

# **Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 126**

**bast**

# **Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke**

von

Stephan Freudenstein  
Benjamin Neudert

TU München  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
Lehrstuhl und Prüfamnt für Verkehrswegebau

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 126**

**bast**

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

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

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

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

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

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

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 08.0207/2010/KGB:**  
Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

### Fachbetreuung

Wolfgang Roßbach

### Herausgeber

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

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-407-4

Bergisch Gladbach, September 2018

## Kurzfassung – Abstract

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

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein bereits unter Laborbedingungen bewährtes Baustoffgemisch 0/32 mm – bestehend aus gebrochenen und ungebrochenen Gesteinskörnungen – für die Herstellung einer modifizierten Kiestragschicht unter einem Betonfahrbahndeckensystem einer realen Versuchsstrecke verwendet. Die messtechnische Begleitung dieses Versuchsstreckenbaus an einer Fahrgasse der Tank- und Rastanlage Köschinger Forst (BAB 9) im Sommer/Herbst 2012 umfasste unter anderem umfangreiche Tragfähigkeitsmessungen auf den einzelnen ungebundenen Schichten des Oberbaus. Die 30 cm dicke modifizierte Kiestragschicht wurde mit einer 27 cm dicken unbewehrten Betonfahrbahndecke in Plattenbauweise überbaut. Die Tragfähigkeitsmessungen auf der modifizierten Kiestragschicht wurden unmittelbar nach dem Einbau und nach 16 Tagen unter freier Witterung und Baustellenverkehr durchgeführt. Bei allen Messungen wurden die Vorgaben der ZTV SoB-StB –  $E_{v2} \geq 150 \text{ MPa}$  – erfüllt. Eine Fuge der Fahrgasse wurde unverdübelt und ohne Fugenmasse ausgeführt, um durch die erhöhten Relativbewegungen der Plattenränder und den gleichzeitigen hohen Wassereintrag eine Erosion der Tragschicht im Fugenbereich zu induzieren.

Im Mai 2015 erfolgten – nach 32-monatiger Liegedauer – die Wiederholungsmessungen. Die Überrollungen der unverdübelten Querscheinfuge konnten zum damaligen Zeitpunkt grob mit 350.000 Fahrzeugen (ca. 1 Mio. äquivalente 10t-Achsen) abgeschätzt werden. Für die Wiederholungsmessungen wurden zwei Einzelfahrbahnplatten der Lkw-Fahrgasse abgehoben. Es konnten hierbei keine wesentlichen Veränderungen der für eine KTSuB relevanten Performanceparameter festgestellt werden.

Die in den ZTV SoB-StB und den RStO geforderten Mindestwerte der Tragfähigkeit – statischer Verformungsmodul und Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  – konnten an allen untersuchten Prüfpunkten eingehalten werden. Des Weiteren konnten die Bedenken hinsichtlich der Erosions- und Umlagerungsbeständigkeit im Fugenbereich beim vorliegenden – relativ langsam fahrenden Schwerlastverkehr – relativiert werden.

### Construction and measurements on a test track with optimized gravel base layer under the concrete pavement

As part of the research project an already under laboratory conditions proven construction material mix 0/32 mm – consisting of round and crushed aggregates – was used for the production of a modified gravel base under a concrete pavement system of a test track in operation. The monitoring of this roadway construction (driving lane of the motorway service area “Köschinger Forst”) in the summer/fall of 2012 included among other things comprehensive load capacity measurements on each unbound layers of the track superstructure. The 30 cm thick gravel base layer was covered with a 27 cm thick jointed plain concrete pavement (concrete slabs with joints and dowels). The load capacity measurements on the modified gravel base layer were carried out immediately after construction and after 16 days under free weathering and site traffic. For all measurements the requirements (ZTV SoB-StB,  $E_{v2} \geq 150 \text{ MPa}$ ) have been met. One singular joint of the concrete pavement system was carried out without dowels and joint sealing in order to induce increased relative movements of the slab edges and the simultaneous high water entry erosion of the gravel based layer.

In May 2015 repeated measurements – after 32 month in operation – took place. The traffic load of the joint without dowels and sealing could be estimated with roughly 350,000 vehicles (about 1 million equivalent 10t-axles). For the repeated measurements two concrete slabs of the roadway construction were ripped off. No significant changes to the modified gravel base layer performance parameters could be detected. The requirements of the ZTV SoB-StB and RStO were complied.

Furthermore, concerns about the erosion and the rearrangement resistance of the modified gravel base layer in the joint area of the concrete pavement could be put into perspective, in consideration of a relatively slow-moving heavy traffic.

## Summary

### Construction and measurements on a test track with optimized gravel base layer under the concrete pavement

## 1 Research occasion and purpose

Exclusively graded building material mixtures containing predominantly crushed aggregates – “gravel base layers” – according to ZTV SoB-StB or TL SoB-StB are used as a base of concrete pavement systems higher resistance classes by the basis of standardized concrete construction of RStO for construction of base layers without binder (ToB). Graded material mixtures of uncrushed aggregate “gravel base layers” are only standardized for asphalt and paving construction methods in terms of use as base layers without binder.

The aim of the research is to change gravel base layers according to ZTV SoB-StB or TL SoB-STB for use as base layers without binder under concrete pavements for higher load classes by substituting partial size fraction by crushed aggregates so that

an approximate equivalence to gravel layers can be reached considering stability, water permeability and rearrangement and erosion resistance. By using uncrushed aggregates regional rock deposits can be considered in the production of base layers without binder under concrete pavements.

From previous research projects – under laboratory conditions – modified construction material mix will now be enhanced for use in a real test track. For this purpose, the construction of a test track is monitored by measurements.

## 2 Conceptual design of a test track

Based on the results of previous research and the knowledge of preliminary tests in gravel plants, the following grading curve for producing a modified construction material mixture KTSuB 0/32 mm was developed (Figure 1).

As a test track, a 143 m long by 6.5 m wide lane of the motorway service area Kösching Forest West at Ingolstadt on the highway A9 Berlin-Munich, driving direction to Munich, with about 120 truck parking area, was selected. Due to the structural design of the motorway service area, as well as traffic law

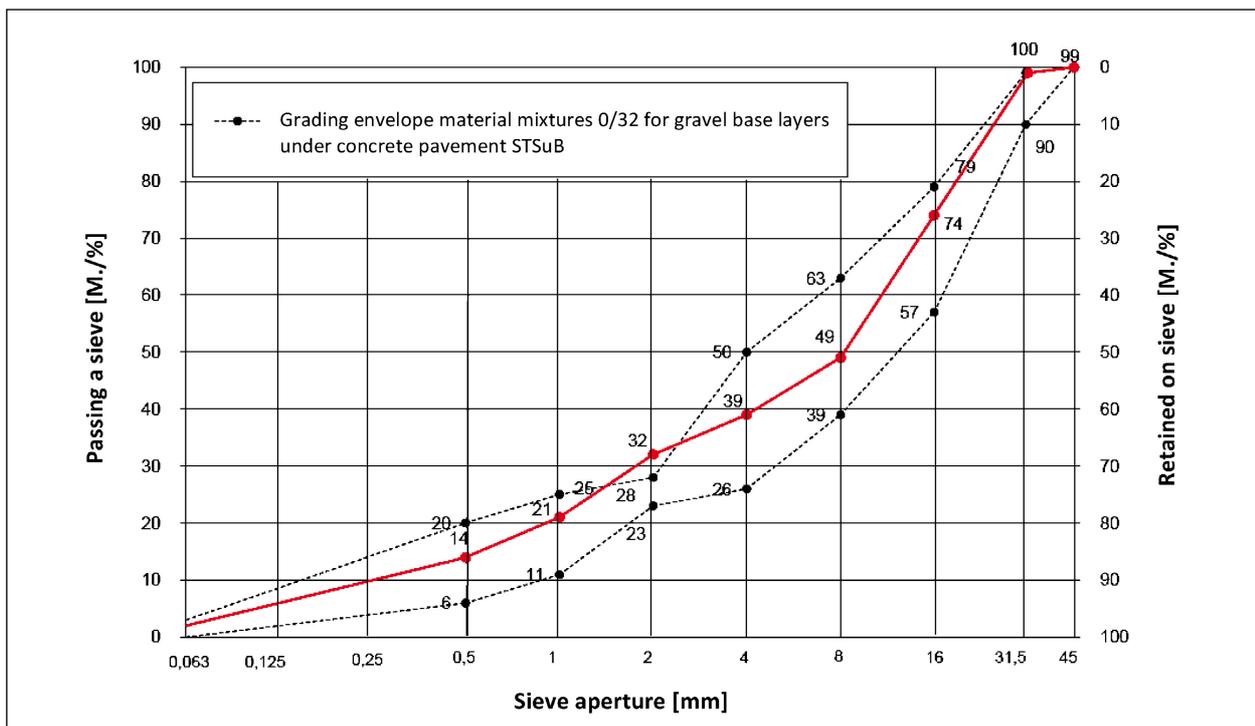


Fig. 1: Gradation curve of the modified material mixture 0/32 (red) and grading envelope material mixtures 0/32 for gravel base layers under concrete pavement according to TL SoB-StB

limits the accessibility of the set up area is only possible over the test track. The average daily traffic volume (DTV<sup>(SV)</sup>) may be roughly estimated at about 450 veh./24h. An exact determination of traffic volume did not take place. A 27 cm thick plain concrete pavement on a 30 cm thick modified gravel base layer KTSuB was accomplished in autumn 2012. Below the modified gravel base layer, a 18 cm thick layer of subbase of crushed Jurassic lime was additionally arranged.

### 3 Documentation of the test track construction

Before the actual integration of the modified construction material mix 0/32 mm, the capacities of the underlying unbound test layers – planum and subbase – were determined by static plate load tests in accordance with DIN 18134 and dynamic plate load tests with a medium/heavy drop weight device ( $m = 15 \text{ kg}$ ) in a predefined test grid. On the surface of the modified gravel base layer the static and dynamic moduli of deformation were conducted in the same test grid one day after construction and after about two weeks under free weather conditions and construction traffic.

Notwithstanding the provisions of the ZTV-StB SoB the installation of the modified material mixture was performed with a grader (Langmahdverfahren). Due to the high uncompacted bulk density of the material it was possible already to drive along the grader built and still uncompacted base layer by articulated truck without any problems. A plate compactor (Unimog) achieved optimum compaction of the modified gravel layer with uniform water addition – even after near-surface drying. The requirements of ZTV-StB SoB –  $E_{v2} \geq 150 \text{ MPa}$  on the surface of KTSuB – could be consistently observed.

The modified gravel base layer was suspended, after paving and compaction, for 16 days in different weather conditions. In addition, the installation of the concrete pavement for the adjacent truck set/up areas took place at this time. The surface of the modified gravel base layer was exposed to high construction traffic at this time. Figures 2 and 3 show the surfaces of the modified gravel base layer after installation and after 16 days under different weather conditions and stresses caused by construction traffic.



Fig. 2: Surface of the modified gravel base layer immediately after installation

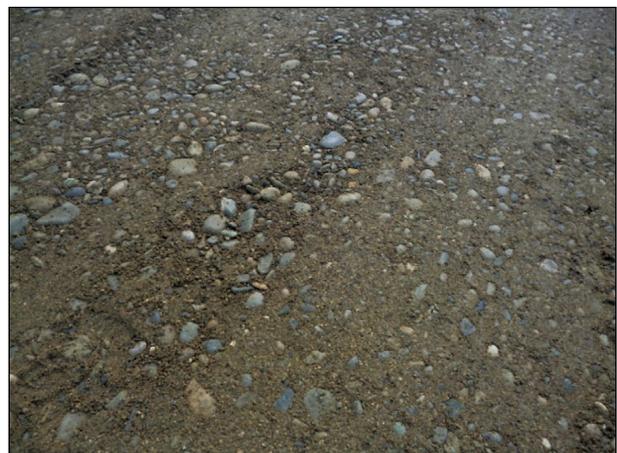


Fig. 3: Surface of the modified gravel base layer after 16 days und different weather conditions and construction traffic

The laid material mixture was exposed to rainfall and intense solar radiation. In superposition with the high stresses reasoned by the construction traffic two states arise (dry or wet surface- near area), which can be proved to be unfavorable for the unprotected ToB. After all these different load conditions no deviations from the prescribed flatness and transverse and longitudinal profile of the modified gravel base layer were recorded before the installation of the concrete pavement. Visual a – negligible – particle rearrangement at the surface was detected, which is caused by the eluviation of the fines.

The viability measurements before the concrete pavement installation verify the knowledge from the test rig and large test rig. In sum a consistent sustainability of the modified gravel base layers KTSuB 0/32 mm after different weather conditions and construction traffic can be expected. The observed in situ plastic deflections on the base

surface can – regarding to the requirements for flatness – be neglected and verify the results of the test rig and large test rig.

In the subsequent superstructure with a 27.0 cm thick concrete pavement a transversal dummy joint was specifically designed without dowels and joint sealing in order to induce an increased erosion of base surface due seeping water.

#### 4 Repeat measurement

In May 2015 – after 32 months of service time – the repeat measurements took place. Until the repeat measurement the rollovers of the transversal dummy joints without dowels can estimated with roughly 350,000 vehicles (about 1 million equivalent 10t-axles). Due to the extensiveness of the motorway service area and the location of the test track at the beginning of the set-up areas, the travel speed of heavy trucks can be estimated with approximately 40 to 50 km/h.

For repeat measurements two slabs of the lane were lifted. The transversal dummy joints between the two slabs was made during the construction in autumn 2012 without dowels and joint sealing. The aim was to induce an increased relative motion of the two slab edges and the related increased erosion effect by invaded surface water.

No rearrangement or visible erosion could be detected visually in the exposed joint area (Figure 4). For consistent detection in the joint area 4 trials were removed from the region near the surface and mixed to form a composite sample. Since – due to



Fig. 4: Surface of the modified gravel base layer KTS in the joint area, the points of withdrawal are marked in red

the adherence of aggregates – a correlation for the analyzing of the grading curve from the assembly is only partly possible, samples were taken from the undisturbed field area beneath the slab segments. The laboratory studies confirmed the visual assumptions.

#### 5 Evaluation of research results and next steps

At the modified gravel base layer KTS 0/32 mm below the concrete pavement on the motorway service area Kösching Forest at the BAB A9 could not determined any significant changes to a KTSuB relevant performance parameters, after 32 months of service time of the road surface.

The minimum values of resistance required by the ZTV-StB and the RStO SoB – static deformation modulus and relative value  $E_{V2}/E_{V1}$  – could be accomplished on all investigated checkpoints despite a low load-bearing base. Furthermore, concerns about the erosion and migration resistance in the joint area with a relatively slow-moving heavy traffic could be put into perspective.

Despite persistent precipitation events before the repeating measurement (extension of two single lane slabs) the moisture content of the material mixture could be declared as only slightly moist. It is recommended at first to develop a FGSV-knowledge document in a further step, in which the experience of the dosing, mixing, transportation and installation of the material mixture are defined. Furthermore, it is recommended to investigate a larger and heavier loaded concrete pavement section – with higher road speed of heavy trucks – on a modified gravel base layer to get further experiences.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Forschungsanlass</b> .....	9	<b>6</b>	<b>Wiederholungsmessung</b> .....	31
<b>2</b>	<b>Ziel der Forschungstätigkeiten</b> .....	10	<b>7</b>	<b>Bewertung der Forschungsergebnisse und weiteres Vorgehen</b> .....	34
<b>3</b>	<b>Abgeschlossene Forschungsprojekte</b> .....	10		<b>Literatur</b> .....	35
3.1	Vergleichende Standfestigkeitsuntersuchungen im Prüfstand .....	10		<b>Bilder</b> .....	36
3.2	Vergleichende Untersuchungen im Großprüfstand .....	11		<b>Tabellen</b> .....	37
<b>4</b>	<b>Konzeptionierung einer Versuchsstrecke</b> .....	12			
4.1	1. Technisches Datenblatt .....	12		Die Anlagen sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <a href="http://bast.opus.hbz-nrw.de">http://bast.opus.hbz-nrw.de</a> abrufbar.	
4.2	Dossier-/Misch- und Einbauversuche im Kieswerk (Vorversuche) .....	14			
4.3	Weiterentwicklung des Baustoffgemisches .....	15			
<b>5</b>	<b>Wissenschaftliche Begleitung des Versuchsstreckenbaus</b> .....	17			
5.1	Allgemeines .....	17			
5.2	Ausführungsplanung .....	17			
5.3	Messumfang während der Bauausführung .....	19			
5.4	Einbau und Verdichtung der modifizierten Kiestragschicht .....	20			
5.5	Kiestragschicht unter freier Witterung und Baustellenverkehr .....	21			
5.6	Herstellung der Betonfahrbahndecke .....	23			
5.7	Korrelation zwischen statischem und dynamischen Verformungsmodul .....	23			
5.8	Messungen auf dem Planum und der Frostschuttschicht .....	25			
5.9	Messungen auf der modifizierten Kiestragschicht KTSuB .....	27			



# 1 Forschungsanlass

Bei der Herstellung von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) als Unterlage von Betondeckensystemen höherer Beanspruchungsklassen sind unter Zugrundelegung der standardisierten Betonbauweisen der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen RStO (FGSV 2012a) ausschließlich korngestufte Baustoffgemische aus überwiegend gebrochener Gesteinskörnung (FGSV 2007a, S. 9) – Schottertragschichten – nach den ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) beziehungsweise TL SoB-StB (FGSV 2007b) zu verwenden. Korngestufte Baustoffgemische aus ungebrochener Gesteinskörnung (FGSV 2007a, S. 9) – Kiestragschichten – sind hinsichtlich einer Verwendung als Tragschichten ohne Bindemittel lediglich für Asphalt- und Pflasterbauweisen standardisiert.

Berechtigt begründet wird dieser Sachverhalt durch die im Vergleich zu Schottertragschichten (Bild 1) geringere Standfestigkeit (LEYKAUF, BIRMANN 2004, S. 2) – Tragfähigkeit und Widerstand gegenüber Baustellenverkehr – der originären Kiestragschichten nach den ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) bzw. TL SoB-StB (FGSV 2007b). Insbesondere der reduzierte Verformungswiderstand der eingebauten und verdichteten Kiestragschicht gegenüber Beanspruchungen aus Baustellenverkehr und die dadurch induzierten Unebenheiten der Unterlage beim Beton einbau schließt bis heute eine Verwendung von Kiestragschichten mit ausschließlich gerundeten Körnern unter Betonfahrbahndeckensystemen nahezu aus.

