

# **Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 70**

**bast**



# Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen

von

Dirk Jansen  
Kirsten Kunz

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 70**

**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 **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt AP F1100.3206001**  
Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen

### 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](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-86918-139-4

Bergisch Gladbach, Juli 2011

## Kurzfassung – Abstract

### Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen

Aufgrund des im Jahr 2004 fertig gestellten Forschungsprojektes „Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel“ (FE 06.073/2000/FGB) wurde nach kontroverser Diskussion in den zuständigen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen der zulässige Ziegelanteil in den TL Gestein-StB auf 30 M.-% erhöht. Diskussionspunkte waren u. a. die gewählten Prüfverfahren und die mangelnde Praxiserfahrung mit ziegelreichen RC-Baustoffgemischen.

Um die Erkenntnisse aus o. g. Forschungsprojekt zu bestätigen und Praxiserfahrungen zu sammeln, wurde durch das Ministerium für Infrastruktur und Raumordnung Brandenburg der Bau einer Erprobungsstrecke angeboten. Im Jahr 2006 wurde daraufhin eine Erprobungsstrecke im östlichen Brandenburg auf rund 1.200 m eingerichtet, die im April 2007 dem Verkehr übergeben worden ist. Die fachliche Betreuung vor Ort erfolgte durch die TU Cottbus. Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch die Bundesanstalt für Straßenwesen.

In Damm- und Einschnittlage sind jeweils sechs Varianten mit unterschiedlichen Baustoffgemischen für die Tragschicht ohne Bindemittel eingebaut worden. Neben einer Referenzbauweise mit natürlichen Gesteinskörnungen wurden Varianten mit 10, 20, 30 und 40 M.-% Ziegelanteil im RC-Baustoffgemisch eingebaut. Eine weitere Variante sollte aus 40 M.-% Ziegelanteil und 60 M.-% natürlichen Gesteinskörnungen bestehen. Aus baupraktischen Gründen musste der Anteil mit natürlichen Gesteinskörnungen deutlich reduziert werden und teilweise durch Betonbruch ersetzt werden. Die Dicke der Asphaltsschichten und die Dicke des frostsicheren Oberbaus wurden über alle Varianten konstant gehalten. In verschiedenen Tiefen der gebundenen und ungebundenen Schichten des Oberbaus sowie im Untergrund bzw. Unterbau wurden in allen Varianten Temperatur- und Feuchtesensoren eingebaut. Die Messwertaufzeichnung erfolgte stündlich. Des Weiteren wurden eine Wetterstation und eine automatische Verkehrszählung eingerichtet. Zur Dokumentation der Einwirkungen von Verkehr und Klima auf die Erprobungsstrecke erfolgten

Tragfähigkeitsmessungen (Falling-Weight-Deflectometer und Benkelman-Balken) und Höhenmessungen (Feinnivellement) jeweils vor und nach Frostereignissen. Ergänzend wurden an den Baustoffgemischen, neben den Standarduntersuchungen der Eignungs- und Kontrollprüfungen, Frosthebungsversuche nach den TP BF-StB durchgeführt.

Zunächst erfolgte eine Beurteilung des dreijährigen Beobachtungszeitraums. Durch die strengen Winter 2008/2009 und 2009/2010 lagen die Voraussetzungen zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit der Bauweisen vor. Die Tragfähigkeitsmessungen zeigen im Bereich der ziegelreichen Varianten ein im Vergleich zur Referenzbauweise sehr hohes Tragfähigkeitsniveau. Mit zunehmendem Ziegelanteil ist die Tragfähigkeit zwar abnehmend, übertrifft jedoch die gestellten Anforderungen. Als wesentlich hierfür stellte sich der Anteil an Betonbruch im RC-Baustoffgemisch heraus. Wesentliche Frosthebungen wurden auf dem gesamten Streckenabschnitt nicht festgestellt. Die durch die Konsolidierung der Strecke verursachten Senkungen überlagerten Höhendifferenzen liegen lediglich im Bereich von  $\pm 2$  mm. Die im Frosthebungsversuch gemessenen Frosthebungen ließen sich nicht auf die Situation der Erprobungsstrecke übertragen.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse und der Ergebnisse aus zwei weiteren Forschungsprojekten, die rein auf Laboruntersuchungen beruhen, kann die mit Einführung der TL Gestein-StB in 2004 umgesetzte Erhöhung des zulässigen Ziegelanteils in RC-Baustoffen von 30 M.-% als unkritisch angesehen werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die meisten in der Erprobungsstrecke eingesetzten Baustoffgemische die Anforderungen an die mechanische Beständigkeit und Verwitterungsbeständigkeit im Rahmen der Eignungsprüfung nicht erfüllt haben und somit gemäß den TL Gestein-StB und TL SoB-StB nicht zugelassen wären.

Die sehr umfangreiche Datenbasis, die nicht nur im direkten Zusammenhang mit der Erforschung der Eignung ziegelreicher Tragschichten ohne Bindemittel steht, eignet sich auch als Beitrag für andere Fragestellungen der Straßenbautechnik.

### **Test track with binder-free base course made of brick-rich recycled building materials**

The research project "Suitability of brick-rich recycled building materials for base courses without binders" (FE 06.073/2000/FGB) led to intense discussions in the relevant committees of the Research Society for Road and Transport Matters. Subsequently the permitted brick component in the Technical Delivery Conditions for Aggregates in Road Construction was increased to 30% by mass. Points of discussion were, among other issues, the test procedures selected and lack of practical experience with brick-rich recycled building material mixtures.

In order to confirm the findings of the research report mentioned and to acquire practical experience, the Ministry for Infrastructure and Regional Planning in Brandenburg proposed the construction of a test track. In 2006, a test track with a length of 1200 m was built in the eastern part of Brandenburg and opened to traffic in April 2007. The technical support was provided by the Technical University of Cottbus. The scientific support was provided by the Federal Highway Research Institute.

Six versions with different building material mixtures for the base courses without binders were installed in embankment positions as well as in box-cut positions. Versions with a brick component of 10, 20, 30 and 40% by mass in the RC building material mixture were installed in addition to a reference construction with natural aggregate. A further version with a brick component of 40% by mass and a natural aggregate component of 60% by mass was planned. However, practical considerations during the building process required a reduction of the natural aggregate component and its partial replacement with crushed concrete. The thickness of the asphalt layers and the thickness of the frost-protected superstructure were kept constant for all versions. Temperature and humidity sensors were installed at different depths in the bound and unbound layers of the superstructure as well as in the underground or base course of all versions. The measuring values were recorded on an hourly basis. In addition, a weather station and an automatic traffic counter were installed. Carrying capacity measurements (falling weight deflectometer and Benkelmann beam) as well as height measurements (fine levelling) were performed before and after frost

events to document the effects of traffic and climate. Frost heave tests according to Technical Test Regulations for Soil and Rock in Road Construction (TP BF-StB) were performed on the building material mixtures, in addition to standard tests, suitability and control tests.

An evaluation was performed after three years of observation. The harsh winters of 2008/2009 and 2009/2010 provided the preconditions for evaluating the frost sensitivity of the constructions. The carrying capacity measurements showed a very high carrying capacity of the brick-rich versions as compared to the reference construction. The carrying capacity decreased with increasing brick content but exceeded the requirements. The crushed concrete component turned out to be an important element of the recycled building material mixture in this context. No major frost heaving was detected in any place of the whole section. The settling caused by the consolidation of the track only led to height differences of  $\pm 2$  mm. The frost heaving measured by the frost heave test cannot be related to the conditions of the test track.

These results and the findings provided by two additional research projects based on laboratory tests indicate that the increase in the permitted brick component in recycled materials to 30% by mass, which was introduced in the Technical Delivery Conditions for Aggregates in Road Construction 2004 (TL Gestein-StB), is not problematic. However, it must be considered that most of the building material mixtures used in the test track would not have complied with the requirements for mechanical stability and weathering resistance assessed in the suitability test. They would therefore not have been permitted according to the Technical Delivery Conditions for Aggregates in Road Construction (TL Gestein-StB) and the Technical Delivery Conditions for Building Material Mixtures and Soil in Road Construction (TL SoB-StB).

The extensive database is not only relevant for researching the suitability of brick-rich base courses without binders. It can also be used as a contribution to investigating other issues in road engineering.

## Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	7	6.2.3 Häufigkeitsverteilung und Extremwerte .....	30
<b>1 Einleitung und Problemstellung</b> .....	7	6.2.4 Jahresgang .....	32
<b>2 Einsatz von RC-Baustoffen aus Bauschutt im Straßenbau</b> .....	7	6.2.5 Frosteindringung .....	32
2.1 Anfall und Verwertung .....	8	6.3 Feuchtemessungen .....	34
2.2 Anforderungen .....	8	6.4 Höhenmessungen .....	36
<b>3 Stand der Kenntnisse</b> .....	9	6.4.1 Konsolidierung .....	36
<b>4 Auswahl und Aufbau der Erprobungsstrecke</b> .....	12	6.4.2 Frosthebungen .....	38
4.1 Konzept .....	12	6.5 Tragfähigkeitsmessungen .....	39
4.2 Umsetzung .....	12	6.5.1 FWD-Messungen .....	39
4.2.1 Vor-Ort-Betreuung .....	12	6.5.2 Benkelman-Balken-Messungen .....	43
4.2.2 Lage und Aufbau .....	13	6.5.3 Vergleich Messwerte FWD und Benkelman-Balken .....	44
4.2.3 Voruntersuchungen .....	16	6.6 Verkehrszählung .....	46
4.2.4 Baubegleitende Untersuchungen .....	18	6.7 Visuelle Zustandserfassung .....	47
4.2.5 Instrumentierung .....	18	6.8 Frosthebungsversuche .....	49
4.2.6 Ergebnisse der Eignungs- und Kontrollprüfungen .....	20	6.8.1 Versuchsdurchführung .....	49
<b>5 Untersuchungsumfang</b> .....	24	6.8.2 Probenbezeichnung .....	51
5.1 Tragfähigkeitsmessungen .....	24	6.8.3 Stoffliche Zusammensetzung .....	51
5.2 Höhenmessungen .....	24	6.8.4 Ergebnisse der Frosthebungs- versuche .....	52
5.3 Frosthebungsversuche .....	24	6.8.5 Ergebnisse der CBR-Versuche .....	56
<b>6 Ergebnisse und Auswertung</b> .....	24	6.8.6 Ergebnisse der Wassergehalts- bestimmung .....	56
6.1 Wetterdaten .....	24	6.8.7 Korngrößenverteilung .....	57
6.1.1 Vergleich mit der Referenzperiode .....	25	6.8.8 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	58
6.1.2 Bewertung der Frostereignisse im Beobachtungszeitraum .....	26	<b>7 Schlussfolgerungen</b> .....	59
6.2 Temperaturmessungen .....	29	7.1 Voruntersuchungen und bau- begleitende Untersuchungen .....	59
6.2.1 Datenbasis .....	29	7.2 Beurteilung des Beobachtungs- zeitraums .....	59
6.2.2 Temperaturverteilung in Längsrichtung .....	29	7.3 Tragfähigkeit .....	59

7.3.1 In-situ-Messungen .....	59
7.3.2 Laborversuche .....	60
7.3.3 Fazit .....	60
7.4 Frosthebungen .....	61
7.4.1 In-situ-Messungen .....	61
7.4.2 Laborversuche .....	61
7.4.3 Fazit .....	61
7.5 Oberflächenbild .....	61
7.6 Fazit .....	61
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>62</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>63</b>

## Vorwort

Der Forschungsbericht zum Arbeitsprogrammprojekt 06 321/S2 wurde von Herrn Dr.-Ing. Dirk Jansen verfasst. Frau Dipl.-Ing. (FH) Kirsten Kunz hat sowohl organisatorisch als auch als Autor (Kapitel Frosthebungsversuche) an diesem Bericht mitgewirkt.

Die Aufgaben der BAST bestanden in der wissenschaftlichen Begleitung und Auswertung des Projektes. Die Einrichtung der Erprobungsstrecke, die Begleitung der Baumaßnahmen, die Organisation und Durchführung der Materialuntersuchungen, die Datenauslesung und Pflege der Instrumentierungen erfolgten durch das Land Brandenburg, Landesbetrieb Straßenwesen, und die TU Cottbus, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik.

## 1 Einleitung und Problemstellung

Im Jahr 2004 wurde das Forschungsprojekt mit dem Titel „Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel“ (FE 06.073/2000/FGB) abgeschlossen. Über die Ergebnisse und deren Umsetzung wurde in den zuständigen Gremien der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) kontrovers diskutiert, wobei sich zwei unterschiedliche Meinungen ergaben.

Zum einen wurde angeführt, dass der Einfluss der Ziegeleigenschaften auf die Eigenschaften der Recycling (RC) Baustoffgemische mangels geeigneter Prüfverfahren nicht abschließend geklärt werden konnte. Die Entwicklung geeigneter Prüfverfahren und der Nachweis ihrer Eignung sollten deshalb vorrangig betrieben werden, bevor die empfohlene Erhöhung des zulässigen Ziegelanteils im RC-Baustoffgemisch oder die Beurteilungskriterien für die Frostempfindlichkeit in das Regelwerk eingeführt werden.

Zum anderen wurde seitens des FGSV AA 6.3 „Schichten ohne Bindemittel“ gefordert, die vom Forschungsnehmer vorgeschlagene Erhöhung des Ziegelanteils auf 30 M.-% möglichst kurzfristig in den TL Min-StB 2000 bzw. in den TL Gestein-StB 2004 umzusetzen, da mit den Ergebnissen der

Frostversuche in Anlehnung an die TP HGT-StB in Verbindung mit den CBR-Versuchen und den festgestellten Kornverfeinerungen die Eignung solcher RC-Baustoffgemische ausreichend nachgewiesen sei.

Im weiteren Verlauf sind auf Initiative des AA 6.3 die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen in den neu herausgegebenen „Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau Ausgabe 2004 – TL Gestein-StB 04“ in der oben beschriebenen Art geändert worden. Systematisch gesammelte Praxiserfahrungen zu dem erhöhten zulässigen Ziegelanteil in RC-Baustoffen liegen jedoch noch nicht vor.

Um die Erkenntnisse aus dem o. g. Forschungsprojekt zu bestätigen und Praxiserfahrungen zu sammeln, hat das Ministerium für Infrastruktur und Raumordnung Brandenburg den Bau einer Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen angeboten und hierzu ein Untersuchungskonzept vorgelegt. In 2006 wurde die Erprobungsstrecke im östlichen Brandenburg auf einer Länge von 1.200 m errichtet und im Jahr 2007 dem Verkehr übergeben. Es wurden mehrere Abschnitte mit unterschiedlichen Ziegelanteilen im RC-Baustoff für die Tragschicht ohne Bindemittel eingerichtet. Die Erprobungsstrecke wurde umfangreich u. a. mit Feuchte- und Temperatursensoren instrumentiert und das Verhalten unter Verkehrs- und Klimabeanspruchung durch Tragfähigkeitsmessungen und Höhenmessungen beobachtet.

Die fachliche Betreuung vor Ort wurde durch TU Cottbus sichergestellt, die Bundesanstalt für Straßenwesen hat die wissenschaftliche Betreuung der Erprobungsstrecke übernommen.

Durch den systematischen Einsatz von in-situ-Messungen und umfangreichen Laboruntersuchungen an den eingesetzten Gesteinskörnungen bzw. Baustoffgemischen ist es möglich, die Eignung ziegelreicher RC-Baustoffe komplex zu untersuchen.

## 2 Einsatz von RC-Baustoffen aus Bauschutt im Straßenbau

Die Bedeutung von so genannten Ersatzbaustoffen im Straßenbau hat, nicht zuletzt durch die gesetzlichen Anforderungen, in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Baustoffe, die in der Regel bereits

hohe Anforderungen des Hoch- und Tiefbaus erfüllt haben, werden für einen nicht minderqualifizierten Zweck im Straßenbau wieder verwendet. Die dabei gestellten Anforderungen an diese RC-Baustoffe und RC-Baustoffgemische sind ebenso hoch wie die Anforderungen an neue und natürliche Baustoffe.

