die Problematik der Risse in der OPB-Schicht und die einhergehenden Kornausbrüche könnten vermieden werden, wenn der OPB auf einer durchgehend bewehrten Betondecke gebaut wird. Bei dieser Bauweise sind keine Fugen im UB vorhanden, die dann in den OPB durchschlagen können. Bei der durchgehend bewehrten Betondecke werden die Rissöffnungen geringgehalten. Somit sind geringere Rissweiten im OPB zu erwarten, wodurch das Ausbrechen von Körnern im Bereich des Risses reduziert werden kann. Der Einfluss der Rissöffnungsweite auf Kornausbrüche wurde im Rahmen dieser Forschung nicht untersucht. Zur Bauweise OPB auf durchgehend bewehrter Betondecke liegen derzeit keine Erfahrungen aus der Praxis vor.

Die bei der Versuchstrecke gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass die Maschinentechniker mit den Betontechnikern in einem engen Dialog miteinander stehen sollten, damit die Bedürfnisse beider und die Randbedingungen aufeinander abgestimmt werden können. In einer engen Zusammenarbeit kann herausgearbeitet werden wie die Konsistenz und Verarbeitbarkeit des Betons sein sollte, damit dieser mit den Maschinen plan und eben eingebaut werden kann.

In einem weiteren Forschungsvorhaben könnte der Ansatz eines Nass-in-Nass Einbaus von UB und OPB verfolgt werden. Bei diesem Einbau würde das Auftragen einer Haftbrücke entfallen. Die daraus resultierenden Probleme der händischen Applikation, der richtigen Menge die aufgebracht werden muss sowie die Problematik des Auftragens im Bereich der Raupenfahrwerke des Fertigers sowie der Reifenspuren des Lkw müssten nicht weiter beachtet werden. Ebenfalls kann auf die Reinigung der UB-Fläche verzichtet werden. Allerdings müssten bei dieser Art des Einbaus zwei Einbaumaschinen vorgehalten werden. Dies erfordert einen sehr hohen Grad an Detailplanung. Der Materialfluss muss für beide Betonsorten aufeinander abgestimmt sein und es darf zu keiner Verzögerung im Bauablauf kommen.

Für zukünftige Forschungsarbeiten muss eine Erhöhung der Griffigkeit der Oberfläche genauer betrachtet werden. Der Versuch die Griffigkeit mit einem sogenannten Waschbetonpapier zu erhöhen ist zum derzeitigen Zeitpunkt nicht ausreichend erforscht und konnte auf dieser Versuchsstrecke keine Erfolge aufweisen. Bei dem Forschungsvorhaben in Düren (2002) wurde bereits ein Schleifverfahren angewandt, das zu einer Erhöhung der Griffigkeit führte (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004). In einem Forschungsvorhaben könnte die Wirksamkeit und Funktionsweise des Schleifens auf OPB genauer betrachtet werden.

Die FE-Simulationen zeigten, dass die Risse im OPB lediglich dort auftreten wo sich darunter bereits ein Riss im UB befindet und dass die Rissweiten im OPB von den Rissweiten im UB abhängig sind. Es wurde ebenfalls deutlich, dass die Risse ausschließlich durch die Aufbringung einer Temperaturbelastung entstehen.

Die letzten beiden OPB Versuchsstrecken in Deutschland wurden auf PWC-Anlagen ausgeführt. Auf diesen Anlagen werden die Oberflächen stark durch das Rangieren der Lkw beansprucht. In diesen Bereichen treten Anfahr- und Bremsbelastungen in Form von Schubkräften, sowie Scherbeanspruchungen durch die Lenkbewegungen beim Einparken mit geringen Geschwindigkeiten beziehungsweise über nicht gelenkte Achsen bei Bogenfahrt der Sattelaufleger, auf. Im Rahmen einer neuen Versuchsstrecke sollte eine Strecke gewählt werden, die in Hinblick auf eine spätere Nutzung (Autobahn, Bundesstraße) vergleichbare Bean-

spruchungen aufweist und somit bezüglich ihrer Dauerhaftigkeit vergleichbar sind.

Es wäre sinnvoll die nächsten grundlegenden Forschungsschritte auf einer Versuchsstrecke auf einer nichtöffentlichen Anlage durchzuführen. Hierdurch könnten Flächen ohne bauliche Zwänge gewählt werden, wobei ein Rückbau der Strecke vereinfacht wird.

Eine weitere Möglichkeit für die Umsetzung neuer Versuchsstrecken zur Gewinnung neuer Erkenntnisse ist der Einbau auf Geh- und Fahrradwegen. Auf diesen Flächen ist es einfacher Versuchsstrecken umsetzen zu können. Ebenso ist der Planungsaufwand geringer und die Maßnahme kann somit schneller umgesetzt werden. Auf diesen Strecken sind die Belastungen minimal, das heißt die Dauerhaftigkeit wird vergrößert und ermöglicht somit eine Langzeitanalyse der Strecke.

