

Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 55

bast

Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)

von

Günther Leykauf
Dieter Birmann
Olaf Weller

Lehrstuhl und Prüfamnt für Bau von Landverkehrswegen
Technische Universität München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 55

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 beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 08.184/2005/CGB:
Optimierung der Bauweise „Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)“

Projektbetreuung
Ekkehard Noske

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-86509-835-1

Bergisch Gladbach, September 2008

Kurzfassung – Abstract

Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)

Betondecken auf Schottertragschichten sind bewährte Bauweisen. Bei der Anwendung von Schottertragschichten unter Betondecken (STSuB) werden besondere Anforderungen nach TL/ZTV SoB-StB 04 gestellt. Ob mit Kiestragschichten mit optimiertem Anteil gebrochener Gesteinskörnung die geforderte Umlagerungs- und Erosionsbeständigkeit unter Betondecken erreicht werden kann, wurde an 5 Varianten einer Tragschicht ohne Bindemittel (ToB) untersucht (2 STSuB, 1 Kiestragschicht (KTS), 2 modifizierte Kiestragschichten). Die Anforderungen an die bodenmechanischen Kennwerte (Korngrößenverteilung, Proctordichte, CBR-Wert, Wasserdurchlässigkeit) wurden i. d. R. eingehalten. Dauerschwellversuche mit Lastplatte auf ToB, die schweren Baustellenverkehr simulieren sollen, zeigen eine Zunahme der plastischen Verformung der ToB mit dem Logarithmus der Lastwechselzahl, womit eine vergleichende Bewertung ermöglicht wird.

Beim Dauerschwingversuch im Großprüfstand mit Betonplatte mit Fuge auf ToB wurden die Belastung der Fugenränder und die Phasenverschiebung so eingestellt, dass die Überfahrt eines schweren Lkw über die Fuge mit stufenweiser Zunahme der Schwingweite in 4 Versuchsphasen simuliert wird. Die gezielte Wasserzugabe über die Fuge führte zu einer starken Zunahme der bleibenden Verformung. Die größere Einsenkung und bleibende Einsenkung am „zuletzt befahrenen“ Fugenrand stehen in Übereinstimmung mit den Beobachtungen der Stufenbildung in situ (in Fahrtrichtung abwärts), ebenso ein stärkeres Freilegen der groben Gesteinskörnung an der Oberseite infolge Pumpens. Eine Feinkornumlagerung an die Unterseite der ToB konnte aus der Korngrößenverteilung nicht abgelesen werden. Eine tendenzielle Veränderung der Wasserdurchlässigkeit vor und nach dem Dauerschwingversuch war nicht festzustellen. Bei der Versuchsreihe war der CBR-Wert kein geeignetes Kriterium für die Beurteilung der Tragfähigkeit einer ToB unter Betondecken.

Von den untersuchten Kiestragschichten wies eine modifizierte Kiestragschicht die beste Eignung für die Anwendung unter einer Betondecke auf. Das

korngestufte Baustoffgemisch bestand aus gebrochener Gesteinskörnung < 8 mm (Korngruppe 0/2 mm gewaschen) und ungebrochener Gesteinskörnung > 8 mm, Erweiterung des Sieblinienbereichs von STSuB bei 2 mm von 28 auf 31 %, Feinanteil < 0,063 mm im eingebauten Zustand < 5 Masse-%, Wasserdurchlässigkeit in der Laborprüfung mit Durchlässigkeitsbeiwert $k \geq 5,4 \cdot 10^{-5}$ m/sec.

Eine theoretische Untersuchung zeigte, dass eine Reduzierung des E_{V2} -Wertes einer ToB von 180 auf 150 N/mm² unter Verkehrslast nur eine geringe Spannungserhöhung in der Betondecke herbeiführt. Bei modifizierten KTS mit einem entsprechend optimierten Anteil an gebrochener Gesteinskörnung kann auch bei Auflagerung auf einer Frostschutzschicht die Anforderung an den Verformungsmodul auf der Oberfläche der ToB mit $E_{V2} \geq 150$ N/mm² beibehalten werden. Gegen den Einsatz entsprechender ToB unter Betondecken bestehen keine Bedenken.

Der Originalbericht enthält die in Kapitel 7 aufgelisteten Anlagen 1 bis 23. Im vorliegenden Heft der Schriftenreihe wurde auf ihre Wiedergabe verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Verweise auf die Anlagen im Berichtstext wurden zur Information des Lesers beibehalten.

Thick plain concrete pavements on unbound base courses

Concrete pavements on unbound crushed (type 1 base) are established constructions. For this type 1 base beneath concrete pavements there are special requirements according to TL/ZTV SoB-StB 04. If the required stability and erosion consistency beneath the concrete pavement can be attained with bases consisting of gravel and an optimized percentage of crushed aggregate was examined at five versions of unbound base courses (two crushed materials of type 1, one gravel base and two modified gravel bases). The requirements for the soil mechanical properties (grading, Proctor density, CBR-value, water permeability) were met. Pulsatory fatigue tests with a load plate on the surface of the unbound base course, which should simulate heavy site traffic, show an increase of the permanent deformation in dependence on the

logarithm of load cycles, which allows a comparative evaluation.

In the big test stand with a concrete slab with a full scale test a jointed slab (without dowels) supported by the unbound base course was exposed to dynamic loading. The loading at the edge of the joint and the phase lag were adjusted to simulate the crossing of a heavy truck over the joint with progressive increase of the amplitude of oscillation in four test phases. The selective addition of water at the open joint caused a big increase of the permanent deformation. The larger deflection and the permanent deflection of the "leave" slab edge of the joint is in accordance with the observation of the step-faulting in situ (in direction of travel downwards), as well as an loss of fine aggregates on the top side because of pumping effects. A relocation of the fines at the bottom side of the unbound base courses couldn't be read from the particle size distribution. A clear change of the was not permeability after the dynamic fatigue test wasn't noticeable. In the experimental series the CBR-Value was not a fitting criterion for the evaluation of the bearing capacity of the unbound base courses beneath the concrete pavement.

One modified gravel base of the examined gravel base showed the best suitability for the application beneath a concrete pavement. The graded mixture of material consisted of crushed aggregates <8mm (particle size fraction 0/2mm washed) and uncrushed aggregates >8mm, widening of the area of the gradation curve for type 1 base at 2 mm from 28% to 31%, fines content <0.063mm in installed condition <5 mass-%, water permeability in the laboratory test with a permeability coefficient $k \geq 5.4 \cdot 10^{-5}$ m/ sec.

A theoretical examination showed that a decrease of the E_{V2} -value of an unbound base course from 180 to 150N/mm² causes only to a slight increase of the bending stress in the concrete pavement under traffic load. Therefore the load plate bearing test requirements on the top-side of the unbound base course of $E_{V2} \geq 180$ N/mm² when this base course is supported by a frost blanket layer can be reduced to $E_{V2} \geq 150$ N/mm² for a modified gravel base with an optimized percentage of crushed aggregates. There are no concerns for using a respective unbound base courses beneath a concrete pavement.

The original report contains the appendices 1 to 23. They are not included in this publication, but are

listed in chapter 7. They are available at the Federal Highway Research Institute and can be viewed there. References to the appendices have been maintained in the text of the report for the information of the reader.

Inhalt

1	Allgemeines	7	6	Zusammenfassung	23
2	Untersuchte fünf ToB	7	6.1	Allgemeines	23
3	Versuchsdurchführung	8	6.2	Untersuchte fünf Tragschichten ohne Bindemittel	23
3.1	Versuchsprogramm	8	6.3	Versuchsdurchführung	24
3.2	Prüfstand	8	6.4	Versuchsergebnisse	24
3.3	Einbau der ToB	9	6.5	Folgerungen für die Praxis	25
3.4	Bodenmechanische Kennwerte	9	7	Verzeichnis der Anlagen	26
3.5	Wasserdurchlässigkeit mit Doppel- ring-Infiltrometer	10	8	Literatur	27
3.6	Plattendruckversuch	11			
3.7	Dauerschwellversuch auf der ToB mit Lastplatte	12			
3.8	Dauerschwingversuch mit auf- gelagerter Betondecke	12			
4	Versuchsergebnisse der fünf ToB ...	14			
4.1	Plattendruckversuch	14			
4.2	Elastisch-plastisches Verhalten der ToB (Lastplatte)	15			
4.3	Wasserdurchlässigkeit	16			
4.4	Einsenkungsverhalten der Beton- platten-Fugenränder auf ToB	17			
4.5	Auswirkung von Wasserzugabe auf das Verhalten	18			
4.6	Zustand der ToB nach 3 Mio Last- wechseln und Wasserzugaben	19			
5	Bewertung der Versuchs- ergebnisse	21			
5.1	Druckbeanspruchung der ToB	21			
5.2	Vergleich/Reihung der ToB	22			
5.3	Rechnerischer Einfluss des E_{V2} - Wertes der ToB	22			
5.4	Anforderungen an eine modifi- zierte Kiestragschicht unter Beton- decken	23			

1 Allgemeines

Betondecken auf Schottertragschichten sind bewährte Bauweisen [1], die in den RStO geregelt sind (Bild 1) [2]. Bei der Anwendung von Schottertragschichten unter Betondecken (STSuB) werden besondere Anforderungen nach TL/ZTV SoB-StB 04 [3, 4] gestellt. Damit sollen eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit und Umlagerungs- und Erosionsbeständigkeit sichergestellt werden. Nach früheren Untersuchungen am Prüfam ist mit modifizierten Kiestragschichten mit optimiertem Anteil an gebrochener Gesteinskörnung u. U. eine gleich hohe Standfestigkeit wie bei Schottertragschichten zu erreichen. Ob auch die geforderte Umlagerungs- und Erosionsbeständigkeit unter Betondecken erreicht werden kann, sollte im Maßstab 1:1 untersucht werden. Der Versuchsaufbau besteht aus einem durch eine Fuge unterteilten Betonplattenstreifen auf 5 Varianten einer Tragschicht ohne Bindemittel (ToB), die vergleichend untersucht werden sollten.

2 Untersuchte fünf ToB

Die zu untersuchenden fünf ToB 0/32 mm in jeweils 30 cm Schichtdicke wurden entsprechend dem Versuchsprogramm nach Korngrößenverteilung (Bild 2) und dem Anteil gebrochener Korngruppen ausgewählt.

S1 Schottertragschicht STSuB aus gebrochenem Felsgestein (Kalkstein) nach TL/ZTV SoB-StB 04 [3, 4]. Sie wird im Folgenden als „S1“ bezeichnet. Auf dieser Schottertragschicht sollte ein Verformungsmodul von $E_{V2} \geq 180 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden. Weiterhin war die Sieblinienbegrenzung nach TL/ZTV SoB-StB mit der Sieblinienbegrenzung bei 2 mm Nennweite von 23 bis 28 % Siebdurchgang in Masse-% einzu-

halten (Anlage 1). Das Gestein aus Felsgestein ist Kalkstein aus dem fränkischen Jura.

S2 Schottertragschicht, Bezeichnung „S2“, aus derselben Lieferung wie S1. Der auf der Oberfläche der Schottertragschicht (wie S1) vorgegebene E_{V2} -Wert $\geq 150 \text{ N/mm}^2$ sollte durch Anordnung eines zusätzlichen Vlieses auf der Unterlage erreicht werden. Dies entspricht der Anforderung bei Auflagerung auf einer Schicht aus frostunempfindlichem Material nach RStO (Bild 1).

KTS Kiestragschicht ausschließlich aus ungebrochener Gesteinskörnung und an der oberen Grenze des Sieblinienbereichs nach TL/ZTV SoB-StB. Die Kiestragschicht, im Folgenden als „KTS“ bezeichnet, ist ein Extrem gegenüber der Schottertragschicht aus gebrochenem Felsgestein. Sie wurde von einem Kieswerk am Oberrhein südlich Karlsruhe zusammengesetzt.

Kg Bei dieser Kiestragschicht, Bezeichnung „Kg“, ist die Korngruppe über 8 mm zu über 50 % gebrochen (gebrochener Kies). Sie wurde von einem weiteren Werk am Oberrhein südlich Karlsruhe bezogen.

Km Modifizierte Kiestragschicht, Bezeichnung „Km“, aus 4 Korngruppen zusammengesetzt, wobei in Umkehrung zu „Kg“ unter 8 mm eine gebrochene Gesteinskörnung vorhanden und die Korngruppe 0/2 mm aus gewaschenem Brechsand aus gebrochenem Kies ist. Die Korngrößenverteilung liegt etwas über dem Sieblinienbereich einer STSuB bei 2 mm Öffnungsweite. Die Lieferung in 4 Korngruppen erfolgte durch ein drittes Kieswerk am Oberrhein:

- 30 % Korngruppe 0/2 mm, gewaschener Brechsand aus gebrochenem Kies, Lieferbezeichnung W9,

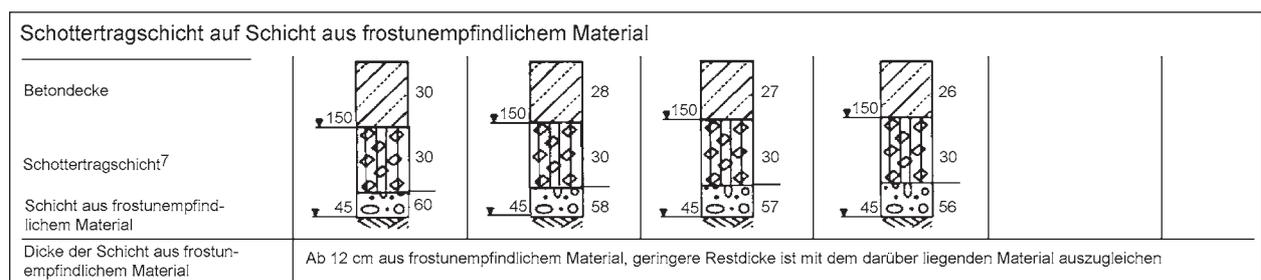


Bild 1: Schottertragschicht auf Schicht aus frostunempfindlichem Material, RStO 01, Tafel 2 „Bauweisen mit Betondecke“, Zeile 3 Bauklasse SV bis III [2]