## 2.1 Anfall und Verwertung

Durch den Straßenbaulehrstuhl der Ruhr-Universität Bochum wurden in regelmäßigen Abständen der Anfall und die Verwertungsquoten von Recycling-Baustoffen für die Jahre 1989 bis 2005 ausgewertet, vgl. u. a. (KRASS, JUNGELD, & TROGISCHE, 2002) (KRASS, BRÜGGEMANN, & GÖRENER, 2004) (RADENBERG & CETINKAYA, 2009). Die Daten wurden anhand von Umfragen erhoben, die an die RC-Betriebe gerichtet wurden, und stellen repräsentative Stichproben dar.

In den letzten 20 Jahren hat die Menge an RC-Baustoffen aus Bauschutt zugenommen und betrug in den Wirtschaftsjahren 2001 und 2005 rund 50 bis 55 Mio. t/a. Die Verwertungsraten an Bauschutt, gemessen am gesamten RC-Baustoff-Anfall, befinden sich seit 1993 auf einem konstant hohem Niveau von rund 65 %, vgl. Bild 1.

Bei der Separierung von Bauschutt nach Herkunft aus dem Straßenbau, dem Hochbau und sonstiger Herkunft beträgt der Anfall aus dem Hochbau, also der Anteil, in dem Ziegel enthalten sein können, gleich bleibend rund 40 %, gefolgt von dem Anfall

aus dem Straßenbau mit rund 30 %. Mit im Jahr 2006 rund 50 % (1,6 Mio. t) wird der Bauschutt in den meisten Fällen als RC-Baustoff für Tragschichten ohne Bindemittel eingesetzt (davon 17 % als Frostschuttschicht-Material), gefolgt von Verfüllmaterial (9 % in 2006, 18 % in 2005).

## 2.2 Anforderungen

RC-Baustoffe aus dem Hochbau nehmen gemäß den o. g. Auswertungen für den Straßenbau, speziell für den Einsatz als Material für Tragschichten ohne Bindemittel, eine bedeutende Rolle ein. Durch den „fachfremden“ Einsatz von im Hochbau bewährten Materialien im Straßenbau werden Eignungsnachweise erforderlich. Der Einsatz von RC-Baustoffen im Straßenbau wird von der bautechnischen Seite durch die TL Gestein-StB (FGSV, 2007a), die TL SoB-StB (FGSV, 2007c), den ZTV SoB-StB (FGSV, 2007b) und durch das Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau (FGSV, 2002) geregelt.

Über die Anforderungen an natürliche Gesteinskörnungen für Frostschuttschichten, Schottertragsschichten und Schichten aus frostunempfindlichem Material hinaus werden an RC-Baustoffe besondere Anforderungen, gemäß den o. g. Regelwerken, an die stoffliche Zusammensetzung, umweltrelevante Merkmale, den Widerstand gegen Frostbeanspruchung und den Widerstand gegen Kornzertrümmerung gestellt, vgl. Tabelle 1.

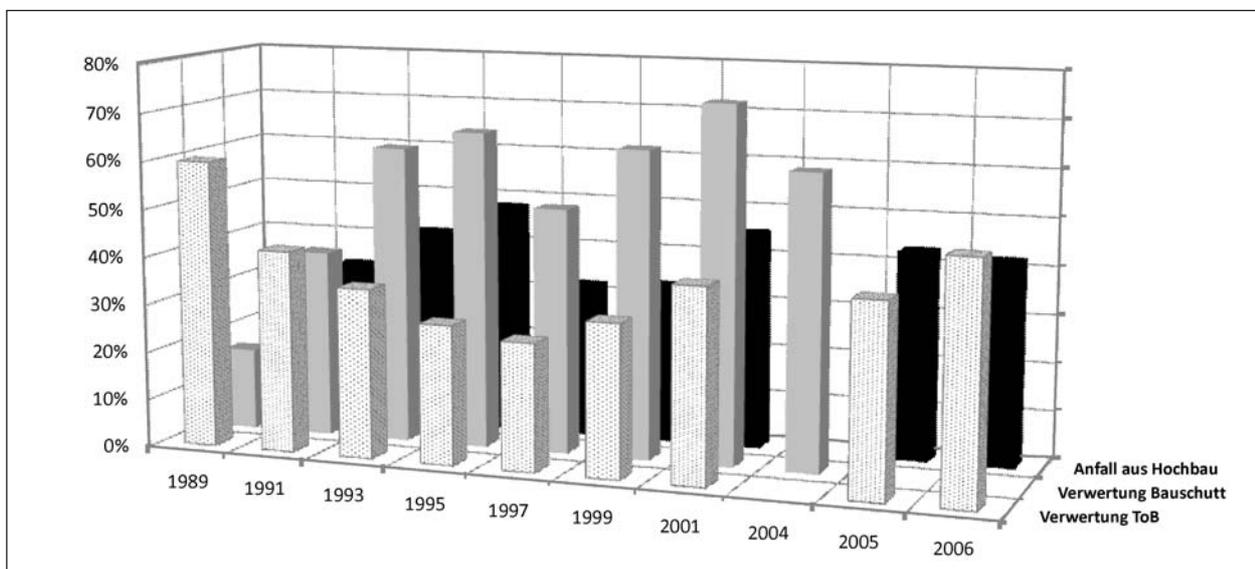


Bild 1: Anfall und Verwertung von Bauschutt

Durch den hier gegebenen konkreten Fall ist der Vollständigkeit halber auf die Anwendung der brandenburgischen Richtlinie für die Verwertung von RC-Baustoffen BTR RC-StB (Ministerien des Landes Brandenburg, 2004) hinzuweisen. Diese unterscheidet sich von o. g. Regelwerken vor allem durch die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung, vgl. Tabelle 2. Demnach ist der Ziegelanteil gegenüber den Anforderungen der TL Gestein-StB deutlich begrenzt. Allerdings erlauben die BTR RC-StB einen höheren Ziegelanteil, wenn durch die Eignungsprüfung für spezielle Bauvorhaben nachgewiesen wird, dass ein höherer Anteil an

Ziegel, Mörtel und weiterem porösem Material unschädlich ist. Die Entscheidung zum Einsatz obliegt dem Baulastträger und besitzt nur Gültigkeit für das konkrete Bauvorhaben.

### 3 Stand der Kenntnisse

Der Einsatz von Recycling-Baustoffen wurde durch die BAST erstmals ausführlich im Jahr 1985 überprüft. Im Zuge des Neubaus der BAB A 44 im Bereich des Düsseldorfer Flughafens wurden vier von acht Fahrstreifen mit einer 20 cm dicken Trag-

Stoffliche Zusammensetzung					
Stoffgruppe					M.-%
Asphaltgranulat im Anteil > 4 mm					≤ 30
Klinker, Ziegel und Steinzeug im Anteil > 4 mm					≤ 30
Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe im Anteil > 4 mm					≤ 5
mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe, wie Poren- und Bimsbeton im Anteil > 4 mm					≤ 1
Fremdstoffe, wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien im Gemisch					≤ 0,2
Umweltrelevante Merkmale					
Anforderungen Eluat an folgende (Inhalts-)Stoffe					
Chlorid	Sulfat	Phenolindex	Arsen	Blei	Cadmium
Chrom, ges.	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	
Anforderungen Feststoffgehalte an folgende (Inhalts-)Stoffe					
EOX	KW	PAK (EPA)	PCB		
Mechanische Anforderungen (über die Anforderungen an natürliche Gesteinskörnungen hinaus)					
Widerstand gegen Frostbeanspruchung					
Kategorie $F_4$ (Verlust $\leq 4$ M.-%), $F_{\text{angegeben}}$					
Frostschuttschicht: Eine Überschreitung der Anforderung der Kategorie $F_4$ bis 10 M.-% ist für RC-Baustoffe für Frostschuttschichten nur zulässig, wenn der im Befrostungsversuch an der Gesamtkörnung > 0,063 mm entstandene Anteil < 0,063 mm 2 M.-% nicht übersteigt. Die Summe aus dem ursprünglich enthaltenen Anteil < 0,063 mm und dem im Befrostungsversuch zusätzlich entstandenen Anteil < 0,063 mm darf nicht mehr als 5 M.-% betragen.					
Schottertragschicht: Eine Überschreitung der Kategorie $F_4$ bis zu 5 M.-% ist zulässig, wenn der Anteil < 0,71 mm höchstens 1,0 M.-% beträgt.					
Widerstand gegen Kornzertrümmerung					
RC-Baustoffe müssen für die Verwendung in Frostschuttschichten $SZ_{32}/LA_{40}$ erfüllen; für die Verwendung in Schottertragschichten sind nur $SZ_{3P}$ -Werte $\leq 28$ bzw. LA-Werte $\leq 35$ sowie für den SD10-Wert $\leq 33$ zulässig.					

Tab. 1: Besondere Anforderungen an RC-Baustoffe in Schichten ohne Bindemittel

Stoffgruppe	M.-%
Asphalt im Anteil > 4 mm	≤ 20
Material mit niedrigen Festigkeiten, z. B. Ziegel, Mörtel, porige mineralische Baustoffe, Aschen usw. im Anteil > 4 mm	≤ 10
Störstoffe im Gesamtgemisch	≤ 0,2

Tab. 2: Bundeslandspezifische Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen gemäß den BTR RC-StB

schicht aus gebrochenem Bauschutt 0/45 gebaut. Da die Absplitterungen nach Frost-Tau-Wechsel-Bearbeitungen im Labor den Anforderungen der damals gültigen TL Min-StB 1983 nicht genügten, wurde vermutet, dass der Ziegelanteil im Bauschutt hierfür verantwortlich sei. Bei erneuter Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit getrennt an den Bauschuttbestandteilen Beton, Ziegel und Porenbeton stellte sich überraschenderweise jedoch heraus, dass der Ziegelbruch im untersuchten Fall den besten Frostwiderstand aufwies und der Betonbruch den gesetzten Anforderungen nicht gerecht wurde (TOUSSAINT, 1997). Als wichtiges Ergebnis blieb festzuhalten, dass eine alleinige augenscheinliche stoffliche Einordnung von RC-Baustoffen zur Beurteilung des Frostwiderstandes nicht ausreichend ist.

Die Eignung von ziegelreichen RC-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel wurde weiterhin infrage gestellt und der Ziegelanteil in den TL Min-StB 2000 (FGSV, 2000) getrennt für hartgebrannte (max. 25 M.-%) und weichgebrannte Ziegel (max. 5 M.-%) begrenzt. Durch das Forschungsvorhaben FE 06.073/200/FGB (KRASS & KOLLAR, 2004) wurde daraufhin eine Erhöhung der Ziegelanteile im RC-Baustoff geprüft. Vorgehen und Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Für die Untersuchungen wurden fünf hartgebrannte und vier weichgebrannte reine Ziegelgemische verwendet. Jeweils zwei Gemische bestanden aus ungebrauchten Ziegeln, die restlichen wurden ver-

schiedenen RC-Anlagen entnommen und manuell aussortiert. Des Weiteren wurden vier Gemische aus Mauerwerksbruch mit Ziegel, Mörtel und Putz sowie ein RC-Gemisch aus reinem Betonbruch entnommen. Die in der Summe 14 Ausgangsmaterialien wurden in der Kornfraktion 0/22 zunächst getrennt in zwei Stufen untersucht. In der Stufe A wurden die Eigenschaften der Stoffe ermittelt, in der Stufe B die Versuche zum Nachweis der Eignung der Materialien für Frostschutz- und Schottertragsschicht durchgeführt, vgl. Tabelle 3. Anschließend erfolgten die Prüfungen an im Labor hergestellten RC-Gemischen (0/22 und 0/32) mit 20 und 40 M.-% Ziegelanteil (Stufe C und D).

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Trennung von hart- und weichgebrannten Ziegeln sowohl aufgrund der äußeren Beschaffenheit als auch durch die Trockenrohichte nicht ausreichend eindeutig ist. In diesem Zusammenhang sind vor allem die durch die Porosität entstehenden Schwierigkeiten bei der Dichtebestimmung mit dem Pyknometerverfahren zu nennen. Es wurde herausgestellt, dass die Frostbeständigkeit und Dichtigkeit unterschiedlicher Ziegelsorten anhand des Wasseraufnahmegrades beschrieben werden können. Daher, und da die Prüfung der Frostbeständigkeit ohnehin für RC-Baustoffe erforderlich ist, wurde die Unterscheidung nach hart- und weichgebrannten Ziegeln infrage gestellt. Hinsichtlich der Kornfestigkeit und Frostepfindlichkeit der Ziegelgemische aus Mauerwerksbruch konnte herausgestellt werden, dass die Anteile an Putz-

Materialgruppen	
ZH	Ziegelgemische hartgebrannt – Ziegelarten, die im Außenbereich der Witterung ausgesetzt sind: Vormauerziegel, Klinker (Pflasterklinker), Dachziegel (Tondachziegel)
ZW	Ziegelgemische weichgebrannt – Hintermauerziegel, sowohl aus sortenrein aufbereitetem Material als auch aus von Hand aussortierten Ziegeln aus dem Ziegelhaufwerk (nachträgliche Zerkleinerung im Prallbecher)
MZ	Gemische aus Mauerwerksbruch mit Ziegel, Mörtel und Putz, wie sie in der Recycling-Praxis am häufigsten vorkommen
RC	RC-Baustoff aus praktisch reinem Betonbruch
Untersuchungsumfang	
Prüfungen an Ausgangsmaterialien (0/22)	
A	Korngrößenverteilung, Kornform, stoffl. Zusammensetzung, Trockenroh-/Dichte, Porosität, Wasseraufnahme, Schlagzertrümmerung nach Frost-Tau-Wechsel
B	Proctorversuch + Kornverfeinerung, CBR <sub>0</sub> , CBR <sub>ft</sub> mit Frost-Hebungsversuchen nach TP HGT-StB
Prüfungen an RC-Gemisch mit 20 M.-% und 40 M.-% Ziegel	
C	wie B am Gemisch 0/22
D	Gemisch 0/32 mit 40 M.-% Ziegelanteil: modifizierte Proctorverdichtung, Variation des Sandanteils, CBR <sub>0</sub> , CBR <sub>ft</sub> mit Frost-Hebungsversuchen, Wasserdurchlässigkeit

Tab. 3: Materialgruppen und Untersuchungsumfang (KRASS & KOLLAR, 2004)

und Mörtelresten deutlichen Einfluss auf die Versuchsergebnisse besitzen. Die Menge der Absplittierungen ist tendenziell höher als bei den sortenreinen Ziegeln.

Bei den Gemischen aus RC-Beton und Ziegeln mit einem erhöhten Ziegelanteil von 40 M.-% konnte keine höhere Frostempfindlichkeit gegenüber dem reinen Betonbruch festgestellt werden. Durch CBR-Prüfungen vor und nach der Frost-Tau-Wechselbeanspruchung konnte überwiegend eine Tragfähigkeitserhöhung der Gemische festgestellt werden.

Aufgrund der Ergebnisse aus diesem Forschungsprojekt wurden die Anforderungen an ziegelreiche RC-Baustoffe für Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) in den TL Gestein-StB (FGSV, 2007a) modifiziert. Der zulässige Anteil an Ziegeln im Gemisch wurde auf 30 M.-% angehoben, ohne weitere Unterscheidung von hart- und weichgebrannten Ziegeln. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens und die Anhebung des zulässigen Ziegelanteils wurden in den zuständigen Gremien kontrovers diskutiert. Vor allem die Prüfmethode für die Frostempfindlichkeit war Gegenstand der Diskussionen. Der in Anlehnung an die TP HGT-StB (FGSV, 1994) durchgeführte Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTWV) gibt für Prüfungen von ToB-Baustoffen durch die allseitige Frostbeanspruchung die tatsächliche Beanspruchungssituation nur ungenügend wieder. Durch die Weiterentwicklung des Frosthebungsversuches (FHV) stand wenige Zeit später ein Prüfverfahren zur Verfügung, das für die Prüfung von u. a. RC-Baustoffen geeigneter ist, vgl. (WEINGART & WIELAND, 2005). Deutlichster Unterschied ist die realitätsnahe alleinige Befrostung über die Probenoberseite. Der Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung sind ausführlich in Kapitel 6.8.1 beschrieben.