Auf die Ebenheit der Oberfläche bei der Herstellung wurde in der Vergangenheit kein großer Fokus gelegt. In Zukunft sollte diese Thematik mehr in den Vordergrund rücken. Da eine unebene Oberfläche zu einer Schallemission führt, die bei einer lärmreduzierenden Fahrbahnoberfläche unbedingt vermieden werden sollte.

Im Hinblick auf die Bevölkerung, die immer größeren Wert auf den Lärmschutz legt, führt dies dazu, dass dieses Thema auch in der Politik immer wichtiger wird. Der OPB als lärmreduzierende Betonoberfläche sollte somit in Zukunft mehr in den Fokus gerückt werden. Bei einem lärmreduzierenden Belag aus Beton können die Vorteile des Betons als Baustoff wie seine Dauerhaftigkeit, Helligkeit der Fahrbahn und keine Verdrückungen des Materials ausgenutzt werden. Aus diesem Grund sollte weiterhin intensiv am OPB geforscht werden, damit diese Bauart in der Zukunft flächendeckend auf Fernstraßen eingebaut werden kann.

In einem Forschungsprojekt könnten weitere Einsatzgebiete von OPB im Verkehrswesen untersucht werden. Beispielsweise im Bahnbereich in Tunnelabschnitten. Dort führt der OPB dazu, dass der Gleisbereich von Einsatzfahrzeugen befahren werden kann und dass Schlepplwasser das von den Zügen in den Tunnel transportiert wird abgeleitet werden kann. Ebenfalls wirkt der Hohlraum in der Oberbetonschicht als Schallabsorber im Gleisbereich. Durch das erweiterte Einsatzgebiet wird der Fokus auf diese Bauweise gesteigert.

Die in diesem Forschungsprojekt gesammelten und neu gewonnenen Erkenntnisse der Bauweise mit OPB sollten als Grundlage für weitere Forschung dienen, um diese lärmindernde Bauweise zukünftig als Regelbauweise etablieren zu können.

## Literatur

DIN EN ISO 10534 2:2001-10 (2001). Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion.

DIN EN ISO 11819-1:2002-05 (2002). Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche.

DIN EN ISO 11819-2:2017-10 (2017). Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche - Teil 2: Nahfeldmessverfahren.

Analytische Rechenverfahren im Verkehrswegebau Vorlesung 2018. S. FREUDENSTEIN, Lehrstuhl und Prüfam für Verkehrswegebau, Technische Universität München.

FGSV, 2014, AP Trag Teil B 1 (2014). Arbeitspapier - Tragfähigkeit für Verkehrsflächenbefestigungen Teil B 1 Benkelman-Balken: Gerätebeschreibung, Messdurchführung.

FGSV, 2013. Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil A: Messsysteme.

Autobahndirektion Nordbayern (Hrsg.). (2016). Ausführungsplanung. BAB A 6 Heilbronn - Nürnberg PWC-Anlage Silberbach.

B\_I MEDIEN GmbH. (2016). Lärmindernde Fahrbahn: Offenporigen Beton auf Teststrecke eingebaut, B\_I MEDIEN GmbH. Zugriff am 20.03.2018. Verfügbar unter <https://www.bi-medien.de/artikel-13481-bm-teststrecke-fuer-opb-auf-der-a6.bi>

B+P Baustoffprüfung. (2018). Plattendruckversuch (DIN 18134). Autobahndirektion Südbayern Dienststelle München Bahnhofstraße 23, 82216 Maisach PWC-Anlage Brunngas.

BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen, Hrsg.). Erfassen und Bewerten von Oberflächeneigenschaften. MEFA - Multifunktionales Erfassungs-