Die eben bezeichnete, verminderte Standfestigkeit von Kiestragschichten gegenüber Schottertragschichten führt bei den standardisierten Asphaltbauweisen (Bild 2) nach Tafel 1 der RStO (FGSV

Schottertragschicht auf Schicht aus frostunempfindlichem Material		Schottertragschicht auf Frostschuttschicht																																																						
3.1	<table border="1"> <tr> <td>Betondecke</td> <td>29</td> <td>28</td> <td>27</td> <td>26</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>Schottertragschicht</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Schicht aus unempfindlichem Material</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td><math>\Sigma</math></td> <td>59</td> <td>58</td> <td>57</td> <td>56</td> <td>54</td> </tr> </table>	Betondecke	29	28	27	26	24	Schottertragschicht	150	150	150	150	150	Schicht aus unempfindlichem Material	45	45	45	45	45	$\Sigma$	59	58	57	56	54	<table border="1"> <tr> <td>Betondecke</td> <td>29</td> <td>28</td> <td>27</td> <td>26</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>Schottertragschicht</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Frostschuttschicht</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>Schicht aus unempfindlichem Material</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td><math>\Sigma</math></td> <td>49</td> <td>48</td> <td>47</td> <td>46</td> <td>44</td> </tr> </table>	Betondecke	29	28	27	26	24	Schottertragschicht	150	150	150	150	150	Frostschuttschicht	120	120	120	120	120	Schicht aus unempfindlichem Material	45	45	45	45	45	$\Sigma$	49	48	47	46	44
Betondecke	29	28	27	26	24																																																			
Schottertragschicht	150	150	150	150	150																																																			
Schicht aus unempfindlichem Material	45	45	45	45	45																																																			
$\Sigma$	59	58	57	56	54																																																			
Betondecke	29	28	27	26	24																																																			
Schottertragschicht	150	150	150	150	150																																																			
Frostschuttschicht	120	120	120	120	120																																																			
Schicht aus unempfindlichem Material	45	45	45	45	45																																																			
$\Sigma$	49	48	47	46	44																																																			
Dicke der Schicht aus frostunempfindlichem Material		Ab 12 cm aus frostunempfindlichem Material, geringere Restdicke ist mit dem darüber liegenden Material auszugleichen																																																						

Bild 1: Standardisierte Betonbauweisen höherer Beanspruchungsklassen mit Tragschichten ohne Bindemittel, aus (FGSV 2012a)

Asphalttragschicht und Schottertragschicht auf Frostschuttschicht		Asphalttragschicht und Kiestragschicht auf Frostschuttschicht																																																																																								
3	<table border="1"> <tr> <td>Asphaltdecke</td> <td>12</td> <td>12</td> <td>12</td> <td>10</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Asphalttragschicht</td> <td>18</td> <td>14</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>10</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Schottertragschicht <sup>7)</sup></td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td><math>E_v \geq 150(120)</math></td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>Frostschuttschicht</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td><math>\Sigma</math></td> <td>45</td> <td>41</td> <td>37</td> <td>35</td> <td>31</td> <td>29</td> <td>27</td> </tr> </table>	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	8	Schottertragschicht <sup>7)</sup>	150	150	150	150	150	150	150	$E_v \geq 150(120)$	120	120	120	120	120	120	100	Frostschuttschicht	45	45	45	45	45	45	45	$\Sigma$	45	41	37	35	31	29	27	<table border="1"> <tr> <td>Asphaltdecke</td> <td>12</td> <td>12</td> <td>12</td> <td>10</td> <td>4</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Asphalttragschicht</td> <td>18</td> <td>14</td> <td>10</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>10</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Kiestragschicht <math>E_v \geq 150(120)</math></td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> <td>150</td> </tr> <tr> <td>Frostschuttschicht</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>120</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td><math>\Sigma</math></td> <td>45</td> <td>46</td> <td>42</td> <td>40</td> <td>36</td> <td>34</td> <td>32</td> </tr> </table>	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4	Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	8	Kiestragschicht $E_v \geq 150(120)$	150	150	150	150	150	150	150	Frostschuttschicht	120	120	120	120	120	120	100	$\Sigma$	45	46	42	40	36	34	32
Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4																																																																																			
Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	8																																																																																			
Schottertragschicht <sup>7)</sup>	150	150	150	150	150	150	150																																																																																			
$E_v \geq 150(120)$	120	120	120	120	120	120	100																																																																																			
Frostschuttschicht	45	45	45	45	45	45	45																																																																																			
$\Sigma$	45	41	37	35	31	29	27																																																																																			
Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4																																																																																			
Asphalttragschicht	18	14	10	10	12	10	8																																																																																			
Kiestragschicht $E_v \geq 150(120)$	150	150	150	150	150	150	150																																																																																			
Frostschuttschicht	120	120	120	120	120	120	100																																																																																			
$\Sigma$	45	46	42	40	36	34	32																																																																																			
Dicke der Frostschuttschicht		- - 30 <sup>2)</sup> 40 - - 34 <sup>2)</sup> 44 - 28 <sup>3)</sup> 38 48 - - 30 <sup>2)</sup> 40 - 24 <sup>3)</sup> 34 44 16 <sup>3)</sup> 26 36 46 - 18 <sup>3)</sup> 28 38																																																																																								

Bild 2: Standardisierte Asphaltbauweisen mit Tragschichten ohne Bindemittel, aus (FGSV 2012a)

2012a) zu deutlichen Anpassungen der Tragschichtdicken. Unter Zugrundelegung eines Verformungsmoduls der Unterlage (Frostschuttschicht) von  $E_{v2} \geq 120$  MPa ist zur Sicherstellung der Mindesttragfähigkeit ( $E_{v2} \geq 150$  MPa) auf der eingebauten und verdichteten Tragschicht ohne Bindemittel eine Mindestschichtdicke – bei Verwendung eines korngestuftes Baustoffgemisches aus ungebrochener Gesteinskörnung (FGSV 2007a, S. 9) – von 20,0 cm nachzuweisen. Bei Verwendung einer Schottertragschicht kann hingegen die Schichtdicke um 5,0 cm auf 15,0 cm reduziert werden.

## 2 Ziel der Forschungstätigkeiten

Das Gesamtziel der im Jahre 2003 begonnenen und noch andauernden Forschungstätigkeiten besteht darin, Kiestragschichten gem. ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) beziehungsweise TL SoB-STB (FGSV 2007b) für die Verwendung als Tragschichten ohne Bindemittel unter Betonfahrbahndeckensystemen höherer Beanspruchungsklassen durch Substituierung partieller Korngruppen durch gebrochene Gesteinskörnungen derart zu verändern, dass eine annähernde Gleichwertigkeit zu Schottertragschichten hinsichtlich Standfestigkeit, Wasserdurchlässigkeit sowie Umlagerungs- und Erosionsbeständigkeit erreicht werden kann.

Während sich die ersten Forschungstätigkeiten des Prüfamtes für Verkehrswegebau der Technischen Universität München aus den Jahren 2003 bis 2007 – u. a. FE 08.0184/2005/CGB „Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)“ – auf die labortechnische Bestimmung der Standfestigkeiten, der Wasserdurchlässigkeiten sowie der Umlagerungs- und Erosionsbeständigkeiten verschiedener Tragschichten ohne Bindemittel im Prüfstand beziehungsweise Großprüfstand beschränkten, sollen nun im Rahmen des seit 2011 in der Bearbeitung befindlichen Forschungsvorhabens FE 08.0207/2010/KGB die positiven Erkenntnisse unter realen Bedingungen an einer Versuchsstrecke verifiziert werden.

Durch die Verwendung ungebrochener Gesteinskörnungen können regionale Gesteinsvorkommen bei der Herstellung von Tragschichten ohne Bindemittel unter Betondeckensystemen berücksichtigt werden. Hierdurch lassen sich die Transportwege und die damit verbundenen Schadstoffemissionen erheblich reduzieren. Der süddeutsche Raum

(Bayern, Baden-Württemberg) kann hierbei als Hauptanwendungsgebiet genannt werden.

## 3 Abgeschlossene Forschungsprojekte

### 3.1 Vergleichende Standfestigkeitsuntersuchungen im Prüfstand

Vor über zehn Jahren wurde das Prüfamte für Verkehrswegebau der Technischen Universität München durch den Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg ISTE e. V. mit der Durchführung von vergleichenden Standfestigkeitsuntersuchungen an unterschiedlichen Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) im Prüfstand beauftragt. Bei den Untersuchungen wurden neben Baustoffgemischen für die Herstellung von Kies- und Schottertragschichten, gemäß den damals gültigen ZTV T-StB 95/Fassung 2002, auch verschiedene modifizierte Kiestragschichten – mit variierenden Anteilen gebrochener Gesteinskörnungen – berücksichtigt.

Im Prüfstand wurden die jeweils 20 cm dicken Prüfschichten in zwei Lagen auf eine ebenfalls 20 cm dicke Frostschuttschicht mit einem Verformungsmodul von mindestens 120 MPa eingebaut und verdichtet. Die Standfestigkeitsuntersuchungen sahen für jede Prüfschicht den in Tabelle 1 dargestellten Algorithmus vor. Bei den ersten vergleichenden Standfestigkeitsuntersuchungen im Prüfstand wurde auf die Überbauung der eingebauten und verdichteten Prüfschicht mit einer Betondecke verzichtet.

Standfestigkeitsuntersuchung	Bestimmung des statischen Verformungsmoduls $E_{v2}$ auf der Oberfläche der Prüfschicht unmittelbar nach dem Einbau gemäß DIN 18134
	Bestimmung des statischen Verformungsmoduls $E_{v2}$ nach 6.000 Lastwechseln (Dauerschwellversuch) mit einer Oberlast von 30 kN auf der Oberfläche der Prüfschicht gemäß DIN 18134
	Bestimmung des statischen Verformungsmoduls $E_{v2}$ nach weiteren 4.000 Lastwechseln (Dauerschwellversuch) mit einer Oberlast von 50 kN auf der Oberfläche der Prüfschicht gemäß DIN 18134
	Bestimmung der elastischen und plastischen Verformungsanteile nach Entlastung der Prüfschicht (Dauerschwellversuch insgesamt 10.000 Lastwechseln)

Tab. 1: Untersuchungsalgorithmus „Standfestigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel ohne Überbauung im Prüfstand“ der TU München

Im Rahmen der Dauerschwellversuche konnte bei allen untersuchten Tragschichten ohne Bindemittel ein Anstieg des statischen Verformungsmoduls  $E_{V2}$  bis 6.000 Lastwechsel um 22 bis 53 % festgestellt werden. Hierbei wurde der Maximalwert von  $E_{V2,max} = 317$  MPa auf einer modifizierten Kiestragschicht (Baustoffgemisch aus 75 % ungebrochener und 25 % gebrochener Gesteinskörnung) und der Minimalwert von  $E_{V2,min} = 211$  MPa auf der originären Kiestragschicht (Baustoffgemisch aus 100 % ungebrochener Gesteinskörnung) erreicht. Auf sämtlichen Prüfschichten wurde nach dem Einbau der Mindestverformungsmodul von  $E_{V2} = 150$  MPa erreicht. Nach weiteren 4.000 Lastwechseln kann eine Abnahme des statischen Verformungsmoduls um 7 bis 12 %, offensichtlich verursacht durch eine Umlagerung der Gesteinskörnungen und Auflockerung der Tragschichten (LEYKAUF, BIRMANN 2004, S. 14), beobachtet werden. Auch nach den Dauerschwellversuchen konnten die Minimal- und Maximalwerte erneut bei den eben bezeichneten Baustoffgemischen i. H. v. mit  $E_{V2,max} = 291$  MPa und  $E_{V2,min} = 197$  MPa festgestellt werden. In Summe stieg bei allen untersuchten Tragschichten ohne Bindemittel der Verformungsmodul  $E_{V2}$  nach 10.000 Lastwechseln um 10 bis 37 % an.

Die Dauerschwellversuche gaben zudem Aufschluss über die Widerstände der eingebauten und verdichteten ToB gegenüber mechanischen Beanspruchungen aus dem Baustellenverkehr. Nach Abschluss der Dauerschwellversuche (Entlastung) wurden bei jeder Prüfschicht sowohl die elastischen als auch die plastischen Verformungsanteile bestimmt. Während die originäre Kiestragschicht – Baustoffgemisch aus ausschließlich ungebrochener Gesteinskörnung – eine plastische Deformation von 5,0 mm aufwies, konnte bei der Schottertragschicht eine bleibende Einsenkung von 2,5 mm verzeichnet werden. Durch die Verwendung von gebrochener Gesteinskörnungen konnte das plastische Verformungsverhalten der Kiestragschicht signifikant verbessert werden. Die bleibende Einsenkung auf der Oberfläche der eingebauten und verdichteten modifizierten Kiestragschichten betrug nach 10.000 Lastwechseln zwischen 1,5 und 3,3 mm. Drei der untersuchten modifizierten Kiestragschichten wiesen sogar einen deutlich höheren Widerstand gegenüber mechanischen Beanspruchungen aus Baustellenverkehr auf.

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe im Prüfstand wurde somit deutlich, dass die Standfestigkeiten von Kiestragschichten durch Substituierung partieller

Korngruppen durch gebrochene Gesteinskörnungen im Vergleich zu originären Kiestragschichten nach den ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) beziehungsweise TL SoB-StB (FGSV 2007b) deutlich zunehmen. Es wurde zudem festgestellt, dass die Standfestigkeiten der modifizierten Kiestragschichten mit denen von Schottertragschichten vergleichbar sind.

### 3.2 Vergleichende Untersuchungen im Großprüfstand

Das Prüfamts für Verkehrswegebau der Technischen Universität München wurde vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS 2005 mit der Bearbeitung des zweijährigen Forschungsprojektes FE 08.0184/2005/CGB „Dicke Betondecken auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)“ beauftragt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollten fünf verschiedene Baustoffgemische für die Herstellung von Tragschichten ohne Bindemittel unter einer dicken Betonfahrbahndecke bezüglich der Attribute Wasserdurchlässigkeit, Umlagerungsbeständigkeit und Erosionsbeständigkeit im Großprüfstand – 1:1-Modell – vergleichend gegenübergestellt werden. Neben zwei Baustoffgemischen aus überwiegend gebrochener Gesteinskörnung (FGSV 2007a, S. 9) und einer aus ungebrochener Gesteinskörnung (FGSV 2007a, S. 9) nach den ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) bzw. TL SoB-StB (FGSV 2007b) wurden auch zwei modifizierte Baustoffgemische verwendet. Die Sieblinien der Baustoffgemische zur Herstellung der modifizierten Kiestragschichten wurden aufbauend auf den positiven Erkenntnissen der ersten Versuchsreihe der Jahre 2003 und 2004 festgelegt. Unterschieden wurden die Baustoffgemische hinsichtlich der Korngruppen, die durch gebrochene Gesteinskörnungen ersetzt wurden. Während beim ersten Baustoffgemisch die Korngruppen  $< 8$  mm Siebennweite substituiert wurden, wurden beim zweiten Baustoffgemisch die Korngruppen ab 8 mm Siebennweite durch gebrochene Gesteinskörnung ersetzt.

Bei den Großprüfstandsversuchen wurden die jeweils 30 cm dicken Prüfschichten auf eine Vlies-schicht und eine alte, mit Strukturrissen durchsetzte, gebundene Tragschicht – die einer Bodenverfestigung entspricht – aufgebaut (LEYKAUF, BIRMANN, WELLER 2007, S. 7). Analog den ersten Versuchsreihen wurde auf den Oberflächen der

Prüfschichten jeweils der Algorithmus aus Tabelle 1 durchlaufen. Anschließend wurden die bereits beanspruchten Prüfflächen mit jeweils zwei unbewehrten Betonfahrbahndecken überbaut und im unverdübelten Fugenbereich unter Wasserzugabe mit zwei Prüfszylindern pulsierend belastet.

Insgesamt konnten die Erkenntnisse aus den ersten Versuchsreihen anhand der Ergebnisse der Großprüfstandsversuche am 1:1-Modell verifiziert werden. Es zeigte sich vor allem, dass die statischen Verformungsmoduln auf den Oberflächen der modifizierten Kiestragschichten während der jeweiligen Versuchsreihe (Tabelle 2) am wenigsten variierten und somit die größte Konstanz aufwiesen. Die Wasserdurchlässigkeiten  $k_{10}$  wurden nach DIN 18130-1 (Verfahren ZY-MS-MZ-3) auf jeder Prüfschicht an drei unterschiedlichen Stellen vor und nach dem Dauerschwingversuch mit einem Doppelring-Infiltrimeter bestimmt. Hierbei konnten alle untersuchten Prüfschichten in situ als stark durchlässig bewertet werden. Eine tendenzielle Veränderung der Wasserdurchlässigkeit vor und nach den Dauerschwingversuchen konnte bei keiner Prüfschicht festgestellt werden (LEYKAUF, BIRMANN, WELLER 2007, S. 33). Die Erosionsbeständigkeiten der Prüfschichtenoberflächen im Fugenbereich wurden im Anschluss an die Dauerschwingversuche mit Wasserzugabe nach Abheben der Betonplatten visuell beurteilt. Hier zeigten sich bei der originären Kiestragschicht nach TL SoB-StB (FGSV 2007b) beziehungsweise ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) die größten Kornumlagerungen. Die Erosionsbeständigkeiten der modifizierten Kiestragschichten waren mit denen der Schottertragschichten vergleichbar. Durch Feststellung der Kornverteilungen wurden anschließend die visuellen Erkenntnisse bestätigt. Eine eindeutige Fein-

Prüfschicht	$E_{v2}$ nach Einbau	$E_{v2}$ auf der Prüffläche nach 10.000 LW, Algorithmus nach Tabelle 1	$E_{v2}$ auf der Prüffläche nach Dauerschwingversuch
STSuB (1)	206 MPa	241 MPa	192 MPa
STSuB (2)	141 MPa <sup>1</sup>	174 MPa	128 MPa
KTS	136 MPa <sup>1</sup>	144 MPa	146 MPa
KTSuB (1)	155 MPa	168 MPa	149 MPa
KTSuB (2)	150 MPa	152 MPa	174 MPa

<sup>1</sup> Vorgabe  $E_{v2} \geq 150$  MPa nicht eingehalten

Tab. 2: Variation der statischen Verformungsmoduln auf den Oberflächen der Prüfschichten vor, während und nach den Untersuchungen

kornumlagerung an der Unterseite der Prüfschichten (Umlagerungsbeständigkeit) konnte aus den entsprechenden Kornverteilungen (Probenentnahme an der Ober- und Unterseite der Prüfschichten) nach Abschluss der Dauerschwingversuche nicht festgestellt werden (LEYKAUF, BIRMANN, WELLER 2007, S. 33). Den untersuchten modifizierten Kiestragschichten konnte abschließend eine annähernde Äquivalenz zu Schottertragschichten hinsichtlich Standfestigkeit, Wasserdurchlässigkeit sowie Umlagerungs- und Erosionsbeständigkeit auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Prüfstands- und Großprüfstandsversuchen bescheinigt werden. Das modifizierte Baustoffgemisch 0/32, bei dem die Korngruppe 0/8 durch gebrochene Gesteinskörnungen ersetzt wurde, wies in Summe bessere Eigenschaften auf als das inverse modifizierte Baustoffgemisch. Die damalige Empfehlung war die Verifikation der Erkenntnisse aus den Großprüfstandsversuchen an einer Versuchsstrecke unter realen Witterungs- und Baustellenbedingungen.