Mit Hilfe des noch ausreichend zur Verfügung stehenden Probenmaterials aus o. g. Forschungsprojekt wurden die Frosthebungsversuche am gleichen Forschungsinstitut mit dem weiter entwickelten Verfahren FHV wiederholt (RADENBERG & CETINKAYA, 2008). Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst.

Durch die langsamere und längere Befrostung wurden höhere maximale und bleibende Frosthebungen festgestellt. Die in (KRASS & KOLLAR, 2004) festgestellten Abnahmen der Tragfähigkeiten nach dem FTWV konnten bei Befrostung im FHV nicht eindeutig bestätigt werden. Die mit dem CBR-Ver-

such gemessenen Tragfähigkeiten nach dem FHV spreizen sehr, es wurden Tragfähigkeitsverluste bis zu knapp 80 % und Tragfähigkeitserhöhungen bis zu 43 % beobachtet. Zur Beurteilung der Ergebnisse der Frosthebungsversuche werden die maximale und die bleibende Hebung sowie die Frosthebungsgeschwindigkeit am letzten Tag der Befrostung vorgeschlagen. Bei Gemischen mit einer hohen Frosthebungsgeschwindigkeit ist mit weiteren Frosthebungen zu rechnen.

Auch bei Verwendung eines bei der Einzelbestimmung frostempfindlicheren Hintermauerziegels wurde im FHV kein schädlicher Einfluss am Gemisch aus RC-Beton (70 M.-%) und Ziegel (30 M.-%) erkannt. Auch hier zeigt sich der komplexe Einfluss der stofflichen Zusammensetzung von RC-Baustoffen auf die Frostempfindlichkeit.

Des Weiteren wurden die Proben im Rahmen des Forschungsprojektes gemäß den ZTV E-StB, siehe auch (FGSV, 2009), nach ihrem Feinkornanteil und der Ungleichförmigkeitszahl einer Frostempfindlichkeitsklasse zugeordnet, vgl. Bild 2. Obwohl an einer Vielzahl der untersuchten Proben sehr hohe Frosthebungen festgestellt worden sind, wurde nur eine Probe der Frostempfindlichkeitsklasse F3 zugeordnet. Auch die in den ZTV E-StB (Fassung 1997) noch genannte Möglichkeit eine Klassifizierung über den  $CBR_{ft}$ -Wert zu erreichen, war bei den untersuchten RC-Baustoffen nicht zielführend, da annähernd alle Proben mit F1, also nicht frostempfindlich, klassifiziert wurden.

Zusammenfassend ist zum Stand der Kenntnis festzuhalten, dass eine schädliche Wirkung von un-

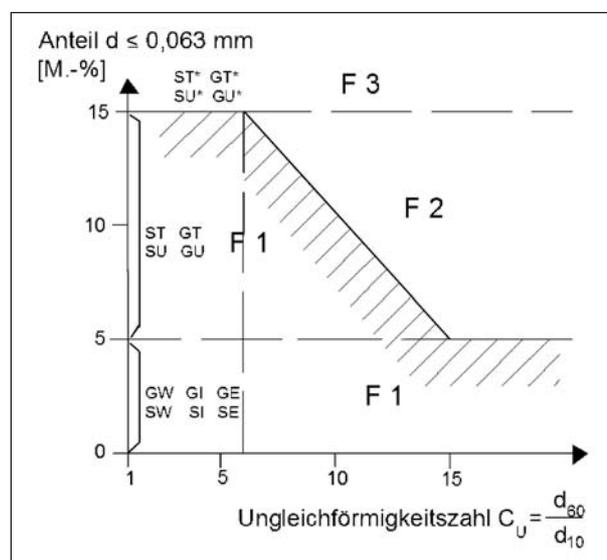


Bild 2: Frostempfindlichkeitsklassen gemäß ZTV E-StB

sortiertem Ziegelmaterial im RC-Baustoff nicht eindeutig nachgewiesen werden konnte. Die Einflüsse auf die Frostempfindlichkeit von RC-Baustoffen sind aufgrund der unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzung komplex, weshalb der Einfluss der Ziegel im RC-Baustoff anhand der vorgestellten Forschungsergebnisse nicht eindeutig identifiziert werden konnte. Der Stand der Kenntnis stützt sich fast ausschließlich auf die Ergebnisse von Laborversuchen. Systematisch hergeleitete dokumentierte Praxiserfahrungen liegen nicht vor.

## 4 Auswahl und Aufbau der Erprobungsstrecke

### 4.1 Konzept

Auf Grundlage des „Merkblattes über Anforderungen an Untersuchungsstrecken“ (FGSV, 1980) wurde ein Konzept zur Einrichtung einer Erprobungsstrecke erarbeitet, welches durch das Ministerium für Infrastruktur und Raumordnung des Landes Brandenburg umgesetzt wurde. Das Konzept sah vor, im Rahmen einer regulären Baumaßnahme eine Untersuchungsstrecke als Erprobungsstrecke anzulegen. Die auszuwählende Erprobungsstrecke sollte dabei folgende Anforderungen unter Beachtung bereits ausgeführter Planungen erfüllen:

- Bundesstraße mit gleich bleibend hohem Verkehrsaufkommen und erhöhtem Lkw-Anteil (ca.  $DTV^{SV} = 500$  Kfz); Einordnung in Bauklasse III,
- Zählstelle (vorhandene bzw. neu einzurichtende),
- homogene Baugrundverhältnisse; geländegleicher Straßenaufbau; möglichst freie Lage im Gelände mit der Möglichkeit einer Frostdurchdringung der gesamten Straßenkonstruktion,
- möglichst gestreckte Linienführung in Grund- und Aufriss,
- gleich bleibende klimatische Verhältnisse (Sonneneinstrahlung, Kleinklima),
- möglichst gleich bleibende Geländeeinflüsse (Bewuchs, Geländeform),
- möglichst ungünstige hydrogeologische Bedingungen (in der Tauperiode aufsteigendes Schichten- oder Grundwasser bis in die Tragschicht ohne Bindemittel).

Folgende bautechnische Parameter sollten erfüllt werden:

- frostempfindliches Planum,
- planmäßig nach RStO gebundener Oberbau (Tafel 1, Zeile 3 oder 5),
- analoger Aufbau der ToB-Baustoffe (z. B. Brechkornanteil, Korngrößenverteilung),
- das Ausgangsmaterial für die Herstellung des RC-Baustoffes sollte ohne spezielle qualitative Vorauswahl der Abbruchziegel (einschließlich der üblichen Zwangsanhaftungen aus Mörtel- und Putzresten) verwendet werden,
- Herstellung der Korngemische mit Doseur; Einbau unter gleichen Verdichtungsbedingungen.

Es wurden die Anlage von fünf Erprobungsabschnitten mit einem Raster von 10 M.-%-Schritten für den Ziegelanteil im RC-Baustoff (10 bis 40 M.-%) und ein Abschnitt mit 40 M.-% Ziegelanteil und 60 M.-% natürlichen Gesteinskörnungen vorgeschlagen. Zusätzlich sollte ein Referenzabschnitt mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen hergestellt werden.

Eine zentrale Begleitung der Maßnahme von der Planung bis zur Ausführung vor Ort wurde gewünscht. Die Gesamtbetreuung sollte durch die BASt erfolgen, die fachliche Betreuung vor Ort durch eine wissenschaftliche Einrichtung des Landes Brandenburg.

Die Erprobungsstrecke sollte sowohl vor, während und nach der Bauphase durch ein umfangreiches Untersuchungsprogramm beobachtet werden. Neben den in der Regel üblichen Baugrunduntersuchungen und Eignungsprüfungen sowie Kontrollprüfungen sah das Konzept vor, nach der Bauphase die Änderung der Korngrößenverteilung in der ToB, das Höhenniveau, die Tragfähigkeit, die Ebenheit, die Temperaturen und Feuchtegehalte in den Schichten zu erfassen. Es wurde mit einem fünfjährigen Beobachtungszeitraum geplant.

### 4.2 Umsetzung

#### 4.2.1 Vor-Ort-Betreuung

Für die Betreuung vor Ort wurde die TU Cottbus, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik, beauftragt. Die Betreuung erstreckte sich über die Planungs- und Bauphase sowie über den

Beobachtungszeitraum. Dies beinhaltete auch die Pflege der Messwertaufzeichner und die Datenauswertung. Die verschiedenen Phasen wurden ausführlich in jährlichen Berichten dokumentiert, vgl. (LEHMANN & WICHTER, 2007) (LEHMANN & WICHTER, 2008) (LEHMANN & WICHTER, 2009).

#### 4.2.2 Lage und Aufbau

Im Juli 2006 erfolgte der Baubeginn für die Erprobungsstrecke. Ausgewählt wurde ein Los der Ortsumgehung Seelow im östlichen Teil Brandenburgs, vgl. Bild 3. Der Streckenabschnitt der Bundesstraße B 167n ist Teil des vorrangig auszubauenen und strukturorientierten Bundesstraßennetzes im östlichen Teil Brandenburgs. Das ausgewählte Bauilos, Gesamtlänge 1.430 m, davon 1.200 m freie Strecke, wurde als Interimslösung geplant, bis der restliche Ausbau mit den entsprechenden Anschlüssen der Ortsumgehung Seelow/Dolgelin fertig gestellt ist. Die Erprobungsstrecke konnte somit als Teil einer regulären Baumaßnahme ausgeführt werden, mit der Möglichkeit eines kontrollierten Rückbaus nach Ablauf der Interimszeit. Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichtes kann jedoch nicht mit einem kurzfristigen Rückbau gerechnet werden, da aufgrund der real eingetretenen niedrigeren Verkehrsbelastung das Verkehrskonzept der Region abgeändert wurde.

Der ausgewählte Streckenabschnitt genügt fast vollständig den Kriterien des Konzeptes. Lediglich der geländegleiche Straßenaufbau konnte nicht realisiert werden, d. h., die Strecke befindet sich jeweils zur Hälfte in Dammlage und Einschnittlage. Durch die gleich verteilte Anordnung der Untersuchungsstreckenabschnitte, wie im Folgenden beschrieben, können die daraus eventuell resultieren-

den Einflüsse kontrolliert und vergleichbar erfasst werden.

Auf einer Gesamtlänge von 1.160 m wurden insgesamt zwölf Untersuchungsstreckenabschnitte angelegt. Jeweils in Damm- und Einschnittlage wurden die sechs Varianten wie folgt geplant:

- Variante 0 V0..... ausschließlich natürliche Gesteinskörnungen,
- Variante 1 V1..... RC-Baustoff mit 10 M.-% Ziegelanteil,
- Variante 2 V2..... RC-Baustoff mit 20 M.-% Ziegelanteil,
- Variante 3 V3..... RC-Baustoff mit 30 M.-% Ziegelanteil,
- Variante 4 V4..... RC-Baustoff mit 40 M.-% Ziegelanteil,
- Variante 5 V5..... 40 M.-% Ziegel und 60 M.-% natürliche Gesteinskörnung.

Die stoffliche Zusammensetzung wurde innerhalb der Varianten für die Schottertragschicht (0/45) und die Frostschutzschicht (0/22) gleich gewählt. Zur Herstellung der Baustoffgemische für die Schottertragschicht (STS) und die Frostschutzschicht (FSS) wurden jeweils maximal drei Kornfraktionen verwendet, vgl. Tabelle 4. Die Anteile an Ziegel-RC wurden dabei in allen Fällen höher als die Anforderung an das resultierende Baustoffgemisch gewählt, da das aus dem Aufbereitungsprozess vorliegende Ziegelmaterial immer Anteile an Beton-RC und weiteren Störstoffen enthält. Hierdurch bedingt konnte die Variante 5 nur mit 40 M.-% Ziegel, rund 30 M.-% natürlicher Gesteinskörnung und 30 M.-%

	V1	V2	V3	V4	V5	V1	V2	V3	V4	V5
M.-%	FSS					STS				
Z 0/22	15	25	35	45	-	15	25	40	50	-
Z 8/22	-	-	-	-	40	-	-	-	-	10
Z 22/45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40
B 22/45	-	-	-	-	-	-	10	15	25	-
B 0/22	85	75	65	55	-	-	-	-	-	-
B 0/45	-	-	-	-	-	85	65	45	25	-
KS 0/8	-	-	-	-	60	-	-	-	-	50

Z = Ziegel ,RC B = Beton, RC KS = Kiessand

Tab. 4: Zusammensetzung der Baustoffgemische aus einzelnen Kornfraktionen

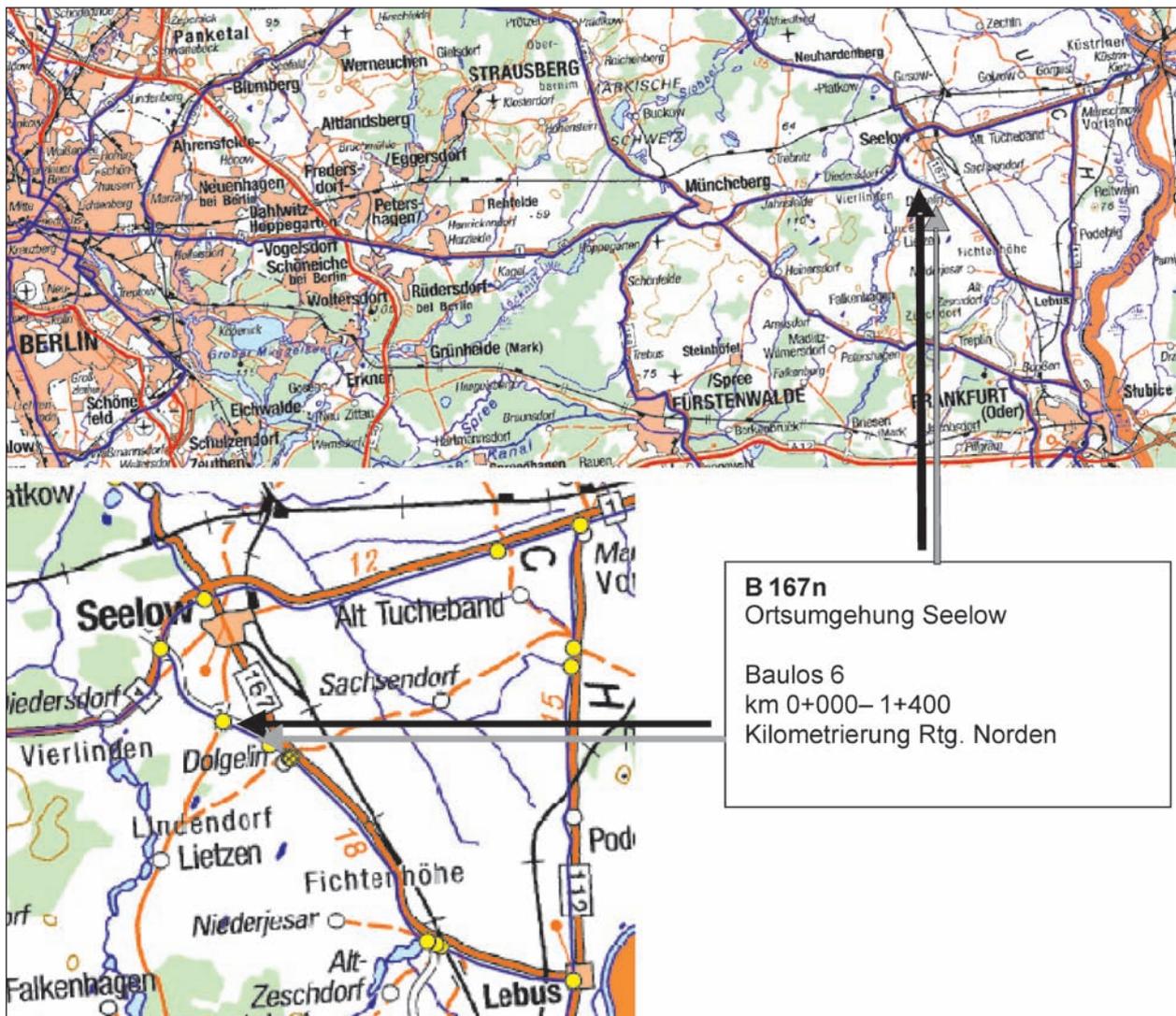


Bild 3: Lage der Erprobungsstrecke, Quelle: BISStra/BKG

Beton-RC hergestellt werden, vgl. auch Kapitel 4.2.4.