- system zur Fahrbahnoberflächenanalyse. Zugriff am 26.04.2019. Verfügbar unter [https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Strassenbau/Technik/MEFA.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=5](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Strassenbau/Technik/MEFA.pdf?__blob=publicationFile&v=5)
- BASt. Neue Wege beschreiten OPB - Offenporiger Beton. Ein Projekt der BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt, L. W., Hrsg.).
- Bayerische Vermessungsverwaltung 2018. (2018). Brunngras P: BayernAtlas Plus.
- Bayern Atlas. (2018): Bayern Atlas. Verfügbar unter <https://geoportal.bayern.de/bayernatlas/?lang=de&topic=ba&catalogNodes=11,122&bgLayer=atkis&layers=luftbild&E=4473313.62&N=5348722.96&zoom=12>
- BECKER, C. (26.02.2018). Versuchsstrecke Silberbach (Telefonat).
- BECKER, C. & WIELAND, M. (2017). Fahrbahnoberflächen - Entwicklungen im Betonstraßenbau. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 2017, 54-62.
- Eurocode 2, 2011 (2011). Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010: DIN EN 1992-1-1. Berlin: Beuth Verlag.
- BENAICHA, M., ROGUIEZ, XAVIER, JALBAUD, OLIVIER & BURTSCHHELL, Y. (2015). Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete (84).
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). (2004). Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr - Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ (Heft S 37). Bremerhaven: Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). (2015). Jahresbericht 2013/2014. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (A 37). Bergisch Gladbach. Zugriff am 19.02.2018. Verfügbar unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/volltexte/2015/1485/pdf/A37b.pdf>
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). (2017a). duraBASt - Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der BASt. Zugriff am 20.02.2018. Verfügbar unter [http://www.dura-bast.de/durabast/DE/Home/home\\_node.html;jsessionid=DF4B950B01609DE0FC1577E5E3374F8E.live11293](http://www.dura-bast.de/durabast/DE/Home/home_node.html;jsessionid=DF4B950B01609DE0FC1577E5E3374F8E.live11293)
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). (2017b). FE 08.0243/2015/ARB. „Potenzialanalyse - Prozesssichere Herstellung lärmarmen Straßen in Betonbauweise (OPB - Offenporiger Beton)“. Leistungsbeschreibung.
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). (2017c). Offenporiger Beton für den Einsatz im Straßenbau. Zugriff am 20.02.2018. Verfügbar unter <http://www.durabast.de/durabast/DE/Untersuchungen/OPB/OPB-kurz.html>
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). (2017d). Offenporiger Beton für den Einsatz im Straßenbau – Erprobung verschiedener Einbautechnologien. duraBASt. Zugriff am 19.02.2018. Verfügbar unter [http://www.durabast.de/durabast/DE/Publikationen/Infoblaetter/OPB.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.durabast.de/durabast/DE/Publikationen/Infoblaetter/OPB.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.). (2007). Einfluss der Wärmeabstrahlung, -leitfähigkeit und -kapazität von Mineralstoffen auf die Energiebilanz von Fahrbahnbefestigungen (1. Aufl.).
- CHANDRAPPA, A. K. & BILIGIRI, K. P. (2016). Comprehensive investigation of permeability characteristics of pervious concrete. A hydrodynamic approach. Construction and Building Materials, 123.
- CHEN, Y., WANG, K., WANG, X. & ZHOU, W. (2013). Strength, fracture and fatigue of pervious concrete. Construction and Building Materials, 42.
- CICKOVIC, M. (2018). Zerstörungsfreie Prüfung des Schichtverbundes mittels Falling Weight Deflectometer (FWD) (Kirsch Baum, Hrsg.) (02.2018). : Straße und Autobahn.
- EHRlich, N. & WIELAND, M. (2014). Offenporige Betone im Straßenbau - neue Entwicklungen. Forschungskolloquium „Betonstraßenbau“ - Dresden 11./12.12.2014. Zugriff am 14.02.2018. Verfügbar unter <https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/isb/strabau/ressourcen/dateien/alt/news/Forschungskolloquium/Teil3-Vortrag6.pdf?lang=en>