## 4 Konzeptionierung einer Versuchsstrecke

### 4.1 1. Technisches Datenblatt

Basierend auf den positiven Erkenntnissen der Forschungsarbeiten von 2003 und 2007 wurden zu Beginn der gegenwärtigen Forschungstätigkeit im Jahre 2011 die Anforderungen an das Baustoffgemisch 0/32 zur Herstellung einer modifizierten Kiestragschicht sowie an die eingebaute und verdichtete Tragschicht ohne Bindemittel selbst im 1. Technischen Datenblatt aufgeführt. Das 1. Technische Datenblatt diente dazu, die Eckdaten für die Vorversuche in einem Kiestragwerk festzusetzen. Die Angaben wurden an Baustoffgemischen festgelegt, die in Kleinmengen unter Laborbedingungen zusammengesetzt wurden. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Vorversuche in einem Kieswerk wird im Anschluss das 2. Technische Datenblatt formuliert.

#### 1. Technisches Datenblatt KTSuB 0/32 mm

a) Zusammensetzung des Baustoffgemisches (Korngruppe 0/32):

- Korngruppe 0/2 mm:  
Moräne-Brechsand, gewaschen,

Kornklasse [mm]	Sollvorgabe aus Forschungen		Kommentar	Sieblinienbereiche für Kies- und Schottertragschichten nach den TL SoB-StB	
	Anteil [M.-%]	Siebdurchgang [M.-%]		Sieblinienbereich [M.-%]	Einhaltung der Sollvorgaben aus den Regelwerken
0 - 0,063	1,0	1,0	gebrochene Gesteinskörnung (= 49,0 M.-%)	0,0 - 3,0	✓
0,063 - 0,5	7,0	8,0		6,0 - 20,0	✓
0,5 - 1	9,0	17,0		11,0 - 25,0	✓
1 - 2	14,0	<b>31,0</b> (= Sandanteil)		23,0 - 28,0	✗
2 - 4	9,0	40,0		26,0 - 50,0	✓
4 - 8	9,0	49,0		39,0 - 63,0	✓
8 - 16	25,0	74,0		57,0 - 79,0	✓
16 - 31,5	26,0	100,0	ungebrochene Gesteinskörnung (= 51,0 M.-%)	90,0 - 99,0	✓
31,5 - 45	0,0	100,0		100	✓
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>				

Tab. 3: Ausgangskorngrößenverteilung des modifiziertes Baustoffgemisches 0/32 (1. Technisches Datenblatt)

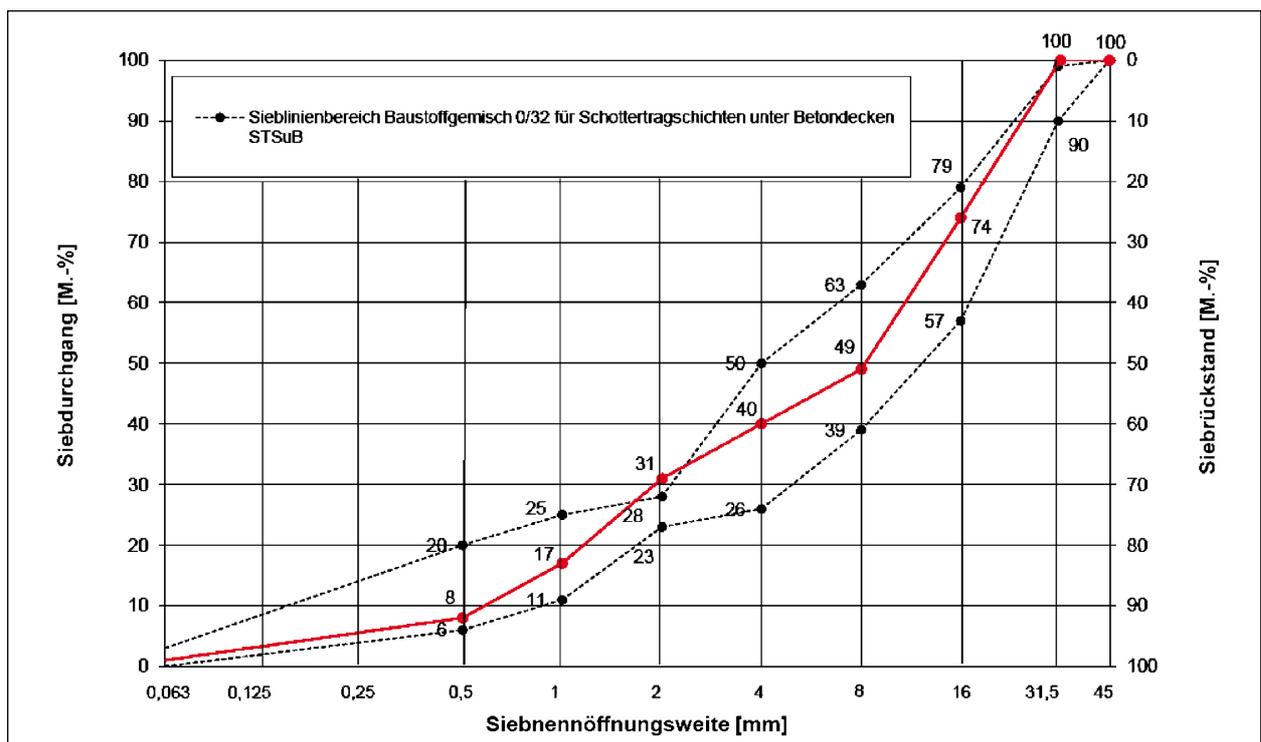


Bild 3: Ausgangssieblinie (rot) des korngestuftes Baustoffgemisches 0/32 sowie Sieblinienbereiche der Baustoffgemische 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecken STSuB nach den TL SoB-StB (1. Technisches Datenblatt)

- Korngruppe 2/8 mm: Moräne-Kies (einfach gebrochen),
  - Korngruppe 8/16 mm: Moräne-Kies (ungebrochen),
  - Korngruppe 16/32 mm: Moräne-Kies (ungebrochen).
- b) Ausgangskorngrößenverteilung (Tabelle 3) und Ausgangssieblinie (Bild 3):
- Korngestuftes Baustoffgemisch 0/32 bestehend aus gebrochener Gesteinskörnung < 8 mm und ungebrochener Gesteinskörnung > 8 mm,

- erweiterter Sieblinienbereich bei 2 mm – Siebnennweite nach TL SoB-StB für Schottertragschichten unter Betondecken STSuB von 28,0 auf 31,0 M.-%,
- Feinanteil (< 0,063 mm) im Lieferzustand:  $\leq 3,0$  M.-%,
- Feinanteil (< 0,063 mm) im eingebauten Zustand:  $\leq 5,0$  M.-%.

c) Wasserdurchlässigkeit:

Anforderungen an die Wasserdurchlässigkeit von Baustoffgemischen bestehen national nicht (FGSV 2007b, S. 14). Die Wasserdurchlässigkeit ( $k_{10}$ -Wert) ist nach DIN 18130-1 (Verfahren ZY-ES-ST-2) am zertrümmerten Probenmaterial nach Kapitel 2.3.6 der DBS 918 062 zu ermitteln und sollte den folgenden Wert nicht unterschreiten:

$$k_{10}\text{-Wert [m/s]} \geq 5,0 \cdot 10^{-5},$$

$$f \text{ [M.-%]} \leq 5,0 \text{ (UF}_5\text{)} \\ \text{nach Zertrümmerungsversuch.}$$

d) CBR-Versuch:

Nach den TL SoB-StB ist bei Baustoffgemischen 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecken ein CBR-Wert nach DIN EN 13286-47 (Zylinderdurchmesser 150 mm) nach Abtrennung des Anteils > 22 mm am Baustoffgemisch 0/22 mm nach 4 h Wasserlagerung zu bestimmen (FGSV 2007b, S. 14);

$$\text{CBR-Wert [\%]} > 80.$$

e) Proctor-Versuch:

Der Wassergehalt von Baustoffgemischen sollte nach den TL SoB-StB dem für den Einbau und die Verdichtung erforderlichen Wassergehalt entsprechen (FGSV 2007b, S. 14). In der Regel sollten 90 % des nach DIN EN 13286-2 bestimmten optimalen Wassergehalt ( $w_{Pr}$ ) nicht unterschritten werden (FGSV 2007b, S. 14);

$$w_{Pr} \text{ [\%]} = 6,0 \text{ nach den TL SoB-StB min.} \\ 5,4 \text{ \% (90 \%)},$$

$$\rho_{Pr} \text{ [g/cm}^3\text{]} = 2,029.$$

f) Statischer Verformungsmodul:

$$E_{v2} \geq 150 \text{ MPa (Vorgabe).}$$

## 4.2 Dosier-/Misch- und Einbauversuche im Kieswerk (Vorversuche)

Mit Unterstützung des Industrieverbandes Steine und Erden Baden-Württemberg ISTE e. V. wurden nach der Festlegung des 1. Technischen Datenblattes (siehe Kapitel 4.1) Ende Juli 2012 in einem Kieswerk der Wanner + Märker GmbH & Co. KG bei Donauwörth erste Dosier-, Misch- und Einbauversuche durchgeführt. Es wurden zwei Halden des modifizierten Baustoffgemisches 0/32 mit jeweils einer Gesamtmasse von ca. 100 Tonnen hergestellt. Die Dosierung und Mischung der Kornklassen erfolgte mit einem Radlader (siehe Bild 4). Die Radladermischung ist ein gängiges Dosier- und Mischverfahren in Kieswerken.

Die modifizierten Baustoffgemische 0/32 unterschieden sich hinsichtlich der Sandanteile (Korngruppe 0/2 mm). Während das Baustoffgemisch 0/32-A einen Sandanteil von ca. 26 M.-% aufwies, betrug dieser beim Baustoffgemisch 0/32-B ca. 31 M.-%. Aus den Halden wurden mehrere Proben größeren Umfangs entnommen und für die Bestimmung der spezifischen Eigenschaften dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung cbm der Technischen Universität München übergeben. Die späteren Auswertungen zeigten, dass die Dosierung und Mischung über Radlader als geeignet für die Herstellung des modifizierten Baustoffgemisches 0/32 angesehen werden kann. Die im 1. Technischen Datenblatt (siehe Kapitel 4.1) als Sollvorgabe definierte Sieblinie des Materials wurde eingehalten.

Im Rahmen eines ersten Einbauversuches wurde eine 30 cm dicke Tragschicht ohne Bindemittel aus



Bild 4: Dosierung und Mischung des Baustoffgemisches 0/32 mittels Radlader

dem Baustoffgemisch 0/32-B (Sandanteil 31,0 M.-%) hergestellt. Der Einbau erfolgte, entgegen der Vorgaben der ZTV SoB-StB, Abschnitt 2.3.3 (FGSV 2007a), einlagig mit einem Grader. Verdicht-



Bild 5: Einbau- und Verdichtungsversuche (Unimog mit Trenkplatten)



Bild 6: Hohe Standfestigkeit des eingebauten und verdichteten Baustoffgemisches



Bild 7: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht direkt nach dem Verdichten

tet wurde das Baustoffgemisch mit Plattenverdichtern unter gleichmäßiger Wasserzugabe (Bild 5). Zur Kontrolle wurde direkt nach dem Verdichten dynamische Lastplattendruckversuche auf der Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht durchgeführt. Bereits zu diesem Zeitpunkt wurde ein korrelierter statischer Verformungsmodul von mindestens 150 MPa erreicht. Es konnte bereits eine hohe Standfestigkeit des Materials beobachtet werden (siehe Bild 6). Bild 7 zeigt die Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht nach dem Verdichten.

### 4.3 Weiterentwicklung des Baustoffgemisches

Die Angaben im 1. Technischen Datenblatt, siehe Kapitel 4.1, stützen sich auf Erkenntnisse aus Baustoffgemischen, die unter labortechnischen Bedingungen in Kleinmengen hergestellt wurden. Für die Fortschreibung des 1. Technischen Datenblattes des modifizierten Baustoffgemisches 0/32 wurden im Folgenden die Erkenntnisse aus den Dosier- und Mischversuchen im Kieswerk (Proben größeren Umfangs) herangezogen. Auf Grundlage des 2. Technischen Datenblattes wurden 700 Tonnen des modifizierten Baustoffgemisches für den Versuchsstreckenbau hergestellt.

#### 2. Technisches Datenblatt KTSuB 0/32 mm

a) Zusammensetzung des Baustoffgemisches (Korngruppe 0/32):

siehe 4.1 a.

b) Korngrößenverteilung (Tabelle 4) und Sieblinie (Bild 8):

siehe 4.1 b.

c) Wasserdurchlässigkeit:

Wasserdurchlässigkeit und Zertrümmerungsversuch,

$k_{10}$ -Wert [m/s]:  $3,5 \cdot 10^{-5} \geq 5,0 \cdot 10^{-5}$  **x**.

Der Mindestwert der Wasserdurchlässigkeit gemäß den TL SoB-StB von  $\geq 5,0 \cdot 10^{-5}$  [m/s] wurde im Versuch unterschritten. Wegen Geringfügigkeit kann die Mindestwertunterschreitung jedoch vernachlässigt werden.

- f [M.-%] 3,3 ≤ 5,0 (UF<sub>3</sub>) ✓ . e) Proctor-Versuch:  
 w<sub>Pr</sub> [%] = 5,0 nach den TL SoB-StB min.  
 4,5 % (90 %),  
 d) CBR-Versuch: ρ<sub>Pr</sub> [g/cm<sup>3</sup>] = 2,10.  
 CBR-Wert [%] 86 > 80 ✓ .

Kornklasse [mm]	Sollvorgabe		Kommentar	Sieblinienbereiche für Kies- und Schottertragschichten nach den TL SoB-StB	
	Anteil 1./2. Datenblatt [M.-%]	Siebdurchgang 1./2. Datenblatt [M.-%]		Sieblinienbereich [M.-%]	Einhaltung der Sollvorgaben aus den Regelwerken
0 - 0,063	2,0/1,0	2,0/1,0	gebrochene Gesteinskörnung (= 48,5 M.-%)	0,0 - 3,0	✓
0,063 - 0,5	12,0/7,0	14,0/8,0		6,0 - 20,0	✓
0,5 - 1	7,0/9,0	21,0/17,0		11,0 - 25,0	✓
1 - 2	11,0/14,0	<b>32,0/31,0</b> (= Sandanteil)		23,0 - 28,0	✗
2 - 4	7,0/9,0	39,0/40,0		26,0 - 50,0	✓
4 - 8	10,0/9,0	49,0/49,0		39,0 - 63,0	✓
8 - 16	25,0/25,0	74,0/74,0	ungebrochene Gesteinskörnung (= 51,5 M.-%)	57,0 - 79,0	✓
16 - 31,5	25,0/26,0	99,0/100,0		90,0 - 99,0	✓
31,5 - 45	1,0/0,0	100,0/100,0		100	✓
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>				

Tab. 4: Korngrößenverteilung des modifiziertes Baustoffgemisch KTSuB 0/32

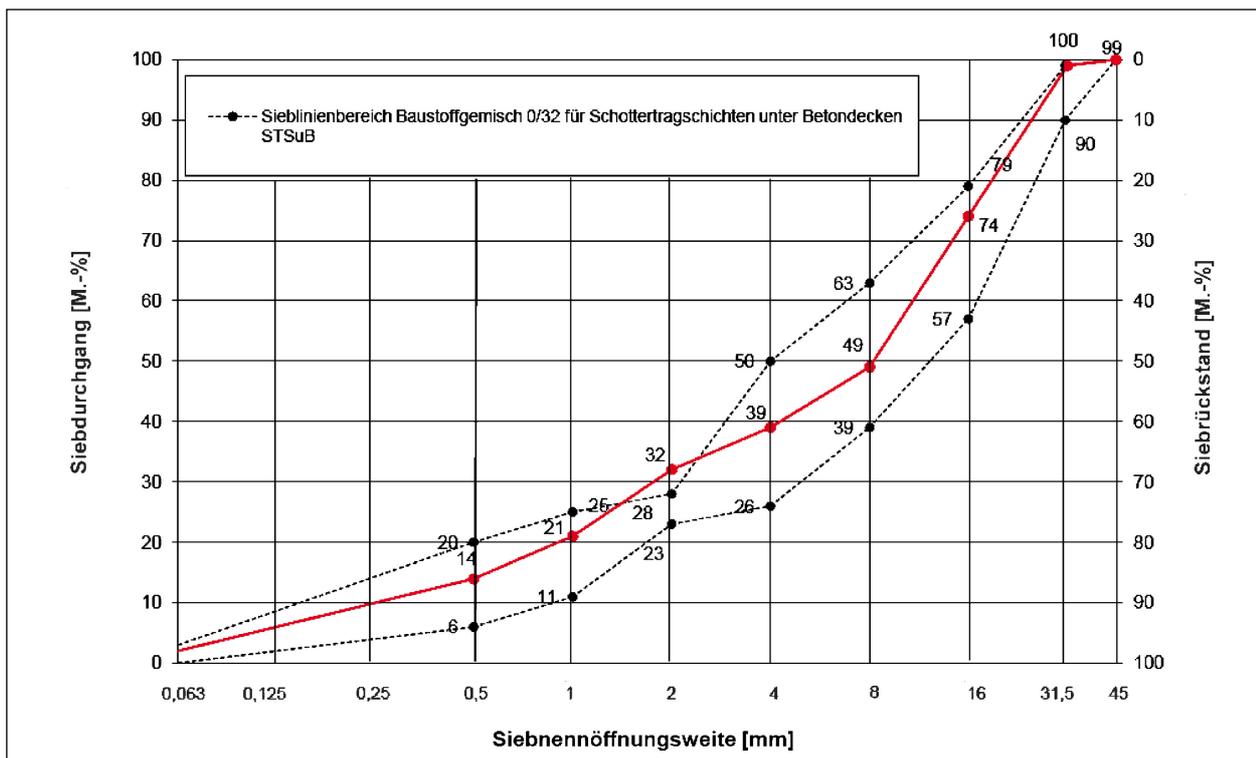


Bild 8: Sieblinie des modifizierten Baustoffgemisches 0/32 (rot) sowie Sieblinienbereiche der Baustoffgemische 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecken nach den TL SoB-StB (2. Technisches Datenblatt)

f) Statischer Verformungsmodul:

$$E_{v2} \geq 150 \text{ MPa (Vorgabe).}$$

## 5 Wissenschaftliche Begleitung des Versuchsstreckenbaus

### 5.1 Allgemeines

Als Versuchsstrecke wurde eine 143 m lange und 6,5 m breite Fahrgasse der Tank- und Rastanlage Köschinger Forst West bei Ingolstadt an der Bundesautobahn A 9 Berlin-München, Fahrtrichtung München ausgewählt, über die ca. 120 Lkw-Stellplätze erschlossen werden. Bedingt durch die hohen Verkehrsmengen auf der Bundesautobahn A 9 im Bereich Ingolstadt ist von einer hohen Frequentierung der Tank- und Rastanlage auszugehen. Die an die Versuchsfläche angrenzenden Lkw-Abstellflächen wurden ebenfalls in Betonbauweise ausgeführt wurden (Bild 9).