Die gebundene Tragschicht wurde als Asphalttragschicht 0/22 CS mit Straßenbaubitumen 50/70, die Asphaltdeckschicht in Asphaltbeton 0/11S mit Straßenbaubitumen 50/70 ausgeführt. Der gesamte Streckenabschnitt wurde eine Bauklasse niedriger dimensioniert, d. h. Bauklasse IV statt III, als es die Verkehrsprognosen bei Dimensionierung gemäß den RStO zulassen würden, vgl. Bild 4. Durch die Unterdimensionierung sollte eine zeitrafende Belastung der Erprobungsstrecke erreicht werden.

Jeder Untersuchungsstreckenabschnitt hat eine Länge von 100 m, mit Ausnahme der Variante 5D (Dammlage) mit einer Länge von 60 m. Die Anordnung der Untersuchungsstreckenabschnitte ist in Tabelle 5 schematisch dargestellt. Die Erprobungs-

strecke wurde als RQ 10,5 gemäß den RAS-Q (FGSV, 1996) ausgebildet, vgl. Bild 5. Bilder 6 und 7 zeigen die örtliche Situation nach Fertigstellung. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Anforderungen des Konzeptes hinsichtlich der Linienführung (gestreckt in Grund- und Aufriss) und gleich bleibender Geländeeinflüsse erfüllt werden konnten. Die Verkehrsfreigabe erfolgte im April 2007.

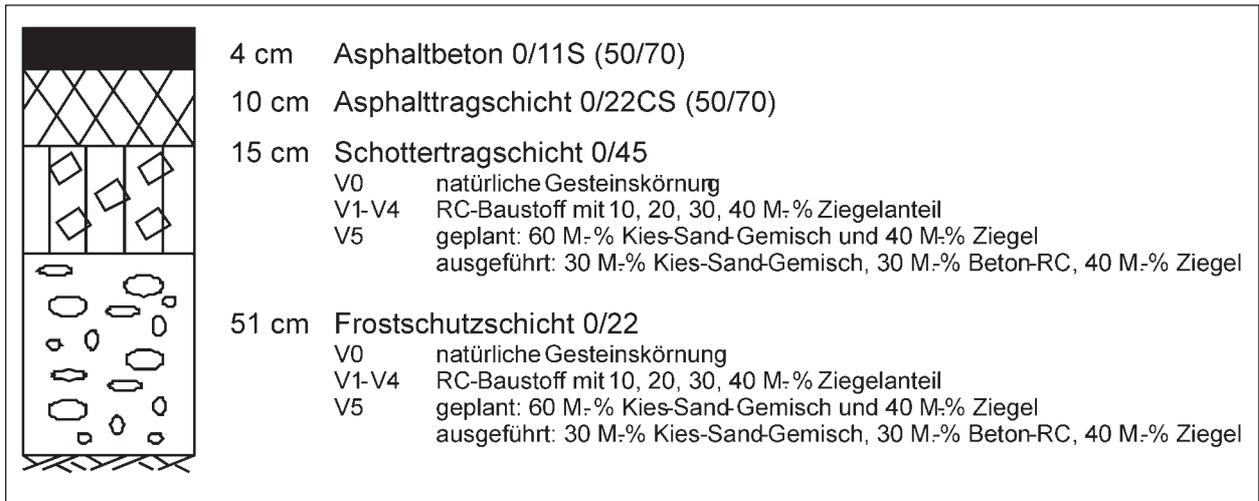


Bild 4: Aufbau der Erprobungsstrecke, RStO 01, Tafel 1, Zeile 3, Bauklasse IV

Damm					Einschnitt						
Variante											
5D	4D	3D	2D	1D	0D	0E	1E	2E	3E	4E	5E
60 M.-% Kies-Sand- u. Beton-RC	Beton RC mit				100 M.-% natürliche Gesteinskörnung	Beton-RC mit				60 M.-% Kies-Sand- u. Beton-RC	
40 M.-% Ziegel	40 M.-% Ziegel	30 M.-% Ziegel	20 M.-% Ziegel	10 M.-% Ziegel			10 M.-% Ziegel	20 M.-% Ziegel	30 M.-% Ziegel	40 M.-% Ziegel	40 M.-% Ziegel RC
0+240	0+300	0+400	0+500	0+600	0+700		0+900	1+000	1+100	1+200	1+300 1+400

Tab. 5: Streckenband (schematische Darstellung)

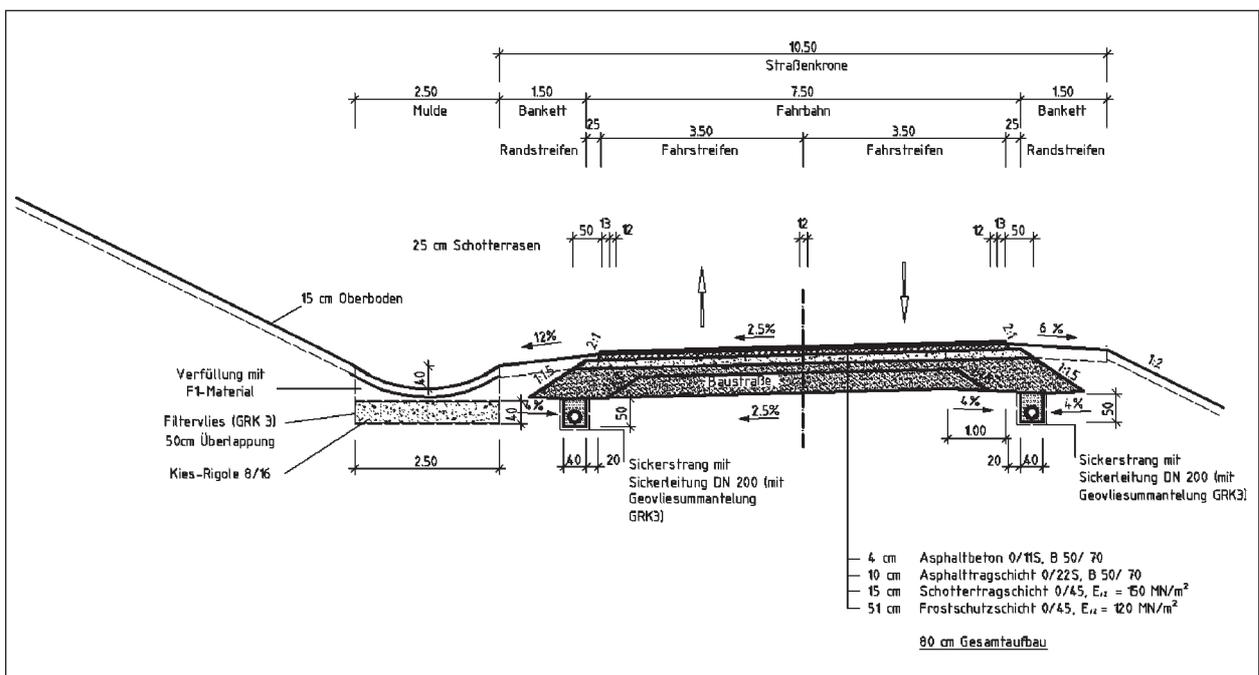


Bild 5: Querschnitt der Erprobungsstrecke, Ausführungsplan



**Bild 6:** Erprobungsstrecke Seelow, Dammlage, Blickrichtung Nord



**Bild 7:** Erprobungsstrecke Seelow, Einschnittlage, Blickrichtung Nord

#### 4.2.3 Voruntersuchungen

Die Baugrundverhältnisse wurden mit einem geotechnischen Streckengutachten in der Planungsphase dokumentiert, vgl. (Baugrundinstitut Franke-Meißner, 2005). Demnach befindet sich das Bauvorhaben im Bereich der Lebus-Platte, die in ihrer Oberflächengestaltung und ihrem oberflächennahen geologischen Aufbau durch die Folgen der Inlandsvereisung während des Weichselglazials geprägt ist. Geschiebelehmerde und -mergel, Geschiebedecksande und in Rinnen Abschlammungen der umliegenden Böden wurden abgelagert. Im Baulos setzt sich der Oberboden aus braunen, schwach schluffigen bis schluffigen schwach humosen bis humosen Sanden, mit einer Mächtigkeit von 0,25 bis 0,60 m, zusammen. Die Eigenschaften der im Streckenverlauf anstehenden Böden sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Das Grundwasser hat einen Flurabstand von 15 bis 30 m zur Geländeoberfläche. Mit dem Antreffen von Schichtenwas-

ser, das sich in den Geschiebedecksanden oder in Sandlagen innerhalb der Geschiebemergel sammelt, muss jedoch beim Bau gerechnet werden. Bei Durchführung der Rammkernsondierungen wurde Wasser in Tiefen von rund 90 bis 390 cm unterhalb der Höhe des Planums angetroffen, vgl. Tabelle 7. Gemäß den ZTV E-StB sind die Wasserverhältnisse demnach als ungünstig anzusehen. Die anstehenden Böden sind der Frostempfindlichkeitsklasse F1 bis F3 zuzuordnen und schwanken stark in ihrer Güte.

Die RC-Baustoffe für die ToB bzw. die fertigen Baustoffgemische wurden vor dem Einbau wie folgt geprüft (Eignungsprüfung):

- Korngrößenverteilung,
- Rohdichte,
- Proctordichte und optimaler Wassergehalt,
- CBR<sub>0</sub>-Wert,
- stoffliche Zusammensetzung,
- Frostbeständigkeit,
- Kornform,
- Schlagzertrümmerungswert an Prüfkörnung nach TP Gestein-StB und Zertrümmerungsversuch am Gemisch nach Deutsche Bahn Standard DBS 918 062,
- Wasserdurchlässigkeit,
- Umweltverträglichkeitsprüfung.

Die Ergebnisse der Prüfungen sind, mit Ausnahme der Korngrößenverteilung, in Kapitel 4.2.6 dargestellt und teilweise in Tabelle 8 und Tabelle 9 wiedergegeben. Die Eignung gemäß den TL Gestein-StB, TL SoB-StB sowie den BTR RC-StB ist in den genannten Tabellen kenntlich gemacht. Im Falle des Schottertragschichtmaterials erfüllt keines der Baustoffgemische die Anforderungen der Technischen Lieferbedingungen, im Falle des Frostschutzschichtmaterials erfüllen die Baustoffgemische der Varianten 4 und 5 nicht die durch die Regelwerke gesetzten Anforderungen. Hierdurch wird deutlich, dass trotz der Einhaltung der in den TL Gestein-StB genannten Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung die Anforderungen an die mechanische Beanspruchung und die Verwitterungsbeanspruchung nicht eingehalten werden können. Die in den BTR RC-StB enger gesetzten

Bodenart	B	F	V	$\gamma/\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\varphi'$ [°]	$c'/c_u$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$E_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	k-Wert [m/s]
Auffüllungen, die evtl. im Bereich der Kreuzung (östlich) anzutreffen sind Bodengruppe A	3-4	F1-F3	V1-V3	18/10	30	0	10-25	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$
Geschiebedeck- und Hochflächen- sande; mind. mitteldicht gelagert Bodengruppen SE, SW, SU	3	F1-F2	V1	18/10	35	0	40	$1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$
Geschiebelehm und -mergel in mind. steifer Konsistenz Bodengruppen UL, TL, SU*	4 <sup>1</sup>	F3	V2-V3	21/11	30	2-5	30	$\leq 1 \cdot 10^{-7}$

B: Bodenklasse nach DIN 18300; F: Frostempfindlichkeitsklasse nach ZTV E-StB 94;  
V: Verdichtbarkeitsklasse nach ZTV A-StB 89;  $\gamma$ : Wichte;  $\gamma'$ : Wichte unter Auftrieb;  $\varphi'$ : Reibungswinkel drainierter Boden;  
 $c'$ : Kohäsion drainierter Boden;  $c_u$ : Kohäsion undrainierter Boden;  $E_s$ : Steifemodul; k-Wert: Durchlässigkeitsbeiwert  
<sup>1</sup> in Ausnahmefällen nach ZTV E-StB 94 auch Bodenklasse 5 bis 6

Tab. 6: Bodengruppen, Bodenklassen und bodenmechanische Rechenwerte

Stationierung der Rammkernsondierung [km]	0+200	0+600	0+750	0+850	1+050	1+170	1+360
Tiefe des Wasserspiegels unterhalb des her- zustellenden Planums [m]	2,50	3,90	1,20	0,90	0,90	1,80	1,00

Tab. 7: Tiefen des angetroffenen Wasserspiegels bei Rammkernsondierungen

Parameter	TL Gestein TL SoB	BTR RC	V1	V2	V3	V4	V5
Anteil < 0,063 mm	5		1,8	2,6	3,5	3,9	0,7
Anteil von Material mit niedrigen Festigkeiten	$\leq 36$	$\leq 10$	11,4	[20,1]	[28,9]	[[48,2]]	[[41,2]]
nach Frost-Tauwechsel: Gesamt- absplitterung	< 4		3,8				
oder Gesamtabsplitterung u. Absplitterung < 0,71 mm	< 5 $\leq 1$			[[7,9]] [[0,2]]	[[9,6]] [[0,2]]	[[12,1]]	[[12,1]]
Absplitterung bei Schlagzertrüm- merung	$\leq 28$	$\leq 32$	[31,6]	[31,8]	[31,9]	[[33,4]]	[[32,1]]
[...]. un geeignet nach Beurteilung durch TL oder BTR RC							
[[...]]. un geeignet nach Beurteilung durch TL und BTR RC							

Tab. 8: Wertung der Eignungsprüfung am Schottertragschichtmaterial

Parameter	TL Gestein TL SoB	BTR RC	V1	V2	V3	V4	V5
Anteil < 0,063 mm	5		1,5	2,6	2,5	3,4	6,7
Anteil von Material mit niedrigen Festigkeiten	$\leq 36$	$\leq 10$	8,8	[21,9]	[28,9]	[[38,2]]	[34,6]
nach Frost-Tauwechsel: Gesamt- absplitterung	< 4		3,8				
oder Gesamtabsplitterung u. Absplitterung < 0,71 mm	< 10 $\leq 2$			7,9	9,6	[[12,1]]	[[12,1]]
Absplitterung bei Schlagzertrüm- merung	$\leq 32$	$\leq 34$	31,6	31,8	31,9	[33,4]	[32,1]
[...]. un geeignet nach Beurteilung durch TL oder BTR RC							
[[...]]. un geeignet nach Beurteilung durch TL und BTR RC							

Tab. 9: Wertung der Eignungsprüfung am Frostschuttschichtmaterial

Grenzen der stofflichen Zusammensetzung, insbesondere die Begrenzung auf max. 10 M.-% Ziegelanteil, resultieren auf eben diesen Erfahrungen mit ziegelreichen RC-Baustoffen.

Da mit der Erprobungsstrecke ein Beitrag zum Eignungsnachweis ziegelreicher Tragschichten ohne Bindemittel angestrebt wird, ist die Überschreitung der Anforderungswerte kein Ausschlusskriterium.