- EHRLINGER, S. (HeidelbergCement, Hrsg.). (2016). Kaum zu hören. Weniger Dezibel für den Verkehrswegebau. 4. Zugriff am 14.02.2018. Verfügbar unter [http://context.heidelbergcement.de/ausgabe\\_04\\_16/kaum-zu-hoeren.html](http://context.heidelbergcement.de/ausgabe_04_16/kaum-zu-hoeren.html)
- (THIS-Tiefbau, Hochbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Hrsg.). (2018). Ein Ansatz – viele Lösungen. Offenporige Betone im Verkehrswegebau, Fachmagazin. Zugriff am 19.03.2018. Verfügbar unter [http://www.this-magazin.de/artikel/tis\\_Ein\\_Ansatz\\_viele\\_Loesungen\\_3083855.html](http://www.this-magazin.de/artikel/tis_Ein_Ansatz_viele_Loesungen_3083855.html)
- FELSCH, K., BÖHME, K. & SCHWENNINGER, D. (2002). Lärmindernde Straßenbeläge - Dränbeton am Hockenheimring. Straße + Autobahn, 9, S. 515-520.
- Freistaat Bayern Autobahndirektion Südbayern Dienststelle München (Hrsg.). (2017). A 9 Nürnberg - München. Ausbau der Parkplätze Echinger Gfild und Brunngras.
- Freistaat Bayern Autobahndirektion Südbayern Dienststelle München. (2018, 01. Mai). A 9 Nürnberg - München Ausbau der Parkplätze Echinger Gfild und Brunngras. Regelquerschnitt B-B PWC-Anlage Brunngras.
- FREUDENSTEIN, S., Witt, M. & Eger, M. (2016). Ingenieurtechnische Dokumentation der Versuchsstrecke mit offenporigem Beton auf der PWC - Anlage Silberbach Nord an der BAB A 6, Richtungsfahrbahn Heilbronn, bei Ansbach (Nicht veröffentlicht, Hrsg.): TU München, Forschungsbericht Nr. 3573.
- BAWMerkblatt (2012). Frostprüfung von Beton (MFB).
- GEBHARDT, C. (2014). Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik (2., überarb. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Carl Hanser Verlag. Verfügbar unter <http://www.hanser-elibrary.com/action/show-Book?doi=10.3139/9783446439566>
- HABAU Hoch- und Tiefbau GmbH (Hrsg.). (2018, 06. Februar). PWC-Anlage Echinger Gfild und Brunngras. A9 Nürnberg - München, Ausbau der Parkplätze Echinger Gfild und Brunngras.
- HEBAU GmbH (Hrsg.). Waschbetonpapier. Der Klassiker für Betonwerkstein mit gewaschener Oberfläche. Zugriff am 21.02.2018. Verfügbar unter [http://www.hebau.de/PDF/DE/Flyer/Flyer\\_Waschbetonpapier\\_de\\_web.pdf?m=1458218059](http://www.hebau.de/PDF/DE/Flyer/Flyer_Waschbetonpapier_de_web.pdf?m=1458218059)
- HEBAU GmbH (Hrsg.). (2015). HEBAU WB-Papier. RSE-Papier 01 SE-Papier.
- HeidelbergCement AG (Hrsg.). (2017). Betontechnische Daten.
- HOFMEISTER (Güte Gemeinschaft Verkehrsflächen aus Beton, Hrsg.). (2017). Forschungsprojekt Offenporiger Beton. Weiterbildungsveranstaltung 2017 der Gütegemeinschaft Verkehrsflächen aus Beton e.V. Zugriff am 15.02.2018. Verfügbar unter [https://www.guetegemeinschaft-beton.de/fileadmin/guetegemeinschaft-beton-de/media/Redaktion/PDF-Dateien/10-HOFMEISTER\\_OPB.pdf](https://www.guetegemeinschaft-beton.de/fileadmin/guetegemeinschaft-beton-de/media/Redaktion/PDF-Dateien/10-HOFMEISTER_OPB.pdf)
- HUANG, B., WU, H., SHU, X. & BURDETTE, E. G. (2010). Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete. Construction and Building Materials, 24 (5).
- InformationsZentrum Beton GmbH (Hrsg.). (2013). Dränbeton-Referenzstrecke realisiert. Bau einer Versuchsstrecke in Mainz-Amöneburg. Zugriff am 15.02.2018. Verfügbar unter <https://www.beton.org/aktuell/news/details/draenbeton-referenzstrecke-realisiert-1/>
- JOSEPH VÖGELE AG (Hrsg.) Vögele Einbaufibel [Themenheft].
- JOSEPH VÖGELE AG (Hrsg.). (2008). Vögele Einbaufibel.
- KEVERN, J. T., SCHAEFER, V. R., WANG, K., SULEIMAN, M. T. & DEAN, S. W. (2008). Pervious Concrete Mixture Proportions for Improved Freeze-Thaw Durability. Journal of ASTM International, 5 (2), 101320.
- KIA, A., WONG, H. S. & CHEESEMAN, C. R. (2018). Defining clogging potenzial for permeable concrete. Journal of environmental management, 220.
- M VaB Teil 1 (2013). Kreisverkehr, Busverkehrsflächen und Rastanlagen.

- LANGER, M. (2018). duraBAST, OPB.
- LARRARD, F. D. (1999). Concrete mixture proportioning. A scientific approach (Modern concrete technology). London: E & FN Spon.
- LMU, Fakultät für Physik, Meteorologie (Hrsg.). (2018). Klimawerte Garching neuer Turm. Zugriff am 07.03.2019. Verfügbar unter <https://www.meteo.physik.uni-muenchen.de/DokuWiki/doku.php?id=wetter:garching:neu:klimagarching>
- M dBT (2013). Merkblatt für Dränbetontragschichten.
- M VV (2013). Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen.
- (2019, Februar). Messverfahren - Reifen-Fahrbahngeräusch. Forschungskolloquium Betonstraßenbau, Stuttgart.
- MÜLLER BBM (Hrsg.). Reifen-/Fahrbahngeräusch - Entstehungsmechanismen. Zugriff am 03.05.2018. Verfügbar unter [https://www.google.de/search?q=m%C3%BCller+bbm+reifen+fahrbahnger%C3%A4usch&rlz=1C1GGRV\\_enDE763DE763&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKE-wjtqaLCnenaAhWNzaQKHdDND7wQ\\_AUICigB&biw=1527&bih=835#imgcr=Tp2vTakc50auiM](https://www.google.de/search?q=m%C3%BCller+bbm+reifen+fahrbahnger%C3%A4usch&rlz=1C1GGRV_enDE763DE763&source=Inms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKE-wjtqaLCnenaAhWNzaQKHdDND7wQ_AUICigB&biw=1527&bih=835#imgcr=Tp2vTakc50auiM)
- DIN EN 13036-3:2002 (2002). Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen - Prüfverfahren - Teil 3: Messung der horizontalen Entwässerung von Deckschichten.
- Planunterlagen Brunngas und Echingen Gfild. (2017). Ausschnitt (HABAU Hoch- und Tiefbau GmbH, Hrsg.).
- DIN CEN/TS 12390-9 (2017). Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung.
- DIN EN, 12350-4:2009-08. Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß.
- RDO Asphalt, 2009 (2009). Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht, 2009.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- RDO Beton 09 (2009). Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen. Köln: FGSV.
- RStO 01 (2001). Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Köln: FGSV.
- RIFFEL, S. (2012). Leise - sicher - umweltfreundlich. Offenporiger Beton für Straßen und Schienen von heute und morgen. Straßen- und Tiefbau, 66 (12), 14-19. Zugriff am 09.02.2018. Verfügbar unter [file:///C:/Users/ga72hem/Downloads/sut\\_fb\\_RIFFEL%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/ga72hem/Downloads/sut_fb_RIFFEL%20(3).pdf)
- Road News JOSEPH VÖGELE AG (Hrsg.). (2004). Die Straße, die den Lärm schluckt. Dränbeton-Teststrecke in Düren. 01. Zugriff am 14.02.2018. Verfügbar unter [http://www.roadnews.info/DE\\_rn01\\_artikel02.pdf](http://www.roadnews.info/DE_rn01_artikel02.pdf)
- SCHAEFER, V. R., KEVERN, J. T., IZEVBEKHAI, B., WANG, K., CUTLER, H. E. & WIEGAND, P. Construction and Performance of Pervious Concrete Overlay at Minnesota Road Research Project (Transportation Research Record 2164, Hrsg.).
- SCHMERBECK, R. (19.01.2018). Bauablauf zur Herstellung der Raumfuge zw. OPB und Schlitzrinne (E-Mail).
- SIEBEL, E. & EICKSCHEN, E. (1995). Lärmarme Betonfahrbahndecken - ein europäisches Forschungsprojekt.: Straße + Autobahn 11/95.
- GT/B 50082-2009 (2009). Standard for Test Methods of Long-Term Performance and Durability of Ordinary Concrete, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of China.
- TL Beton-StB 07 (2007). Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton. Köln: FGSV-Verl.
- VDI (Hrsg.). (2013). VDI-Wärmeatlas: Springer Verlag.
- VOGEL, P. (2018, Juni). New Developments for Technical and Economic Optimization of Porous Concrete. Dyckerhoff GmbH, Wiesbaden/Germany 13th International Symposium on Concrete Roads, 19-22 June 2018, Berlin, Berlin.