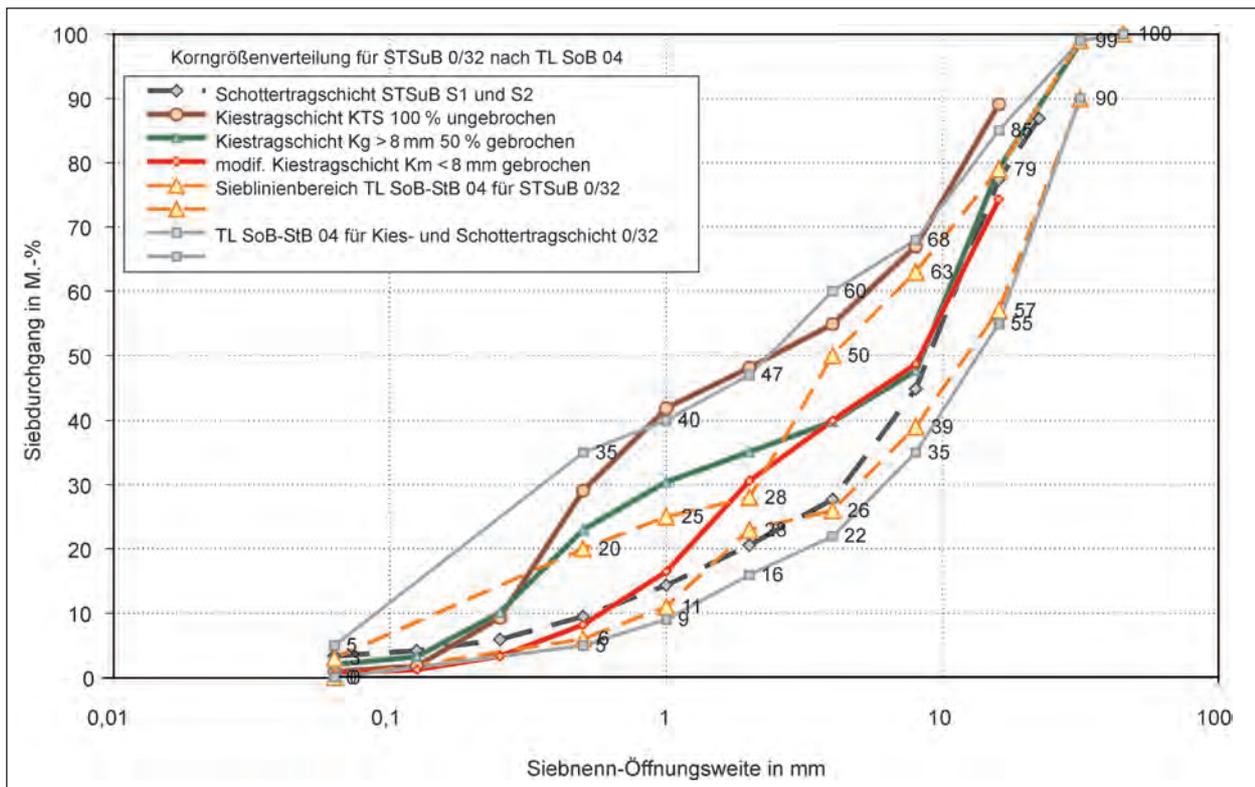


Bild 2: Korngrößenverteilung der fünf untersuchten ToB 0/32 (2 Schottertragschichten STSuB und 3 Kiestragschichten nach TL SoB-StB), Ergebnisse der Kontrollprüfung am angelieferten Baustoffgemisch vor Einbau

- 10 % Moräneedelsplitt 2/5 mm,
- 35 % Kies 8/16 mm,
- 25 % Kies 16/32 mm.
- Beurteilung der ToB-Oberfläche nach dem Dauerschwingversuch,
- statische Plattendruckversuche und Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach dem Dauerschwingversuch

3 Versuchsdurchführung

3.1 Versuchsprogramm

Folgendes Versuchsprogramm wurde für jede ToB durchgeführt:

- statische Plattendruckversuche auf der ToB an zwei Lastpunkten,
- Dauerschwellversuche mit einer Lastplatte auf ToB an zwei Lastpunkten (10.000 LW),
- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit an drei Messorten mit einem am Prüfamt erstellten Doppelring-Infiltrimeter mit kontinuierlicher Messwertaufzeichnung,
- Dauerschwingversuch an der auf ToB aufgesetzten Betonplatte mit unverdübelter Fuge in 4 Phasen mit stufenweise vergrößerter Schwingweite und mit Wasserzugabe über die Fuge (> 3 Mio LW),

3.2 Prüfstand

Der Großprüfstand wurde für die verschiedenen Untersuchungen mit den Abmessungen 1,25 x 5,2 m konzipiert. Ein Betontrog, dessen große Steifigkeit günstig für die Verdichtung beim Einbau ist, dient als Begrenzung für die verschiedenen einzubauenden Tragschichten ohne Bindemittel in einer Dicke von 30 cm und der kontrollierten Entwässerung der ToB bei Wasserzugabe von oben während der Wasserdurchlässigkeits-Messungen und der Dauerschwingversuche (Bild 3).

Die Unterlage der ToB bildet eine durch frühere Versuche mit Strukturrissen durchsetzte, alte gebundene Tragschicht, die einer Bodenverfestigung entspricht. Ein aufgelegtes Vlies schafft eine zusätzliche elastische Auflagerung (2,2 mm dick), womit annähernd die Verhältnisse wie auf einer gut verdichteten Frostschutzschicht (FSS) als Unterlage

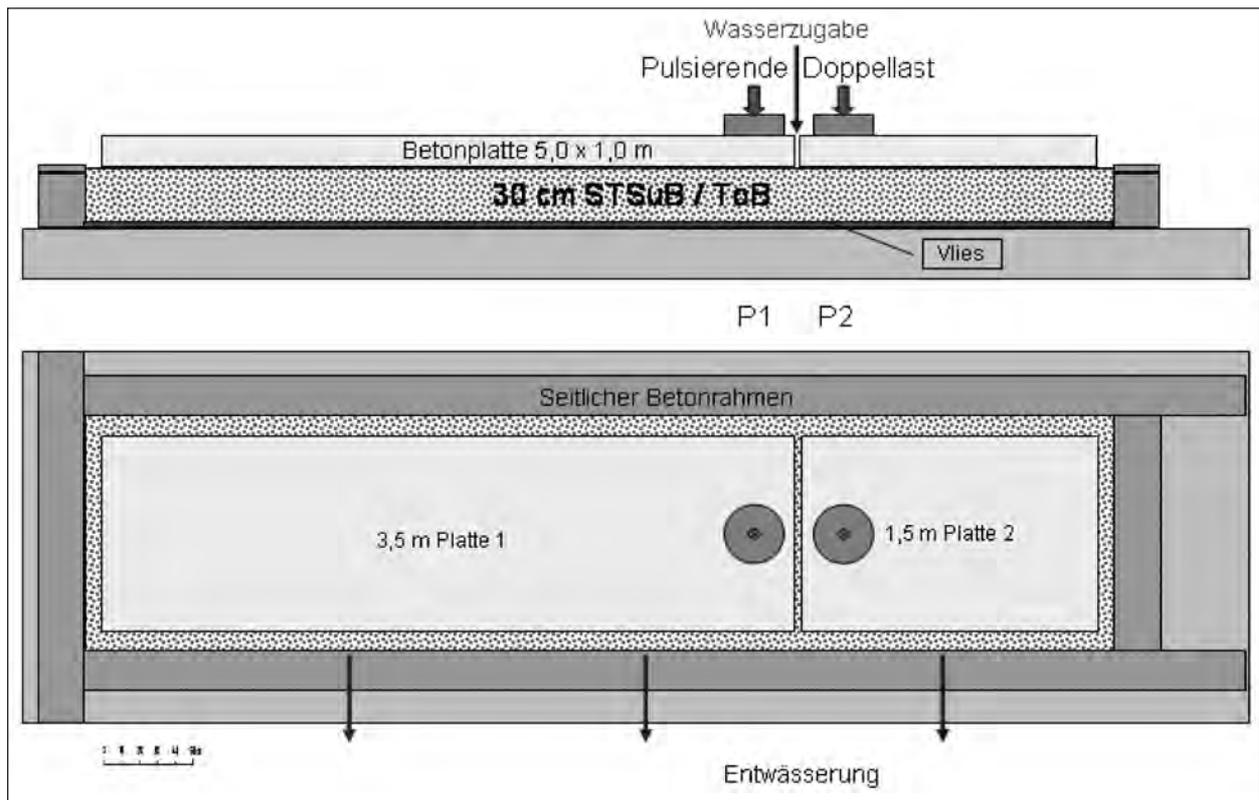


Bild 3: Großprüfstand für Versuche mit STSuB/ToB unter Betondecke (Längsschnitt und Aufsicht)

der ToB erreicht werden. Nach den RStO 01 muss bei Auflagerung der mindestens 30 cm dicken STSuB auf FSS ein Verformungsmodul auf O.K. Schottertragschicht von $\geq E_{V2}$ 180 N/mm² erreicht werden. Bei Auflagerung nach RStO 01, Tafel 2, Zeile 3 „Schottertragschicht auf frostunempfindlichem Material“ dagegen wird $E_{V2} \geq 150$ N/mm² gefordert (Bild 1).

Die auf den ToB aufgelagerte Betondeckenkonstruktion wird unter Kapitel 2.8 beschrieben.

3.3 Einbau der ToB

Die ToB wurde in einer Dicke von 30 cm in den Großprüfstand auf einer unteren Vlieseinlage eingebaut (Bild 4), zur Erzielung der geforderten Ebenheit über ein Lehrgerüst abgezogen und mit einem Plattenrüttler „Vibromax“ mit einem Betriebsgewicht von 140 kg verdichtet. Die Ergebnisse der Verdichtungskontrolle sind unter

- 1) Forderung $E_{V2} \geq 180$ N/mm² bei Auflagerung der STSuB auf FSS,
- 2) zwei Messorte unter den Prüfzylindern P1 und P2,
- 3) zwei Messorte auf der eingebauten ToB,

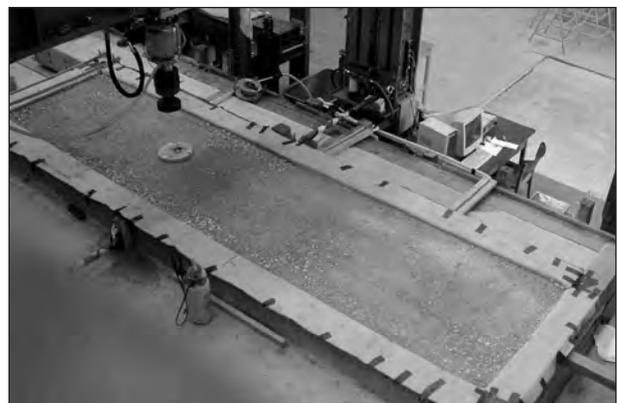


Bild 4: Großprüfstand für die Untersuchung an 30 cm dicker Schottertragschicht unter Betondecken (STSuB). Unter dem Prüfzylinder 1 (am späteren Fugenrand, lange Platte) aufgelegte Lastplatte für den Plattendruckversuch und für die Dauerschwellversuche

in Tabelle 1 beschrieben.

Nur bei der Untersuchung der STSuB S2 wurde eine zusätzliche Lage Vlies unter der STSuB eingelegt. Der angestrebte Verformungsmodul von $E_{V2} \geq 150$ N/mm² wurde dadurch annähernd erreicht.

3.4 Bodenmechanische Kennwerte

Die bodenmechanischen Kennwerte von Proben der ToB (Korngrößenverteilung, Proctordichte,

CBR-Wert, Wasserdurchlässigkeit) wurden vom Zentrum Geotechnik der TU München bestimmt. Die Ergebnisse sind in

- 1) Forderung $E_{V2} \geq 180 \text{ N/mm}^2$ bei Auflagerung der STSuB auf FSS,
- 2) zwei Messorte unter den Prüfsylindern P1 und P2,
- 3) zwei Messorte auf der eingebauten ToB

in Tabelle 1 aufgeführt. Danach werden die Anforderungen an die Baustoffgemische i. d. Regel mit folgenden Ausnahmen eingehalten:

Die Korngrößenverteilung der KTS weicht geringfügig vom oberen Sieblinienbereich für Kiestragschichten nach TL/ZTV SoB ab. Die nach DIN 18130 [5] geprüfte Wasserdurchlässigkeit der ToB soll nach dem „Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen (1998)“ [6] $k_s \geq 5,4 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ betragen und war bei KTS und Kg geringer. Der Verdichtungsgrad der Kiestragschicht KTS wurde bei gleichem Versuchsabau knapp unterschritten. Für die Versuchsreihen wurde den Plattendruckversuchen ein größerer Stellenwert als der Verdichtungskontrolle eingeräumt, da die Tragfähigkeit für die Belastungsversuche von besonderer Bedeutung ist. Bzgl. der Ergebnisse der Plattendruckversuche siehe Kapitel 4.1.

Die Korngrößenverteilung der 5 untersuchten ToB nach DIN EN 933-1 ist in Bild 2 aufgetragen. Zum Vergleich wurden die Sieblinienbereiche für Kies-

und Schottertragschichten 0/32 nach TL SoB sowie die enger begrenzten Sieblinienbereiche für Schottertragschichten STSuB angegeben. Die STSuB S1 und S2 erfüllen weitestgehend die enge Begrenzung nach TL SoB, die modifizierten Kiestragschichten Kg und Km haben bei 2 mm Siebnenn-Öffnungsweite einen größeren Anteil und die KTS wurde im oberen Bereich der Sieblinienbegrenzung für Kiestragschichten gewählt.

3.5 Wasserdurchlässigkeit mit Doppelringinfiltrometer

Für die Durchlässigkeits-Messungen an der eingebauten ToB im Prüfstand wurde in Absprache mit der BAST Ref. S2 ein Doppelring-Infiltrometer [7 ,8] gewählt (Bild 6). Dazu wurde eine entsprechende Prüfeinrichtung konzipiert und der Infiltrometer erstellt. Mit dieser Messeinrichtung sind durch elektronische Messung des Wasserverbrauchs eine Aufzeichnung des Wasserdurchflusses im inneren Ring mit 235 mm Innen-Ø und damit eine kontinuierliche Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts k [m/sec] möglich. Im Folgenden wird zur Vereinheitlichung die Wasserdurchlässigkeit der ToB wie in DIN 18130 und DIN 17892-11 [16] durch den Durchlässigkeitsbeiwert k [m/sec] beschrieben, auch wenn nach DIN 19682-7 [8] dafür die Bezeichnung „Infiltrationsrate“ verwendet wird. Bei den Versuchen an drei Messorten (Bild 5) wurde über eine entsprechende Steuerung der Wasser-

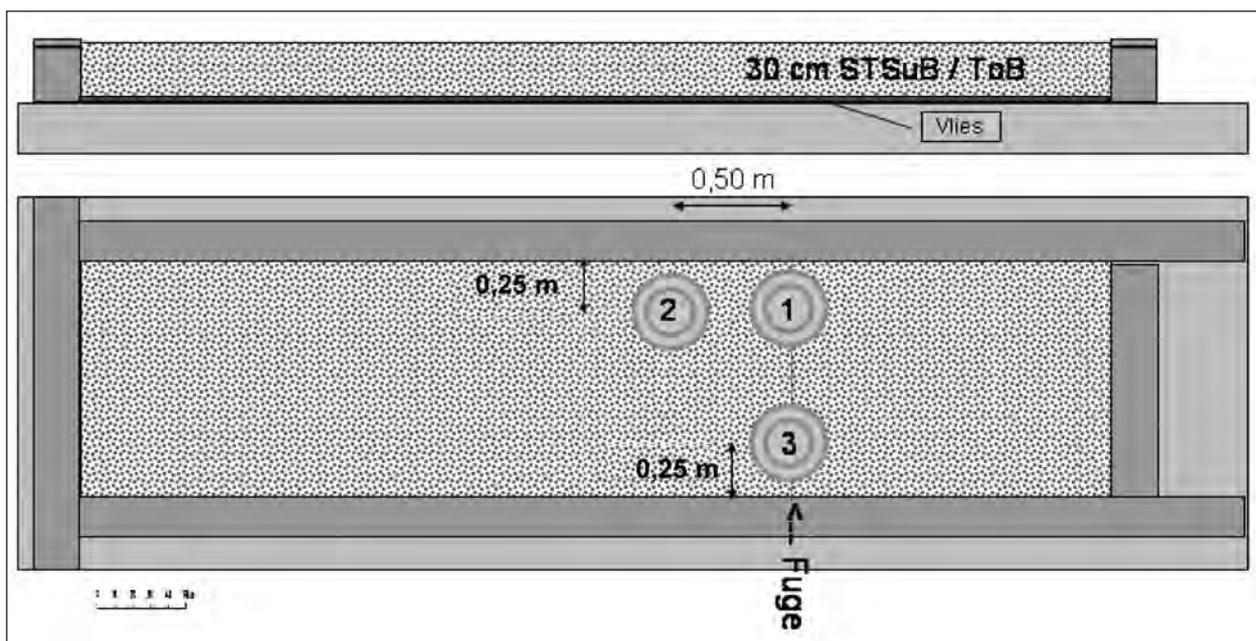


Bild 5: Drei Messorte W1 bis W3 für die Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts k der ToB mit dem Doppelring-Infiltrometer

spiegel im Innen- und Außenzylinder konstant auf einer Höhe von 30 mm gehalten, die Versuchszeit betrug maximal 1 Stunde.