Bedingt durch die konstruktive Gestaltung der Tank- und Rastanlage sowie durch verkehrsrechtlichen Beschränkungen ist die Erreichbarkeit der Aufstellflächen ausschließlich über die Versuchsstrecke möglich (Bild 10). Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke DTV<sup>(SV)</sup> kann grob mit ca. 450 Fz./24 h abgeschätzt werden. Eine exakte Erfassung der Verkehrsstärke erfolgte nicht.

### 5.2 Ausführungsplanung

Gemäß Tabelle 4 der RStO 01 (FGSV 2001) sind Verkehrsflächen in Neben- und Rastanlagen – bei vorherrschendem Schwerverkehr – in Bauklasse III oder gegebenenfalls höher auszuführen. Aufgrund der zu erwartenden Schwerverkehrsbelastungen wurde die Versuchsstrecke in Bauklasse II ausgeführt. In Anlehnung an die Bauweise Betondecke auf Schottertragsschicht – Tafel 2 der RStO 01 (FGSV 2001) – und unter Zugrundelegung einer Mindestdicke des frostsicheren Oberbaus von

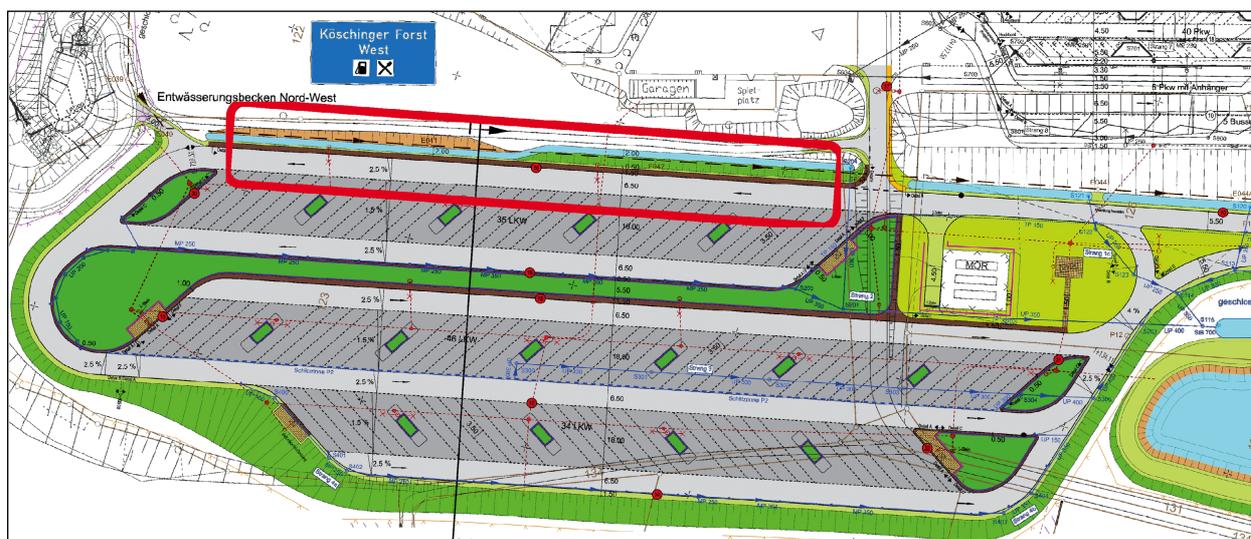


Bild 9: Übersichtslageplan T+R – Anlage Köschinger Forst West mit Versuchsstrecke (rot), Quelle: Freistaat Bayern, Autobahndirektion Südbayern

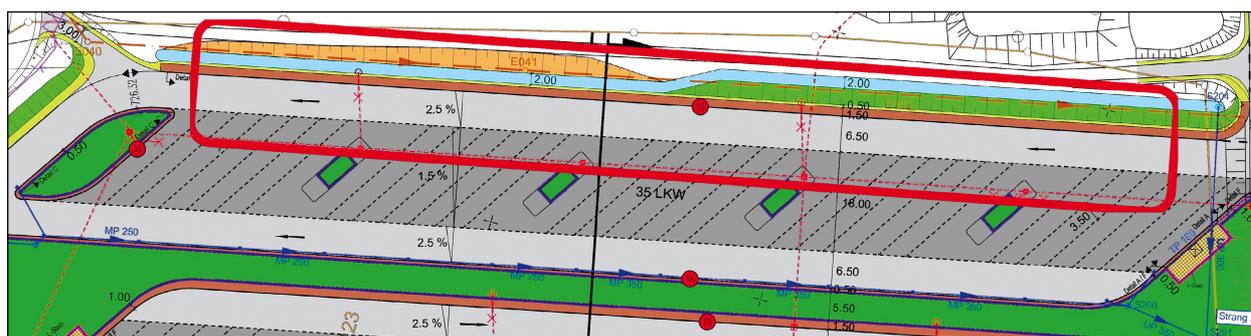


Bild 10: Lageplan der Versuchsstrecke (rot), Quelle: Freistaat Bayern, Autobahndirektion Südbayern



### 5.3 Messumfang während der Bauausführung

Vor dem eigentlichen Einbau des modifizierten Baustoffgemisches 0/32 mm wurden die Tragfähigkeiten der darunter befindlichen ungebundenen Prüfschichten – Planum und Frostschuttschicht – durch statische Lastplattendruckversuche nach DIN 18134 und dynamische Lastplattendruckversuche mit einem mittelschweren Fallgewichtsgerät ( $m = 15 \text{ kg}$ ) in einem vorab definierten Prüfraster bestimmt. Das gleichmäßige Raster gewährleistete, dass die Messpunkte auf den ungebundenen Prüfschichten jeweils übereinander liegen und somit differenzierte Aussagen zum Trag- und Verformungsverhalten der Einzelschichten möglich sind.

Die Bilder 14 bis 16 zeigen die Versuchsstrecken bei unterschiedlichen Bau-km.

Auf der Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht wurden die statischen und dynamischen Verformungsmoduln im gleichen Prüfraster ein Tag nach der Herstellung und nach ca. zwei Wochen unter freier Witterung und unter Baustellenverkehr durchgeführt. Die Messungen wurden in den regulären Bauablauf wie folgt eingetaktet:

17.09.2012: Herstellung des Planums,  
50 cm Bodenaustausch auf Geotextil,

19.09.2012: statische und dynamische LPDV auf Planum,

19.09.2012: Herstellung Frostschuttschicht FSS,

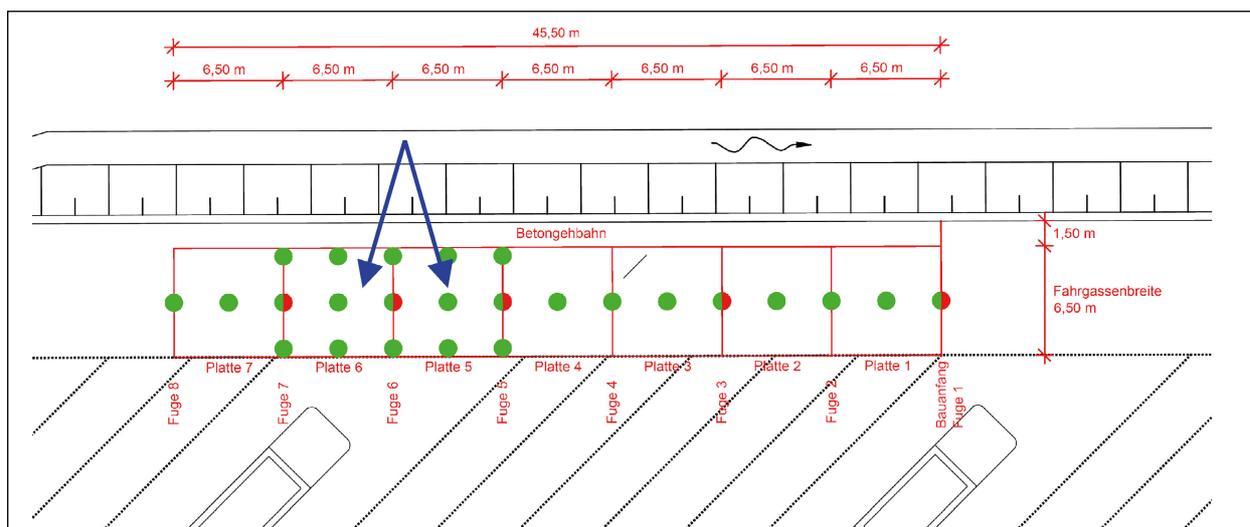


Bild 14: Versuchsstrecke von Bau-km 0,000 (Bauanfang) bis 0,0455 mit Prüfpunkten (rot =  $E_{v2}$ , grün =  $E_{vd}$ ); die beiden wieder auszubauenden Platten 5 und 6 ohne Verdübelung und Fugenmasse sind mit blauen Pfeilen hervorgehoben

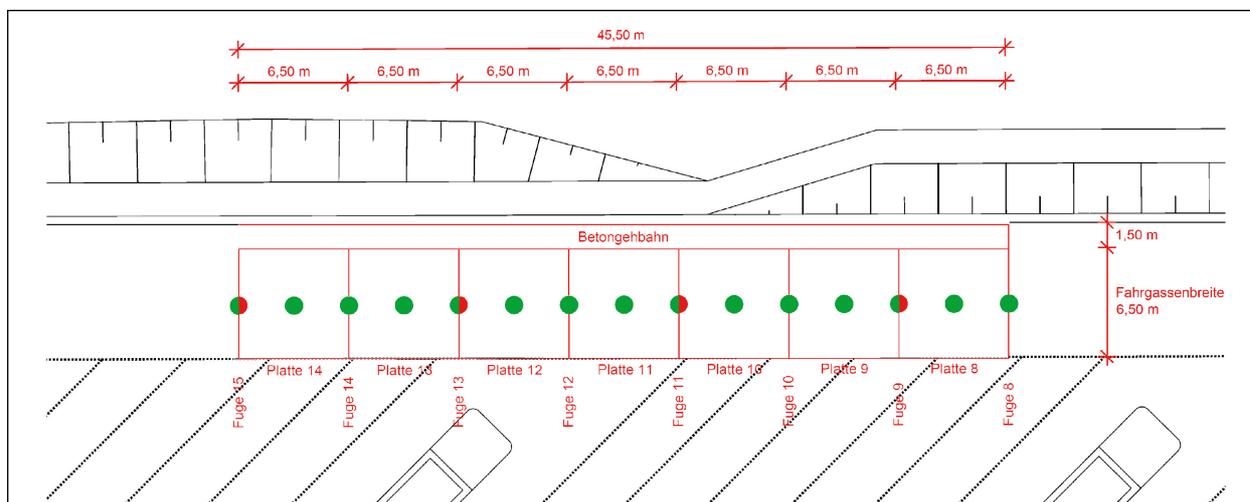


Bild 15: Versuchsstrecke von Bau-km 0,0455 bis 0,091 mit Prüfpunkten (rot =  $E_{v2}$ , grün =  $E_{vd}$ )

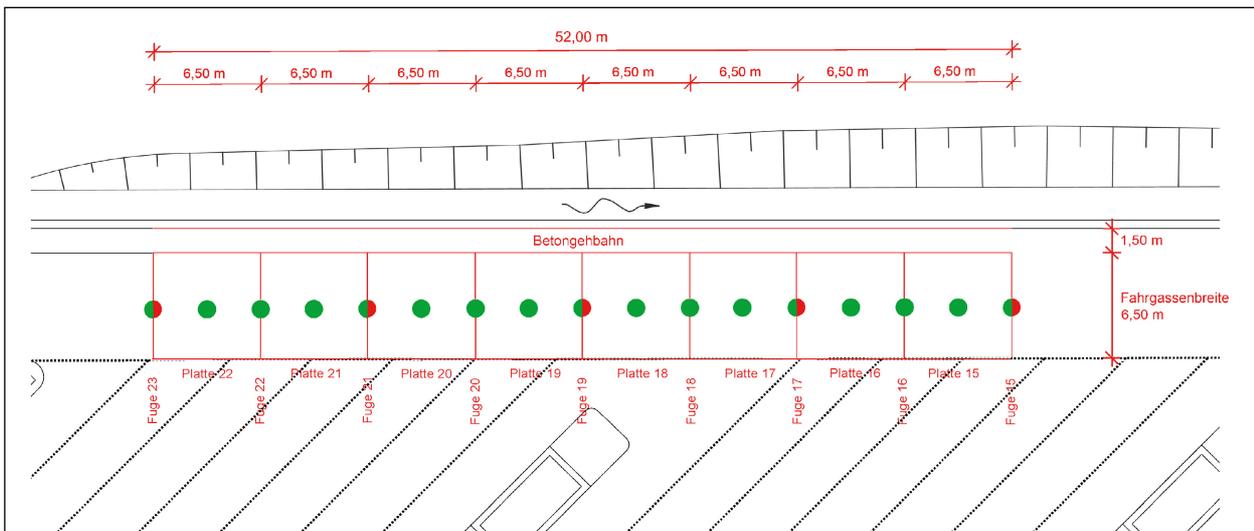


Bild 16: Versuchsstrecke von Bau-km 0,091 bis 0,143 (Bauende) mit Prüfpunkten (rot =  $E_{v2}$ , grün =  $E_{vd}$ )

24.09.2012: statische und dynamische LPDV auf Frostschutzschicht,

25.09.2012: Herstellung modifizierte Kiestragschicht KTSuB,

26.09.2012: statische und dynamische LPDV auf KTSuB (Erstmessung),

09.10.2012: statische und dynamische LPDV auf KTSuB (Zweitmessung),

10.10.2012: Herstellung Betonfahrbahndecke im Handeinbau.



Bild 17: Einbau des modifizierten Baustoffgemisches mit einem Grader (Langmahdverfahren)

#### 5.4 Einbau und Verdichtung der modifizierten Kiestragschicht

Das modifizierte Baustoffgemisch wurde ca. 2 Wochen vor dem Einbau in einem Kieswerk der Wanner + Märker GmbH & Co. KG bei Donauwörth dosiert, gemischt und in Haldenform abgedeckt gelagert. Die Anlieferung an die ca. 70 km entfernte Baustelle erfolgte am Einbautag mit abgedeckten Sattelzügen. Eine Zwischenlagerung auf der Baustelle ist gemäß den einschlägigen Richtlinien nicht zulässig (FGSV 2007a, S. 20). Beim Entladen der Sattelzüge im Baufeld konnte visuell keine Entmischung des modifizierten Baustoffgemisches festgestellt werden. Nach Feststellung der Korngrößenverteilungen im Labor wurde der erste visuelle Eindruck bestätigt.

Abweichend von den Bestimmungen der ZTV SoB-StB erfolgte der Einbau des modifizierten Baustoffgemisches mit einem Grader (Langmahdverfahren),



Bild 18: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht nach dem Gradereinbau und vor dem Verdichten

ren), siehe Bild 17 und 18. Das Material wurde – bedingt durch Arbeiten im Bereich der benachbarten Lkw-Aufstellflächen – nicht von der Seite, sondern durch Befahren der Frostschutzschicht bzw. der bereits eingebauten modifizierten Kies-

tragschicht in das Baufeld eingebracht (Bild 19). Aufgrund der hohen Schüttdichte des Materials konnte die mit dem Grader eingebaute und noch unverdichtete Tragschicht bereits mit Sattelzügen ohne Probleme befahren werden.

Die Anlieferung des Baustoffgemisches erfolgte gemäß den Vorgaben der ZTV SoB-StB mit einem für den Einbau und die Verdichtung günstigen Wassergehalt (FGSV 2007a, S. 20) von 5,0 %. Es zeigte sich, dass der oberflächennahe Bereich der eingebauten und noch unverdichteten modifizierten Kiestragschicht bei sommerlichen Temperaturen nach Stunden bereits austrocknet. In-situ-Versuche mit einem Walzenzug (mit Plattenverdichter) verdeutlichten, dass zu diesem Zeitpunkt ohne Wasserzugabe keine effektive Verdichtung des Baustoffgemisches mehr möglich ist. Bei der Herstellung der Versuchsstrecke stand zusätzlich ein Unimog mit Plattenverdichtern zur Verfügung (Bild 20). Mit diesem Baugerät konnte unter gleichmäßiger Wasserzugabe eine optimale Verdichtung der modifizierten Kiestragschicht – auch nach oberflächennahem Austrocknen – erreicht werden.



Bild 19: Abkippen des modifizierten Baustoffgemisches im Bau-  
feld



Bild 20: Verdichten mit Plattenverdichtern unter Wasserzugabe

## 5.5 Kiestragschicht unter freier Witterung und Baustellenverkehr

Nach dem Einbau und der Verdichtung der modifizierten Kiestragschicht war diese 16 Tage lang der freien Witterung ausgesetzt. Zudem erfolgte in dieser Zeit der Betondeckeneinbau in den angrenzenden Lkw-Aufstellflächen. Die Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht wurde in dieser Zeit hohem Baustellenverkehr ausgesetzt. Die Bilder 21 und 22 zeigen die Oberflächen der modifizierten Kiestragschicht nach dem Einbau und nach 16 Tagen unter freier Witterung sowie Beanspruchungen durch Baustellenverkehr.