- WACKER Chemie AG (Hrsg.). (2013). Neue Polymere für wasserdurchlässige Betonfahrbahnen: Das Projekt Bebenroth-Tunnel. Zugriff am 14.02.2018. Verfügbar unter <http://docplayer.org/51455230-Neue-polymere-fuer-wasserdurchlaessige-betonfahrbahnen-das-projekt-bebenroth-tunnel.html>
- (2018). Wetterstation Freising (LfL). Verfügbar unter <http://www.am.rlp.de/Internet/AM/Notes-BAM.nsf/bamweb/89952241408487f9c12573920045299b?OpenDocument&TableRow=3.3>
- WIELAND, M. & BECKER, C. (2018). Offenporiger Beton für den Einsatz im Straßenbau. Vortrag Weiterbildungsveranstaltung bei der Gütegemeinschaft Verkehrsflächen aus Beton e. V. BAST.
- WIRTGEN GROUP (Hrsg.). (2018). Parts and More Compact Bohle. Zugriff am 27.02.2019. Verfügbar unter <file:///C:/Users/ga72hem/Downloads/wg-brochure-pam-compact-screed-1218-v1-de.pdf>
- WU, H., ZHUO, L., BEIBEI, S., JIAN, Y., LIU, Z., SUN, B. et al. (2016). Experimental investigation on freeze–thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC).
- ZEITLER, S. (2018). Untersuchung zum Rissverhalten einer offenporigen Oberbetonschicht. Entwurf, Master Thesis m 153. : Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Technische Universität München.
- ZHONG, R. & WILLE, K. (2016). Compression response of normal and high strength pervious concrete. *Construction and Building Materials* (109:177-187).
- ZHONG, R. & WILLE, K. (2018). Influence of matrix and pore system characteristics on the durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 162.
- Bild 3: Horneffekt beim Rollgeräusch (WIELAND & BECKER, 2018)
- Bild 4: Aufbau der zweilagigen Betondecke (FELSCH et al., 2002)
- Bild 5: Betonzusammensetzung (FELSCH et al., 2002)
- Bild 6: Verdichtungsbohle (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004)
- Bild 7: Kehrbürste zur Haftbrückenapplikation (in Anlehnung an Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004)
- Bild 8: Betonzusammensetzung OPB (SCHAEFER et al.)
- Bild 9: Einbau des OPB (HOFMEISTER, 2017)
- Bild 10: Hohlraumverteilung, CT Untersuchung (EHRlich & WIELAND, 2014)
- Bild 11: Einbau OPB (InformationsZentrum Beton GmbH, 2013)
- Bild 12: Übersicht der Versuchsstrecke (Autobahndirektion Nordbayern, 2016)
- Bild 13: Mobile Mischanlage zur Herstellung des OPB
- Bild 14: Manuelle Aufbringung der Haftbrücke vor Einbau des OPB
- Bild 15: Einbau des OPB mit HV-Bohle
- Bild 16: Partielle Bearbeitung der Oberfläche, Silberbach
- Bild 17: Abdeckung des OPB mit Vlies
- Bild 18: Schlitzrinne mit Perforation
- Bild 19: Lage der Längsfugen im Querschnitt
- Bild 20: Links: Längsriss, Rechts: Querriss
- Bild 21: Fertiger beim Einbau des OPB auf der duraBAST (Bundesanstalt für Straßenwesen, 2017c)
- Bild 22: Fertiggestellter OPB auf der duraBAST (LANGER, 2018)
- Bild 23: Verdichtungsmaß der Referenzmischungen bei 10 °C, 20 °C und 30 °C bis 90 min nach Wasserzugabe
- Bild 24: Verdichtungsmaß der Referenzmischungen mit  $\pm 5 \text{ l/m}^3$  bis 90 Minuten nach Wasserzugabe