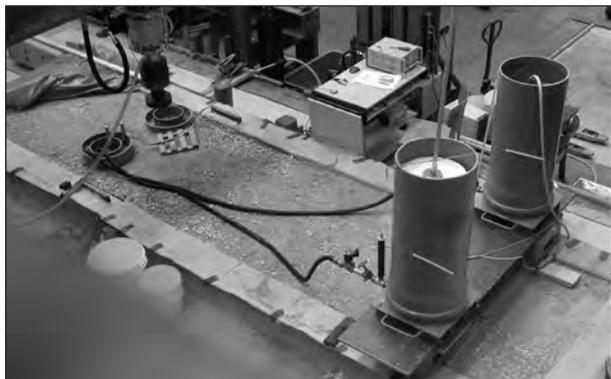


Bild 6: Messen der Wasserdurchlässigkeit der STSuB S1 im Großprüfstand mit dem Doppelring-Infiltrometer (Messorte S1v-W1 und S1v-W3)

Die Wasserdurchlässigkeit k_{10} an Proben der ToB wurde im Labor nach DIN-18130-1-Verfahren ZY-MS-MZ-3 [5] durchgeführt (ZY = Probekörper im Versuchszylinder, MS = Messung des hydraulischen Gefälles mit mehreren Standrohren, MZ = Messung des Wasservolumens mit Messzylinder, 3 = Versuchsklasse, dabei wird Wassersättigung nicht nachgewiesen und nicht kontrolliert und die Strömung stationär nicht nachgewiesen).

3.6 Plattendruckversuch

Der im Plattendruckversuch ermittelte Verformungsmodul E_{V2} ist ein Maß für die Tragfähigkeit einer Tragschicht ohne Bindemittel auf der Unterlage.

Kennwert der ToB							
gemessen an Proben im Labor	Dimension	STSuB S1	STSuB S2	KTS	modif. KTS Kg	modif. KTS Km	Anforderung
Trockendichte ρ_{pr}	g/cm ³	2,011	---	2,053	2,056	2,029	
optimaler Wassergehalt nach Proctor W_{pr}	%	4,01	---	7,21	6,34	6,02	
CBR nach Wasserlagerung bei ρ_{pr} bis 2,5 mm Eindringtiefe	%	93	---	---	182	113	≥ 80
CBR bis 5 mm Eindringtiefe	%	101	---	---	182	159	
Durchlässigkeit k_{10} nach DIN 18130-1 ZY-MS-MZ-3	m/sec	$40,5 \cdot 10^{-5}$ $\Delta h = 7 \text{ mm}$	---	$0,80 \cdot 10^{-5}$ $\Delta h = 43 \text{ mm}$	$0,96 \cdot 10^{-5}$ $\Delta h = 370 \text{ mm}$	$51,1 \cdot 10^{-5}$ $\Delta h = 9 \text{ mm}$	≥ $5,4 \cdot 10^{-5}$
Durchlässigkeit k_{10} nach DIN 18130-1 ZY-MS-MZ-3	m/sec	$74,3 \cdot 10^{-5}$ $\Delta h = 31 \text{ mm}$	---	$1,15 \cdot 10^{-5}$ $\Delta h = 240 \text{ mm}$	$1,11 \cdot 10^{-5}$ $\Delta h = 658 \text{ mm}$	$51,5 \cdot 10^{-5}$ $\Delta h = 35 \text{ mm}$	≥ $5,4 \cdot 10^{-5}$
gemessen an der eingebauten ToB							
Trockendichte ρ_d nach DIN 18125 T2 Wasserersatzverfahren (2 Messorte)	g/cm ³	2,253/2,125 ³⁾	---	2,006/2,025 ³⁾	---	---	
Verdichtungsgrad (2 Messorte auf der eingebauten ToB)	%	112/106 ³⁾		98/99 ³⁾	---	---	≥ 103
			P1/P2 ²⁾	P1/P2 ²⁾	P1/P2 ²⁾	P1/P2 ²⁾	
E_{V1} (2 Messorte unter P1/P2)	N/mm ²	126	64/83 ²⁾	61/69 ²⁾	61/93 ²⁾	87/67 ²⁾	
E_{V2} (2 Messorte unter P1/P2)	N/mm ²	206	139/141	136/145	142/155	147/149	150 bzw. 180 ¹⁾
E_{V2}/E_{V1} E_{V2} (2 Messorte unter P1/P2)	N/mm ²	1,6	2,2/1,7 ²⁾	2,2/2,1 ²⁾	2,3/1,7 ²⁾	1,7/2,2 ²⁾	≤ 2,2
E_{V2} nach 10.000 LW auf ToB, 2 Messorte unter P1/P2	N/mm ²	241	135/174 ²⁾	144/179 ²⁾	190/168 ²⁾	160/152 ²⁾	
E_{V2} nach Dauerschwingversuch (2 Messorte unter P1/P2)	N/mm ²	192	157/128 ²⁾	146/156 ²⁾	184/149 ²⁾	126/174 ²⁾	
1) Forderung $E_{V2} \geq 180 \text{ N/mm}^2$ bei Auflagerung der STSuB auf FSS							
2) zwei Messorte unter den Prüfsylindern P1 und P2							
3) zwei Messorte auf der eingebauten ToB							

Tab. 1: Bodenmechanische Kennwerte der Schottertragschichten STSuB S1 und S2, der Kiestragschicht KTS und der modifizierten Kiestragschichten Kg und Km

Die Plattendruckversuche auf der ToB zur Ermittlung des Verformungsmoduls (Bild 4) wurden entsprechend DIN 18134 [10] mit einer Stahlplatte von 300 mm Durchmesser an zwei Messorten (Bild 7) durchgeführt. Nach Aufbringen der Vorbelastung wurde dreimal in 7 Stufen belastet und in 3 Stufen entlastet mit einer Wartezeit von jeweils 60 sec. (für Tragschichten im Verkehrswegebau mit $\sigma_{\max} = 0,5 \text{ N/mm}^2$).

Daraus wurde der Verformungsmodul als Kenngröße für die Verformbarkeit der Tragschicht als Sekante zwischen den Punkten $0,3 \sigma_{\max}$ und $0,7 \sigma_{\max}$ ermittelt. Die Drucksetzungslinien aus der mittleren Normalspannung σ_0 unter der Platte und der zugehörigen Setzung s wurden nach DIN 18134 durch ein Polynom zweiten Grades errechnet. Bei der Erstbelastung wurde nach DIN 18134 die Laststufe 0 mit der Last = 0 nicht berücksichtigt.

Die Kraft wurde über eine geeichte Druckmessdose gemessen, der Weg mit drei Induktivwegaufnehmern über Messverstärker aufgezeichnet und nach DIN 18134 gemittelt.

3.7 Dauerschwellversuch auf der ToB mit Lastplatte

Zur Ermittlung des elastisch-plastischen Verformungsverhaltens und Simulation des Baustellenverkehrs wurde im Großprüfstand des Prüfamtes

für Bau von Landverkehrswegen ein Dauerschwellversuch mit einer Lastplatte von 300 mm Durchmesser auf der Oberfläche der ToB durchgeführt. Bei einer Belastungsfrequenz von 3 Hz wurden 6.000 Lastwechsel mit 35 kN Oberlast (Maximallast des Plattendruckversuchs) und 4.000 LW mit 50 kN Oberlast (max. Einzel-Radlast eines Lkw) bei einer Unterlast von jeweils 2 kN aufgebracht. Damit soll sehr starker Baustellenverkehr simuliert werden. Der Versuch wurde an zwei Messorten über die Druckzylinder P1 und P2 durchgeführt (Bild 7), sodass je ToB zwei Messwerte bestimmt werden konnten.

3.8 Dauerschwingversuch mit aufgelagerter Betondecke

Zur Simulation der dynamischen Beanspruchung der ToB unter Betondecken im Fugenbereich wie in situ bei Überfahrt mit einem schweren Lkw wurde eine Prüfeinrichtung konzipiert. Dazu wurde im Großprüfstand ein Betonplattenstreifen in einer Länge von 5,0 m aufgelegt, der durch eine unverdübelt Fuge getrennt ist (Bild 8). Die Betonplatten wurden im Fugenbereich gegenüberliegend mit zwei Prüfzylindern, die unabhängig und phasenverschoben gesteuert werden können, pulsierend belastet. Die grundsätzlichen Zusammenhänge hierzu sind in Anlage 2 und Anlage 3 dargestellt.

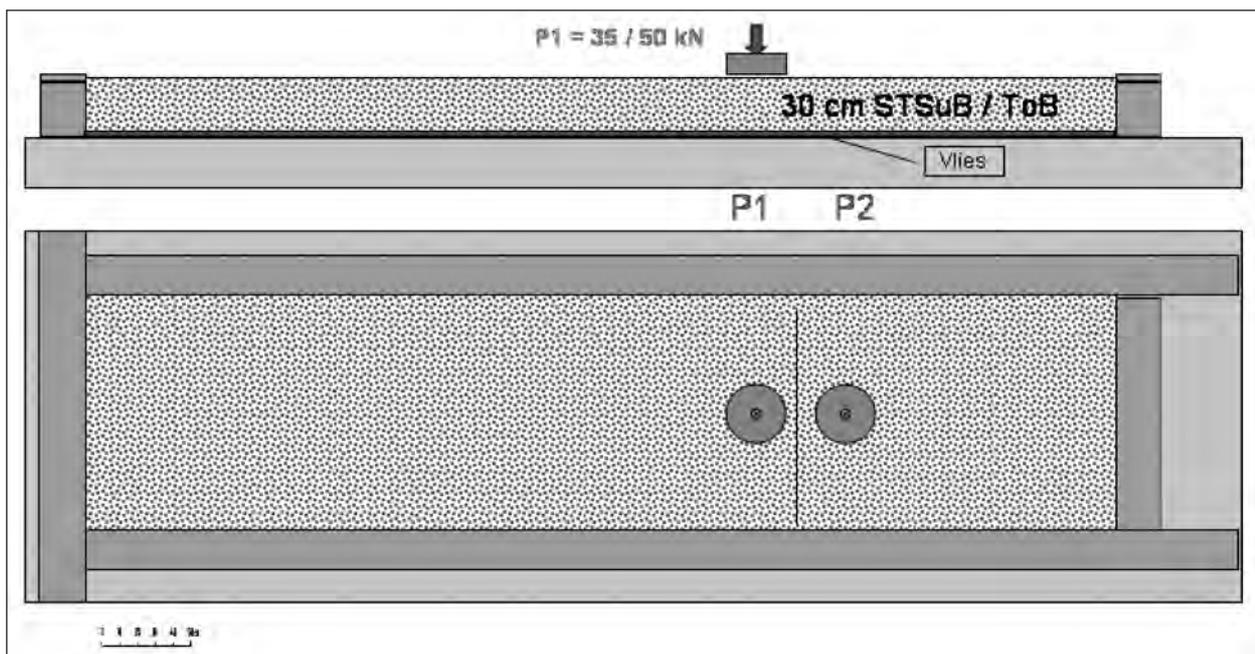


Bild 7: Messanordnung für Plattendruckversuch (hier Messort mit Druckzylinder P1) und Dauerschwellversuch mit Lastplatte auf ToB

In umfangreichen Vorversuchen wurde zunächst die vertikale Abspannung der Plattenenden (Bild 8) variiert und so gewählt, dass sich Verformungsverhältnisse (Biegelinien) wie in situ für dicke Betondecken auf STSuB einstellen, und die Steuerung der beiden Prüfzylinder so abgestimmt, dass der zeitliche Verlauf der Belastungen und damit der Einsenkung den Verhältnissen bei Überfahrt einer Fuge mit konstanter Überfahrgeschwindigkeit und verschiedenen Wirksamkeitsindices entspricht (Bild 11). Als Belastungsverlauf der Prüfzylinder am Fugenrand wurde eine „komplexe Trapezfunktion“ gewählt, um einem langsamen Anwachsen der Einsenkung beim Befahren der Platte und einem raschen Entlasten bei Fugenüberfahrt nahezukommen. Weiter wurden die Prüflasten so eingestellt, dass ein größtmögliches Maß an Übereinstimmung der Einsenkung der Platten im Großprüfstand mit denen in situ unter Verkehrslast besteht. Die Belastung wurde kraftgesteuert aufgebracht, um bei gleicher Belastung mit einer bleibenden Einsenkung der Platten wirklichkeitsnahe Verhältnisse wie unter Verkehrsbelastung zu schaffen.



Bild 8: Großprüfstand mit zwei an den Enden abgespannten Betonplatten und Messeinrichtungen; an den Fugenrändern gegenüberliegend je ein unabhängig gesteuerter Prüfzylinder

Die Belastungen an den beiden Fugenrändern wurden in 4 Versuchsphasen mit insgesamt > 3,1 Mio LW bei einer Prüffrequenz von 3 Hz aufgebracht (siehe Tabelle 2). Sie unterscheiden sich hinsichtlich:

- Schwingweite bei Beginn der Versuchsphase (Einsenkung am Fugenrand),
- Phasenverschiebung der Belastung der beiden Prüfzylindern,
- simuliertem Wirksamkeitsindex zu Beginn der Versuchsphase als Maß der Querkraftübertragung (siehe Anlage 2 und Anlage 3),
- Zugabe von Wasser in die Fuge.

In Tabelle 2 sind diese Versuchsphasen im Einzelnen aufgeführt:

- Die Einsenkung von 0,2 mm beider Fugenränder zu Beginn der Versuchsphase 1 bei einem simulierten Wirksamkeitsindex von 100 % entspricht einem guten Zustand der Fuge bei optimaler Querkraftübertragung.
- Mit einer Einsenkung von 0,5 mm (beide Fugenränder zu Beginn der Versuchsphase 3) und einem Wirksamkeitsindex von 0 % wird der Zustand ohne Dübel oder nicht mehr wirksamer Dübel erfasst.
- Die letzte Versuchsphase 4 mit 0,7 mm Schwingweite der Fugenränder entspricht einer extremen Beanspruchung, z. B. bei Achslasten, die über den zulässigen Bereich der StVZO hinausgehen.