#### 4.2.4 Baubegleitende Untersuchungen

Während der Bauphase erfolgten fortlaufend Prüfungen (Kontrollprüfungen) des Verdichtungsgrades und des Verformungsmoduls (statisch und dynamisch), jeweils auf den fertig gestellten ungebundenen Schichten bzw. auf dem Planum. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.2.6 zusammengefasst. Die Anforderungen an den Verdichtungsgrad (direkte oder indirekte Kennzeichnung) und Verformungsmodul gemäß den ZTV SoB-StB bzw. den ZTV E-StB wurden in den meisten Fällen ohne Nachverdichtungsarbeiten erfüllt.

Zur Beurteilung der Wasserdurchlässigkeit wurden in situ auf der Oberfläche der Schottertragschicht Infiltrationsversuche mit dem Doppelring-Infiltrometer durchgeführt, vgl. Kapitel 4.2.6. Quantitative Anforderungen werden derzeit nicht an die Durchlässigkeit gestellt. Zur Orientierung kann jeweils die Hälfte der in DIN 18130-1 (DIN, 1998) genannten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte verwendet werden, wenn angenommen wird, dass das in situ vorhandene Porenraumvolumen deutlich geringer ist als das im Laborversuch (FGSV, 2010) (WOLF, 2006). Aufgrund dieser Annahmen liegen die Varianten 1 und 3 bis 5 im durchlässigen Bereich, die Variante 2 im schwach durchlässigen Bereich.

Die stoffliche Zusammensetzung der in den Varianten 1 bis 5 verbauten RC-Baustoffgemische wurde an Proben des Schichtmaterials beim Einbau bestimmt. Die Ergebnisse sind gekürzt in Tabelle 10 dargestellt. Es ist anzumerken, dass die von Hand durchgeführte Sortierung der Proben immer mit einer nicht quantifizierbaren Unsicherheit versehen ist, die laut Aussage des beteiligten Prüfinstitutes im ungünstigsten Fall bis zu  $\pm 10$  M.-% betragen kann. Die stoffliche Zusammensetzung der Varianten 5D und 5E, die deutlich von den Vorgaben abweicht, verdeutlicht die Schwierigkeit, ein Gemisch aus reinem Ziegelbruch und Naturstein herzustellen, da die aus dem herkömmlichen Recycling-Prozess entnommene Ziegelkornfraktion in der Regel

Variante	Ziegel [M.-%]			Betonbruch [M.-%]			Natursteine [M.-%]		
	Soll	STS	FSS	Soll	STS	FSS	Soll	STS	FSS
5D	40	45	37	0	33 <sup>1</sup>	35 <sup>1</sup>	60	21 <sup>1</sup>	27 <sup>1</sup>
4D	40	39	38	60	54	58	0	0	0
3D	30	29	29	70	66	60	0	0	0
2D	20	17	23	80	78	71	0	0	0
1D	10	10	10	90	80	80	0	0	0
0D	0	0	0	0	0	0	100	100	100
0E	0	0	0	0	0	0	100	100	100
1E	10	11	8	90	84	79	0	0	0
2E	20	21	19	80	68	70	0	0	0
3E	30	31	28	70	64	65	0	0	0
4E	40	41	38	60	53	57	0	0	0
5E	40	33	30	0	43	40 <sup>1</sup>	60	22	27 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gemäß Eignungsprüfung, bzw. daraus berechnet, vgl. hierzu auch Kapitel 4.2.6

Tab. 10: Stoffliche Zusammensetzung (Kontrollprüfung/gekürzt), vgl. auch Kapitel 4.2.6

mit Betonbruch versetzt ist. Eine genauere Sortierung von Hand wäre theoretisch möglich gewesen, ist aber ohne Praxisbezug und somit ungeeignet für die Aufgabenstellung.

Zur Abnahme der Bauleistung wurden zudem Ebenheits- und Griffigkeitsmessungen sowie Asphaltmischgutuntersuchungen durchgeführt und Bohrkern entnommen. Bis auf wenige Überschreitungen der Ebenheit im Längsprofil wurden die Abnahmekriterien erfüllt, vgl. (LEHMANN & WICHTER, 2008).

#### 4.2.5 Instrumentierung

Zur Erfassung der Feuchte- und Temperaturzustände in verschiedenen Tiefen und Abschnitten der Erprobungsstrecke wurden in der Bauphase Sensoren verlegt, vgl. Tabelle 11. Die Messwertaufzeichnung erfolgt digital in einem stündlichen Intervall. Die Datenlogger wurden in Wetterschränke, jeweils zwei Stück pro Abschnitt im Straßenbankett, verschlossen, vgl. Bild 8. Die Stromversorgung für die Feuchtesensoren erfolgte durch die Stromleitung der Lichtsignalanlage am Ende der Erprobungsstrecke, die Temperatursensoren wurden durch Batterien versorgt. Die Messdaten wurden vierteljährlich durch Austausch der Speichermedien oder mit Hilfe eines Laptops ausgelesen. Der Messpunkt in Streckenmitte (Station 0+833) wurde zudem mit einem Modem ausgestattet, sodass die Datenaus-

	Lage im Querschnitt ab OK Fahrbahn	Lage im Streckenverlauf
Temperaturmessung	- 4,0 cm OK Asphalttragschicht - 21,5 cm Mitte Schottertragschicht - 54,5 cm Mitte Frostschuttschicht - 80,0 cm Planum - 130,0 cm 50 cm unter Planum untereinander in Fahrstreifenmitte (Randabstand 2,0 m)	24 Messpunkte: 2 Messpunkte pro Abschnitt bzw. Variante; pro Fahrstreifen 1x (wechselseitig versetzt), je 33 m vor bzw. hinter Abschnittswechsel
Feuchtemessung	- 39,0 cm 10 cm unter OK FSS - 90,0 cm 10 cm unter OK Planum untereinander in Fahrstreifenmitte (Randabstand 2,0 m)	12 Messpunkte: 1 Messpunkt pro Abschnitt bzw. Variante; Damm: in FR Nord; Einschnitt: in FR Süd

Tab. 11: Lage der Temperatur- und Feuchtemessstellen



Bild 8: Wetterstation mit Datenlogger (links) und Abschnittsmarkierungen durch Beschilderung der Wetterstation (rechts)

lesung an diesem Messpunkt zusätzlich über das Mobilfunknetz möglich war.

Als Temperatursensoren wurden Thermoelemente eingesetzt, deren Messkopf aus zwei punktverschweißten Thermodrähten besteht (Messprinzip: Thermoelektrischer Effekt). Die Zuleitung ist mit einer PVC- bzw. Teflonummantelung versehen, die sich in einem Kabelschutzrohr befindet. Durch den so geschützten Aufbau konnten die Sensoren während der Bauphase eingebaut werden. Die Temperaturfühler im Bereich der Asphalttragschicht wurden nach dem Verlegen der Schicht, jedoch vor dem Verlegen der Deckschicht, in einen gefrästen Schlitz eingebracht.

Für die Messung der Feuchte wurden Mikrowellensensoren verwendet. Die Messköpfe erzeugen eine

elektromagnetische Welle, die sich wenige Zentimeter in das vor-Kopf liegende Material ausbreitet. Aus dem Anteil an reflektierten Wellen kann der Feuchtegehalt bestimmt werden (Messprinzip: Dielektrischer Effekt). Die Sensoren wurden im Labor an Materialproben und zusätzlich vor Ort beim Einbau materialspezifisch kalibriert. Die Sensoren wurden während der Bauphase installiert, die Zuleitungskabel wurden durch ein Kabelschutzrohr vor mechanischem Angriff während der Bauphase geschützt.

In Streckenmitte (Station 0+833), also im Übergang von Damm- zur Einschnittlage, wurde eine Wetterstation in 2 m Höhe installiert. Mit dem eingesetzten Kombigerät können die Windrichtung, die Windgeschwindigkeit, die relative Luftfeuchte, die Lufttemperatur, die Niederschlagsintensität und die Nieder-

schlagsmenge erfasst werden. Zudem wurde ein Messkopf zur Erfassung der Globalstrahlung installiert. Die Daten werden stündlich mit einem Datenlogger aufgezeichnet.

An der Erprobungsstrecke wurde zudem eine automatische Verkehrszählung installiert, die den Verkehr für beide Fahrrichtungen getrennt erfasst. Erfasst werden das gesamte Verkehrsaufkommen und der Schwerverkehrsanteil.

#### 4.2.6 Ergebnisse der Eignungs- und Kontrollprüfung

Die unter Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 zusammengefassten Ergebnisse der Eignungs- und Kontrollprüfungen werden im Folgenden zusammengefasst dargestellt.

	Feinanteile vor Zertrümmerung, Anteil < 0,063 mm	Feinanteile nach Zertrümmerung, Anteil < 0,063 mm	Rohdichte	Proctorversuch		CBR <sub>0</sub> -Wert	Frostbeständigkeit, Absplitterung	Kornform, Kennzahl	Schlagversuch		Wasserdurchlässigkeit (m/s)	Umweltverträglichkeitsprüfung
	M.-%	M.-%	Mg/ m <sup>3</sup>	$\rho_{Pr}$ g/cm <sup>3</sup>	w <sub>Pr</sub> %	%	%	-	Splitt SZ <sub>8/12</sub> %	SD10 %	DIN 18130-1	Einord- nung gemäß LAGA
<b>Frostschuttschicht</b>												
FSS 0/22 mit 10 M.-% Ziegel, Variante 1	1,5	2,9	2,52	1,75	14,0	59	3,8	15	31,6	-	5,2 x 10 <sup>-6</sup>	Z2
FSS 0/22 mit 20 M.-% Ziegel, Variante 2	2,6	4,1	2,46	1,74	15,7	55	7,9	16	31,8	-	3,2 x 10 <sup>-6</sup>	Z2
FSS 0/22 mit 30 M.-% Ziegel, Variante 3	2,5	6,5	2,45	1,71	15,1	52	9,6	9	31,9	-	2,7 x 10 <sup>-6</sup>	Z2
FSS 0/22 mit 40 M.-% Ziegel, Variante 4	3,4	6,5	2,44	1,69	14,9	48	12,1	15	33,1	-	1,7 x 10 <sup>-6</sup>	Z2
FSS 0/22 mit 40 M.-% Ziegel und 60 M.-% Kiessand 0/8, Variante 5	0,6	0,8	2,48	1,97	12,1	127	12,1	6	32,1	-	4,7 x 10 <sup>-5</sup>	Z2
<b>Schottertragschicht</b>												
STS 0/45 mit 10 M.-% Ziegel, Variante 1	1,8	3,1	2,52	1,81	13,6	78	3,8	4	31,6	40,9	4,4 x 10 <sup>-6</sup>	Z2
STS 0/45 mit 20 M.-% Ziegel, Variante 2	2,6	3,1	2,46	1,74	13,3	66	7,9	4	31,8	43,2	1,6 x 10 <sup>-6</sup>	Z2
STS 0/45 mit 30 M.-% Ziegel, Variante 3	3,5	4,7	2,46	1,72	13,3	55	9,6	7	31,9	43,8	3,0 x 10 <sup>-6</sup>	Z2
STS 0/45 mit 40 M.-% Ziegel, Variante 4	3,9	4,6	2,44	1,74	17,3	54	12,1	14	33,1	44,4	3,0 x 10 <sup>-6</sup>	Z2
STS 0/45 mit 40 M.-% Ziegel und 60 M.-% Kiessand 0/8, Variante 5	0,7	3,3	2,48	1,97	8,3	98	12,1	14	32,1	48,0	5,2 x 10 <sup>-6</sup>	Z

	Betonbruch	Natursteine	Asphalt aus Zwangsanhaftungen im Anteil > 4 mm	Material mit niedrigen Festigkeiten, z. B. Ziegel im Anteil > 4 mm	Störstoffe im Gesamtgemisch
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
<b>Frostschuttschicht</b>					
FSS 0/22 mit 10 M.-% Ziegel, Variante 1	81,0	< 0,1	10,0	8,8	0,2
FSS 0/22 mit 20 M.-% Ziegel, Variante 2	71,7	< 0,1	6,3	21,9	0,1
FSS 0/22 mit 30 M.-% Ziegel, Variante 3	52,1	< 0,1	18,8	28,9	0,2
FSS 0/22 mit 40 M.-% Ziegel, Variante 4	58,5	0,3	2,9	38,2	0,1
FSS 0/22 mit 40 M.-% Ziegel und 60 M.-% Kiessand 0/8, Variante 5	35,3	26,6	3,4	34,6	0,1
<b>Schottertragschicht</b>					
STS 0/45 mit 10 M.-% Ziegel, Variante 1	82,9	< 0,1	5,5	11,4	0,2
STS 0/45 mit 20 M.-% Ziegel, Variante 2	74,4	< 0,1	5,0	20,1	0,2
STS 0/45 mit 30 M.-% Ziegel, Variante 3	69,7	< 0,1	1,3	28,9	0,1
STS 0/45 mit 40 M.-% Ziegel, Variante 4	54,6	< 0,1	4,1	41,2	0,1
STS 0/45 mit 40 M.-% Ziegel und 60 M.-% Kiessand 0/8, Variante 5	37,4	20,9	0,4	41,2	0,1

Schottertragschicht (STS)																	
	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}/E_{v1}$	Verdichtung [%]				Infiltration [m/s]						
Anforderung					>150	<2,2	>150	<2,2	>150	<2,2	>150	<2,2	103				
	MP1	MP2	MP3	MW	MP1		MP2		MP3		MW	MW	MP1	MP2	MP3	MW	
5D STS	33,4	45,0	38,8	<b>39,1</b>	164,1	1,41	159,2	1,72	171,3	1,87	<b>164,9</b>	<b>1,67</b>	98	100	104	<b>101</b>	$1,4 \cdot 10^{-5}$
4D STS	49,3	50,4	48,9	<b>49,5</b>	197,6	1,43	165,3	1,38	165,4	1,63	<b>176,1</b>	<b>1,48</b>	106	105	107	<b>106</b>	$3 \cdot 10^{-7}$
3D STS	54,5	45,4	65,0	<b>55,0</b>	224,0	1,82	197,0	1,68	219,5	1,76	<b>213,5</b>	<b>1,75</b>	112	111	112	<b>112</b>	$3 \cdot 10^{-6}$
2D STS	57,7	58,3	154,1	<b>90,0</b>	192,2	1,61	182,4	1,76	178,7	1,79	<b>184,4</b>	<b>1,72</b>	115	105	112	<b>111</b>	$5 \cdot 10^{-7}$
1D STS	118,4	144,2	123,0	<b>128,5</b>	201,0	1,64	175,1	1,51	187,8	1,62	<b>188,0</b>	<b>1,59</b>	114	111	109	<b>111</b>	$6 \cdot 10^{-7}$
0D STS	58,7	72,6	67,6	<b>66,3</b>	157,8	1,60	182,9	1,70	184,8	1,67	<b>175,2</b>	<b>1,66</b>	111	102	108	<b>107</b>	$3 \cdot 10^{-5}$
0E STS	48,6	55,8	72,6	<b>59,0</b>	194,0	2,20	190,1	2,20	164,1	1,64	<b>182,7</b>	<b>2,01</b>	111	100	103	<b>105</b>	$9 \cdot 10^{-5}$
1E STS	78,7	74,3	123,0	<b>92,0</b>	224,0	1,75	235,2	1,60	175,6	1,79	<b>211,6</b>	<b>1,71</b>	107	109	99	<b>105</b>	$1 \cdot 10^{-6}$
2E STS	84,6	63,7	49,7	<b>66,0</b>	177,8	1,54	198,7	1,42	175,0	2,03	<b>183,8</b>	<b>1,66</b>	110	108	113	<b>110</b>	$4 \cdot 10^{-7}$
3E STS	68,2	82,4	59,2	<b>69,9</b>	188,1	1,48	204,4	1,81	176,3	1,87	<b>189,6</b>	<b>1,72</b>	107	108	105	<b>107</b>	$1 \cdot 10^{-6}$
4E STS	69,0	63,7	54,9	<b>62,5</b>	152,4	1,84	173,2	1,89	156,3	1,85	<b>160,6</b>	<b>1,86</b>	109	108	108	<b>108</b>	$1 \cdot 10^{-6}$
5E STS	63,2	62,5	77,6	<b>67,8</b>	194,8	1,64	170,1	1,53	156,2	2,00	<b>173,7</b>	<b>1,72</b>	104	101	105	<b>103</b>	$8 \cdot 10^{-6}$