## Bilder

- Bild 1: Abgrenzung Dränbeton und Offenporiger Beton
- Bild 2: Entstehungsmechanismen Reifen-Fahrbahngeräusch (Müller BBM)

- Bild 25: Referenzprobe mit Sicht auf Bodenplatte (frontal)
- Bild 26: Verdichtungsmaß der Mischungen L1-L3 bis 90 Minuten nach Wasserzugabe
- Bild 27: Verdichtungsmaß der Mischungen S1-S5 bis 90 Minuten nach Wasserzugabe
- Bild 28: Verdichtungsmaß der Mischungen KSM1-KSM3 bis 90 Minuten nach Wasserzugabe
- Bild 29: Vergleich Hohlraumgehalt und Spaltzugfestigkeiten nach 7 und 28 Tagen
- Bild 30: Abwitterung in Anlehnung an den CDF-Versuch des KSM1
- Bild 31: Verdichtungsmaß der Mischung KSM1 mit  $\pm 5 \text{ l/m}^3$  bis 90 Minuten nach Wasserzugabe
- Bild 32: Verdichtungsmaß der Mischung KSM1 bei  $10^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$  und der Referenztemperatur von  $20^\circ\text{C}$  bis 90 Minuten nach Wasserzugabe
- Bild 33: Vergleich Hohlraumgehalt und 7d Spaltzugfestigkeit mit und ohne Dispersionsmittel
- Bild 34: KSM1 Probekörper nach dem Auswaschen nach 24 h (links) und 120 h (rechts)
- Bild 35: Einstellung Tamperhub (in Anlehnung an JOSEPH VÖGELE AG, 2008)
- Bild 36: Lage der Versuchsstrecke (roter Kreis) (Bayerische Vermessungsverwaltung 2018, 2018)
- Bild 37: PWC-Anlage Brunngras, OPB Weiß/schwarz schraffiert (Freistaat Bayern Autobahndirektion Südbayern Dienststelle München, 2017)
- Bild 38: Anker- und Dübellage
- Bild 39: Fugenausbildung im Unterbeton
- Bild 40: Hochverdichtungsbohle mit Tamper (HOFMEISTER, 2017)
- Bild 41: Kornausbrüche im Übergangsbereich, OPB - Lkw Stellfläche (Beton), PWC-Anlage Silberbach
- Bild 42: Bauablauf zur Herstellung der Raumfuge OPB-Schlitzrinne (R. SCHMERBECK)
- Bild 43: Übergang Asphalt – OPB, Silberbach
- Bild 44: Lage der Leerrohre (links), Aufbau der Temperaturmessstellen (rechts)
- Bild 45: Positionierung der Messstelle 1 im OPB-Fahstreifen (Stationierung 0+036)
- Bild 46: Positionierung der Referenzmessstelle im OPB-Fahstreifen (Stationierung 0+036)
- Bild 47: Positionierung der Messstelle 2 im OPB-Fahstreifen (Stationierung 0+088)
- Bild 48: Lage der Temperatursensoren an den Messstellen der Versuchsstrecke
- Bild 49: Lage der Temperatursensoren an der Messstelle im Schwerlastparkstreifen
- Bild 50: Schlitzrinne mit Perforationen
- Bild 51: Einbau des Unterbetons mit Gleitschalungsfertiger
- Bild 52: Dübellage im Unterbeton
- Bild 53: Ankerlage im Unterbeton
- Bild 54: Ausführung des Kerbschnitts vor der Aufweitung
- Bild 55: Reinigungsfahrzeug zur Oberflächenreinigung des UB
- Bild 56: Kugelstrahlreinigung der UB Oberfläche
- Bild 57: Handschleifgerät für die Randbereiche
- Bild 58: Messaufbau mit Leerrohr vor der Herstellung des UB
- Bild 59: Messtechnik vor Überbauung mit UB
- Bild 60: Freigelegtes Leerrohr
- Bild 61: Messtechnik im OPB
- Bild 62: Überbauung mit OPB
- Bild 63: Temperaturwerte Probefeldeinbau und Haupteinbau (in Anlehnung an Wetterstation Freising (LFL), 2018)
- Bild 64: Schematischer Ablauf des OPB Einbaus
- Bild 65: Mischwerk Heidelberger Beton
- Bild 66: Fahrweg Mischwerk - Versuchsstrecke (Bayern Atlas, 2018)