In der Versuchsphase 2b wurde über die offene Fuge Wasser von oben zugegeben. Damit soll der Einfluss des Wassers auf das Tragverhalten sowie

Versuchs-Phase	Schwingweite zu Beginn der Versuchsphase		Phasen-Verschiebung zwischen P1 und P2 deg	Wirksamkeitsindex W zu Beginn der Phase %	Wasserzugabe an Fuge	Lastwechsel je Phase Mio	Lastwechsel (Summe) Mio
	bei P1 mm	bei P2 mm					
1	0,2	0,2	5	100	ohne	0,21	0,21
2a	0,3	0,3	45	80	ohne	1,20	1,41
2b	0,3	0,3	45	80	mit	0,25	1,66
3	0,5	0,5	160	0	mit	1,28	2,94
4	0,7	ca 0,7	160	0	mit	> 0,17	> 3,11

Tab. 2: Versuchsphasen der Belastung an den beiden Fugenrändern mit einem Belastungsverlauf einer komplexen Trapezfunktion und mit Phasenverschiebung, 3 Hz, kraftgesteuert

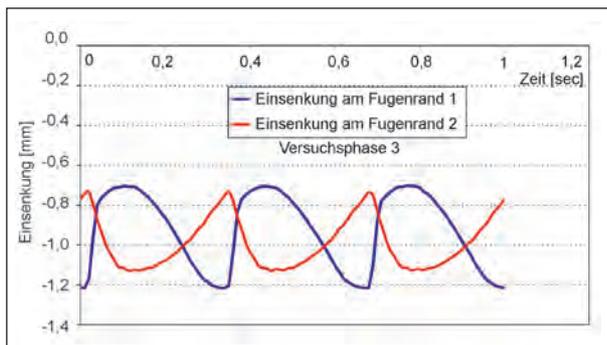


Bild 9: Verlauf der Einsenkung an den beiden Fugenrändern; die unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeit entspricht der Überfahrt über die Querfuge mit einem Wirksamkeitsindex = 0 %; S1-Versuchsphase 3 bei 2,94 Mio LW, 3 Hz, Biegelinien siehe Bild 11

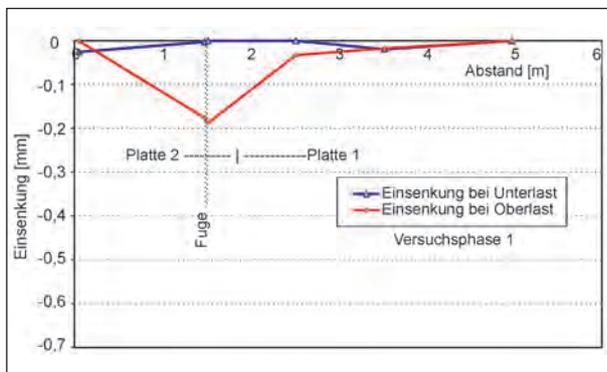


Bild 10: Als Biegelinie aufgetragene Schwingweite der beiden Platten während einer Schwingperiode nach 148.000 LW; S1-Versuchsphase 1 mit einem Wirksamkeitsindex von 100 %

infolge der dynamischen wechselseitigen Belastung der Fugenränder auf eine Kornumlagerung (Pumpen) untersucht werden. Die Wassermenge betrug etwa $0,2 \text{ l/sec} \cdot \text{Fugenmeter}$.

Die Verformungen der beiden Betonplatten (gemessen mit Induktivwegaufnehmern) und die über die Prüfzylinder aufgebrachten Kräfte wurden während des Dauerschwingversuchs in Periodenlängen von jeweils 1 Sekunde mit einer Messfrequenz von 100 Hz über Messverstärker aufgezeichnet. Bild 9 bis Bild 11 zeigen Beispiele der Aufzeichnungen.

In Bild 9 ist der zeitliche Verlauf der Einsenkung der beiden Fugenränder dargestellt. Deutlich zu sehen sind die langsamere Belastung und schnelle Entlastung der befahrenen Platte (grau) sowie die schnelle Belastung und langsamere Entlastung der danach befahrenen Platte (vergl. Anlage 1). Diese Belastung wird bei einer Frequenz von 3 Hz über 3-Mio-fach wiederholt, womit Aussagen über das Langzeitverhalten ermöglicht werden.

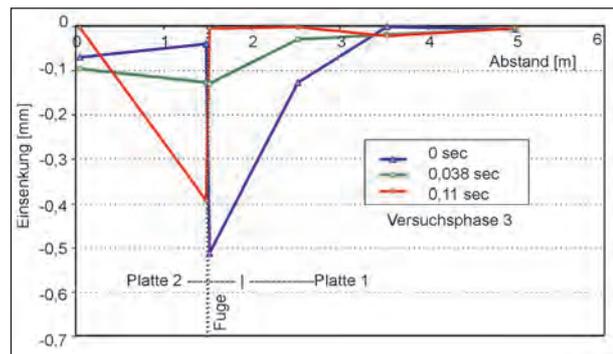


Bild 11: Biegelinie der beiden Platten (Schwingweite) zu verschiedenen Zeitpunkten; Versuchsphase 3 mit einem Wirksamkeitsindex von 0 %, 2,94 Mio LW, STSuB S1

Bild 10 zeigt die unter dynamischer Belastung gemessenen Schwingweiten der Einsenkung in Plattenlängsrichtung, als Biegelinie dargestellt. Die an verschiedenen Punkten gemessenen Werte sind linearverbunden. Die Forderung der gleich großen Einsenkung an beiden Fugenrändern bei einem Wirksamkeitsindex von 100 % wird erfüllt und die vorgesehene Schwingweite von 0,2 mm eingehalten.

Bild 11 zeigt die Biegelinien (Schwingweg, bezogen auf die Einsenkung bei Unterlast) zu verschiedenen Zeitpunkten während einer Schwingperiode der Versuchsphase 3 mit einem angestrebten Wirksamkeitsindex von 0 %. Deutlich zu erkennen sind der Zustand mit Wirksamkeitsindex 0 bei Belastung der Platte 1 (blaue Linie) und der Zustand mit Wirksamkeitsindex 0 % bei Belastung der Platte 2 (rote Linie), während die Einsenkung zu dem Zeitpunkt, wenn die Verkehrslast über der Fuge steht, an den beiden Fugenrändern gleich groß ist (grüne Linie).

Nach Abschluss der Dauerschwingversuche wurden auf der jeweiligen freigelegten ToB Plattendruckversuche und Messungen der Wasserdurchlässigkeit vorgenommen, um Änderungen infolge der stufenweisen Dauerschwingbelastung feststellen zu können.

4 Versuchsergebnisse der fünf ToB

4.1 Plattendruckversuch

Die Ergebnisse der Plattendruckversuche nach DIN 18134 [10] sind in

- 1) Forderung $E_{V2} \geq 180 \text{ N/mm}^2$ bei Auflagerung der STSuB auf FSS,

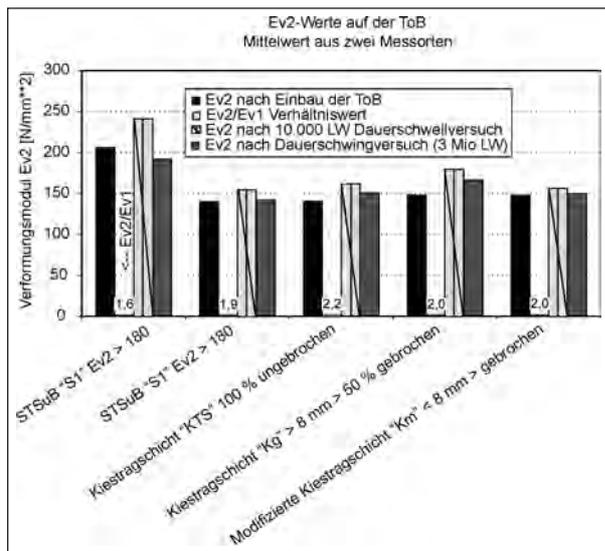


Bild 12: Verformungsmoduln auf der ToB nach Einbau der ToB, nach dem Dauerschwellversuch mit Lastplatte auf ToB (10.000 LW) und nach dem Dauerschwingversuch mit Betonplatte (3 Mio LW)

- 2) zwei Messorte unter den Prüfzylindern P1 und P2,
- 3) zwei Messorte auf der eingebauten ToB

in Tabelle 1 sowie als Säulendiagramm in Bild 12 – aus 2 Werten von 2 Messorten gemittelt (P1 und P2) – zusammengestellt. Der größte Verformungsmodul wurde bei der STSuB S1 erreicht und der Mindestwert von 180 N/mm² übertroffen. Der bei den übrigen ToB angestrebte E_{V2} -Wert von 150 N/mm² wurde knapp unterschritten, jedoch steigt der E_{V2} -Wert beim Dauerschwellversuch über 150 N/mm² an.

Aus dem Säulendiagramm ist direkt abzulesen, dass bei allen untersuchten ToB der E_{V2} -Wert durch den Dauerschwellversuch ansteigt und nach Abschluss des Dauerschwingversuchs mit Wasserzugabe wieder geringer wird. Dies kann mit dem nach den Wasserzugaben deutlich höheren Wassergehalt der ToB und einer Abnahme des E-Moduls [14] erklärt werden.

Bei einem Vergleich des Verformungsverhaltens der beiden STSuB unter Kapitel 4.4 ist zu beachten, dass der gemessene Verformungsmodul von S1 50 % größer ist als der von S2.

4.2 Elastisch-plastisches Verhalten der ToB (Lastplatte)

Bild 13 zeigt das Ergebnis des Dauerschwellversuchs mit einer Oberlast von zunächst 35 kN und

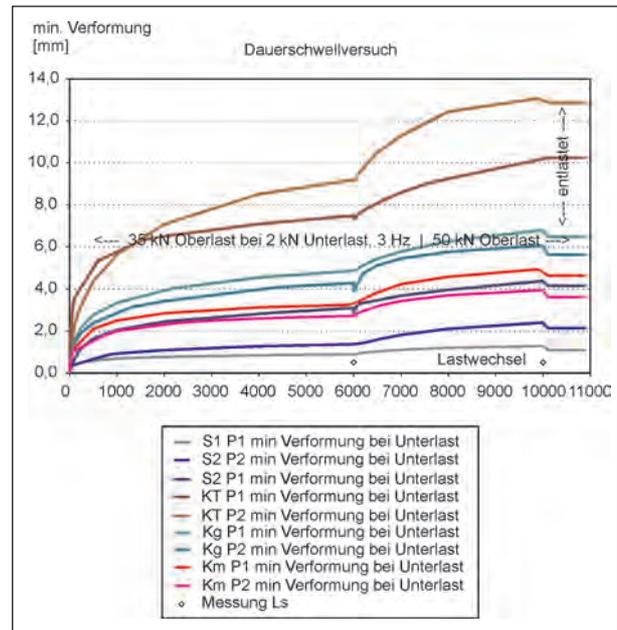


Bild 13: Minimale Verformung bei 2 kN Unterlast (und 35 bzw. 50 kN Oberlast) beim Dauerschwellversuch auf den ToB, Messort P1 und P2, lineare Teilung

ab 6.000 Lastwechseln von 50 kN bei jeweils 2 kN Unterlast. Angegeben ist die minimale gemessene Verformung (Einsenkung der Lastplatte) in Abhängigkeit von den Lastwechseln, die etwa der plastischen Verformung der ToB entspricht. Je ToB sind zwei Messkurven (Messort mit Druckzylinder P1 und P2, siehe Bild 7) aufgetragen. Zur Dokumentation des Versuchs ist in den Diagrammen der Anlage 4 die minimale und maximale gemessene Verformung (Schwingweite der Lastplatte) bei Unter- und Oberlast aufgetragen und die bleibende Verformung am Ende jeder Versuchsphase als Tabelle (Anlage 5) angegeben.

Bei allen untersuchten ToB ist bei 35 kN Oberlast mit zunehmender Lastwechselanzahl eine degressive Zunahme der Verformungen zu verzeichnen, wie dies auch bei früheren Untersuchungen an ToB festgestellt wurde [11, 12]. In der Versuchsphase mit 50 kN Oberlast zeigt sich erwartungsgemäß ein deutlicher Anstieg der Verformungen, mit zunehmenden Lastwechseln jedoch ebenfalls abklingend.

Im halblogarithmischen Maßstab stellt sich das plastische Verformungsverhalten der ToB bei 35 kN Oberlast in einer linearen Zunahme dar (Bild 14). In einer gesonderten Untersuchung wurde der Anstieg der Verformung der 1. Versuchsphase in Abhängigkeit vom Logarithmus der Lastwechselzahl n [mm/log(n)] durch eine lineare Regressionsanalyse

ermittelt. Die Werte sind in der Tabelle in Anlage 5 zusammengestellt und vereinfacht als Mittelwert aus den zwei Messwerten als Säulendiagramm im Bild 15 grafisch aufgeführt.

Hinsichtlich der Zunahme der Verformung in [mm/log (n)] sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Bei den beiden Schottertragschichten STSuB ist eine relativ kleine lastwechselzahlabhängige

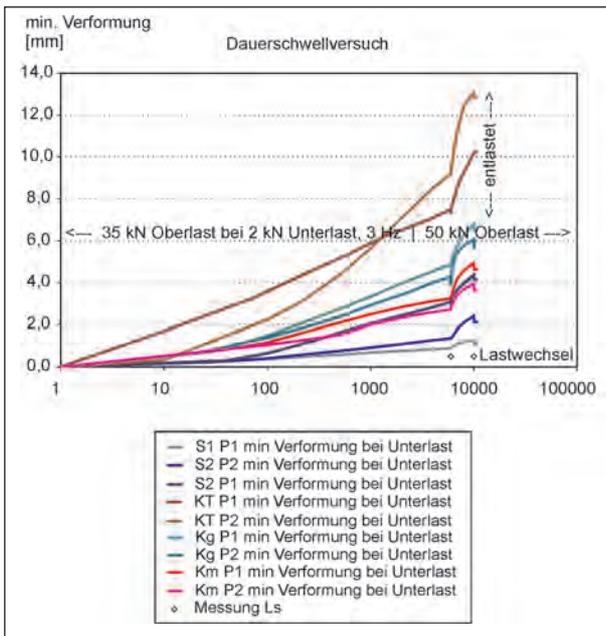


Bild 14: Minimale Verformung bei 2 kN Unterlast (und 35 bzw. 50 kN Oberlast) beim Dauerschwellversuch auf den ToB, Messort P1 und P2; logarithmische Teilung der Lastwechselzahl

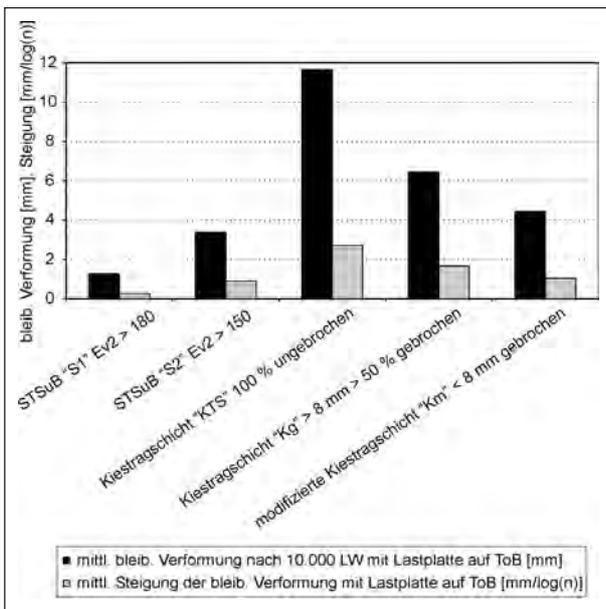


Bild 15: Bleibende Verformung beim Dauerschwellversuch mit Lastplatte auf ToB

Verformung festzustellen. Die Kiestragschicht KTS mit ausschließlich Rundkorn weist die größte Verformungszunahme auf (Bild 15). Dazwischen liegen die beiden modifizierten Kiestragschichten mit gebrochenen Anteilen. Kongruent zu dem Anstieg in der 1. Versuchsphase ist die Größe der gemessenen bleibenden Verformung am Ende des Dauerschwellversuchs. Die besonders starke Zunahme der Verformung bei der Kiestragschicht KTS am Messort P2 ist ein Hinweis auf die geringe Standfestigkeit dieser ToB aus 100 % Rundkorn. Nach der Shakedown-Theorie [14] tritt mit Überschreiten des Shakedown-Limits ein zunehmendes Versagen der ToB ein, das bei KTS offensichtlich noch nicht erreicht wurde. Die modifizierte Kiestragschicht Km war nach dem Dauerschwellversuch weniger plastisch verformt als Kg.