Während der zweiwöchigen Liegedauer der Kiestragschicht wurde versucht, so viel Baustellenverkehr wie möglich die Fläche befahren zu lassen. Zudem wurde während dieser Zeit die Lkw-Abstellfläche unmittelbar neben der Versuchsstrecke hergestellt (siehe Bilder 23 und 24).



Bild 21: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht direkt nach dem Einbau

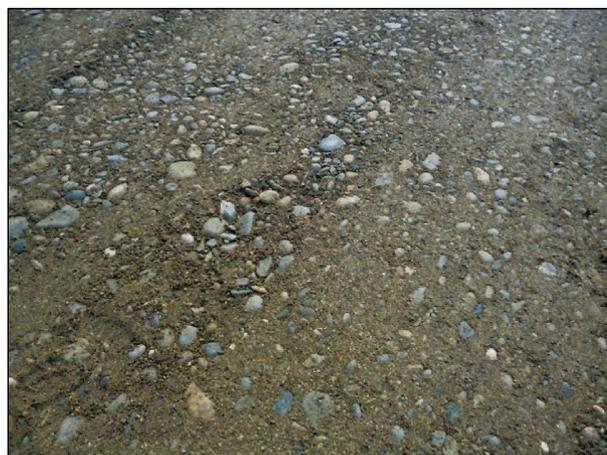


Bild 22: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht nach 16 Tagen freier Witterung und Baustellenverkehr (rechts)



Bild 23: Herstellung der Lkw-Abstellfläche in Betonbauweise unmittelbar neben der Versuchstrecke; Anlieferung des Betons über die Kiestragschicht



Bild 24: Baustellenverkehr im Bereich der Versuchstrecke; zu sehen sind auch die Prüfpunkte im Bereich der beiden wieder auszubauenden Einzelfahrbahnplatten

In Tabelle 5 sind die maximalen Tagestemperaturen, die Niederschlagshöhen und die relativen Luftfeuchtigkeiten (Tageshöchstwerte) für den Ort Kösching im Zeitraum vom 25.09.2012 (Einbau modifizierte Kiestragschicht) bis einschließlich 10.10.2012 (Überbauung der modifizierten Kiestragschicht) dargestellt. Hieraus können die Witterungseinflüsse auf die nicht überbaute modifizierte Kiestragschicht abgeschätzt werden. Die hohen Luftfeuchtigkeiten wurden in den Morgenstunden gemessen (Frühnebel).

Das eingebaute Baustoffgemisch war sowohl Niederschlägen als auch intensiver Sonneneinstrahlung ausgesetzt. In Überlagerung mit den hohen Beanspruchungen aus dem Baustellenverkehr entstehen zwei Zustände (ausgetrockneter oder durchfeuchteter oberflächennaher

Datum	Maximale Tagestemperatur [°C]	Niederschlagshöhe [mm]	Relative Luftfeuchtigkeit [%]
25.09.2012	21,4	0,0	72,3
26.09.2012	23,6	7,3	73,7
27.09.2012	16,9	2,8	81,8
28.09.2012	18,9	0,0	81,3
29.09.2012	12,6	7,0	93,5
30.09.2012	15,8	0,0	88,4
01.10.2012	15,3	0,0	84,3
02.10.2012	17,3	0,0	84,5
03.10.2012	19,0	0,0	83,0
04.10.2012	18,0	0,9	85,9
05.10.2012	20,3	0,0	83,9
06.10.2012	22,7	5,5	75,5
07.10.2012	13,9	4,3	87,0
08.10.2012	13,2	1,6	84,4
09.10.2012	13,5	0,2	93,8
10.10.2012	12,0	0,0	80,8

Tab. 5: Klimadaten während der freien Bewitterung der modifizierten Kiestragschicht



Bild 25: Herstellung der Betonfahrbahndecke im Handeinbau

Bereich), die als ungünstig für die ungeschützte ToB herausgestellt werden können. Nach all diesen unterschiedlichen Belastungszuständen wies die Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht vor dem Einbau der Betonfahrbahndecke keinerlei Abweichungen von der vorgeschriebenen Ebenheit sowie der profilgerechten Lage verzeichnet werden. Visuell konnte eine zu vernachlässigende Kornumlagerung an der Oberfläche festgestellt werden, die durch das Auswaschen der Feinanteile entstanden ist.

## 5.6 Herstellung der Betonfahrbahndecke

Die Betonfahrbahndecke wurde an zwei Tagen im Handeinbau hergestellt (Bild 25). Witterungsbedingt wurde auf eine normalerweise erforderliche Anfeuchtung der Oberfläche der modifizierten Kiesstragschicht vor dem Betondeckeneinbau verzichtet.

## 5.7 Korrelation zwischen statischem und dynamischen Verformungsmodul

Zur Verifizierung der messtechnisch ermittelten dynamischen Verformungsmoduln wurden vorab diverse Versuchsreihen auf unterschiedlichen ungebundenen Schichten durchlaufen. Zur Verfügung standen ein leichtes ( $m = 10 \text{ kg}$ ) und ein mittelschweres ( $m = 15 \text{ kg}$ ) Fallgewichtsgerät. Es zeigte sich, dass insbesondere bei Schotter- und Kiesstragschichten mit dem leichten Fallgewichtsgerät keine verwertbaren Ergebnisse mehr erreicht werden können. Aufgrund dessen wurden alle Messungen an der Versuchsstrecke mit einem mittelschweren Fallgewichtsgerät durchgeführt.

Da die bestehenden Korrelationsansätze zwischen dem statischen und dem dynamischen Verformungsmodul nur als grobe Schätzwerte verstanden

werden können, wurde zunächst versucht, eine eindeutigere Beziehung zwischen den Parametern herzustellen. Hierzu wurden auf einer 30 cm dicken Prüfschicht an verschiedenen Kalibrierpunkten (KP) mehrere dynamische Verformungsmoduln ( $E_{vd,1}$  bis  $E_{vd,i}$ ) nacheinander bestimmt. Vorab wurde an einigen Punkten des Prüffeldes auch die statischen Verformungsmoduln ermittelt. Jeder Prüfzyklus umfasst 3 Kalibrierungsmessungen und 3 effektive Messungen. Hinsichtlich detaillierter Angaben zur Messung an sich wird auf (BMVBS, 2008) verwiesen. Die Prüfzyklen wurden unmittelbar hintereinander durchgeführt.

In Bild 26 sind die einzelnen dynamischen Verformungsmoduln in Abhängigkeit vom jeweiligen Prüfzyklus (1 bis 5) für alle Kalibrierpunkte (KP) dargestellt (Bilder 27 bis 29). Bei allen Punkten ist der Verformungsmodul nach dem zweiten Prüfzyklus deutlich höher als nach dem ersten. Begründet wird dies durch die Nachverdichtung des oberflächennahen Bereiches der Prüfschicht. Nach dieser anfänglichen Nachverdichtung nimmt der dynamische Verformungsmodul bis nach dem 4. Prüfzyklus weitaus weniger zu. Ab dem 5. Prüfzyklus kann wiederum eine deutliche Steigerung der Verdichtung verzeichnet werden.

Nach erfolgter Auswertung der umfangreichen Messergebnisse wird empfohlen, die Messwerte  $E_{vd,2}$  bis

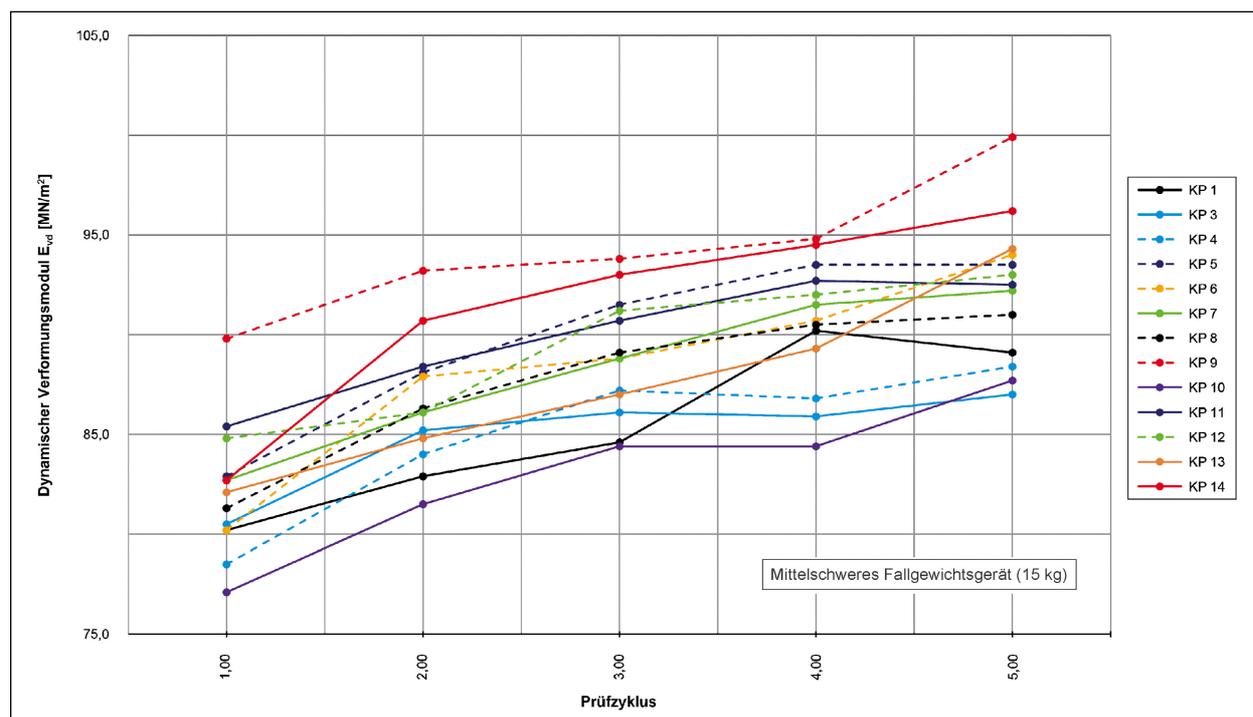


Bild 26: Dynamische Verformungsmoduln an den Prüfpunkten 1 bis 14

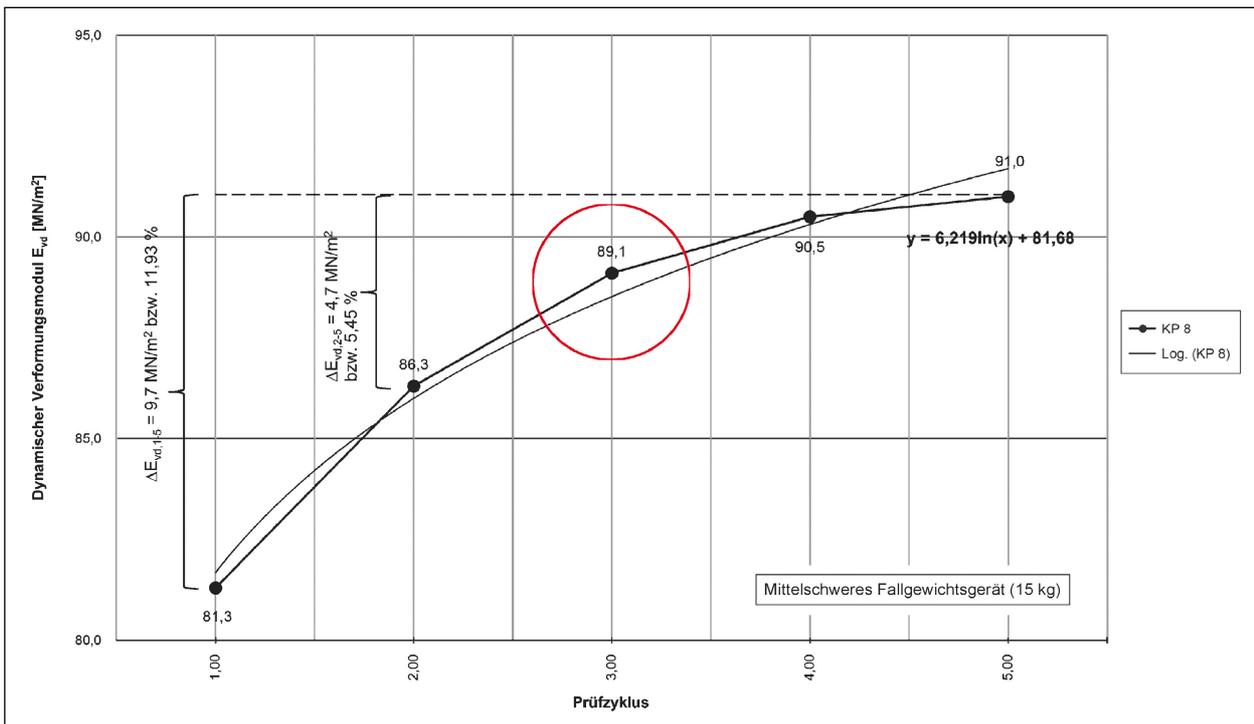


Bild 27: Dynamische Verformungsmoduln am Kalibrierpunkt 8

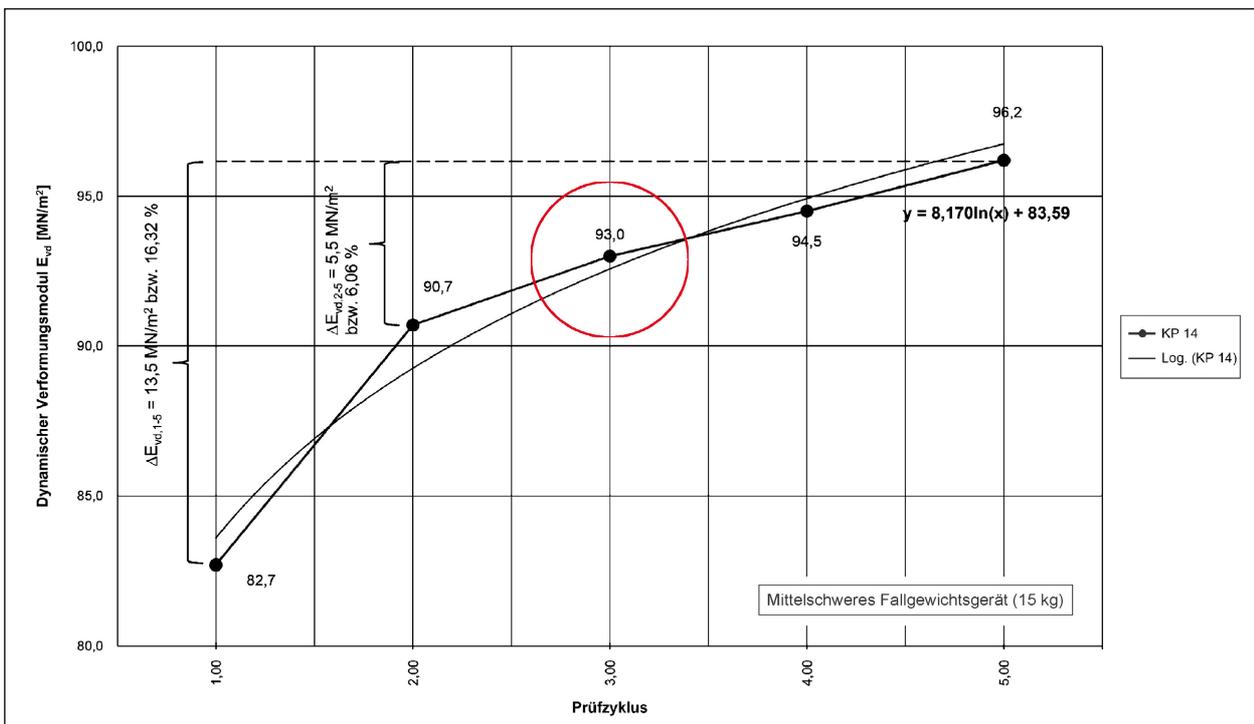


Bild 28: Dynamische Verformungsmoduln am Kalibrierpunkt 14

einschließlich  $E_{vd,4}$  zur Bewertung der Tragfähigkeit der Prüfschicht heranzuziehen. Im Rahmen der Vorversuchsreihen konnte ab dem 5. Prüfyklus eine Nachverdichtung der ungebundenen Schicht beobachtet werden. Weitergehende Messungen zeigten, dass dieser Wendepunkt vom Verdichtungsgrad der

Schicht abhängt und beispielsweise schon ab dem 3. oder erst ab dem 8. Prüfyklus eintreten kann. Zur Bewertung von Tragschichten ohne Bindemittel, die ein Verhältnis  $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$  aufweisen, kann der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd,3}$  nach dem 3. Prüfyklus herangezogen werden.

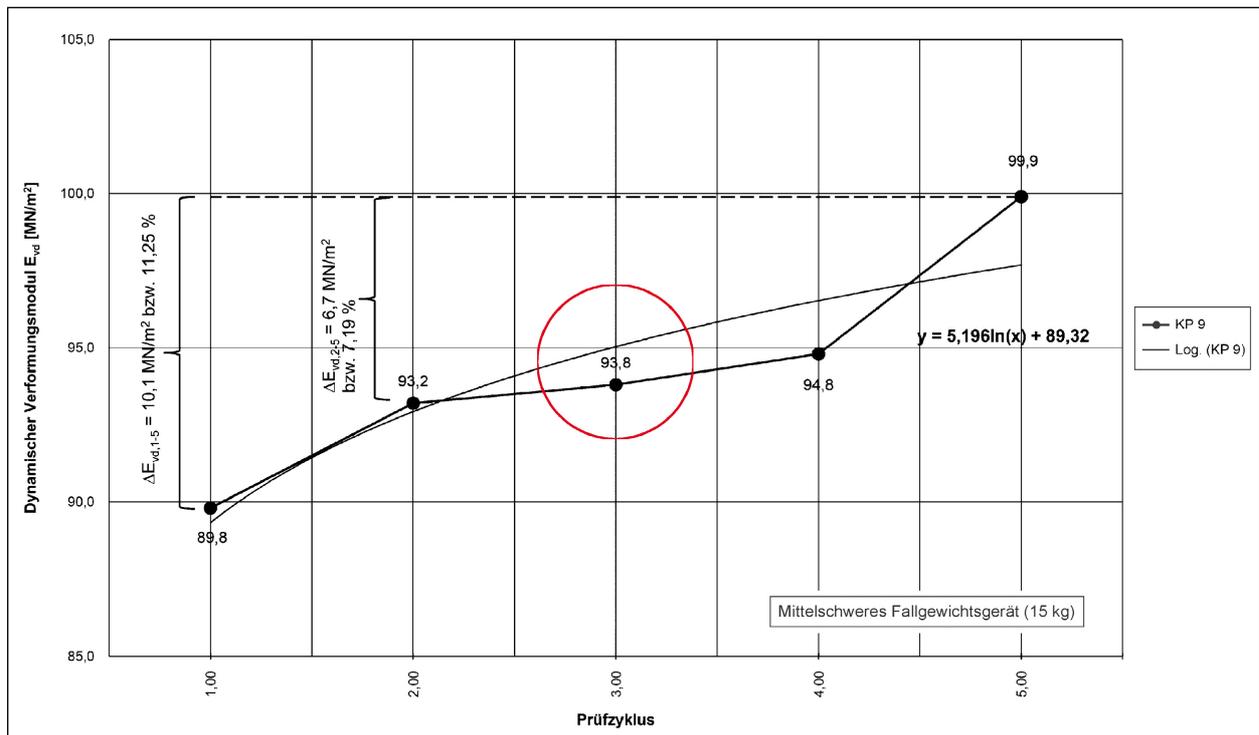


Bild 29: Dynamische Verformungsmoduln am Kalibrierpunkt 9

Die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) reglementieren den Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$ . Hierdurch wird ein Mindestverdichtungsgrad  $D_{pr,min} = 103 \%$  gewährleistet. Sofern man allein den statischen mit dem dynamischen Verformungsmodul ins Verhältnis setzt, wird der Verdichtungsgrad der ungebundenen Schicht, beschrieben über den Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$ , nicht berücksichtigt.