Frostschuttschicht (FSS)																	
	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}/E_{v1}$	Verdichtung [%]				Infiltration [m/s]						
Anforderung					>150	<2,2	>150	<2,2	>150	<2,2	>150	<2,2	103				
	MP1	MP2	MP3	MW	MP1		MP2		MP3		MW	MW	MP1	MP2	MP3	MW	
5D STS	46,1	40,3	44,5	<b>43,6</b>	122,4	1,67	116,9	1,95	145,9	1,03	<b>128,4</b>	<b>1,55</b>	98	97	89	<b>95</b>	
4D STS	63,7	54,5	99,6	<b>72,6</b>	134,1	1,44	144,6	1,62	174,5	1,48	<b>151,1</b>	<b>1,51</b>	96	98	103	<b>99</b>	
3D STS	116,6	79,5	96,6	<b>97,6</b>	221,8	1,58	225,0	1,52	202,7	1,50	<b>216,5</b>	<b>1,53</b>	106	104	101	<b>104</b>	
2D STS	85,7	78,1	90,3	<b>84,7</b>	140,5	1,48	153,7	1,58	154,9	1,60	<b>149,7</b>	<b>1,55</b>	106	103	101	<b>103</b>	
1D STS	103,4	112,8	90,2	<b>102,1</b>	211,2	1,62	167,6	1,59	145,1	1,85	<b>174,6</b>	<b>1,69</b>	106	104	106	<b>105</b>	
0D STS	53,1	56,7	49,3	<b>53,0</b>	133,9	2,19	149,3	1,56	131,0	1,59	<b>138,1</b>	<b>1,78</b>	102	105	102	<b>103</b>	
0E STS	42,8	44,9	41,3	<b>43,0</b>	120,2	1,99	126,1	1,69	123,6	1,20	<b>123,3</b>	<b>1,63</b>	105	100	106	<b>104</b>	
1E STS	92,3	88,5	78,7	<b>86,5</b>	281,8	1,32	252,4	1,51	202,7	1,29	<b>245,6</b>	<b>1,37</b>	106	105	99	<b>103</b>	
2E STS	82,9	77,3	61,5	<b>73,9</b>	199,0	1,08	231,6	1,16	138,5	1,48	<b>189,7</b>	<b>1,24</b>	101	102	100	<b>101</b>	
3E STS	118,4	75,0	55,4	<b>82,9</b>	206,3	1,40	144,6	1,49	147,1	1,40	<b>166,0</b>	<b>1,43</b>	101	102	102	<b>102</b>	
4E STS	36,7	43,0	48,9	<b>42,9</b>	119,6	1,45	113,0	1,20	131,4	1,15	<b>121,3</b>	<b>1,27</b>	106	106	104	<b>105</b>	
5E STS	59,1	52,0	55,9	<b>55,7</b>	155,4	1,02	122,8	1,31	137,2	1,37	<b>138,5</b>	<b>1,23</b>	103	100	106	<b>103</b>	

Planum, Bodenart: Sand-Schluff-Gemisch																
	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V2}/$ $E_{V1}$	Verdichtung [%]									
Anforderung	30				>45	<2,3	>45	<2,3	>45	<2,3	>45	<2,3	97/100			
	MP1	MP2	MP3	MW	MP1	MP2	MP3	MW	MW	MP1	MP2	MP3	MW			
5D STS	42,0	46,9	39,8	<b>42,9</b>	59,4	1,81	75,2	1,74	57,0	2,21	<b>63,9</b>	<b>1,92</b>	98	100	98	<b>99</b>
4D STS	52,3	66,2	58,7	<b>59,1</b>	92,8	1,42	98,5	1,57	90,9	1,59	<b>94,1</b>	<b>1,53</b>	101	98	102	<b>100</b>
3D STS	56,8	59,8	60,3	<b>59,0</b>	70,7	1,59	94	1,52	97	1,77	<b>87,2</b>	<b>1,63</b>	97	97	102	<b>99</b>
2D STS	59,2	65,0	62,5	<b>62,2</b>	76,9	1,68	90,9	1,49	53,4	2,32	<b>73,7</b>	<b>1,83</b>	97	100	100	<b>99</b>
1D STS	39,1	48,9	48,9	<b>45,6</b>	41,9	2,49	79,1	2,16	74,1	1,82	<b>65,0</b>	<b>2,16</b>	100	100	100	<b>100</b>
0D STS	43,0	38,6	76,8	<b>52,8</b>	72,9	1,81	85,8	1,83	92,2	1,67	<b>83,6</b>	<b>1,77</b>	97	97	101	<b>98</b>
0E STS	36,1	34,8	28,7	<b>33,2</b>	106,8	1,61	76,6	2,38	77,4	2,08	<b>86,9</b>	<b>2,02</b>	101	101	100	<b>101</b>
1E STS	47,3	46,9	44,1	<b>46,1</b>	69,2	1,39	81,3	1,94	77,2	1,94	<b>75,9</b>	<b>1,76</b>	98	99	101	<b>99</b>
2E STS	25,0	44,7	44,5	<b>38,1</b>	73,9	2,00	94,1	1,57	77,4	1,60	<b>81,8</b>	<b>1,72</b>	97	98	101	<b>99</b>
3E STS	29,8	32,5	42,8	<b>35,0</b>	71,3	2,70	81,5	1,79	61,5	2,15	<b>71,4</b>	<b>2,21</b>	100	100	101	<b>100</b>
4E STS	39,3	34,5	44,5	<b>39,4</b>	47,6	2,01	86,8	1,98	101,2	1,56	<b>78,5</b>	<b>1,85</b>	100	101	100	<b>100</b>
5E STS	39,5	33,4	52,3	<b>41,7</b>	97,6	2,25	100,3	1,67	69,7	1,60	<b>89,2</b>	<b>1,84</b>	100	102	101	<b>101</b>

Schottertragschicht (STS)		Damm							Einschnitt					
Stoffgruppe	Anforderung	5D STS	4D STS	3D STS	2D STS	1D STS	0D STS	0E STS	1E STS	2E STS	3E STS	4E STS	5E STS	
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	
Betonbruch	–	53,8 <sup>b</sup> 32,9 <sup>c</sup>	54,1	65,8	77,7	80,1	–	–	84,3	67,8	63,9	52,6	43,4	
Natursteine	–	20,9 <sup>a</sup>	–	–	–	–	100	100	–	–	–	–	21,6	
Asphaltzwangsanhaftungen (> 4 mm)	< 20	1	7	5,5	4,8	10,2	–	–	5,1	11,2	4,9	6,1	1,3	
Ziegel, Mörtel, porige mineral. Baust.Gips, Anhydrit, Aschen (> 4 mm)	(< 10)	45,0	38,5	28,5	17,4	9,5	–	–	10,6	20,8	31,0	41,0	33,3	
Störstoffe	< 0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	0,2	–	–	–	0,2	0,2	0,3	0,4	
Frostschuttschicht (FSS)		Damm							Einschnitt					
Stoffgruppe	Anforderung	5D STS	4D STS	3D STS	2D STS	1D STS	0D STS	0E STS	1E STS	2E STS	3E STS	4E STS	5E STS	
	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	M.-%	
Betonbruch	–	62,0 <sup>b</sup> 35,4 <sup>c</sup>	57,8	59,7	70,5	79,7	–	–	79,2	69,7	65,3	56,9	66,9 40,3 <sup>c</sup>	
Natursteine	–	26,6 <sup>a</sup>	–	–	–	–	100	100	–	–	–	–	26,6 <sup>a</sup>	
Asphaltzwangsanhaftungen (> 4 mm)	< 20	1,3	3,4	11,3	6,5	9,7	–	–	12,2	11,0	6,6	4,5	2,2	
Ziegel, Mörtel, porige mineral. Baust.Gips, Anhydrit, Aschen (> 4 mm)	(< 10)	36,6	38,4	28,8	22,8	10,4	–	–	8,3	18,9	28,0	38,4	30,3	
Störstoffe	< 0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2	–	–	0,3	0,4	0,1	0,2	0,6	

<sup>a</sup> Fehlender Wert, daher Wert aus Eignungsprüfung übernommen  
<sup>b</sup> Wert ist nicht plausibel (evtl. Anteil an Naturstein nicht differenziert)  
<sup>c</sup> Um den Natursteinanteil geminderter Wert (c = b – a)

## 5 Untersuchungsumfang

Veränderungen verschiedener Parameter über die Zeit wurden zum einen durch die Daten der in Kapitel 4.2.5 beschriebenen festinstallierten Instrumentierung dokumentiert, zum anderen durch regelmäßige Messkampagnen untersucht. Des Weiteren wurden Frosthebungsversuche im Labor durchgeführt, deren Ergebnisse zu den in situ registrierten Frosthebungen in Bezug zu setzen sind.

### 5.1 Tragfähigkeitsmessungen

Zur Beurteilung der Tragfähigkeiten der verschiedenen Varianten und deren zeitlichen Veränderung erfolgten auf der Erprobungsstrecke zweimal pro Jahr Tragfähigkeitsmessungen. Die Messungen wurden jeweils im Herbst (Oktober) und Frühjahr (März/April) durchgeführt. Durch diese zeitliche Anordnung sollten die theoretisch zu erwartenden Veränderungen im Tragverhalten, bedingt durch den Frost-Tau-Wechsel in den Wintermonaten, erfasst werden.

Die Messungen erfolgten zeitlich wie örtlich parallel mit dem Benkelman-Balken (BB) und dem Falling-Weight-Deflectometer (FWD). Hierdurch können beispielsweise Einflüsse der Asphalttemperatur bei der vergleichenden Betrachtung der beiden Messsysteme ausgeschlossen werden. Bei jeder Messkampagne und für jedes Messsystem wurden dieselben 128 Messpunkte angeordnet. Die Messungen erfolgten in beiden Fahrtrichtungen mit einem Messpunktabstand von 15 m.

### 5.2 Höhenmessungen

Zur Dokumentation von Frosthebungen wurden Höhenmessungen durchgeführt. Die Feinnivelllements wurden jedes Jahr im Herbst und mindestens zweimal im Winter während Frostereignissen durchgeführt. Hierzu wurden je Abschnitt drei Querschnitte (Ausnahmen: 5D ein Querschnitt, 0D zwei Querschnitte) mit je sieben Messpunkten durch Messnägeln vor Verkehrsfreigabe dauerhaft markiert. Die Messpunkte befinden sich:

- je Fahrtrichtung im rechten Randstreifen..... Messpunkt 1 und 7,
- je Fahrtrichtung in der rechten Rollspur..... Messpunkt 2 und 6,

- je Fahrtrichtung in Fahrstreifenmitte..... Messpunkt 3 und 5,
- in Fahrbahnmitte..... Messpunkt 4.

Für das Messgerät wird eine Genauigkeit von 0,0003 m auf 1 km angegeben (digitale Messwert-erfassung). Die Nullmessung erfolgte im Oktober 2007. Die Messwerte werden in Meter über Höhen-normal (HN; Bezugspegel Kronstadt bei St. Petersburg) angegeben.

### 5.3 Frosthebungsversuche

Eine Veranlassung zum Bau der Erprobungsstrecke waren die Ergebnisse aus Frosthebungsversuchen im Labormaßstab an ziegelreichen ToB-Baustoffen bzw. an Einzelkörnungen aus Ziegelmaterial. Zur weiteren Beurteilung und zum Vergleich mit den in situ gemessenen Frosthebungen wurden bei der BAST Frosthebungsversuche mit dem von (WEINGART & WIELAND, 2005) weiter entwickelten Laborgerät durchgeführt.

Die Versuche wurden an Proben durchgeführt, die auf der Baustelle genommen und der BAST zugesendet wurden. Zur Beurteilung des Probeneingangs wurde die stoffliche Zusammensetzung untersucht sowie die Korngrößenverteilung vor und nach dem Frosthebungsversuch, der Wassergehalt der Proben und der CBR-Wert nach der Befrostung bestimmt.

## 6 Ergebnisse und Auswertung

### 6.1 Wetterdaten

Zur ortsnahen Aufzeichnung der meteorologischen Daten wurde eine Wetterstation an der Erprobungsstrecke installiert. Aufgrund technischer Defekte liegen für den Beobachtungszeitraum nur Daten vom 01.01.2008 bis 02.05.2008 und ab dem 07.09.2009 vor. Um ein vollständiges Bild der klimatischen Bedingungen im Beobachtungszeitraum zu erhalten, wurde die Datenbasis durch Messwerte einer Wetterstation des DWD (Deutscher Wetterdienst, 2010b) in Müncheberg ergänzt. Die Wetterstation Müncheberg befindet sich in einer Entfernung von circa 17 km in ähnlicher Höhenlage wie die Erprobungsstrecke. Gemäß (Ingenieurgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen et al.,

1996) befindet sich die Wetterstation somit in geeigneter Nähe (< 100 km), um deren meteorologische Daten einer Untersuchungsstrecke zuzuordnen.

### 6.1.1 Vergleich mit der Referenzperiode

Für eine Beurteilung des Beobachtungszeitraumes wurden die aufgezeichneten meteorologischen Daten der Referenzperiode gegenübergestellt. Die Referenzperiode ist ein per Definition der World Meteorological Organization (WMO) auf jeweils 30 Jahre festgelegter Zeitraum, für den jeweils die monatlichen Mittelwerte oder monatliche Summen meteorologischer Kenngrößen berechnet werden. Die derzeit aktuellste und abgeschlossene Normalperiode umfasst die Jahre 1961 bis 1990. Für die Beurteilung wurden die Daten der Referenzperiode der DWD-Station Müncheberg ausgewertet (Deutscher Wetterdienst, 2010a).

In Bild 9 und Bild 10 sind die Differenzen der Mittelwerte bzw. Monatssummen des Beobachtungszeitraums zur Referenzperiode, vgl. Tabelle 12, dargestellt. Der Beobachtungszeitraum lässt sich somit wie folgt beschreiben:

#### Jahr 2007

Die erste Jahreshälfte war deutlich wärmer als das Mittel der Referenzperiode. Im Januar lag die mittlere Temperatur 6 K über dem Mittel. Im restlichen Jahr lagen die mittleren Temperaturen mit  $\pm 2$  K im durchschnittlichen Bereich. Insgesamt lag die mittlere Jahrestemperatur in 2007 rund 2 K über der Referenzperiode. Im Januar 2007 ist überdurchschnittlich viel Regen gefallen. Bis auf die Monate April und Oktober zeichnet sich das Jahr eher durch zu nasse Monate aus. Der Jahreswert liegt 160 mm (30 %) über dem der Referenzperiode.

#### Jahr 2008

Der Januar und Februar waren mit 4 bis 5 K über dem Durchschnitt deutlich zu warm. Der Rest des Jahres entsprach mit rund  $\pm 2$  K den Werten der Referenzperiode. Das Jahresmittel lag 1,8 K über dem Durchschnitt. In den Monaten Januar, März und April ist überdurchschnittlich viel Regen gefallen während die Monate Mai und Juni deutlich zu trocken waren. Die Jahressumme liegt 43 mm (8 %) über dem Wert der Referenzperiode.

#### Jahr 2009

Die Temperaturen im April lagen 5 K höher als der Durchschnitt, ebenso die Temperaturen im November. Die restlichen Monate lagen mit rund  $\pm 2$  K im Bereich der Referenzperiode. Das Jahresmittel lag 0,9 K über dem der Referenzperiode. Auch die Niederschlagssummen liegen im Jahr 2009 im Bereich der Referenzperiode. Lediglich die Monate April und August waren deutlich trockener und die Monate Mai und Oktober nasser. Die Jahressumme liegt 27,7 mm (5 %) über dem Wert der Referenzperiode.