Bei den untersuchten ToB besteht eine gute Korrelation zwischen dem Anstieg der Verformung bei Unterlast und der bleibenden Verformung nach Abschluss der Versuche.

4.3 Wasserdurchlässigkeit

Der mit dem Doppelring-Infiltrationsmeter auf der eingebauten ToB gemessene Durchlässigkeitsbeiwert ist für jeden Messort in der Tabelle in Anlage 6 aufgeführt. Bezogen auf die Bewertung nach DIN 18130-1, die in Tabelle 3 aufgeführt ist, und nach dem Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen [6] können die ToB als „stark durchlässig“ beurteilt werden. Zum Vergleich der ToB sind die aus drei Messorten gemittelten Durchlässigkeitsbeiwerte in Bild 16 aufgetragen.

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, der im Laborversuch am Baustoffgemisch nach DIN 18130-1 ermittelt wurde (Tabelle 1), ist für S1 und Km bei vergleichbarer Wasserdruckhöhe „stark durchlässig“ und hatte damit eine sehr gute Übereinstimmung zu der im Prüfstand eingebauten ToB, wenn man be-

k [m/s]	Bereich
unter 10 ⁻⁸	sehr schwach durchlässig
10 ⁻⁸ bis 10 ⁻⁶	schwach durchlässig
über 10 ⁻⁶ bis 10 ⁻⁴	durchlässig
über 10 ⁻⁴ bis 10 ⁻² = 10 ⁻⁵ bis 1.000 10 ⁻⁵	stark durchlässig
über 10 ⁻²	sehr stark durchlässig

Tab. 3: Durchlässigkeitsbereiche in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert k nach DIN 18130-1, Tabelle 1

achtet, dass eine Klasse der Wasserdurchlässigkeit im Bereich von zwei Zehner-Potenzen liegt (Tabelle 3).

Dagegen ist bei KTS und Kg mit nicht gebrochener Gesteinskörnung < 8 mm die im Labor gemessene Wasserdurchlässigkeit mit ca $1 \cdot 10^{-5}$ und der Bewertung „durchlässig“ (Tabelle 3) geringer als auf

der eingebauten ToB gemessen ($24 \cdot 10^{-5}$ bis $72 \cdot 10^{-5}$, Anlage 6) und unterschreitet den nach dem Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen [6] geforderten Mindestwert $\geq 5,4 \cdot 10^{-5}$ [m/sec].

Aus der vergleichenden Darstellung der Wasserdurchlässigkeit vor und nach dem Dauerschwellversuch ist keine eindeutige Tendenz einer Verbesserung oder Verschlechterung zu erkennen (Anlage 5).

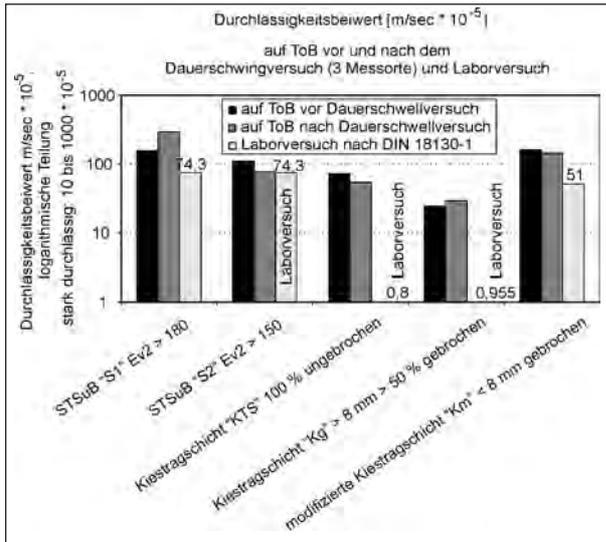


Bild 16: Durchlässigkeitsbeiwerte der ToB vor und nach dem Dauerschwingversuch mit > 3 Mio LW als Mittelwert aus 3 Messorten, und Ergebnis der Labormessung

4.4 Einsenkungsverhalten der Betonplatten-Fugenränder auf ToB

Bei den Dauerschwingversuchen mit aufgelegter Betonplatte wurden je Versuchsreihe über 3,1 Mio Lastwechsel aufgebracht. In Abhängigkeit von der Lastwechselzahl ist in Anlage 9 bis Anlage 11 die Schwingweite während der kraftgesteuerten Versuchsphasen 1 bis 4 dargestellt. Die Verformung der beiden Fugenränder (Fugenrand 1 zuerst befahren, Fugenrand 2 danach befahren) bei Unterlast ist für alle fünf untersuchten Tragschichten in Bild 17 dargestellt, sodass ein direkter Vergleich möglich ist. Die Einzelwerte der Einsenkung bei Unterlast und bei Oberlast für die beiden Fugenränder zu Beginn und am Ende einer Versuchsphase sind in der Tabelle der Anlage 7 zusammengestellt.

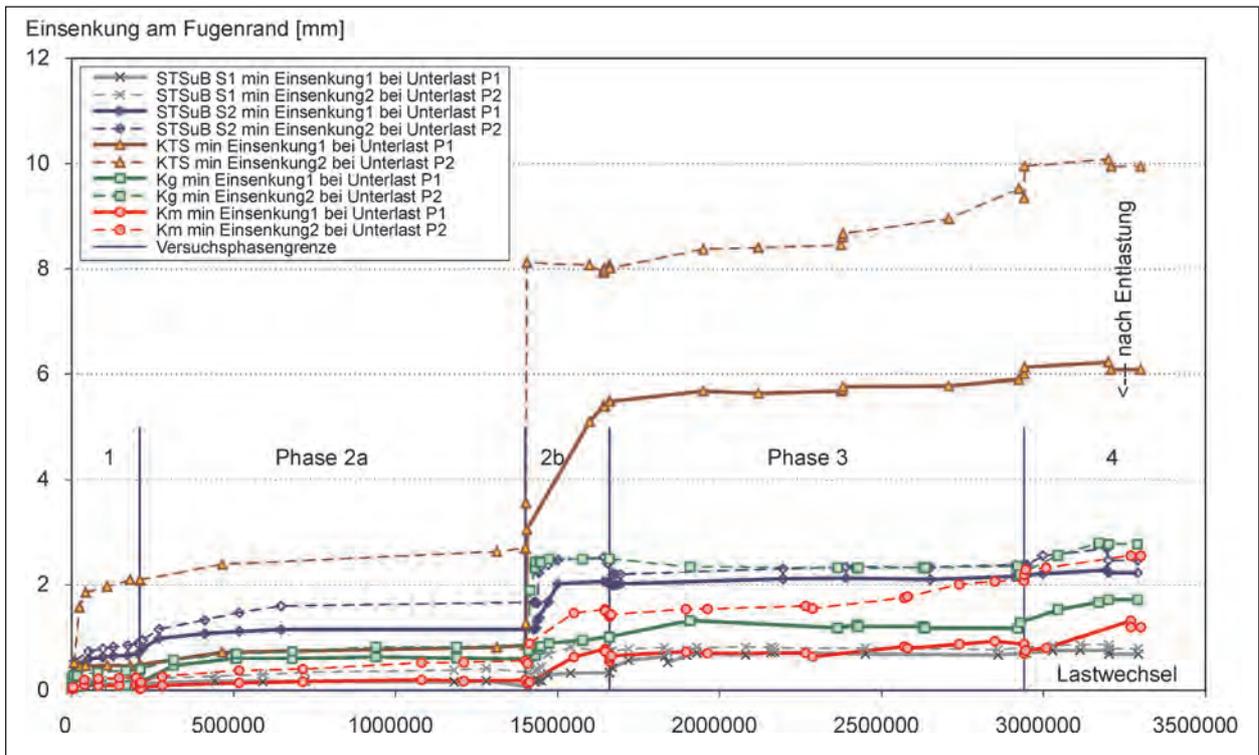


Bild 17: Einsenkung am Fugenrand 1 mit Last P1 und am Fugenrand 2 mit Last P2, jeweils bei Unterlast im Dauerschwingversuch mit > 3 Mio LW, 4 Versuchsphasen

In Abhängigkeit von der Lastwechselzahl ist in Anlage 9 bis Anlage 11 die Schwingweite während der kraftgesteuerten Versuchsphasen 1 bis 4 dargestellt.

Als Kriterium für das elastisch-plastische Verhalten einer ToB unter Betondecken wurde vereinfachend die bleibende Einsenkung der Betonplatten nach dem Dauerschwingversuch, gebildet aus einem Mittelwert der Verformung der beiden Fugenränder, zusammengefasst. Der Wert ist etwa halb so groß wie die aus zwei Plattendruckversuchen ermittelte bleibende Verformung nach 10.000 LW mit einer Lastplatte auf ToB (Bild 18 und Tabelle in Anlage 8). Das bedeutet, dass die bleibende Einsenkung einer Betondecke auf ToB im Wesentlichen von der Eigenschaften der ToB abhängt.

Ebenso besteht eine Proportionalität der aus zwei Messorten (P1 und P2) gemittelten Steigung der bleibenden Verformung im Dauerschwellversuch mit Lastplatte auf ToB und der mittleren Steigung der bleibenden Einsenkung der Fugenränder im Dauerschwingversuch bei Versuchsphase 1 mit 0,2 mm Schwingweite (Anlage 8 und Bild 18). Bzgl. dieser Kennzahl (Steigung) hat die STSuB S1 mit einem E_{V2} -Wert $> 180 \text{ N/mm}^2$ das günstigste Verhalten, gefolgt von der zweiten Schottertragschicht mit einem E_{V2} -Wert von annähernd 150 N/mm^2 . Wie in früheren Versuchen [12] zeigt die Kiestragschicht KTS mit 100 % Rundkorn das ungünstigste

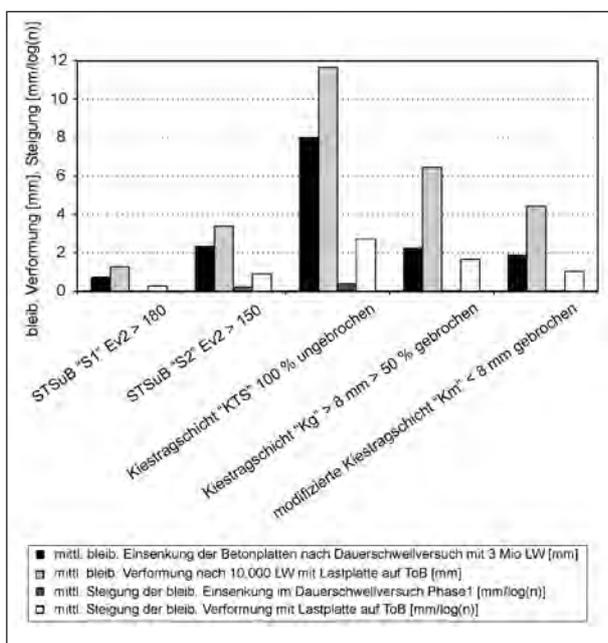


Bild 18: Verformungen bei den Dauerschwellversuchen mit Lastplatte (siehe Bild 15) und beim Dauerschwingversuch mit Betonplatten auf ToB

Verformungsverhalten. Die beiden modifizierten Kiestragschichten liegen bei diesem Kennwert dazwischen: Die modifizierte Kiestragschicht Km mit gebrochenem Anteil unter 8 mm schneidet günstiger ab gegenüber einem gebrochenen Anteil über 8 mm (Kg). Dies bedeutet, dass eine gebrochene feine Gesteinskörnung das elastisch-plastische Verhalten einer ToB günstig beeinflusst.

4.5 Auswirkung von Wasserzugabe auf das Verhalten

Wassergehalt

Die Tragfähigkeit einer Tragschicht wird von einem Wassergehalt über dem Optimum nach PROCTOR bis hin zu einer Wassersättigung ungünstig beeinflusst, was bei nicht oder schlecht funktionierender Entwässerung über einen längeren Zeitraum auftreten kann. Beim Dauerschwingversuch wurde über die Fuge Wasser von oben zugegeben (Bild 19), sodass sich zeitweise ein Wasserspiegel bis Unterkante Betonplatte bzw. Oberkante ToB einstellte. Augenscheinlich wurde das Wasser bei dieser Versuchsphase am schlechtesten von der Kies-



Bild 19: Gezielte Wasserzugabe an der Fuge; STSuB S1 nach 1,45 Mio LW

tragschicht Kg abgeführt, die auch die größte Kornumlagerung (seitliches Auspumpen) aufwies.

Wasserzugabe an der Fuge

Im Verlauf der Einsenkung beim Dauerschwingversuch fällt besonders der starke Anstieg bei Versuchsphase 2b auf (Bild 17 sowie Anlage 9 bis Anlage 11), in der mit der Wasserzugabe über die Fuge begonnen wurde. Anlage 8 zeigt den Verhältniswert der Einsenkung am Ende der Versuchsphase 2b mit Wasserzugabe gegenüber der Einsenkung am Ende der Versuchsphase 2a noch ohne Wasserzugabe. Außerdem wird der Verhältniswert der Einsenkung aus erster Messung nach und letzter Messung vor der ersten Wasserzugabe zu Beginn der Versuchsphase 2b dargestellt. Abgebildet sind dabei die Verhältniswerte am Fugenrand 1, da die Last P1 über die gesamte Phase konstant war. Daraus wird deutlich, dass der Einsenkungsanstieg bei allen ToB in der gesamten Phase 2b sehr groß ist, am größten fällt er bei KTS aus. Bei der STSuB S1 ist zu berücksichtigen, dass trotz des großen Verhältniswertes absolut eine geringe Einsenkungszunahme nach Wasserzugabe aufgetreten ist. Ansonsten war der Einfluss bei S2 am geringsten, was offensichtlich an der stärksten Belastung und der entsprechend großen Vorverformung liegt. Erwähnt sei, dass eine Reihung der ToB durch die unterschiedliche Anzahl an Wasserzugaben und unterschiedlich große Belastungen der einzelnen Platten erschwert wird.