Auf der Grundlage der gesammelten Erkenntnisse wird ein neuer Korrelationsansatz definiert, der den Verdichtungsgrad der ungebundenen Schicht berücksichtigt:

$$\lambda_{E_{vd}} = \frac{E_{v2}/E_{v1}}{E_{vd,3}} = 0,20 \text{ bis } 0,30 \text{ [-]}$$

gültig für  $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$

$$\frac{E_{v2}}{E_{v1}} = 0,20 \text{ bis } 0,30 \cdot E_{vd,3}$$

Zu beachten ist, dass je nach Art des ungebundenen Baustoffgemisches und der Schichtdicke der Wert  $\lambda_{E_{vd}}$  zwischen 0,20 und 0,30 variiert. Messungen auf dem gewachsenen Untergrund verdeutlichen, dass dieser Korrelationsansatz nur bei unge-

bundenen Schichten nach den ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) angewandt werden darf.

Es wird empfohlen – so wurde auch bei der Versuchsstrecke verfahren – den Korrelationsansatz schichtspezifisch anhand von statischen Lastplattendruckversuchen herzustellen.

Eine eindeutige Korrelation zwischen dem statischen und dem dynamischen Verformungsmodul konnte nicht festgestellt werden. Im Rahmen der Voruntersuchungen betrug der Verhältniswert  $E_{v2}/E_{vd,3} = 0,43$  bis  $0,57$ . Dieser vereinfachte Verhältniswert  $E_{v2}/E_{vd,3} = 0,50$  hat nur unter der Voraussetzung  $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$  Gültigkeit.

## 5.8 Messungen auf dem Planum und der Frostschutzschicht

Entlang der Fahrgassenachse wurde ein Längsprofil mit Prüfpunkten generiert, siehe hierzu die Bilder 14 bis 16. Bestimmt wurden die Messwerte entlang der Längsachse sowohl im Bereich der späteren Plattenmitte, als auch im späteren Fugbereich. Die inhomogenen Anfangs- und der Endbereich der Versuchsstrecke wurden bei den Messungen vernachlässigt.

### Planum und Frostschuttschicht

Der nach den ZTV E-StB (FGSV 2009) vorgeschriebene Mindestverformungsmodul von  $E_{v2} \geq 45$  MPa auf dem Planum wurde an allen Prüfpunkten (PP) eingehalten (Tabelle 6). Es zeigte sich jedoch eine

Bau-Kilometer	$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	$E_{v2}/E_{v1}$ [-]
0,0000	49,20	91,30	1,86
0,0130	51,70	98,90	1,91
0,0260	41,30	70,40	1,70
0,0293	33,40	57,90	1,73
0,0325	35,10	62,00	1,77
0,0358	43,30	88,80	2,05
0,0390	50,60	87,90	1,74
0,0520	52,70	100,50	1,91
0,0650	58,10	98,60	1,70
0,0780	76,50	134,40	1,76
0,0910	60,10	100,30	1,67
0,0943	51,50	99,80	1,94
0,1040	50,10	86,80	1,73
0,1170	37,80	91,00	2,41
<b>Mittelwerte</b>	<b>49,39</b>	<b>90,61</b>	<b>1,85</b>

Tab. 6: Prüfwerte Planum

sehr inhomogene Prüfschicht mit Verformungsmoduln von  $E_{v2} = 57,9$  MPa bis  $E_{v2} = 134,40$  MPa.

Nach Überbauung des Planums mit einer 18 cm dicken Frostschuttschicht 0/32 ist eine rechnerische Zunahme des statischen Verformungsmoduls  $\Delta E_{v2} \approx 35$  MPa<sup>1</sup> zu erwarten. Die rechnerische Annahme deckt sich an vielen Prüfpunkten (PP) hinreichend genau mit den Messwerten (Tabelle 7).

Der Zielwert  $E_{v2} \geq 120$  MPa wurde bei einigen Prüfpunkten nicht erreicht. Dies bedeutete, dass durch die 30 cm dicke modifizierte Kiestragschicht ein weitaus höherer Fehlbetrag  $\Delta E_{v2}$  ausgeglichen werden muss, als bei einer Frostschuttschicht mit einem statischen Verformungsmodul  $E_{v2} \geq 120$  MPa. Trotz der Unterschreitung des Anforderungswertes konnte die Inhomogenität des Planums etwas reduziert werden. Während beim Planum die Prüfwerte um 76,5 MPa variierten, konnte der Wert auf der Frostschuttschicht auf 69,9 MPa reduziert werden.

<sup>1</sup> Ermittelt nach Tabelle 8 der RStO 12, Unterlage mit  $E_{v2} = 45$  MPa, Verformungsmodul auf der Oberfläche der Tragschicht ohne Bindemittel  $E_{v2} \geq 80$  MPa

Bau-Kilometer	$E_{v2}$ [MPa] Planum	$E_{v1}$ [MPa] FSS	$E_{v2}$ [MPa] FSS	$E_{v2}/E_{v1}$ [-] FSS	$\Delta E_{v2}$ [MPa] Planum → FSS
0,0000	91,30	69,90	134,80	1,93	+ 43,50
0,0130	98,90	75,60	128,30	1,70	+ 29,40
0,0260	70,40	60,40	108,70	1,80	+ 38,30
0,0293	57,90	56,00	96,60	1,73	+ 38,70
0,0325	62,00	62,10	105,30	1,70	+ 43,30
0,0358	88,80	51,10	99,60	1,95	+ 10,80
0,0390	87,90	59,50	115,50	1,94	+ 27,60
0,0520	100,50	77,00	124,10	1,61	+ 23,60
0,0650	98,60	74,60	145,80	1,95	+ 47,20
0,0780	134,40	54,00	125,30	2,32	- 9,10
0,0910	100,30	36,90	75,90	2,06	- 24,40
0,0943	99,80	52,00	105,80	2,03	+ 6,00
0,1040	86,80	47,90	106,30	2,22	+ 19,50
0,1170	91,00	35,70	81,20	2,27	- 9,80
<b>Mittelwerte</b>	<b>90,61</b>	<b>58,10</b>	<b>110,90</b>	<b>1,94</b>	<b>+ 20,33</b> <b>= 1,13 MPa/cm</b>

Tab. 7: Prüfwerte Frostschuttschicht

## 5.9 Messungen auf der modifizierten Kiestragschicht KTSuB

Von besonderer Bedeutung sind die Korrelationen auf der modifizierten Kiestragschicht, da bei den Wiederholungsmessungen (nach ca. 2 Wochen unter freier Witterung und nach ca. 1,5 Jahren unter Verkehr) aus bauablauftechnischen Gründen kein statischer Verformungsmodul bestimmt werden kann. Die Unterlage der modifizierten Kiestragschicht konnte wie folgt charakterisiert werden:

- Zielwert der Tragfähigkeiten bei 75 % der Prüfpunkte deutlich unterschritten,
- inhomogene Tragfähigkeit mit einem Streubereich von ca. 70 MPa.

Einen Tag nach dem Einbau und der anschließenden Verdichtung der modifizierten Kiestragschicht KTSuB konnten auf der Oberfläche Tragfähigkeiten von  $E_{v2} = 149,8$  bis 208,8 MPa detektiert werden (Tabelle 8). Die Anforderungen aus den ZTV SoB-StB hinsichtlich der Tragfähigkeit ( $E_{v2} \geq 150$  MPa) waren somit durchwegs erfüllt worden. Die weitere Anforderung  $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,2$  wurde lediglich bei einem Prüfpunkt mit einem Wert von 2,63 überschritten.

Die über die modifizierte Kiestragschicht KTSuB 0/32 erhaltene Zunahme der Tragfähigkeit kann im vorliegenden Fall, bezogen auf die Schichtdicke, mit 1,35 bis 3,83 MPa/cm beziffert werden.

Anders als bei den weiteren Prüfschichten (Planum und Frostschutzschicht) wurde bei der modifizierten Kiestragschicht detailliert die Korrelation zwischen statischem und dynamischem Verformungsmodul an über 80 Prüfpunkten bestimmt. Anhand dieser Korrelation werden die dynamischen Prüfwerte aus den Wiederholungsmessungen bestimmt.

Nach ca. zwei Wochen unter freier Witterung und unter Baustellenverkehr wurden unmittelbar vor dem Einbau der Betonfahrbahndecke Wiederholungsmessungen auf der Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht durchgeführt (Tabelle 9). Hierbei wurde auf statische Lastplattendruckversuche verzichtet und stattdessen nur dynamische Prüfwerte ermittelt. Zur Korrelation wurden die jeweiligen Verhältniswerte aus Tabelle 10 herangezogen.

Anhand der Tabelle 11 kann die Abnahme der Tragfähigkeit nach zwei Wochen unter freier Witterung und Baustellenverkehr abgelesen werden. Bei allen Prüfpunkten wurden auch vor dem

Bau-Kilometer	$E_{v2}$ [MPa] Planum	$E_{v2}$ [MPa] FSS	$E_{v1}$ [MPa] KTSuB	$E_{v2}$ [MPa] KTSuB	$E_{v2}/E_{v1}$ [-] KTSuB	$\Delta E_{v2}$ [MPa] FSS → KTSuB
0,0000	91,30	134,80	-	-	-	-
0,0130	98,90	128,30	-	-	-	-
0,0260	70,40	108,70	76,00	<b>167,60</b>	2,21	+ 58,90
0,0293	57,90	96,60	74,20	<b>149,80</b> $\approx 150,00$	2,02	+ 53,20
0,0325	62,00	105,30	86,20	<b>157,00</b>	1,82	+ 51,70
0,0358	88,80	99,60	91,30	<b>181,40</b>	1,99	+ 81,80
0,0390	87,90	115,50	80,00	<b>155,90</b>	1,95	+ 40,40 = 1,35 MPa/cm
0,0520	100,50	124,10	76,80	<b>167,40</b>	2,18	+ 43,30
0,0650	98,60	145,80	79,50	<b>208,80</b>	2,63	+ 63,00
0,0780	134,40	125,30	87,20	<b>186,60</b>	2,14	+ 61,30
0,0910	100,30	75,90	82,30	<b>153,50</b>	1,87	+ 77,60
0,0943	99,80	105,80	107,60	<b>207,30</b>	1,93	+ 101,50 = 3,38 MPa/cm
0,1040	86,80	106,30	76,70	<b>161,10</b>	2,10	+ 54,80
0,1170	91,00	81,20	86,00	<b>181,90</b>	2,12	+ 100,70
<b>Mittelwerte</b>	<b>90,61</b>	<b>110,90</b>	<b>83,70</b>	<b>173,20</b>	<b>2,08</b>	<b>+ 65,68</b> <b>= 2,19 MPa/cm</b>

Tab. 8: Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht; 1 Tag nach Herstellung (statischer LPDV)

Bau-Kilometer	$E_{v2}$ [MPa]	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{vd,3}$ [MPa]	$E_{vd,3}/E_{v2}$	$E_{v2}/E_{v1}$ zu $E_{vd,3}$
0,0260	<b>172,00</b>	2,26	90,00	0,52	0,025
0,0293	<b>154,50</b>	2,08	88,80	0,57	0,023
0,0325	<b>162,40</b>	1,88	90,20	0,56	0,021
0,0358	<b>170,30</b>	1,87	85,90	0,50	0,022
0,0390	<b>147,80</b>	1,85	84,20	0,57	0,022
0,0520	<b>157,40</b>	2,05	83,50	0,53	0,025
0,0650	<b>180,70</b>	2,27	77,10	0,43	0,025
0,0780	<b>169,90</b>	1,95	85,40	0,50	0,023
0,0910	<b>152,80</b>	1,86	84,00	0,55	0,022
0,0943	<b>208,00</b>	1,93	91,00	0,44	0,021
0,1040	<b>153,70</b>	2,00	87,00	0,57	0,023
0,1170	<b>179,80</b>	2,09	86,00	0,48	0,024
<b>Mittelwerte</b>	<b>167,40</b>	<b>2,01</b>	<b>86,14</b>	<b>0,52</b>	<b>0,023</b>

Die korrelierten Werte sind grau hinterlegt

Tab. 9: Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht, 2 Wochen nach Einbau (dynamischer LPDV)

Bau-Kilometer	$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{vd,3}$ [MPa]	$E_{vd,3}/E_{v2}$	$E_{v2}/E_{v1}$ zu $E_{vd,3}$
0,0260	76,0	<b>167,6</b>	2,21	87,7	0,52	0,025
0,0293	74,2	<b>149,8</b>	2,02	86,1	0,57	0,023
0,0325	86,2	<b>157,0</b>	1,82	87,2	0,56	0,021
0,0358	91,3	<b>181,4</b>	1,99	91,5	0,50	0,022
0,0390	80,0	<b>155,9</b>	1,95	88,8	0,57	0,022
0,0520	76,8	<b>167,4</b>	2,18	88,8	0,53	0,025
0,0650	79,5	<b>208,8</b>	2,63	89,1	0,43	0,025
0,0780	87,2	<b>186,6</b>	2,14	93,8	0,50	0,023
0,0910	82,3	<b>153,5</b>	1,87	84,4	0,55	0,022
0,0943	107,6	<b>207,3</b>	1,93	90,7	0,44	0,021
0,1040	76,7	<b>161,1</b>	2,10	91,2	0,57	0,023
0,1170	86,0	<b>181,9</b>	2,12	87,0	0,48	0,024
<b>Mittelwerte</b>	<b>83,7</b>	<b>173,2</b>	<b>2,08</b>	<b>88,9</b>	<b>0,52</b>	<b>0,023</b>

Tab. 10: Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht; 1 Tag nach Herstellung (dynamischer LPDV)

Bau-Kilometer	Erstmessung			Zweitmessung		
	$E_{v1}$ [MPa]	$E_{v2}$ [MPa]	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{v2}$ [MPa]	$E_{v2}/E_{v1}$	Differenz
0,0260	76,0	167,6	2,21	172,0	2,26	+ 5,0 MPa (+ 3,0 %)
0,0293	74,2	149,8	2,02	154,5	2,08	+ 4,7 MPa (+ 3,1 %)
0,0325	86,2	157,0	1,82	162,4	1,88	+ 5,4 MPa (+ 3,4 %)
0,0358	91,3	181,4	1,99	170,3	1,87	- 11,1 MPa (- 6,1 %)
0,0390	80,0	155,9	1,95	147,8	1,85	- 8,1 MPa (- 5,2 %)
0,0520	76,8	167,4	2,18	157,4	2,05	- 10,0 MPa (- 6,0 %)
0,0650	79,5	208,8	2,63	180,7	2,27	- 28,1 MPa (- 13,5 %)
0,0780	87,2	186,6	2,14	169,9	1,95	- 16,7 MPa (- 8,9 %)
0,0910	82,3	153,5	1,87	152,8	1,86	+/- 0 MPa (+/- 0 %)
0,0943	107,6	207,3	1,93	208,0	1,93	+/- 0 MPa (+/- 0 %)
0,1040	76,7	161,1	2,10	153,7	2,00	- 7,4 MPa (- 4,6 %)
0,1170	86,0	181,9	2,12	179,8	2,09	+/- 0 MPa (+/- 0 %)
<b>Mittelwerte</b>	-	<b>173,20</b>	-	<b>167,40</b>	-	<b>- 5,80 MPa (- 3,35 %)</b>

Die korrelierten Werte sind grau hinterlegt

Tab. 11: Vergleich Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht, 1 Tag nach Einbau und 2 Wochen nach Einbau

Betondeckeneinbau die geforderte Tragfähigkeit von  $E_{v2} \geq 150$  MPa eingehalten. Grundsätzlich begründet kann die Abnahme durch die freie Witterung und den Baustellenverkehr werden. In Bild 30 sind die einzelnen Werte nochmals grafisch aufgetragen.

Die Tragfähigkeitsmessungen vor dem Betondeckeneinbau verifizierten die Erkenntnisse aus den Prüfstands- und Großprüfstandsversuchen. In Summe kann von einer gleichbleibenden Tragfähigkeit der modifizierten Kiestragschichten KTSuB 0/32 mm nach freier Witterung und Baustellenverkehr ausgegangen werden. Die in situ festgestellten plastischen Einsenkungen auf der Tragschichtoberfläche konnten ebenfalls vernachlässigt werden und verifizierten die Ergebnisse aus den Prüf- bzw. Großprüfstandsversuchen. In Bild 31 ist nochmals der Verlauf der statischen Verformungsmoduln  $E_{v2}$

$E_{v2,min}$ :	149,9 MPa (nach 1 Tag)
$E_{v2,max}$ :	208,8 MPa (nach 1 Tag)
Streubereich:	58,9 MPa (nach 1 Tag)
$E_{v2,min}$ :	147,8 MPa (nach 14 Tagen)
$E_{v2,max}$ :	208,0 MPa (nach 14 Tagen)
Streubereich:	60,2 MPa (nach 14 Tagen)

Tab. 12: Vergleich Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht, 1 Tag nach Einbau und nach ca. 2 Wochen unter Witterung und Baustellenverkehr

im Bereich der beiden wieder auszubauenden Einzelfahrbahnplatten (Prüffeld) dargestellt. In diesem Bereich wurden nach ca. zweijähriger Liegedauer die Betonfahrbahnplatten abgenommen (Tabelle 12 sowie Bild 32).