#### Jahr 2010 (Januar bis April)

Der Januar 2010 war mit -4,5 K deutlich kälter als das Mittel. Von Februar bis April lagen die Temperaturen im Bereich der Referenzperiode. In den Monaten Januar, Februar und April ist etwas weniger Regen als in der Referenzperiode gefallen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die mittleren Monatstemperaturen im Beobachtungszeitraum eher über dem Durchschnitt der Referenzperiode liegen, mit dem Januar 2010 aber auch überdurchschnittliche Frostereignisse dokumentiert wurden. Die Über- bzw. Unterschreitungen der Niederschlagssummen im Vergleich zu den Werten der Referenzperiode sind relativ gleich verteilt, zudem konnten überdurchschnittliche Werte, sowohl zu nass als zu trocken, erfasst werden (s. Tabelle 12, Bilder 9-10).

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jahr
Niederschlagssummen [mm]	36	29	32	36	55	66	50	56	44	36	44	47	531
mittlere Lufttemperaturen [°C]	-1	0	3	8	13	16	18	17	14	9	4	1	8

Tab. 12: Werte für die Referenzperiode an der Wetterstation Müncheberg

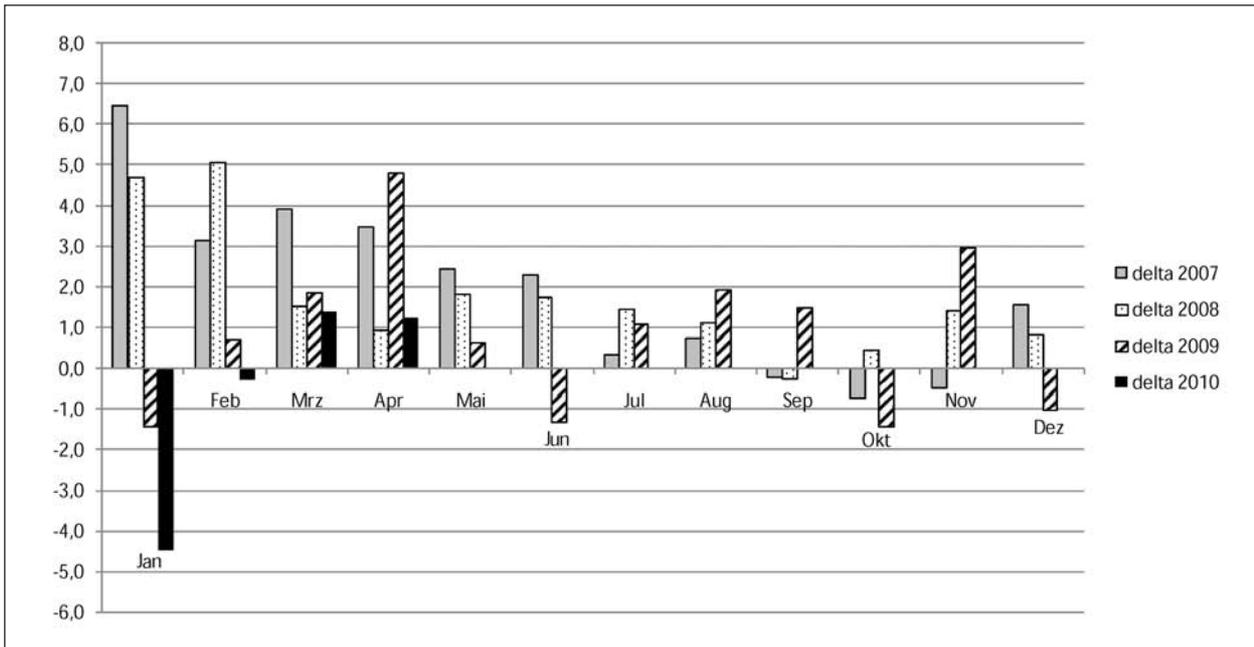


Bild 9: Vergleich mit der Referenzperiode – Differenzen der mittleren monatlichen Lufttemperaturen [K]

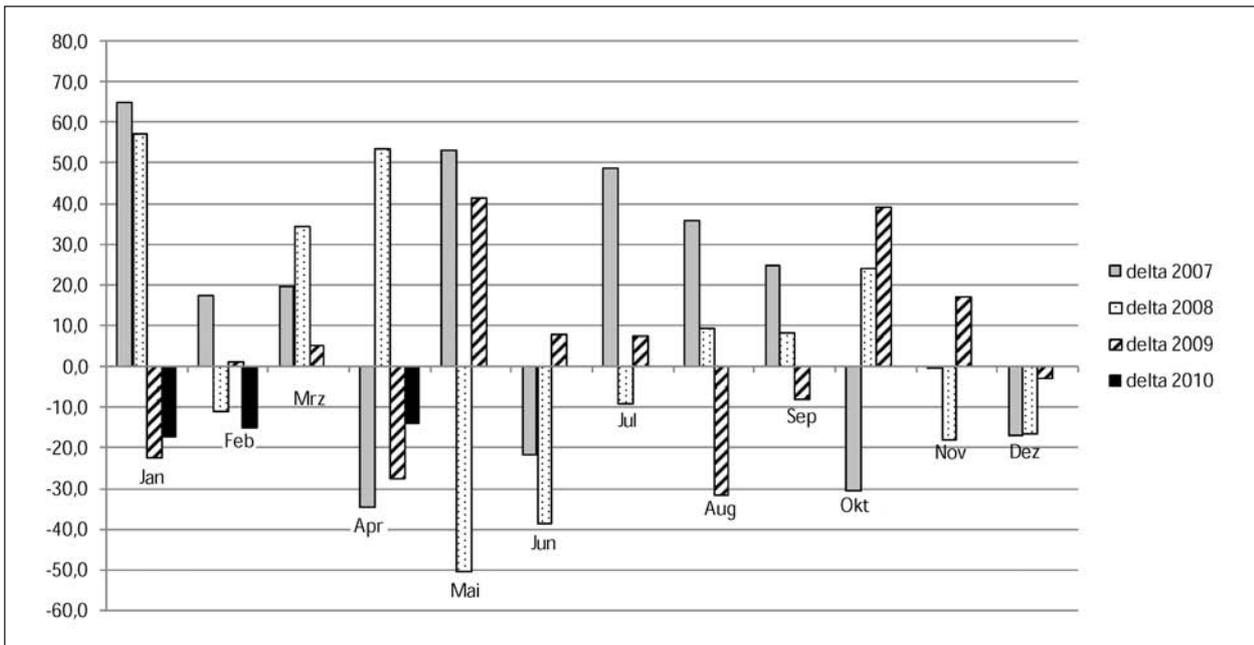


Bild 10: Vergleich mit der Referenzperiode – Differenzen der monatlichen Niederschlagssummen [mm]

### 6.1.2 Bewertung der Frostereignisse im Beobachtungszeitraum

Zur Bestimmung der Strenge einer Frost- bzw. Kälteperiode kann der Frostindex FI berechnet werden. Frostperioden sind aufeinanderfolgende Tage, an denen die mittlere Lufttemperatur weniger als 0 °C beträgt. Werden mehrere Frostperioden zusammen betrachtet, wenn diese nur durch wenige Tage mit mittleren positiven Lufttemperaturen unterbrochen werden, so wird dies als Kälteperiode

bezeichnet. In der Regel wird als Unterbrechungszeit maximal zwei Tage gewählt, vgl. (FGSV, 1994). Der Frostindex FI berechnet sich aus der Differenz von Maximum und Minimum der Temperatursummenkurve innerhalb der Kälteperiode, vgl. Bild 11.

Aus dem Frostindex kann die Frosteindringtiefe abgeschätzt werden. Für mittelstrenge Frostperioden kann folgende Gleichung (1) zur Abschätzung der Frosteindringtiefe  $z_F$  angenommen werden, vgl. (FGSV, 1994):

$$z_F = 15,6 (FI)^{0,3} \text{ [cm]} \quad (1)$$

Aufgrund des Frostindex und der daraus abgeleiteten Frosteindringtiefe wurden in den RStO für die Dimensionierung Frosteinwirkungszonen definiert. Diese basieren auf der Auswertung des Extremwinters 1962/1963. Die Festlegung dieser Frosteinwirkungszonen alleine aufgrund eines Ereignisses und die relativ grobe Darstellung wurden vielfach kritisiert. In einigen Bundesländern wurden daher eigene detailliertere Frostzonenkarten erstellt, die beispielsweise auf der Auswertung einer statistischen 30-jährigen Wiederkehrzeit von extremen Frostergebnissen beruhen, vgl. bspw. für Brandenburg (PLEHM & KIRCHNER, 1999). Für die in 2010 geplante Neufassung der RStO wurde die Festlegung der Frosteinwirkungszonen aktualisiert, vgl. (BLUME & PLEHM, 2009). Die Festlegung erfolgt nun aufgrund der statistischen Wiederkehrzeit von 30 Jahren. Der Detaillierungsgrad der neuen Karte ist zudem höher, da eine größere Anzahl von Wetterdaten ausgewertet wurde und die fortgeschritte-

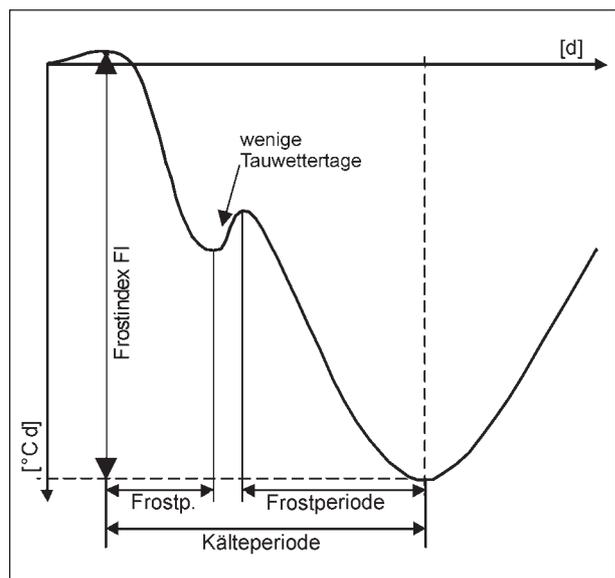


Bild 11: Beispiel für die Bestimmung des Frostindex FI

ne Datenverarbeitung kleinräumigere Darstellungen ermöglicht. In Tabelle 13 sind die Grenzwerte für die Einteilung in die Frostzonen nach alter RStO, geplanter neuer RStO und für das Land Brandenburg (lediglich Unterscheidung von Frostzone II und III) vergleichend dargestellt.

Gemäß den Kartendarstellungen der Frostzonen in den RStO 01 und in (PLEHM & KIRCHNER, 1999) liegt die Erprobungsstrecke Seelow in der Frosteinwirkungszone III, gemäß (BLUME & PLEHM, 2009) in der Frosteinwirkungszone II.

Zur Beurteilung der Frostereignisse im Beobachtungszeitraum wurden die Frostindizes und die Frosteindringtiefe anhand der Daten der DWD-Station Müncheberg berechnet. Hierzu wurden die Frostperioden und Kälteperioden bestimmt. Im Falle der Frostperioden wurden lediglich solche betrachtet, die eine Dauer von mindestens drei Tagen haben. Als Kälteperioden wurden Zeiträume mit mehreren Frostperioden definiert, wenn diese nicht mehr als durch zwei aufeinanderfolgende Tage mit positiven Tagesmitteltemperaturen unterbrochen werden. Für die Zusammenfassung zu Kälteperioden wurden auch Frostperioden mit weniger als drei Tagen Dauer ausgewertet. In Tabelle 14 sind die Frost- bzw. Kälteperioden im Beobachtungszeitraum zusammengefasst. Im Weiteren, vgl. Kapitel 6.2.5, werden die anhand der Lufttemperatur abgeschätzten Frosteindringtiefen mit den an der Erprobungsstrecke gemessenen Frosteindringtiefen verglichen.

Die Kälteperiode Nr. 11 im Winter 2009/2010 besitzt mit 231 Gradtagen den größten Frostindex im Beobachtungszeitraum. Demnach würde bei alleiniger Betrachtung des Beobachtungszeitraumes die Lage des Streckenabschnittes in die Frosteinwirkungszone I fallen, vgl. Tabelle 13. Es handelt sich also um keine repräsentative langzeitige Betrachtung.

Frostzone	Grenzwerte FI basierend auf dem Extremwinter 1962/1963 [°C · d] RStO 01	Grenzwerte FI basierend auf 30-jähriger Wiederkehrzeit [°C · d] (BLUME & PLEHM, 2009)	Grenzwerte FI für Brandenburg, basierend auf 30-jähriger Wiederkehrzeit [°C · d] (PLEHM & KIRCHNER, 1999)
I	≤ 490	≤ 250	-
II	> 490 – ≤ 580	> 250 – ≤ 330	-
III	> 580 – ≤ 675	> 330 – ≤ 580	> 550

Tab. 13: Grenzwerte zur Festlegung der Frosteinwirkungszonen

Die schädigende Wirkung der Frosteindringung in die Straßenbefestigung hängt im Wesentlichen von der Frostempfindlichkeit des Untergrundes bzw. Unterbaus ab. Eine ausreichend frostsichere Dimensionierung des Straßenoberbaus ist daher not-

wendig, um die Frosteindringung in den frostempfindlichen Untergrund bzw. Unterbau zu verhindern. Der Verlauf der Temperatursummenkurve ist ein Indiz für die Frostgefährdung und damit für das Risiko von Schäden während der Auftauperiode. An-

Nr.	Winter	von	bis	F/K <sup>1</sup>	FI [°C · d]	Dauer [d]	Frosteindringtiefe z <sub>F</sub> [cm]
1	06/07 <sup>2</sup>	23.01.2007	27.01.2007	F	-13,9	5	34,4
2		07.02.2007	11.02.2007	F	-8,5	5	29,6
3	07/08	15.12.2007	26.12.2007	K	-20,7	12	38,7
4		02.01.2008	05.01.2008	F	-14,0	4	34,4
5		15.02.2008	17.02.2008	F	-4,4	3	24,3
6	08/09	22.11.2008	25.11.2008	F	-2,7	4	21,0
7		25.12.2008	17.01.2009	K	-108,5	24	63,6
8		26.01.2009	01.02.2009	F	-9,7	7	30,8
9		12.02.2009	21.02.2009	F	-20,8	10	38,8
10	09/10	12.12.2009	22.12.2009	F	-56,0	11	52,2
11		29.12.2009	17.02.2010	K	-230,8	51	79,8
12		04.03.2010	11.03.2010	F	-18,4	8	37,4

<sup>1</sup> F = Frostperiode, K = Kälteperiode  
<sup>2</sup> Auswertung ab 01.01.2007 nur informativ, da Erprobungsstrecke noch im Bau