Für den gegenüberliegenden Fugenrand 2 ist der Verhältniswert nach erster Wasserzugabe in Anlage 8 unten dargestellt. Daraus lassen sich keine ein-

deutigen Tendenzen ableiten. Die Werte liegen zwischen 1 und 2,5.

Der Anstieg der bleibenden Einsenkung zu Beginn der ersten Wasserzugabe in Phase 2b korrespondiert mit einem kurzzeitigen starken Anstieg der Schwingweite am Fugenrand 2 (Anlage 14), aus dem die in Fahrtrichtung fallende Stufenbildung (Anlage 12 und Anlage 13) resultiert.

In einer Betrachtung der Wasserzugaben in Phase 3, nachdem eine starke Zunahme der Einsenkung zu Beginn der Phase 2b eingetreten ist, kann keine eindeutige Reaktion des Tragsystems auf die Zugabe von Wasser im Fugenbereich festgestellt werden. Die Änderung der Schwingweite ist minimal (Anlage 14). Auch die bleibende Einsenkung erfährt in dieser Phase direkt nach Wasserzugabe allenfalls eine minimale Änderung, wobei sowohl geringe Zunahmen als auch geringe Abnahmen beobachtet werden können. Demnach kann das Vorhandensein von Wasser eine weitere Verdichtung ermöglichen, andererseits die Tragfähigkeit insbesondere im wassergesättigten Zustand reduzieren. Deshalb sollte auf eine funktionierende Entwässerung bei der Planung und Unterhaltung von Straßenkonstruktionen geachtet werden.

4.6 Zustand der ToB nach 3 Mio Lastwechseln und Wasserzugaben

Zustand der Oberfläche der ToB

Nach Abschluss der Dauerschwingversuche wurde die Oberfläche der ToB durch Abheben der Platten freigelegt. Gegenüber dem Zustand vor den Versuchen zeigte sich durch Einfluss der Wasserzugabe



Bild 20: STSuB aus natürlicher Gesteinskörnung nach neunjähriger Nutzungsdauer, Schnitt 30 cm hinter der Querfuge; gute Wasserdurchlässigkeit [15]

an der Fuge – zunächst als verdübelt, dann in der Schlussphase als unverdübelt simuliert – und durch das Pumpen an den Fugenrändern ein Freilegen der groben Gesteinskörnung im Fugenbereich (Bild 21 bis Bild 24 und Anlage 18 bis Anlage 23).

Infolge der phasenverschobenen Belastung der Fugenränder mit einem entsprechenden Pumpeffekt stellten sich am Fugenrand 2, der zuletzt befahrenen Platte, eine größere Einsenkung und bleibende Verformung (Anlage 7) ein. Dies steht in Übereinstimmung mit den Beobachtungen der Stufenbildung an Querfugenrändern einer Betonfahrbahn, bei der die zuletzt befahrene Platte tiefer liegt als die zuerst befahrene Platte (in Fahrtrichtung abfallende Stufenbildung).

Wie bereits die Verformungskurven und die Stufenbildung gezeigt haben, war das Freilegen der gro-

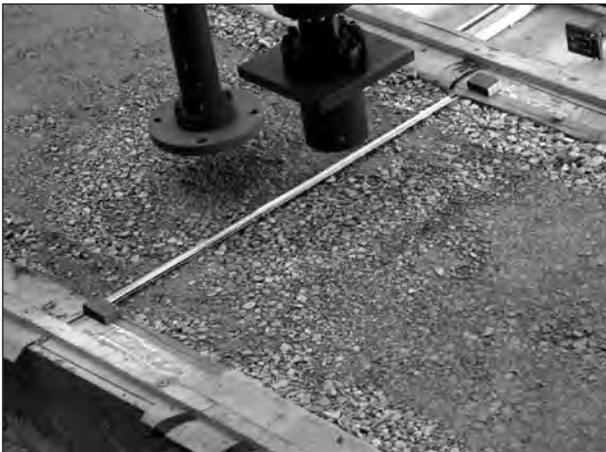


Bild 21: Oberfläche der freigelegten STSuB S1 nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe; simulierte Fahrtrichtung von rechts (Platte 1) nach links; das helle Maßband markiert den Verlauf der – zunächst als verdübelt, dann in der Schlussphase als unverdübelt simulierten – Fuge



Bild 22: Oberfläche der freigelegten Kiestragschicht KTS nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe; simulierte Fahrtrichtung von rechts (Platte 1 mit Prüfzylinder P1) nach links; die dunkelgraue Markierung zeigt die – in der Schlussphase unverdübelte – Fuge an

ben Gesteinskörnung an der zuletzt befahrenen Platte, dem Fugenrand 2, größer (auf eine Länge von etwa 50 cm) als beim zuerst befahrenen Fugenrand 1. Die Auswirkungen durch Wassereintrag und Pumpen sind auch in situ zu beobachten. Bild 20 zeigt, dass Wasser- und Schmutzeintrag durch die nicht mehr dichte Fuge von oben und durch evtl. Umlagerung von Feinanteil vorhanden sind und nach außen zunehmen, da zum freien Plattenrand hin die Einsenkung und Pumpwirkung größer wird, insbesondere bei fehlendem Standstreifen.

Das Freilegen der groben Gesteinskörnung trat bei den ToB in unterschiedlichem Ausmaß auf, besonders bei der Kiestragschicht Kg wurden feine Gesteinskörnungen parallel zur Fuge an den Plattenrand gespült und dort abgelagert, siehe Bild 23 und Anlage 19. Im Vergleich zu den anderen ToB war bei Kg die Kornumlagerung am größten. Bei KTS stellte sich an der Fuge eine Stufe der OK Kiestragschicht von ca. 2 cm ein. Bei der – unter den



Bild 23: Oberfläche der freigelegten Kiestragschicht Kg nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe; simulierte Fahrtrichtung von rechts (Platte 1 mit Prüfzylinder P1) nach links



Bild 24: Oberfläche der freigelegten modifizierten Kiestragschicht Km nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe; simulierte Fahrtrichtung von rechts (Platte 1) nach links; das weiße Maßband markiert den Verlauf der – zunächst als verdübelt, dann in der Schlussphase als unverdübelt simulierten – Fuge

ToB größten gemessenen bleibenden Einsenkung der Platte von ca 1 cm (Anlage 7) ist dies mit einer Hohllage von 1 cm verbunden. Bei Km war die Oberflächenstruktur bereits nach dem Einbau sehr „körnig“, verbunden mit einer geringeren oberseitigen Strukturänderung (Bild 24 und Anlage 20).

Die veränderte Oberflächenstruktur hatte offensichtlich auf das Tragverhalten des Betondeckensystems im Prüfstand keinen ungünstigen Einfluss. Beim Ausbau der ToB wurde festgestellt, dass diese Veränderung sich auf die oberen Zentimeter beschränkt, während die Struktur darunter offensichtlich homogen war und dem Zustand vor dem Einbau entsprach.

Wasserdurchlässigkeit

Eine grafische Darstellung der Veränderung der gemessenen Wasserdurchlässigkeit vor und nach dem Dauerschwingversuch, getrennt nach Messort, zeigt in Anlage 5, dass keine eindeutige Tendenz festzustellen ist. Hierbei ist anzumerken, dass die Veränderungen der Wasserdurchlässigkeit nur zwischen einem Verhältniswert von 0,4 und 2,3 lagen, was angesichts der zwei Dekaden umfassenden Wasserdurchlässigkeitsbewertung „stark durchlässig“ nur eine geringe Veränderung der Wasserdurchlässigkeit bedeutet.

Kornumlagerung

Beim Ausbau der ToB wurden an 3 Stellen, an der Oberfläche (bis zu einer Tiefe von etwa 10 cm) und an der Unterseite im Fugenbereich, Proben entnommen, an denen die Kornverteilungskurve bestimmt wurde. Diese Kornverteilungskurven

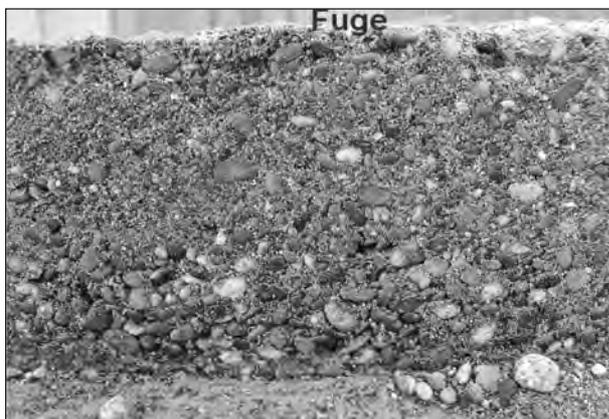


Bild 25: Seitenfläche der modifizierten Kiestragschicht Km beim Abbau des Prüfstands: hohe Standfestigkeit und homogene Struktur über die Dicke der ToB im Fugenbereich

sind in Anlage 15 bis Anlage 17 zusammen mit der Körnungskurve beim Einbau der Tragschicht aufgetragen. Im Feinkornbereich konnte dabei tendenziell eine geringfügige Zunahme der Masseanteile beim ausgebauten Gemisch gegenüber dem eingebauten Gemisch, hervorgerufen durch Verdichtungen, festgestellt werden. Eine eindeutige Feinkornumlagerung an die Unterseite der ToB konnte daraus nicht abgelesen werden. Die geringen Unterschiede der untersuchten Proben von der Unter- und Oberseite dürften im Streubereich der ToB liegen.

Auch bei einer augenscheinlichen Überprüfung beim Ausbau wurde keine Strukturveränderung mit zunehmender Tiefe festgestellt. Die offensichtlichen Veränderungen (Bild 21) beziehen sich nur auf die Oberfläche der ToB. Die hohe Standfestigkeit und homogene Struktur der Tragschicht Km zeigt nach Abschluss der Versuche und Abbau der Betonbegrenzung das Bild 25.

5 Bewertung der Versuchsergebnisse

5.1 Druckbeanspruchung der ToB

Eine Tragschicht ohne Bindemittel unterliegt unter Betondecken einer besonderen Beanspruchung. Gegenüber der Anordnung unter einem Asphalt- oberbau ist die flächige Druckspannung zwar geringer, im Fugenbereich tritt jedoch bei Nachlassen der Querkraftübertragung (Dübel) eine kurzzeitige phasenverschobene Einsenkung der Fugenränder auf, die ein Pumpen verursacht.

Beim statischen und dynamischen Plattendruckversuch (1. Phase) wird eine vertikale gleichmäßige Druckspannung bis $0,5 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht. Diese Spannung wurde in der 2. Phase des Dauerschwellversuchs auf $0,7 \text{ N/mm}^2$ erhöht.

Am Querfugenrand einer Betonfahrbahn kann bei einer Einsenkung von 0,2 mm die Vertikalspannung unter Annahme einer elastischen Bettung zu $0,02 \text{ N/mm}^2$, bei einer Einsenkung von 0,7 mm zu 0,07 bis $0,09 \text{ N/mm}^2$ abgeschätzt werden. Zum Zeitpunkt der Überfahrt über die Fuge hat dort die Druckspannung ein Maximum (impulsartig in Abhängigkeit von der vorhandenen Querkraftübertragung) und in Fahrtrichtung gesehen einen entsprechend der Biegelinie abklingenden Verlauf.

Bei der Bestimmung des CBR-Wertes wird auf dem Baustoffgemisch 0/22 der ToB ohne Überkorn nach vier Stunden Wasserlagerung eine konzentrierte Druckspannung von 6 bis 13 N/mm² bei 2,5 mm Weg eingeleitet. Bei der durchgeführten Versuchsreihe waren die CBR-Werte der modifizierten Kiestragschichten größer als die der Schottertragschicht. Der CBR-Wert ist demnach kein geeignetes Kriterium für die Beurteilung der Tragfähigkeit einer ToB unter Betondecken.

5.2 Vergleich/Reihung der ToB

Wie bereits bei den einzelnen Versuchen an den ToB festgestellt, tritt bei einer Bewertung anhand der verschiedenen Kennwerte jeweils fast die gleiche Reihenfolge auf: Am günstigsten verhält sich die STSuB S1 ($E_{V2} \geq 180$ N/mm²), gefolgt von der STSuB S2, die aus demselben gebrochenen Felsgestein besteht, jedoch den geringeren Verformungsmodul von $E_{V2} \geq 150$ N/mm² aufweist, dann die modifizierte Kiestragschicht Km. Schlechter verhielt sich die Tragschicht Kg und am ungünstigsten die Kiestragschicht KTS (100 % ungebrochen).

Von den untersuchten Kiestragschichten wies die modifizierte Kiestragschicht Km die beste Eignung für die Anwendung unter einer Betondecke auf. Sie hat eine ausreichend große, mit dem Doppelring-Infiltrimeter gemessene Wasserdurchlässigkeit im eingebauten Zustand. Die nach DIN 18130-1 gemessene Wasserdurchlässigkeit erfüllte die Anforderungen nach dem „Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen“ [6] und die Kornumlagerung war den untersuchten STSuB vergleichbar gering. Der geforderte Verformungsmodul $E_{V2} \geq 150$ N/mm² wurde bei einer Schichtdicke von 30 cm erreicht. Die Überschreitung der Sieblinienbegrenzung bei 2 mm Nenndurchmesser (31 Masse-% anstelle von 28 Masse-%) hatte bei Km offensichtlich keine ungünstige Auswirkung.

Eine Modifizierung der Kiestragschicht durch einen gebrochenen Kornanteil unter 8 mm ist günstiger als ein gebrochener Kornanteil über 8 mm. Dies geht aus der größeren Standfestigkeit beim Dauerschwellversuch und Beständigkeit gegenüber Kornumlagerung und Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 hervor. Dies bedeutet, dass eine gebrochene feine Gesteinskörnung das elastisch-plastische Verhalten einer ToB wesentlich beeinflusst.

5.3 Rechnerischer Einfluss des E_{V2} -Wertes der ToB

Anhand einer theoretischen Untersuchung kann gezeigt werden, dass eine Reduzierung des E_{V2} -Wertes auf OK einer ToB von 180 N/mm² auf 150 N/mm² keine signifikante Erhöhung der Biegespannung in der Betondecke unter Verkehrslast herbeiführt, die Auswirkungen auf das Langzeitverhalten hat. Entscheidend für das Langzeitverhalten sind gleichmäßige Auflagerungsbedingungen der Betondecke.

Bei einer vereinfachten Betrachtung (Zusammenfassung aller Schichten unter der Betonplatte als eine homogene Schicht und Gleichsetzen des E_{V2} -Wertes auf der Oberfläche mit dem E-Modul dieser Schicht von 150 N/mm² bzw. 180 N/mm²) beträgt die Erhöhung der Biegespannung in der Betondecke bei 26 cm bis 30 cm Dicke weniger als 3 %. Eine noch geringere Spannungserhöhung in der Betondecke zeigt eine differenziertere Betrachtung mit mehreren Schichten, sofern die Verringerung des E_{V2} -Wertes von 180 N/mm² auf 150 N/mm² nur aus unterschiedlichen Steifigkeiten der obersten Tragschicht bei sonst gleichen Untergrundverhältnissen unter Planum resultiert.