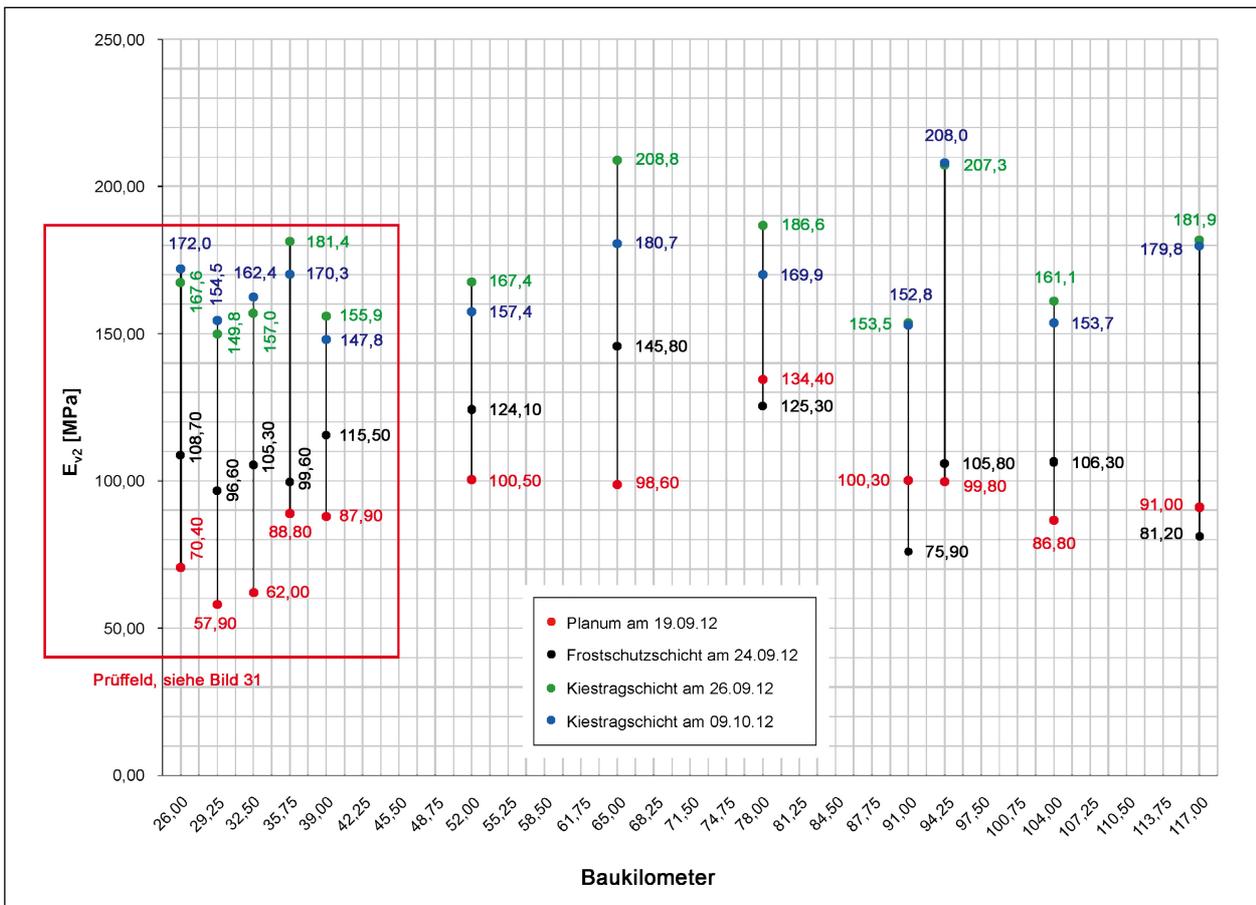


Bild 30: Statische Verformungsmoduln auf den Prüfschichten entlang der Fahrgassenachse, siehe ebenso Anlage B

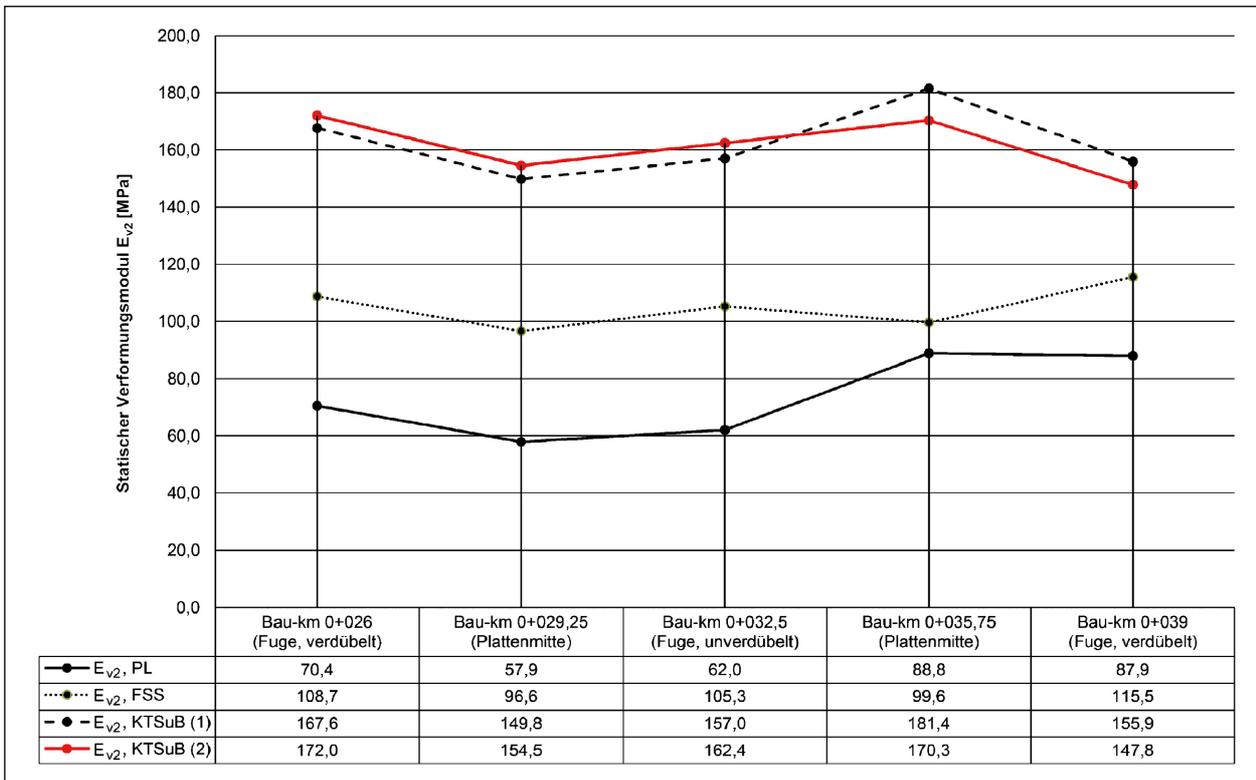


Bild 31: Längsschnitt (Fahrgassenachse, Ausschnitt) mit Auftragung der statischen Verformungsmoduln  $E_{v2}$  [MPa] im Bereich der beiden nach ca. 1,5-jähriger Liegedauer wieder auszubauenen Einzelfahrbahnplatten (Prüffeld)

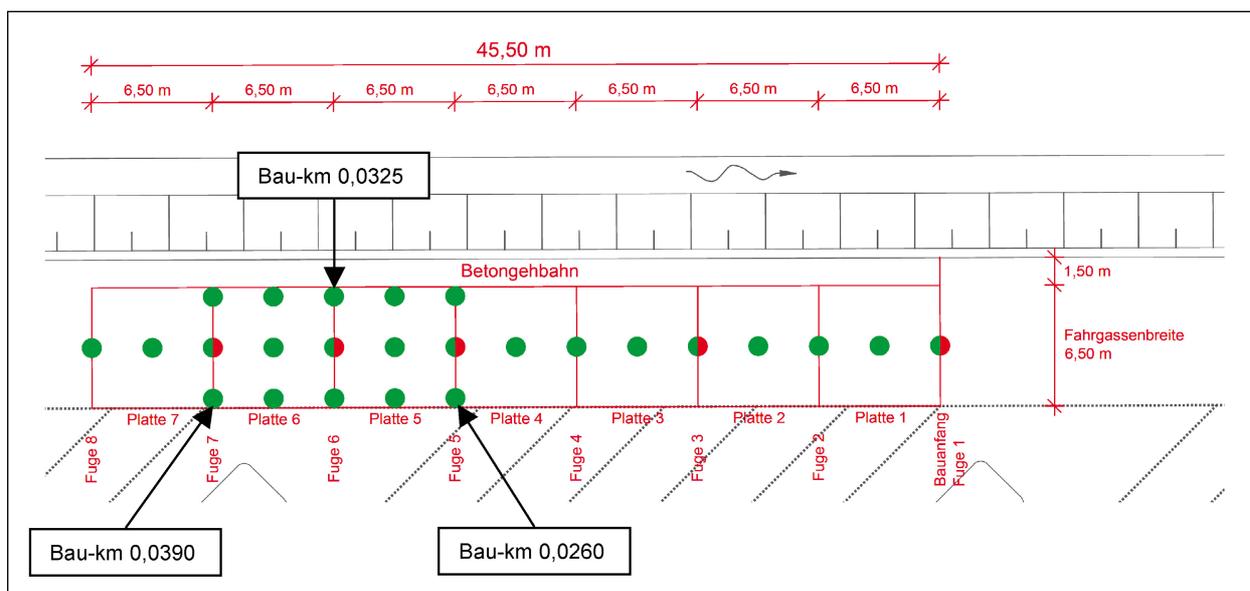


Bild 32: Draufsicht des Prüffeldes zwischen Bau-km 0,0260 und 0,0390

## 6 Wiederholungsmessung

Im Mai 2015 erfolgten nach 32-monatiger Liegedauer die Wiederholungsmessungen. Die bis zur Wiederholungsmessung erfolgten Überrollungen der unverdübelten Querscheinfuge können grob mit 350.000 Fahrzeugen (ca. 1 Mio. äquivalente 10t-Achsen) abgeschätzt werden. Aufgrund der Weitläufigkeit der Rastanlage und der Lage der Versuchsstrecke am Anfang kann die Fahrgeschwindigkeit der Schwerlastfahrzeuge mit ca. 40 bis 50 km/h abgeschätzt werden.

Für die Wiederholungsmessungen wurden zwei Einzelfahrbahnplatten der Lkw-Fahrgasse abgehoben (Bild 33). Die Querscheinfuge zwischen den beiden Platten wurde bereits beim Bau im Herbst 2012 unverdübelt und ohne Fugenverguss ausgeführt. Das Ziel bestand darin, eine erhöhte Relativbewegung der beiden Plattenränder und damit verbunden eine verstärkte Erosionswirkung durch eingedrungenes Oberflächenwasser zu induzieren.

Die Schwierigkeit im Zuge der Wiederholungsmessungen bestand in dem – für die Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht – möglichst minimal-invasiven Ausbau der beiden Einzelfahrbahnplatten. In Absprache mit der ausführenden Firma wurde beschlossen, die beiden Platten durch Schnitte in möglichst kleine Segmente zu zerteilen (Bild 34) und diese dann mit einem Vakuumhebergerät zu entnehmen (Bild 35).

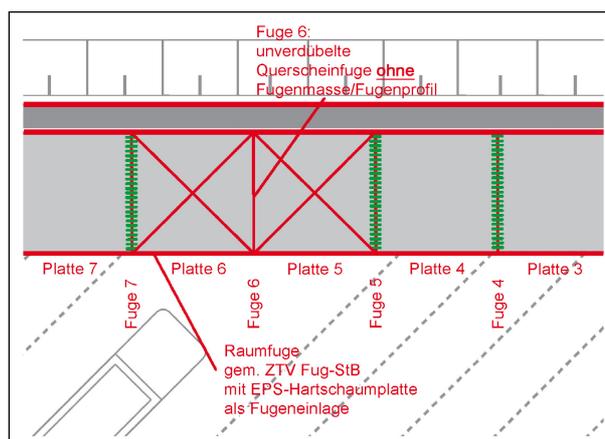


Bild 33: Ausführungsplanung mit den beiden nach zweijähriger Liegedauer abzuhebenden Einzelfahrbahnplatten der Fahrgasse



Bild 34: Segmentierte Einzelfahrbahnplatten der Versuchsstrecke



Bild 35: Vakuumhebergerät



Bild 38: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht KTSuB im Fugenbereich, die Entnahmestellen sind rot markiert



Bild 36: Anhaftendes Baustoffgemisch an der Unterseite der Plattensegmente



Bild 37: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht KTSuB nach dem Abheben des ersten Plattensegmentes

Während des Abhebens der Plattensegmente wurde deutlich, dass Teile der modifizierten Kiestragschicht an der Unterseite anhafteten, siehe Bild 36. Bei der Beurteilung der Umlagerungsbeständigkeit der KTSuB (Sieblinie) ist dieser Umstand zu berücksichtigen (Bild 37).

Visuell konnte zunächst keine Umlagerung oder sichtbare Erosion im freigelegten Fugenbereich detektiert werden. Zur widerspruchsfreien Feststellung wurden im Fugenbereich 4 Proben aus dem oberflächennahen Bereich entnommen (Bild 38) und zu einer Mischprobe vermengt. Da, bedingt durch das Anhaften von Gesteinskörnungen, eine Korrelation zur Sieblinienanalyse aus dem Einbau nur bedingt möglich ist, wurden Proben aus dem ungestörten Feldbereich unterhalb der Plattensegmente entnommen.

In Tabelle 13 sind die Korngrößenverteilungen zweier Mischproben dargestellt. Die Ausbauproben 1 bis 4 aus dem Fugenbereich wurden – ebenso wie die Ausbauproben 5 und 6 aus dem Feldbereich – zu Sammelp Proben vereint und homogenisiert. Wie auch im Prüfbericht Nr. 52-15-0484-02 (siehe Anlage C) des Centrum Baustoffe und Materialprüfung cbm der TU München deutlich erwähnt wird, ist ein Abgleich mit dem Material vor dem Einbau aufgrund der an der Betonfahrbahndecke anhaftenden Gesteinskörnungen nicht möglich. Aufgrund dessen wurde neben den Proben aus dem Fugenbereich auch Material aus dem ungestörten Feldbereich entnommen. In Tabelle 13 sind die beiden Korngrößenverteilungen des Prüfberichtes Nr.: 52-15-0484-02 gegenübergestellt.

Der Sandanteil ist im Fugenbereich um 3,5 M.-% höher als im ungestörten Feldbereich. Ebenso sind die Fraktionen < 2 mm im Fugenbereich um 1,5 bis 3,1 M.-% geringfügig höher. Abschließend kann hinsichtlich der Korngrößenverteilung festgehalten werden, dass eine Kornumlagerung des Materials unmittelbar unterhalb der Betonfahrbahndecke, sowohl im Fugen- als auch im Feldbereich, nicht stattgefunden hat. Die erhöhten Feinanteile im Fugenbereich

Probe 1-4 (Material aus dem Bereich der offenen Fuge)		
Prüfsieb [mm]	Rückstand [M.-%]	Durchgang [M.-%]
45	0,0	100,0
31,5	3,4	96,6
16	22,1	74,5
8	20,3	54,2
4	10,1	44,1
2 *	7,7	36,4
1	11,3	25,1
0,5	7,0	18,1
0,25	4,9	13,2
0,125	3,9	9,3
0,063	2,5	6,8
< 0,063		

Probe 5-6 (Material aus dem Bereich abseits der offenen Fuge)		
Prüfsieb [mm]	Rückstand [M.-%]	Durchgang [M.-%]
45	0,0	100,0
31,5	0,7	99,3
16	23,9	75,4
8	23,3	52,1
4	11,0	41,1
2 *	8,2	32,9
1	10,9	22,0
0,5	6,4	15,6
0,25	4,4	11,2
0,125	3,5	7,7
0,063	2,4	5,3
< 0,063		

Tab. 13: Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen aus Prüfbericht Nr.: 52-15-0484-02 des Centrum Baustoffe und Materialprüfung cbm der TU München

wurden durch die unvergossene Querscheinfuge eingebracht, siehe hierzu Bilder 39 und 40.

Additiv wurden auf der Oberfläche der freigelegten modifizierten Kiestragschicht dynamische Verformungsmoduln  $E_{vd}$  [MPa] bestimmt. Als Korrelationsansätze wurden die Mittelwerte aus Tabelle 9 genommen. Die Prüfpunkte (PP) A bis P sind zufällig gewählte Punkte der freigelegten Oberfläche aus dem Fugenbereich (A bis D) und dem Feldbereich (E bis P), siehe Tabelle 14. Es zeigte sich, dass der Eintrag von Feinanteilen im Bereich der unverdübelt und unvergossenen Querscheinfuge die Tragfähigkeit erhöht hat. Es ist zu vermuten, dass



Bild 39: Feinanteile im unverdübelt und unvergossenen Fugenbereich. Anmerkung: Die Querscheinfuge wurde zum Abheben der Plattensegmente nicht nachgeschnitten

PP	$E_{v2}$ [MPa]	$E_{vd,3}$ [MPa]	$E_{vd,3}/E_{v2}$ Fixwert	$E_{v2}/E_{v1}$ zu $E_{vd,3}$ Fixwert
A*	202,3	105,5	0,52	0,023
B*	174,0	90,5	0,52	0,023
C*	200,4	104,2	0,52	0,023
D*	183,3	95,3	0,52	0,023
E	188,1	97,8	0,52	0,023
F	196,2	102,0	0,52	0,023
G	138,5	72,0	0,52	0,023
H	167,7	87,2	0,52	0,023
I	210,0	109,2	0,52	0,023
J	117,1	60,9	0,52	0,023
K	176,3	91,7	0,52	0,023
L	175,4	91,2	0,52	0,023
M	145,6	75,7	0,52	0,023
N	159,4	82,9	0,52	0,023
O	177,9	92,5	0,52	0,023
P	173,5	90,2	0,52	0,023

Die korrelierten Werte sind grau hinterlegt  
\* Messwert aus Fugenbereich

Tab. 14: Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht, 32 Monate Liegedauer

infolge der geringen Überrollungsgeschwindigkeit von 40 bis 50 km/h der Pumpeffekt im Bereich der Querscheinfuge nicht groß genug ist, um diese Feinanteile wieder abzutragen.