- Bild 67: Aufbringung der Haftbrücke
- Bild 68: Nacharbeiten der Fahrspuren
- Bild 69: Straßenfertiger OPB Einbau (1)
- Bild 70: Straßenfertiger OPB Einbau (2)
- Bild 71: Modifiziertes Seitenblech mit Kunststoffschiene
- Bild 72: Abtastung auf der Schlitzrinne
- Bild 73: Abtasten auf dem Untergrund
- Bild 74: Anfahrt mit Kanthölzern
- Bild 75: Bohlensegment
- Bild 76: Straßenfertiger mit angebauten Bohlensegmenten
- Bild 77: OPB nach Transport in Fahrmischer
- Bild 78: Oberfläche zu Beginn des Probefeldes
- Bild 79: Variation der Vibration beim Probefeldeinbau
- Bild 80: Einstellung Tamperhub (in Anlehnung an WIRTGEN GROUP, 2018)
- Bild 81: Oberfläche des OPB beim Probefeldeinbau
- Bild 82: Rückbau des Probefeldes
- Bild 83: Antransport des OPB
- Bild 84: Auflegen Vlies und Waschbetonpapier
- Bild 85: Entfernen des Waschbetonpapiers
- Bild 86: Auswaschen des oberflächlichen Zementleims
- Bild 87: Oberfläche nach dem Auswaschen
- Bild 88: Anschlussbereich zur Lkw-Stellfläche
- Bild 89: Anschlussbereich zur Schlitzrinne
- Bild 90: Übergangsbereich zum Asphalt, geschnitten
- Bild 91: Verdichtungsmaß während der Herstellung des Testfelds
- Bild 92: Rohdichte (links oben), Druckfestigkeit (rechts oben), Spaltzugfestigkeit (links unten) und Hohlraumgehalt, bestimmt an Frischbetonproben (rechts unten) der Hauptfeld Überwachung
- Bild 93: Zeitlicher Verlauf der Betonlieferungen
- Bild 94: Ursachen für den Ausfall der Dispersionspumpe, in den Gebinden gebildete Haut (links) und der aus dem Ansaugschlauch entfernte Pfropfen (rechts)
- Bild 95: Verdichtungsmaß und Frischbetontemperatur während des Hauptfelds
- Bild 96: In absteigender Reihenfolge Rohdichte, Druckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit und Hohlraumgehalt, bestimmt an Festbetonproben der Hauptfeld Überwachung
- Bild 97: Biegezugfestigkeit (links) und Haftzugfestigkeit (rechts) der Hauptfeld Überwachung
- Bild 98: Ergebnisse der Frostprüfungen, im Werk hergestellte Probekörper
- Bild 99: Ergebnis der Frostprüfung der aus der Strecke entnommenen Bohrkern (links) mit einem beispielhaften VersagensBild der Probe M12 (rechts)
- Bild 100: Temperaturverlauf nach Einbau OPB, ausgewählte Messkanäle, Messstelle
- Bild 101: Temperaturprofil der Betondecke, Messstelle 1
- Bild 102: Messbolzen im OPB
- Bild 103: Setzdehnungsmessgerät mit Kalibrierstab
- Bild 104: Draufsicht Anordnung der Messstellen
- Bild 105: Temperaturverlauf; Einbau OPB (06.06.18) – Nullmessung (18.10.18); ab 14:00 Uhr
- Bild 106: Probekörper zur Bestimmung der Temperaturdehnzahl
- Bild 107: Berechnete Temperaturdehnzahlen
- Bild 108: Draufsicht, visuelle Rissaufnahme im OPB
- Bild 109: Verwendete Geometrie in ANSYS Workbench
- Bild 110: Ausschnitt Vernetzung, Draufsicht
- Bild 111: Lagerbedingungen der Versuchsstrecke im Längsschnitt
- Bild 112: Lagerbedingungen der Versuchsstrecke im Querschnitt
- Bild 113: Anordnung der Lastfläche, rot markiert