Bei der Einsenkung fallen die Unterschiede infolge der Reduzierung des E_{V2} -Wertes der ToB von 180 N/mm² auf 150 N/mm² etwas deutlicher aus. Bei der vereinfachten Betrachtung beträgt die Einsenkungserhöhung am verdübelten Fugenrand unter Einzellast 11,5 %. Bei differenzierter Betrachtung mit mehreren Schichten und gleichen Untergrundverhältnissen sind die Einsenkungsunterschiede dagegen unbedeutend.

Insofern ergeben die theoretischen Untersuchungen unter der Voraussetzung gleichmäßiger Auflagerungsbedingungen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Biegebeanspruchung der Betonplatte in Abhängigkeit vom Verformungsmodul. Der E_{V2} -Wert von 180 N/mm² ist ein zusätzliches Hilfskriterium für einen vorschriftsgemäßen Einbau der 30 cm dicken Schottertragschicht auf Frostschutzschicht mit $E_{V2} \geq 120$ N/mm². Bei Einsatz modifizierter KTS mit einem optimierten Anteil an gebrochener Gesteinskörnung können demnach die Anforderungen an den Verformungsmodul auf der Oberfläche der ToB mit $E_{V2} \geq 150$ N/mm² beibehalten werden.

5.4 Anforderungen an eine modifizierte Kiestragschicht unter Betondecken

Anhand der Untersuchungen sind an eine modifizierte Kiestragschicht zur Anwendung unter Betondecken folgende Anforderungen zu stellen:

- Korngrößenverteilung: korngestuftes Baustoffgemisch aus gebrochener Gesteinskörnung > 8 mm; Korngruppe 0/2 mm aus gewaschenem Brechsand aus gebrochenem Kies; Verwendung von ungebrochener Gesteinskörnung > 8 mm, Erweiterung des Sieblinienbereichs von STSuB bei 2 mm von 28 auf 31 Masse-%; Feinanteil < 0,063 mm im eingebauten Zustand < 5 Masse-%,
- Wasserdurchlässigkeit: in der Laborprüfung Durchlässigkeitsbeiwert $k \geq 5,4 \cdot 10^{-5}$ m/sec; der CBR-Versuch kann entfallen,
- Tragfähigkeit beim Plattendruckversuch: $E_{V2} \geq 150$ N/mm² (auch von der Bemessung her bei Auflagerung auf Frostschuttschicht).

Im Rahmen einer Betondecken-Versuchsstrecke sollte die modifizierte Kiestragschicht 0/32 „Km“ unter Baustellenbedingungen erprobt werden, insbesondere hinsichtlich Transport, Einbau und Standfestigkeit.

6 Zusammenfassung

6.1 Allgemeines

Betondecken auf Schottertragschichten sind bewährte Bauweisen, die in den RStO 01 geregelt sind. Bei der Anwendung von Schottertragschichten unter Betondecken (STSuB) werden besondere Anforderungen nach TL/ZTV SoB-StB 04 gestellt. Damit sollen eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit und Umlagerungs- und Erosionsbeständigkeit sichergestellt werden. Nach früheren Untersuchungen am Prüfamt ist mit Kiestragschichten mit einem optimierten Anteil an gebrochener Gesteinskörnung eine gleich hohe Standfestigkeit wie bei Schottertragschichten zu erreichen. Ob damit auch die geforderte Umlagerungs- und Erosionsbeständigkeit unter Betondecken erreicht werden kann, sollte in einem Großprüfstand im Maßstab 1:1 untersucht werden. Der Versuchsaufbau besteht aus einem durch eine Fuge unterteilten Betonplattenstreifen

auf 5 Varianten einer Tragschicht ohne Bindemittel (ToB), die vergleichend untersucht werden sollten.

6.2 Untersuchte fünf Tragschichten ohne Bindemittel

Die zu untersuchenden fünf ToB 0/32 mm in jeweils 30 cm Schichtdicke wurden entsprechend dem Versuchsprogramm nach Korngrößenverteilung und dem Anteil gebrochener Korngruppen ausgewählt.

S1 Schottertragschicht STSuB aus gebrochenem Felsgestein (Kalkstein) nach TL/ZTV SoB-StB 04. Auf dieser Schottertragschicht sollte ein Verformungsmodul von $E_{V2} \geq 180$ N/mm² erreicht werden.

S2 Der auf der Oberfläche der Schottertragschicht (wie S1) vorgesehene E_{V2} -Wert ≥ 150 N/mm² konnte durch Anordnung eines zusätzlichen Vlieses auf der Unterlage erreicht werden. Dies entspricht der Anforderung bei Auflagerung auf einer Schicht aus frostunempfindlichem Material nach RStO.

KTS Kiestragschicht ausschließlich aus ungebrochener Gesteinskörnung und an der oberen Grenze des Sieblinienbereichs nach TL/ZTV SoB-StB. Die KTS wurde von einem Kieswerk am Oberrhein südlich Karlsruhe zusammengesetzt.

Kg Bei dieser Kiestragschicht ist die Korngruppe über 8 mm zu über 50 % gebrochen (gebrochener Kies). Sie wurde von einem weiteren Werk am Oberrhein südlich Karlsruhe bezogen.

Km Modifizierte Kiestragschicht, Bezeichnung „Km“, aus 4 Korngruppen zusammengesetzt, wobei in Umkehrung zu „Kg“ unter 8 mm eine gebrochene Gesteinskörnung vorhanden und die Korngruppe 0/2 mm gewaschener Brechsand aus gebrochenem Kies ist. Die Korngrößenverteilung liegt etwas über dem Sieblinienbereich einer STSuB bei 2 mm Öffnungsweite.

Die bodenmechanischen Kennwerte (Korngrößenverteilung, Proctordichte, CBR-Wert, Wasserdurchlässigkeit) wurden vom Zentrum Geotechnik der TU München bestimmt. Danach wurden die Anforderungen an die Baustoffgemische i. d. Regel eingehalten.

6.3 Versuchsdurchführung

Folgendes Versuchsprogramm wurde für jede ToB durchgeführt:

- statische Plattendruckversuche auf der ToB an zwei Lastpunkten,
- Dauerschwellversuche mit einer Lastplatte auf ToB an zwei Lastpunkten (10.000 LW),
- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit an drei Messorten mit einem am Prüfamort erstellten Doppelring-Infiltrometer mit kontinuierlicher Messwertaufzeichnung,
- Dauerschwingversuch an der auf ToB aufgesetzten Betonplatte mit unverdübelter Fuge in 4 Phasen mit stufenweise vergrößerter Schwingweite und mit Wasserzugabe über die Fuge (> 3 Mio LW),
- Beurteilung der ToB-Oberfläche nach dem Dauerschwingversuch,
- statische Plattendruckversuche und Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach dem Dauerschwingversuch.

Beim Dauerschwellversuch mit Lastplatte auf der ToB wurden 6.000 Lastwechsel mit 35 kN Oberlast (Maximallast des Plattendruckversuchs) und 4.000 LW mit 50 kN Oberlast (max. Einzel-Radlast eines Lkw) aufgebracht. Damit sollte sehr starker Baustellenverkehr simuliert werden.

Für den Dauerschwingversuch wurde zur Simulation der dynamischen Beanspruchung der ToB unter Betondecken im Querfugenbereich wie in situ bei Überfahrt mit einem schweren Lkw eine Prüfeinrichtung konzipiert. Dazu wurde im Großprüfstand ein Betonplattenstreifen in einer Länge von 5,0 m aufgelegt, der durch eine unverdübelte Fuge getrennt ist (Bild 8). Die Betonplatten wurden im Fugenbereich gegenüberliegend mit zwei Prüfzylindern, die unabhängig und phasenverschoben gesteuert werden können, pulsierend belastet. In umfangreichen Vorversuchen wurde die Steuerung der beiden Prüfzylinder so abgestimmt, dass der zeitliche Verlauf der Belastungen und damit der Einsenkung den Verhältnissen bei Überfahrt einer Fuge mit konstanter Überfahrteschwindigkeit und verschiedenem Wirksamkeitsindex entspricht. Weiter wurden die Prüflasten so eingestellt, dass ein größtmögliches Maß an Übereinstimmung der Einsenkung der Platten im Großprüfstand mit denen in situ unter Verkehrslast besteht. Die Belastung

wurde kraftgesteuert aufgebracht, um bei gleicher Belastung mit einer bleibenden Einsenkung der Platten wirklichkeitsnahe Verhältnisse wie unter Verkehrsbelastung zu schaffen. Die Einsenkung wurde in 4 Versuchsphasen (ab 2. Phase Wasserzugabe über die Fuge) mit insgesamt > 3,1 Mio LW bei einer Prüffrequenz von 3 Hz gesteigert:

- Die Einsenkung von 0,2 mm zu Beginn der Versuchsphase 1 bei einem simulierten Wirksamkeitsindex von 100 % entspricht einem guten Zustand der Fuge bei optimaler Querkraftübertragung.
- Mit einer Einsenkung von 0,5 mm und einem Wirksamkeitsindex von 0 % wird der Zustand ohne Dübel oder nicht mehr wirksamer Dübel erfasst.
- Die letzte Versuchsphase mit 0,7 mm Schwingweite entspricht einer extremen Beanspruchung, z. B. bei Achslasten, die über den zulässigen Bereich der StVZO hinausgehen.

6.4 Versuchsergebnisse

Beim Plattendruckversuch nach DIN 18134 wurde auch bei der STSuB S1 der angestrebte Verformungsmodul von $\geq 180 \text{ N/mm}^2$ übertroffen. Der bei den übrigen ToB angestrebte E_{V2} -Wert von 150 N/mm^2 wurde knapp unterschritten, jedoch steigt der E_{V2} -Wert beim Dauerschwellversuch über 150 N/mm^2 an.

Bei allen untersuchten ToB ist im Dauerschwellversuch mit Lastplatte bei 35 kN Oberlast eine degressive Zunahme der Verformungen zu verzeichnen, wie dies auch bei früheren Untersuchungen an ToB festgestellt wurde. In der Versuchsphase mit 50 kN Oberlast zeigt sich erwartungsgemäß ein deutlicher Anstieg der Verformungen, mit zunehmenden Lastwechseln jedoch ebenfalls abklingend. Im halblogarithmischen Maßstab stellt sich das plastische Verformungsverhalten der ToB bei 35 kN Oberlast in einer linearen Zunahme dar. Eine Reihung der untersuchten ToB bezüglich Zunahme der Verformung und bleibender Verformung ist: S1 (gering) – S2 – Km – Kg – KTS (am größten).

Dauerschwingversuch mit aufgesetzter Betonplatte: Die Zunahme der bleibenden Einsenkung der Fugenränder [mm/log(n)] bei Versuchsphase 1 mit 0,2 mm Schwingweite ist etwa proportional zur Zunahme beim Dauerschwellversuch mit Lastplatte auf ToB. Wie in früheren Versuchen zeigt die Kies-

tragschicht KTS das ungünstigste Verformungsverhalten. Bei den früheren Dauerschwellversuchen auf ToB bewirkte ein gebrochener Anteil von mind. 15 % (Gesteinskörnung > 5 mm) eine Reduzierung der bleibenden Verformung gegenüber einer KTS aus ungebrochener Gesteinskörnung. Deshalb ist eine weitere Verbesserung von Km durch einen gebrochenen Anteil auch > 8 mm zu erwarten. Die modifizierte Kiestragschicht Km mit gebrochenen Korngruppen unter 8 mm schneidet günstiger ab gegenüber einem gebrochenen Kornanteil über 8 mm (Kg). Dies bedeutet, dass eine gebrochene feine Gesteinskörnung das elastisch-plastische Verhalten einer ToB günstig beeinflusst.

Im Verlauf der Einsenkung beim Dauerschwingversuch fällt bei allen ToB der starke Anstieg bei Versuchsphase 2b auf, in der mit der Wasserzugabe über die Fuge begonnen wurde (Faktor 1 bis 2,5). Die größere Einsenkung und bleibende Einsenkung am „zuletzt befahrenen“ Fugenrand stehen in Übereinstimmung mit den Beobachtungen der Stufenbildung in situ (in Fahrtrichtung abwärts) und unterstreichen die Wirksamkeit der gewählten Belastung und Versuchsanordnung.

Nach Abschluss des Dauerschwingversuchs wurde die Oberfläche der ToB durch Abheben der Betonplatten freigelegt. Gegenüber dem Zustand vor den Dauerschwingversuchen zeigte sich durch Einfluss der Wasserzugabe an der Fuge und durch das Pumpen infolge der phasenverschobenen Belastung der Fugenränder ein Freilegen der groben Gesteinskörnung im Fugenbereich. Dies war – wie in situ – am Fugenrand 2 stärker ausgeprägt. Die Veränderung trat bei den ToB in unterschiedlichem Ausmaß auf, besonders bei der Kiestragschicht Kg wurden feine Gesteinskörnungen parallel zur Fuge an den Plattenrand gepumpt und dort abgelagert (Kornumlagerung).

Eine eindeutige Feinkornumlagerung an die Unterseite der ToB konnte aus den Kornverteilungen von Proben von der Ober- und Unterseite der ToB nach Abschluss der Dauerschwingversuche nicht festgestellt werden. Die geringen Unterschiede der untersuchten Proben dürften im Streubereich der ToB liegen. Auch bei einer augenscheinlichen Überprüfung beim Ausbau wurde keine Strukturveränderung mit zunehmender Tiefe festgestellt. Die offensichtlichen Veränderungen beziehen sich nur auf die Oberfläche der ToB unter der Betonplatte.

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert, der im Laborversuch am Baustoffgemisch nach DIN 18130-1 er-

mittelt wurde, entspricht für S1 und Km bei vergleichbarer Wasserdruckhöhe dem Durchlässigkeitsbereich „stark durchlässig“ und hatte damit eine sehr gute Übereinstimmung zum Durchlässigkeitsbeiwert, gemessen mit dem Doppelring-Infiltrometer auf der im Prüfstand eingebauten ToB. Dagegen ist bei KTS und Kg mit nicht gebrochener Gesteinskörnung < 8 mm die im Labor gemessene Wasserdurchlässigkeit mit ca $1 \cdot 10^{-5}$ m/sec und der Bewertung „durchlässig“ geringer als auf der eingebauten ToB gemessen ($72 \cdot 10^{-5}$ bzw. $24 \cdot 10^{-5}$ m/sec) und kleiner als der im „Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen“ [6] geforderte Mindestwert $\geq 5,4 \cdot 10^{-5}$ m/sec.

Eine tendenzielle Veränderung der Wasserdurchlässigkeit vor und nach dem Dauerschwingversuch war bei allen ToB nicht festzustellen.

Bei der Bestimmung des CBR-Wertes wird auf das Baustoffgemisch 0/22 der ToB eine konzentrierte Druckspannung von 6 bis 13 N/mm² bei 2,5 mm Weg eingeleitet. Bei der durchgeführten Versuchsreihe waren die CBR-Werte der modifizierten Kiestragschichten größer als die der Schottertragschicht. Der CBR-Wert ist demnach kein geeignetes Kriterium für die Beurteilung der Tragfähigkeit einer ToB unter Betondecken.