Die dynamischen Lastplattendruckversuche zeigten, dass auch im Fugenbereich (offene Querscheinfuge ohne Verdübelung und Fugenmasse)

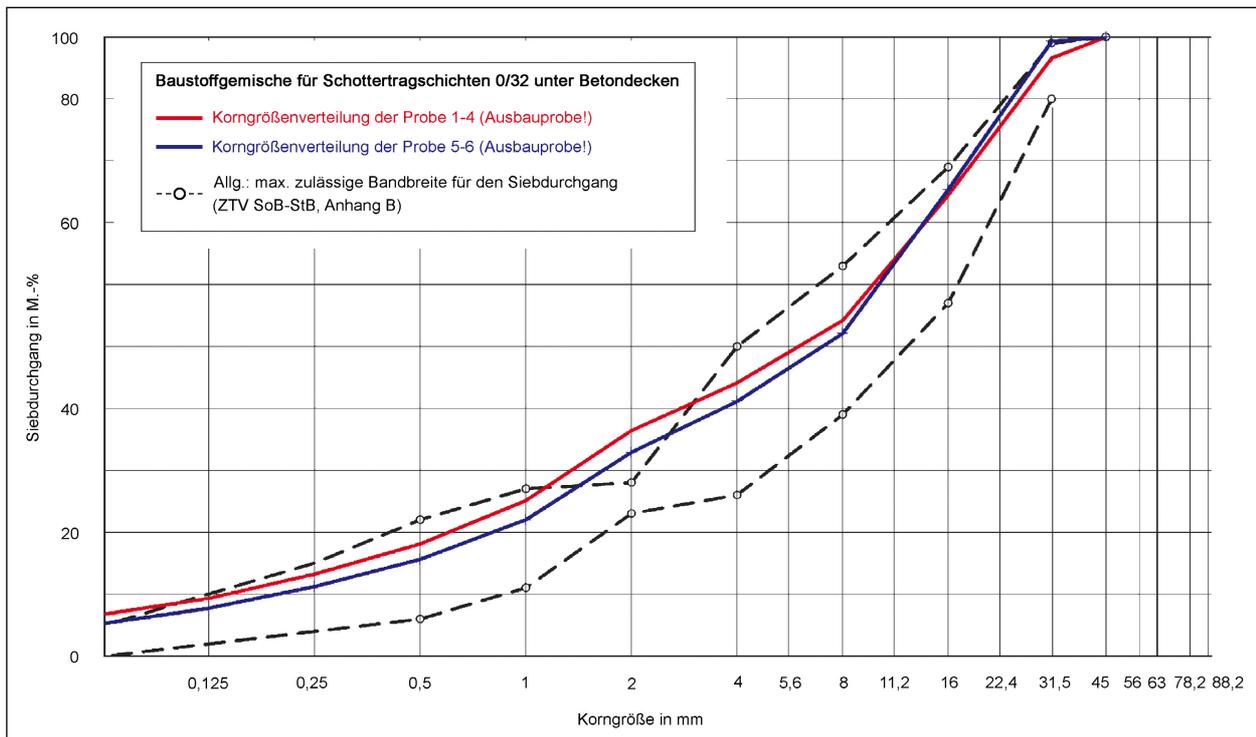


Bild 40: Korngrößenverteilung des Baustoffgemisches KTSuB 0/32 mm, entnommen im Bereich der unverdübelten und unvergossenen Querfuge (rot) und im ungestörten Feldbereich (blau)

durch eingedrungenes Wasser keine Abnahme der Tragfähigkeit – im Vergleich zum Feldbereich – induziert wurde. Die Tragfähigkeit kann, nach 32-monatiger Liegedauer und unter der beschriebenen Verkehrsbeanspruchung, als gleichbleibend und gleichmäßig beurteilt werden.

Der Infiltrationsbeiwert wurde nach den TP Gestein-StB Teil 8.3.2 (FGSV 2012b) durchgeführt. Die beiden Messwerte betragen  $1,6 \cdot 10^{-5}$  [m/sec] bzw.  $1,8 \cdot 10^{-5}$  [m/sec] bei einer Wassertemperatur von 18 °C. Die beiden Werte unterschritten somit die Forderung aus dem 2. Technischen Basisdatenblatt von  $5,0 \cdot 10^{-5}$  [m/sec].

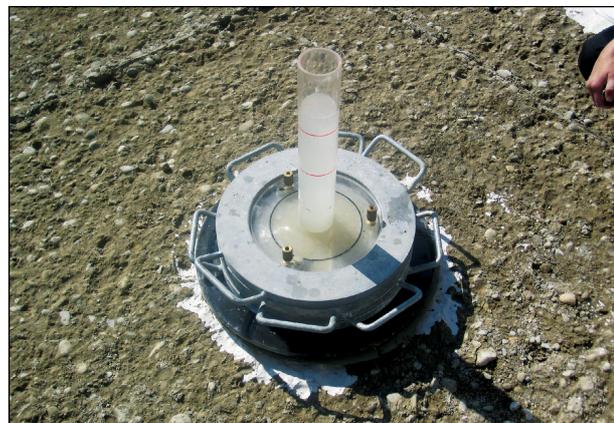


Bild 41: Messung der Wasserdurchlässigkeit

## 7 Bewertung der Forschungsergebnisse und weiteres Vorgehen

An der modifizierten Kiestragschicht KTSuB 0/32 mm, unterhalb der Betonfahrbahndecke an der Tank- und Rastanlage Köschinger Forst an der BAB 9, konnten – nach 32-monatiger Liegedauer der Verkehrsfläche – keine wesentlichen Veränderungen der für eine KTSuB relevanten Performanceparameter festgestellt werden. Die in den ZTV SoB-StB (FGSV 2007a) und den RStO (FGSV 2001/

FGSV 2012a) geforderten Mindestwerte der Tragfähigkeit (statischer Verformungsmodul und Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$ ) konnten trotz einer wenig tragfähigen Unterlage an allen untersuchten Prüfpunkten eingehalten werden. Des Weiteren konnten die Bedenken hinsichtlich der Erosions- und Umlagerungsbeständigkeit im Fugenbereich beim vorliegenden relativ langsam fahrenden Schwerlastverkehr relativiert werden. Die an der Oberfläche der freigelegten modifizierten Kiestragschicht ermittelten Wasserdurchlässigkeiten (Bild 41) unterschritten jedoch den als Sollvorgabe definierten Wert von  $5,0 \cdot 10^{-5}$  [m/sec]. Trotz anhaltender Niederschlagsereignisse vor der Wiederholungs-

messung (Ausbau zweier Einzelfahrbahnplatten) konnte der Feuchtegehalt des Baustoffgemisches als lediglich erdfeucht deklariert werden. Es wird empfohlen, in einem weiteren Schritt zunächst ein FGSV-Wissensdokument durch einen Arbeitskreis erarbeiten zu lassen, in dem die Erfahrungen aus dem Dosieren, dem Mischen, dem Transport und dem Einbau des Baustoffgemisches 0/32 mm niedergeschrieben werden. Insbesondere die Besonderheiten hinsichtlich des optimalen Wassergehaltes beim Verdichten und letztendlich das erforderliche Verdichtungsgerät an sich sollten hierbei beschrieben werden. Das Wissensdokument dient dazu, Erfahrungen mit der modifizierten Kiestragschicht bei Realprojekten zu sammeln. Weiterhin empfehlen wir, einen größeren und stärker belasteten Betonfahrbahnabschnitt – mit höherer Geschwindigkeit des Schwerlastverkehrs – auf einer modifizierten Kiestragschicht zur weiteren Erfahrungssammlung zu untersuchen.

## Literatur

- (BMVBS 2008): Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Dynamischer Plattendruckversuch mit einem mittelschweren Fallgewichtsgesetz; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1005 (2008)
- (DIN 13286-2): Deutsches Institut für Normung (DIN): Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz-Trockendichte und des Wassergehaltes. Proctorversuch (DIN EN 13286-2:2012), Fassung 2012
- (DIN 13286-47): Deutsches Institut für Normung (DIN): Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California bearing ratio), des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes (DIN EN 13286-47:2012), Fassung 2012
- (DIN 18134): Deutsches Institut für Normung (DIN): Baugrund – Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch (DIN 18134:2001-09), Fassung 2012
- (DIN 18130-1): Deutsches Institut für Normung (DIN): Baugrund – Untersuchungen von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Teil 1: Laborversuche (DIN 18130-1:1998-05), Fassung 1998
- (FGSV 2001): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO 01); Ausgabe 2001
- (FGSV 2007a): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (ZTV SoB-StB 07); Ausgabe 2004/Fassung 2007
- (FGSV 2007b): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zu Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB 07); Ausgabe 2004/Fassung 2007
- (FGSV 2007c): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton-StB 07); Ausgabe 2007
- (FGSV 2009): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 09); Ausgabe 2009
- (FGSV 2012a): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12); Ausgabe 2012
- (FGSV 2012b): Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (Hrsg.): Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 8.3.2: Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem modifizierten Standrohr-Infiltrometer – in-situ-Verfahren, (TP Gestein-StB); Ausgabe 2012
- LEYKAUF, BIRMANN (2004): Lehrstuhl und Prüffamt für Bau von Landverkehrswegen. Forschungsbericht Nr. 2149 vom 07.10.2004; Untersuchungen zur Standfestigkeit von Kies/Schottertragschichten, im Auftrag des Industrie-

verbandes Steine und Erden Baden-Württemberg ISTE e. V.

LEYKAUF, BIRMANN, WELLER (2007): Lehrstuhl und Prüfamts für Bau von Landverkehrswegen, Forschungsbericht Nr. 2372 vom 12.11.2007; Dicke Betondecken auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB), im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)

## Bilder

- Bild 1: Standardisierte Betonbauweisen höherer Beanspruchungsklassen mit Tragschichten ohne Bindemittel, aus (FGSV 2012a)
- Bild 2: Standardisierte Asphaltbauweisen mit Tragschichten ohne Bindemittel, aus (FGSV 2012a)
- Bild 3: Ausgangssieblinie (rot) des korngestuftes Baustoffgemisches 0/32 sowie Sieblinienbereiche der Baustoffgemische 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecken STSuB nach den TL SoB-StB (1. Technisches Datenblatt)
- Bild 4: Dosierung und Mischung des Baustoffgemisches 0/32 mittels Radlader
- Bild 5: Einbau- und Verdichtungsversuche (Unimog mit Trenkle-Platten)
- Bild 6: Hohe Standfestigkeit des eingebauten und verdichteten Baustoffgemisches
- Bild 7: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht direkt nach dem Verdichten
- Bild 8: Sieblinie des modifizierten Baustoffgemisches 0/32 (rot) sowie Sieblinienbereiche der Baustoffgemische 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecken nach den TL SoB-StB (2. Technisches Datenblatt)
- Bild 9: Übersichtslageplan T+R – Anlage Köschinger Forst West mit Versuchsstrecke (rot); Quelle: Freistaat Bayern – Autobahndirektion Südbayern
- Bild 10: Lageplan der Versuchsstrecke (rot)
- Bild 11: Regelaufbau der Versuchsstrecke
- Bild 12: Angrenzende Lkw-Abstellflächen in Betonbauweise, Raumfugeneinlage
- Bild 13: Querschnitt der Fahrgasse in Asphaltbauweise; Quelle: Freistaat Bayern – Autobahndirektion Südbayern
- Bild 14: Versuchsstrecke von Bau-km 0,000 (Bauanfang) bis 0,0455 mit Prüfpunkten (rot =  $E_{v2}$ , grün =  $E_{vd}$ ); die beiden wieder auszubauenden Platten 5 und 6 ohne Verdübelung und Fugenmasse sind mit blauen Pfeilen hervorgehoben
- Bild 15: Versuchsstrecke von Bau-km 0,0455 bis 0,091 mit Prüfpunkten (rot =  $E_{v2}$ , grün =  $E_{vd}$ )
- Bild 16: Versuchsstrecke von Bau-km 0,091 bis 0,143 (Bauende) mit Prüfpunkten (rot =  $E_{v2}$ , grün =  $E_{vd}$ )
- Bild 17: Einbau des modifizierten Baustoffgemisches mit einem Grader (Langmahdverfahren, links)
- Bild 18: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht nach dem Gradereinbau und vor dem Verdichten (rechts)
- Bild 19: Abkippen des modifizierten Baustoffgemisches im Baufeld
- Bild 20: Verdichten mit Plattenverdichtern unter Wasserzugabe
- Bild 21: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht direkt nach dem Einbau
- Bild 22: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht nach 16 Tagen freier Witterung und Baustellenverkehr
- Bild 23: Herstellung der Lkw-Abstellfläche in Betonbauweise unmittelbar neben der Versuchsstrecke; Anlieferung des Betons über die Kiestragschicht
- Bild 24: Baustellenverkehr im Bereich der Versuchsstrecke; zu sehen sind auch die Prüfpunkte im Bereich der beiden wieder auszubauenden Einzelfahrbahnplatten
- Bild 25: Herstellung der Betonfahrbahndecke im Handeinbau
- Bild 26: Dynamische Verformungsmoduln an den Prüfpunkten 1 bis 14

- Bild 27: Dynamische Verformungsmoduln am Kalibrierpunkt 8
- Bild 28: Dynamische Verformungsmoduln am Kalibrierpunkt 14
- Bild 29: Dynamische Verformungsmoduln am Kalibrierpunkt 9
- Bild 30: Statische Verformungsmoduln auf den Prüfschichten entlang der Fahrgassenachse, siehe ebenso Anlage B
- Bild 31: Längsschnitt (Fahrgassenachse, Ausschnitt) mit Auftragung der statischen Verformungsmoduln  $E_{v2}$  [MPa] im Bereich der beiden nach ca. 1,5-jähriger Liegedauer wieder auszubauenden Einzelfahrbahnplatten (Prüffeld)
- Bild 32: Draufsicht des Prüffeldes zwischen Baukm 0,0260 und 0,0390
- Bild 33: Ausführungsplanung mit den beiden nach zweijähriger Liegedauer abzuhebenden Einzelfahrbahnplatten der Fahrgasse
- Bild 34: Segmentierte Einzelfahrbahnplatten der Versuchsstrecke
- Bild 35: Vakuumhebergerät
- Bild 36: Anhaftendes Baustoffgemisch an der Unterseite der Plattensegmente
- Bild 37: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht KTSuB nach dem Abheben des ersten Plattensegmentes
- Bild 38: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht KTSuB im Fugenbereich, die Entnahmestellen sind rot markiert
- Bild 39: Feianteile im unverdübelten und unvergossenen Fugenbereich; Anmerkung: Die Querscheinfuge wurde zum Abheben der Plattensegmente nicht nachgeschnitten
- Bild 40: Korngrößenverteilung des Baustoffgemisches KTSuB 0/32 mm, entnommen im Bereich der unverdübelten und unvergossenen Querscheinfuge (rot) und im ungestörten Feldbereich (blau)
- Bild 41: Messung der Wasserdurchlässigkeit

## Tabellen

- Tab. 1: Untersuchungsalgorithmus „Standfestigkeit von Tragschichten ohne Bindemittel ohne Überbauung im Prüfstand“ der TU München
- Tab. 2: Variation der statischen Verformungsmoduln auf den Oberflächen der Prüfschichten vor, während und nach den Untersuchungen
- Tab. 3: Ausgangskorngrößenverteilung des modifiziertes Baustoffgemisches 0/32 (1. Technisches Datenblatt)
- Tab. 4: Korngrößenverteilung des modifiziertes Baustoffgemisch KTSuB 0/32
- Tab. 5: Klimadaten während der freien Bewitterung der modifizierten Kiestragschicht
- Tab. 6: Prüfwerte Planum
- Tab. 7: Prüfwerte Frostschutzschicht
- Tab. 8: Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht; 1 Tag nach Herstellung (statischer LPDV)
- Tab. 9: Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht; 1 Tag nach Herstellung (dynamischer LPDV)
- Tab. 10: Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht, 2 Wochen nach Einbau (dynamischer LPDV)
- Tab. 11: Vergleich Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht, 1 Tag nach Einbau und 2 Wochen nach Einbau
- Tab. 12: Vergleich Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht, 1 Tag nach Einbau und nach ca. 2 Wochen unter Witterung und Baustellenverkehr
- Tab. 13: Gegenüberstellung der Korngrößenverteilungen aus Prüfbericht Nr.: 52-15-0484-02 des Centrum Baustoffe und Materialprüfung cbm der TU München
- Tab. 14: Prüfwerte modifizierte Kiestragschicht, 32 Monate Liegedauer

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2013

S 79: Gussasphalt ohne Abstreuerung  
Ripke € 9,00

S 80: Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden  
Vogt, Birle, Heyer, Etz € 17,50

S 81: Das straßenrechtliche Nutzungsregime im Umbruch – Aktuelle Fragen des Planungsrechts  
Durner € 15,00

## 2014

S 82: Qualitätskontrolle PWS – Wehner/Schulze Quality Control  
Teil 1: Auswertung der Kenndaten der PWS Prüfung  
Teil 2: Auswertung von Vergleichsuntersuchungen zur Prüfung der Poliereinheit mittels Schleifpapier  
Jansen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 83: Die Stellung der Gemeinden im Straßenrecht – aktuelle Probleme des Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 23./24. September 2013 in Bonn  
Durner € 17,00

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen  
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®  
Kunz  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgebundenen, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht  
Radenberg, Miljković, Schäfer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung  
Müller, Seidel, Böhm  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten  
Hünger, Börner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten  
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche  
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)  
Neubeck, Wiesebrock  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen  
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarkeit temporärer Fahrbahnmarkierung  
Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel  
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren  
Dudenhöfer, Rückert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel  
Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt  
Böhm, Beara  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt  
Wistuba, Alisov, Isailović  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen  
R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb  
Wacker, Scherckenbach, Rabe, Golkowski  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial  
Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 - 2013  
Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern  
Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

## 2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden  
Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften  
Radenberg, Nytus, Gehrke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette  
Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels  
Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)  
Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)  
Alisov, Wistuba  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt  
Zander, Buch, Birbaum  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen  
Schellenberg  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt  
Mollenhauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxiserfahrenen Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes  
Wistuba, Isailović  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein  
Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau  
Böhm, Tiemann, Ulrich, Verges, Muschalla  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte  
Renken, Wistuba  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels  
Durner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme  
Wacker, Scherckenbach, Jansen in Vorbereitung  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen  
Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler, Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak in Vorbereitung  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine  
Möller, Bundschuh, Birle, Heyer € 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils  
Stephan, Weigel € 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte  
Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie  
Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke  
Freudenstein, Neudert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fordern Sie auch unser kostenloses Gesamtverzeichnis aller lieferbaren Titel an! Dieses sowie alle Titel der Schriftenreihe können Sie unter der folgenden Adresse bestellen:

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 03-63

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

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