- Bild 114: Biegezugspannungen in Längsrichtung, Last 75 kN, Plattenmitte
- Bild 115: Ausgabe Biegezugspannungen entlang eines Pfades, Plattenmitte
- Bild 116: Darstellung der Biegezugspannung, Last Plattenmitte über den Querschnitt
- Bild 117: Verkürztes Modell zur Kalibrierung des E-Moduls
- Bild 118: Temperaturverlauf über den Querschnitt zum Zeitpunkt der 1. Messung Uhrzeit 11:30 Uhr
- Bild 119: Ausschnitt Spannungsverlauf in x-Richtung bei Temperaturbelastung im ungerissenen OPB
- Bild 120: Ausschnitt Verformung von zwei OPB-Abschnitten im Rissbereich mit UB-Platten (überhöhte Darstellung)
- Bild 121: Schematische Darstellung des Rissabstands
- Bild 122: Rissweiten im OPB in Abhängigkeit der Rissabstände und der Temperaturdehnzahl des UB
- Bild 123: Anordnung der Lastfläche am Plattenrand
- Bild 124: Darstellung der Rissweiten Verkehrslast und Temperaturbelastung
- Bild 125: Biegezugspannungen an der Fuge in Querrichtung
- Bild 126: Skizze eines Messaufbaus zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach dem „falling head“ Prinzip (in Anlehnung an CHANDRAPPA & BILIGIRI, 2016)
- Bild 127: Impedanzrohr zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades (Anlehnung an DIN EN ISO 10534 2:2001-10)
- Bild 128: Aufbau eines Ausflussmessers nach Moore (in Anlehnung an DIN EN 13036-3:2002)
- Bild 129: Schemazeichnung eines angepassten Prüfaufbaus des Durchflussmessers nach Moore
- Bild 130: Messfahrzeug MEFA (BAST)
- Bild 131: Aufbau des CPX-Messanhängers (in Anlehnung an Müller BBM, 2019)
- Bild 132: Belastungsfahrzeug mit Benkelman-Balken
- Bild 133: Standard-Benkelman-Balken (Skizze), (in Anlehnung an(FGSV, 2013; FGSV, 2014 AP Trag Teil B 1)
- Bild 134: Prinzip des FWD (in Anlehnung an FGSV, 2013)
- Bild 135: Randbereich mit PCC-Mörtel
- Bild 136: Randbereich zum Asphalt
- Bild 137: OPB PWC-Anlage Brunngras, nach 10 Monaten Liegezeit

## Tabellen

- Tab. 1: Betonrezeptur des OPB, Mainz-Amöneburg (VOGEL, 2018)
- Tab. 2: Betonrezeptur OPB (HOFMEISTER, 2017)
- Tab. 3: Referenzrezeptur
- Tab. 4: Mischregime
- Tab. 5: Rezeptur mit reduziertem Leimgehalt (L)
- Tab. 6: Hohlraumgehalt der Mischungen L1-L3
- Tab. 7: Rezepturen mit zusätzlichem Silicastaub (S)
- Tab. 8: Hohlraumgehalt der Mischungen S1-S5
- Tab. 9: Rezepturen mit zusätzlichem KSM
- Tab. 10: Hohlraumgehalt der Mischungen KSM1-KSM3
- Tab. 11: Laborrezeptur für die PWC-Anlage Brunngras
- Tab. 12: Straßenaufbau Versuchsstrecke (Freistaat Bayern Autobahndirektion Südbayern Dienststelle München, 2018)
- Tab. 13: OPB Rezeptur PWC-Anlage Brunngras
- Tab. 14: Ergebnisse der Plattendruckversuche (B+P Baustoffprüfung, 2018)
- Tab. 15: Bohleneinstellungen beim Probe-feldeinbau
- Tab. 16: Bohleneinstellungen beim Haupteinbau

- Tab. 17: Klimawerte im Zeitraum der Nachbehandlung (LMU, Fakultät für Physik, Meteorologie, 2018)
- Tab. 18: Versuchsprogramm der Materialüberwachung
- Tab. 19: Rezepturanpassungen beim Probefeld
- Tab. 20: Rezepturanpassung beim Haupteinbau
- Tab. 21: Änderung der Rissweite in Abhängigkeit der Temperaturänderung an der Oberfläche
- Tab. 22: Zuordnung Elastizitätsmodul - Temperatur für den Asphalt (Tragschicht) nach KIEHNE ( (RDO Asphalt, 2009)
- Tab. 23: Übersicht verwendete Materialparameter OPB
- Tab. 24: Ergebnisse der Längenänderung der Messbolzen in Abhängigkeit der Temperatur
- Tab. 25: Materialwerte für die Berechnung mit BISAR
- Tab. 26: Werte für die Berechnung der Längenänderung
- Tab. 27: Kombinationen der Rissabstände im OPB

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2021

### S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach

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

### S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse

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

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

Koukoulidou, Birle, Cudmani

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

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

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

### S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze Klein, Gehlen, Kränkel

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

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

Mielich

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

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

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

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

Büchler, Wüstuba

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

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

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

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

### S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

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

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

Schipek, Steffen

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

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

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

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

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

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Geh-

len, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter

<https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

Rigo, Unterderweide

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

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

Kathmann, Schroeder

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

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

Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes

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

### S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß,

Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann

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

### S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller

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

### S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz

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

### S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Demon, Reiche, Haas, Schmidt

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

### S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder,

Riwe

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

### S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauphase

Gehrke, Stephan, Weigel

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

### S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Radenberg, Holzwarth

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

### S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

Radenberg, Twer, Louis, Buscham

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

## 2022

### S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tielmann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

### S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

### S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

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

### S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

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

### S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

### S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

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

### S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

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

### S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

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

### S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

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

### S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkuhl, Pfeifer € 14,50

## 2023

### S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

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

### S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen

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

### S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalteinlagen

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

### S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen

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

### S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärm- armer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton

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

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

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

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

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