6.5 Folgerungen für die Praxis

Anhand einer theoretischen Untersuchung kann gezeigt werden, dass eine Reduzierung des E_{V2} -Wertes auf OK einer ToB von 180 N/mm² auf 150 N/mm² keine signifikante Erhöhung der Biegespannung in der Betondecke unter Verkehrslast herbeiführt, die Auswirkungen auf das Langzeitverhalten hat. Entscheidend für das Langzeitverhalten sind gleichmäßige Auflagerungsbedingungen der Betondecke.

Der E_{V2} -Wert von 180 N/mm² ist ein zusätzliches Hilfskriterium für einen vorschriftsgemäßen Einbau der 30 cm dicken Schottertragschicht auf Frostschuttschicht mit $E_{V2} \geq 120$ N/mm². Bei Einsatz modifizierter KTS mit einem optimierten Anteil an gebrochener Gesteinskörnung können die Anforderungen an den Verformungsmodul auf der Oberfläche der ToB mit $E_{V2} \geq 150$ N/mm² beibehalten werden.

Anhand der Untersuchungen sind an eine modifizierte Kiestragschicht 0/32 zur Anwendung unter Betondecken folgende Anforderungen zu stellen:

- Korngrößenverteilung: korngestuftes Baustoffgemisch aus gebrochener Gesteinskörnung > 8 mm; Korngruppe 0/2 mm aus gewaschenem Brechsand aus gebrochenem Kies; Verwendung von ungebrochener Gesteinskörnung > 8 mm, Erweiterung des Sieblinienbereichs von STSuB bei 2 mm von 28 auf 31 %; Feinanteil < 0,063 mm im eingebauten Zustand < 5 Masse-%,
- Wasserdurchlässigkeit: in der Laborprüfung Durchlässigkeitsbeiwert $k \geq 5,4 \cdot 10^{-5}$ m/sec; der CBR-Versuch kann entfallen,
- Tragfähigkeit beim Plattendruckversuch: $E_{V2} \geq 150$ N/mm² (auch von der Bemessung her bei Auflagerung auf Frostschutzschicht).

Im Rahmen einer Betondecken-Versuchsstrecke sollte die modifizierte Kiestragschicht 0/32 Km unter Baustellenbedingungen erprobt werden, insbesondere hinsichtlich Transport, Einbau und Standfestigkeit.

7 Verzeichnis der Anlagen

- | | | | |
|----------|--|-----------|--|
| Anlage 1 | Baustoffgemisch 0/32 für Schottertragschichten unter Betondecken nach TL/ZTV SoB-StB 04 | Anlage 6 | Durchlässigkeitsbeiwert [m/sec], gemessen mit dem Doppelring-Infiltrometer, Wasserspiegelhöhe 30 mm; eingebaute Schottertragschichten STSuB S1 und S2 und Kiestragschichten vor Dauerschwingversuch (v) und nach dem Dauerschwingversuch (n) |
| Anlage 2 | Einflusslinie der Einsenkung am Fugenrand | Anlage 7 | Einsenkung der Fugenränder 1 und 2 [mm] bei Unterlast und Oberlast (Schwingweite) im Dauerschwingversuch mit Betonplatte auf ToB zu Beginn und Ende der Phasen und bleibende Einsenkung der Fugenränder nach dem Dauerschwingversuch |
| Anlage 3 | Biegelinien von Betondecken beim Lastfall Plattenmitte und Fugenrand mit einem Wirksamkeitsindex von 0 und 90 % | Anlage 8 | Zunahme der Einsenkung der Fugenränder [mm/log(n)] im Dauerschwingversuch mit Betonplatten auf ToB bei Unterlast und Oberlast, Fugenrand 1 (zuerst befahren) und Fugenrand 2, Versuchsphase1; Einsenkungsänderung (Faktor) durch Wasserzugabe beim Dauerschwingversuch auf Betonplatte mit Belastung P1 und P2 |
| Anlage 4 | Schwingweite der Verformung (minimale und maximale Verformung) bei 2 kN Unterlast und 35 bzw. 50 kN Oberlast beim Dauerschwellversuch auf den ToB, zwei Belastungspunkte (P1 und P2) je ToB | Anlage 9 | Dauerschwingversuch mit Betonplatten auf STSuB mit 4 Phasen bis 3,1 Mio LW, minimale und maximale Verformung (Schwingweite), Fugenrand 1 mit Belastung P1 (zuerst befahren) und Fugenrand 2 mit Belastung P2 |
| Anlage 5 | Verformung [mm] beim Dauerschwellversuch mit Lastplatte auf der ToB bei Unterlast am Ende der Phase, bleibende Verformung nach dem Dauerschwellversuch und Zunahme der Verformung [mm/log(n)] in der ersten Phase bis 6.000 LW, Verhältniswert der Wasserdurchlässigkeit vor und nach dem Dauerschwingversuch mit Betonplatte, Messort W1 bis W3 | Anlage 10 | Dauerschwingversuch mit Betonplatten auf ToB mit 4 Phasen bis 3,1 Mio LW, minimale und maximale Verformung (Schwingweite), Fugenrand 1 mit Belastung P1 (zuerst befahren) und Fugenrand 2 mit Belastung P2 |
| | | Anlage 11 | Dauerschwingversuch mit Betonplatten auf modifizierten Kiestragschichten mit 4 Phasen bis 3,1 Mio LW, minimale und maximale Verformung (Schwingweite), Fugenrand 1 mit Belastung P1 (zuerst befahren) und Fugenrand 2 mit Belastung P2 |
| | | Anlage 12 | Verlauf der Stufenbildung im Fugenbereich im Dauerschwingversuch mit Betonplatten; Schottertragschicht STSuB S1 und S2, modifizierte Kiestragschicht Kg |
| | | Anlage 13 | Verlauf der Stufenbildung im Fugenbereich im Dauerschwingversuch mit Be- |

- tonplatten; Kiestragschicht KTS, modifizierte Kiestragschicht Kg
- Anlage 14 Verlauf der Schwingweite im Fugenbereich beim Dauerschwingversuch mit Betonplatten bis > 3 Mio LW
- Anlage 15 Körnungskurven vor dem Einbau der STSuB und an drei Entnahmestellen beim Ausbau nach dem Dauerschwingversuch auf der ToB (1x an der Oberfläche der ToB, 2x an der Unterseite der ToB im Fugenbereich)
- Anlage 16 Körnungskurven vor dem Einbau der Kiestragschicht KTS und an drei Entnahmestellen beim Ausbau nach dem Dauerschwingversuch auf der Kiestragschicht KTS (1x an der Oberfläche der ToB, 2x an der Unterseite der ToB im Fugenbereich)
- Anlage 17 Körnungskurven vor dem Einbau der ToB und an drei Entnahmestellen beim Ausbau nach dem Dauerschwingversuch auf der ToB (1x an der Oberfläche der ToB, 2x an der Unterseite der ToB im Fugenbereich)
- Anlage 18 Bilder: Oberfläche der STSuB S1 nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe; Oberfläche der STSuB S2 nach dem Dauerschwellversuch mit Wasserzugabe
- Anlage 19 Bilder: Oberfläche der Kiestragschicht KTS nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe; Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht Kg nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe
- Anlage 20 Bild: Oberfläche der modifizierten Kiestragschicht Km nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe; das helle Maßband markiert den Verlauf der Fuge
- Anlage 21 Bilder: Zustand der Oberfläche der STSuB vor und nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe in Versuchsphase 2b und 3, zwischen den Zylindern die Fuge der Betonplatten; STSuB S1 und STSuB S2
- Anlage 22 Bilder: Zustand der Oberfläche der Kiestragschichten vor und nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe in Versuchsphase 2b und 3, zwischen den Zylindern die Fuge der Betonplatten; Kiestragschicht KTS und modifizierte Kiestragschicht Kg
- Anlage 23 Bilder: Zustand der Oberfläche der Kiestragschicht vor und nach dem Dauerschwingversuch mit Wasserzugabe in Versuchsphase 2b und 3, zwischen den Zylindern die Fuge der Betonplatten; modifizierte Kiestragschicht Kg
- Auf die Wiedergabe dieser Anlagen wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar.

8 Literatur

- [1] NOSKE, E.: Erfahrungssammlung zu Fahrbahndecken auf Tragschichten ohne Bindemittel (Schottertragschichten) für Bauklassen SV und I bis III; Straße+Autobahn 2001 Heft 8, S. 458-460
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO 01); Ausgabe 2001
- [3] Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – TL SoB-StB 04, Ausgabe 2004
- [4] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – ZTV SoB-StB 04, Ausgabe 2004
- [5] DIN 18130-1, 1998-05 Baugrund – Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche DIN 18130
- [6] Merkblatt für wasserdurchlässige Befestigungen von Verkehrsflächen (1998), FGSV Nr. 947
- [7] KELLERMANN, Ch.: Zur Bewertung des Infiltrationsverhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel; Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen und Eisenbahnbau der Ruhr-Universität Bochum, Heft 19, 2003

- [8] DIN 19682-7, Ausgabe:1997-04 Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau – Felduntersuchungen – Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelzylinder-Infiltrimeter
- [9] DIN 18130-2: Norm-Entwurf, 2003-10 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes – Teil 2: Feldversuche
- [10] DIN 18134: 2001-09 Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte – Plattendruckversuch
- [11] LEYKAUF, G., BIRMANN, D.: Kies und Sand im Verkehrswegebau – neue Erkenntnisse und Entwicklungen. In: Kies + Sand Gesteinsperspektiven (2004) 2, S. 28
- [12] LEYKAUF, G., BIRMANN, D.: Untersuchungen zur Standfestigkeit von Kies-/Schottertragschichten; Forschungsbericht Nr. 2149 vom 07.10.2004
- [13] WELLNER, F., WERKMEISTER, S.: Beitrag zur Untersuchung des Verformungsverhaltens ungebundener Gesteinskörnungen mit Hilfe der Shakedown-Theorie, Straße und Autobahn 6/2000, S. 369 – 375
- [14] WERKMEISTER, S.: Plastisches Verformungsverhalten von Tragschichten ohne Bindemittel in Straßenbefestigungen; Dissertation TU Dresden 2003
- [15] NOSKE, E.: Erfahrungen zum Langzeitverhalten von Betondecken auf Schottertragschichten; Workshop zu den "Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen" (RStO 01), Berlin 10.02.2006
- [16] DIN ISO/TS 17892-11:2005-01 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 11: Bestimmung der Durchlässigkeit mit konstanter und fallender Druckhöhe

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

1993

- S 1: Verwitterungsbeständigkeit von Recycling-Baustoffen
Guth kostenlos
- S 2: Eignung von Grubenbergen als Baustoff für Tragschichten
ohne Bindemittel
Guth kostenlos
- S 3: Altlastenerfassung durch geophysikalische Methoden
Faust kostenlos
- S 4: EPS-Hartschaum als Baustoff für Straßen
Bull-Wasser kostenlos
- S 5: Baubegleitende Messungen B 73n
Heinisch, Blume kostenlos
- S 6: Eignung überdeckter Fugen mit Querkraftübertragung
Fleisch, Bartz kostenlos

1994

- S 7: 33. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 14,00

1995

- S 8: Anleitung Qualitätsmanagementplan Asphalttragschichten
Freund, Stöckner € 12,50
- S 9: Meßwert- und rechnergestütztes Management der Stra-
ßenenerhaltung – Niederschrift und Referate des Erfahrungsaustau-
ches am 16. und 17. Mai 1995 in Berlin € 13,00
- S 10: 34. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 14,00

1996

- S 11: Der Einfluß der Textur auf Reifen/Fahrbahngeräusch und
Rollwiderstand – Untersuchungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahr-
bahn
Ullrich, Glaeser, Sander, Chudalla, Hasskelo, Löffler,
Sievert € 15,00
- S 12: Offenporige Asphaltdeckschichten auf Außerortsstraßen –
Projektgruppe „Lärmindernde Straßendecken“ € 10,00
- S 13: Qualität von mineralischen Straßenbaustoffen
Tabbert € 16,50

1997

- S 14: 35. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 16,50
- S 15: Anforderungen an Fugenfüllsysteme aus Temperaturdeh-
nungen
Eisenmann, Lechner € 12,50
- S 16: Sicherheitswirksamkeit ausgewählter Straßenbaumaß-
nahmen im Lande Brandenburg
Schnüll, Handke, Seitz € 22,00

1998

- S 17: Restnutzungsdauer von Asphaltsschichten – Prüfung der
Grundlagen zu ihrer Berechnung
Wolf, Schickle € 13,00

- S 18: 2. Erfahrungsaustausch über rechnergestütztes Stra-
ßen-erhaltungsmanagement € 14,50

- S 19: Einfluß der Bruchflächigkeit von Edelsplitten auf die Stand-
festigkeit von Asphalten
Teil 1: Literaturlauswertung
Beckedahl, Nösler, Straube
Teil 2: Einfluß des Rundkornanteils auf die Scherfestigkeit von
Gesteinskörnungen
Diel € 16,50

1999

- S 20: 36. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 14,00
- S 21: Walzbeton: Ergebnisse aus neuester Forschung und lang-
jähriger Praxis – Kompendium
Birmann, Burger, Weingart, Westermann
Teil 1: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von
Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (1)
Schmidt, Bohlmann, Vogel, Westermann
Teil 2: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von
Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (2)
Weingart, Dreßler
Teil 3: Messungen an einer Versuchsstrecke mit Walzbeton-Trag-
schicht an der B54 bei Stein-Neukirch
Eisenmann, Birmann
Teil 4: Temperaturdehnung, Schichtenverbund, vertikaler Dichte-
verlauf und Ebenheit von Walzbeton
Burger € 17,00

2000

- S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen
Straßenenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenenerhaltung
€ 19,50
- S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany,
v. d. Elshout, Sym € 10,50

2001

- S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Unter-
grund - Konsolidationsverfahren -
Teil 1: Vergleichende Betrachtung von Konsolidationsverfahren beim
Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund
Teil 2: Erfahrungsberichte über ausgeführte Straßenbauprojekte auf
wenig tragfähigem Untergrund unter Verwendung von Konsolida-
tionsverfahren
Koch € 17,50
- S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 16,50

2002

- S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Unter-
grund - Aufgeständerte Gründungspolster
Rogner, Stelter € 14,00
- S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von
Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung
der ZTV-M 02
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50
- S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundes-
fernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität
des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am
25./26. September 2000 in Saarbrücken € 13,00
- S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines For-
schungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeits-
ausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saar-
brücken € 13,50

2003

- S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System –
€ 19,50
- S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues
Golkowski € 13,50
- S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2002 in Saarbrücken € 13,50
- S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 17,50
- S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

2004

- S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren
Grundhoff, Kahl € 17,50
- S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50
- S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

2005

- S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken € 16,50
- S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt
Renken, Büchler € 16,00
- S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 17,50
- S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben
Schröder € 13,50
- S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt
Wörner, Metz € 17,50
- S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk
Krajewski, Kuhl € 14,00
- S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

2006

- S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00
- S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

- S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

- S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2007

- S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50
- S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden
€ 15,50
- S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50
- S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

2008

- S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 24./25. September 2007 in Bonn € 15,50
- S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Sliwa, Roßbach, Wenzl € 12,50
- S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.