Tab. 14: Frostereignisse im Beobachtungszeitraum

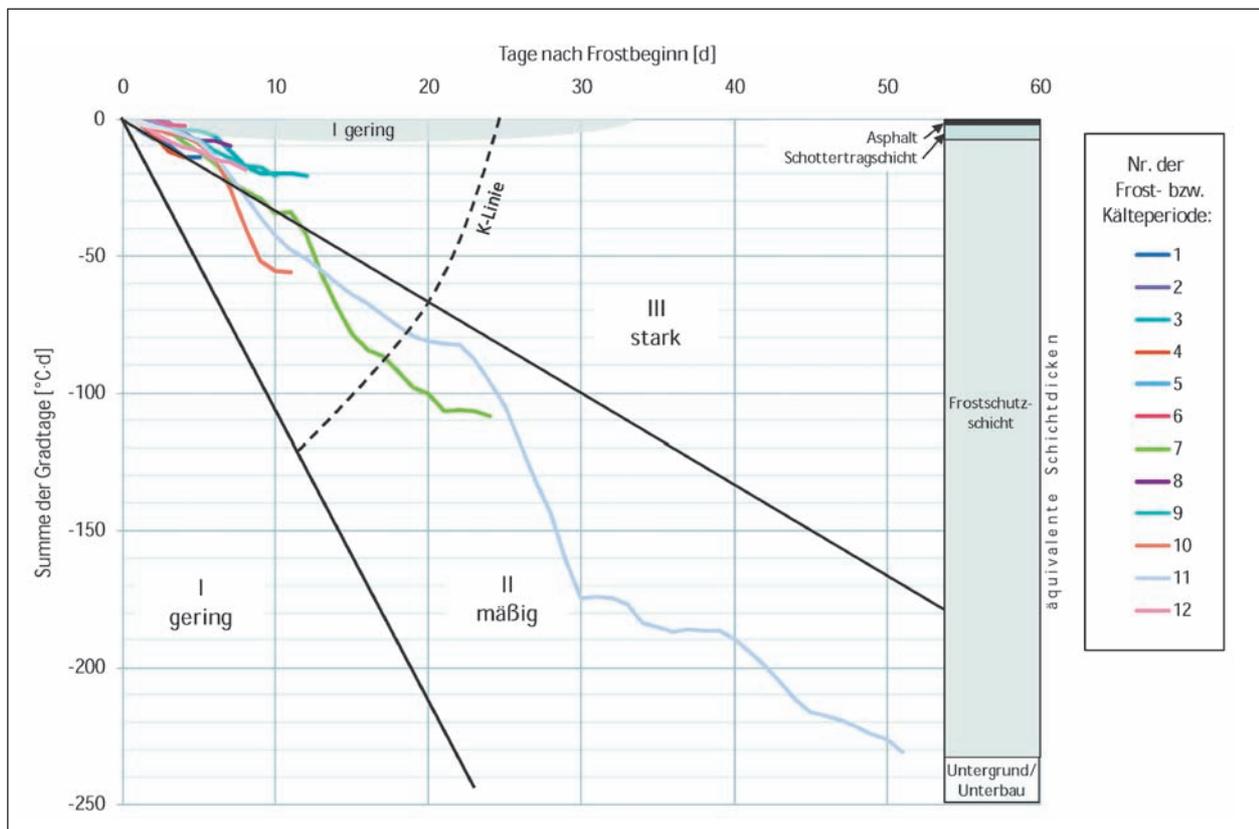


Bild 12: Frostgefährdungspotenzial nach KÜBLER für die Erprobungsstrecke Seelow im Beobachtungszeitraum

haltend mäßige Fröste bewirken eine größere Frostgefährdung, da es vermehrt zur Eislinseneildung kommt, vgl. (FGSV, 1994). Von (KÜBLER, 1964) wurden diese Zusammenhänge an nicht frostsicher ausgebauten Straßen beobachtet und der Zusammenhang zwischen dem Verlauf der Temperatursummenkurve und der Frostgefährdung einer Straße ausgewertet. Der Grad der Frostgefährdung kann demnach mit Hilfe von Bild 12 abgeschätzt werden.

Zur Interpretation sind folgende Erläuterungen notwendig:

- Endet der absteigende Ast vor der empirisch bestimmten K-Linie, so gilt die nächstniedrigere Gefährdungsstufe.
- Wechselt der absteigende Ast in einen anderen Sektor, so gilt derjenige, in dem das nach Tagen gerechnete längere Stück vor dem Maximum liegt.
- Unterbrechen in einem Winter durchgreifende Tauperioden die Kälteperioden, so werden die Frostperioden getrennt beurteilt.

In Bild 12 sind die Temperatursummenkurven der in Tabelle 14 genannten Frost- bzw. Kälteperioden eingetragen. Demnach besitzen Periode 2, 5, 6 und 10 ein geringes und die übrigen ein mäßiges Frostgefährdungspotenzial. Zusätzlich sind in Bild 12 die auf den Frostindex bzw. die Frosteindringtiefe bezogenen äquivalenten Schichtdicken des Straßenoberbaus (siehe Gleichung (1)) dargestellt. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass der Straßenoberbau ausreichend frostsicher dimensioniert ist.

## 6.2 Temperaturmessungen

### 6.2.1 Datenbasis

Für die Auswertung der Temperaturmessungen in verschiedenen Tiefenlagen der Erprobungsstrecke standen Messdaten von Januar 2007 bis März 2010 zur Verfügung. Da der Einbau der Asphaltdeckschicht im März 2007 vorgenommen wurde, wird im Folgenden der Beobachtungszeitraum von April 2007 bis März 2010 definiert.

Insgesamt wurden rund 2,5 Millionen Werte aufgezeichnet, d. h. pro Tiefenposition rund 500.000 Werte. Durch die insgesamt 120 Temperatursensoren verteilt auf 24 Positionen wären bei stündlichem Aufzeichnungsintervall rund 3,1 Millionen Werte

möglich gewesen, die jedoch aufgrund von kurz- und langfristigen Ausfällen nicht erreicht wurden. Langfristige Ausfälle der Instrumentierung sind in den Monaten Oktober 2007 bis Dezember 2007 und Januar 2009 aufgetreten. Insgesamt wurden somit rund 81 % der möglichen Datensätze im Beobachtungszeitraum aufgezeichnet.

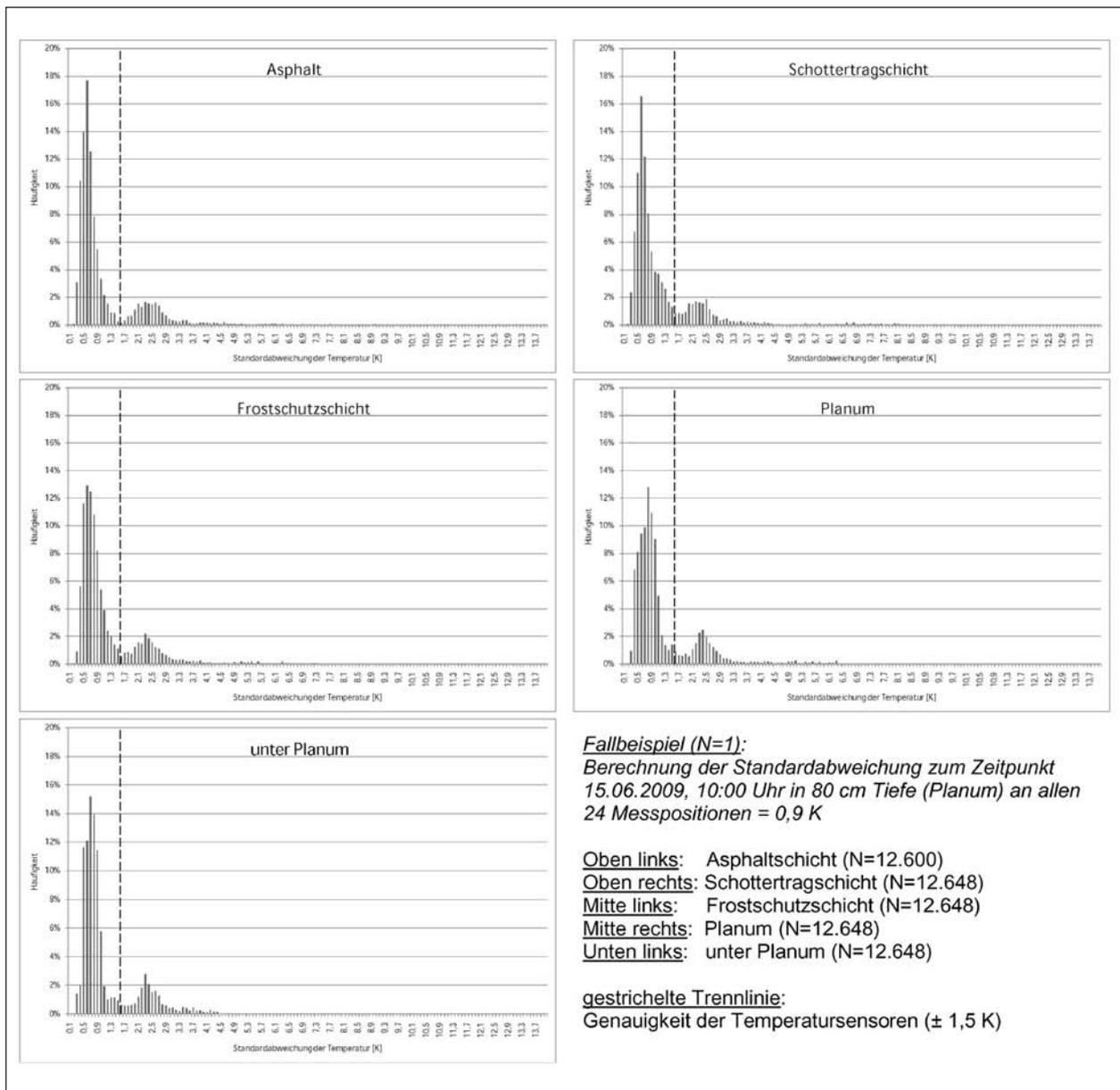
### 6.2.2 Temperaturverteilung in Längsrichtung

Da in jedem Streckenabschnitt der Erprobungsstrecke an zwei Positionen Temperatursensoren installiert worden sind, können Unterschiede in Längsrichtung, insbesondere zwischen Damm- und Einschnittbereich untersucht werden. Um die Streuung der Temperaturen über die Streckenlänge abzuschätzen, wurde zunächst für jeden aufgezeichneten Stundenwert die Standardabweichung der Messwerte untereinander in jeweils einer Tiefenlage berechnet.

Die Ergebnisse sind als Häufigkeitsverteilungen in Bild 13 dargestellt. Die Standardabweichung, also die Streuung der Messwerte, ist in der Regel kleiner als 1,5 K und somit unterhalb der Genauigkeit der eingesetzten Temperatursensoren. In jeder Tiefenlage ist im Bereich über 1,5 K eine Häufung bei circa 2,0 bis 2,5 K festzustellen. Aufgrund der überwiegenden Streuung im Bereich der Messgenauigkeit kann von einer gleichen Temperaturverteilung in Längsrichtung der Erprobungsstrecke ausgegangen werden.

Zur weiteren Untersuchung, ob Unterschiede in der Temperaturverteilung von Damm und Einschnitt festgestellt werden können, wurden die jeweils an vergleichbarer Position in Damm und Einschnitt liegenden Daten miteinander verglichen (z. B. Pos. 0+333 (Variante 4D) mit Pos. 1+233 (Variante 4E)). Der Vergleich erfolgte anhand von Streupunktdiagrammen und der Berechnung von Regressionsgeraden, siehe Beispiel in Bild 14. Es konnten keine signifikanten und systematischen Unterschiede zwischen Damm- und Einschnittlage festgestellt werden. Die Streuungen um die Winkelhalbierende liegen im Wesentlichen im Bereich der Messgenauigkeit von  $\pm 1,5$  K. Bei den Varianten V0 bis V3 kann im Falle negativer Temperaturen eine leichte Tendenz zu höheren Temperaturen im Einschnitt festgestellt werden, die jedoch auch im Bereich der genannten Messgenauigkeit liegt.

Bei den Messpositionen 0+533 (V2D), 0+833 (V0E) und 1+333 (V5E) sind bei dem Vergleich der Mess-



**Bild 13:** Häufigkeitsverteilungen der Standardabweichungen der gemessenen Temperaturen zum jeweils selben Zeitpunkt auf dem gesamten Streckenabschnitt

positionen untereinander vermehrt Ausreißer festzustellen. Teilweise sind diese Werte nicht plausibel, d. h., es stellt sich beispielsweise ein konstanter Wert über einen längeren Zeitraum ein. Aufgrund der Menge nicht plausibler Daten an den genannten Positionen wurden die Messpositionen 0+533 (V2D), 0+833 (V0E) und 1+333 (V5E) von der weiteren Auswertung ausgenommen. Nach Auswertung mehrerer Stichproben zeigte sich zudem ein Zusammenhang mit den o. g. Häufungen der Standardabweichungen von 2,0 bis 2,5 K.

### 6.2.3 Häufigkeitsverteilung und Extremwerte

In Bild 15 ist die Häufigkeitsverteilung der gemessenen Temperaturwerte getrennt nach Tiefenpositionen dargestellt. In Tabelle 15 sind die maximalen und minimalen Temperaturwerte im Beobachtungszeitraum zusammengefasst. Beide Auswertungen wurden ohne die Messpositionen 0+533 (V2D), 0+833 (V0E) und 1+333 (V5E) durchgeführt, vgl. Kapitel 6.2.2.

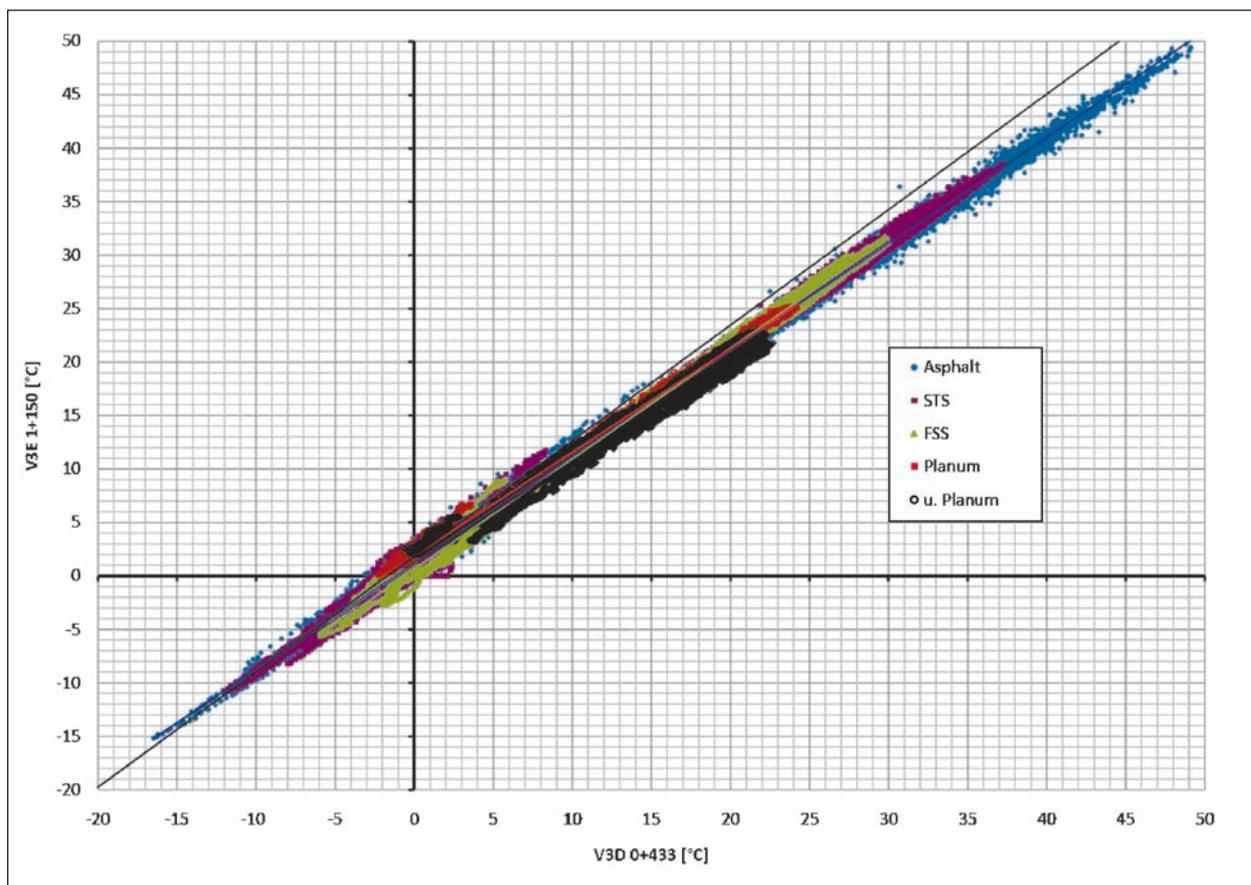


Bild 14: Beispiel für Streupunktdiagramm zum Vergleich der Temperaturverteilung in Damm und Einschnitt, hier Variante 3

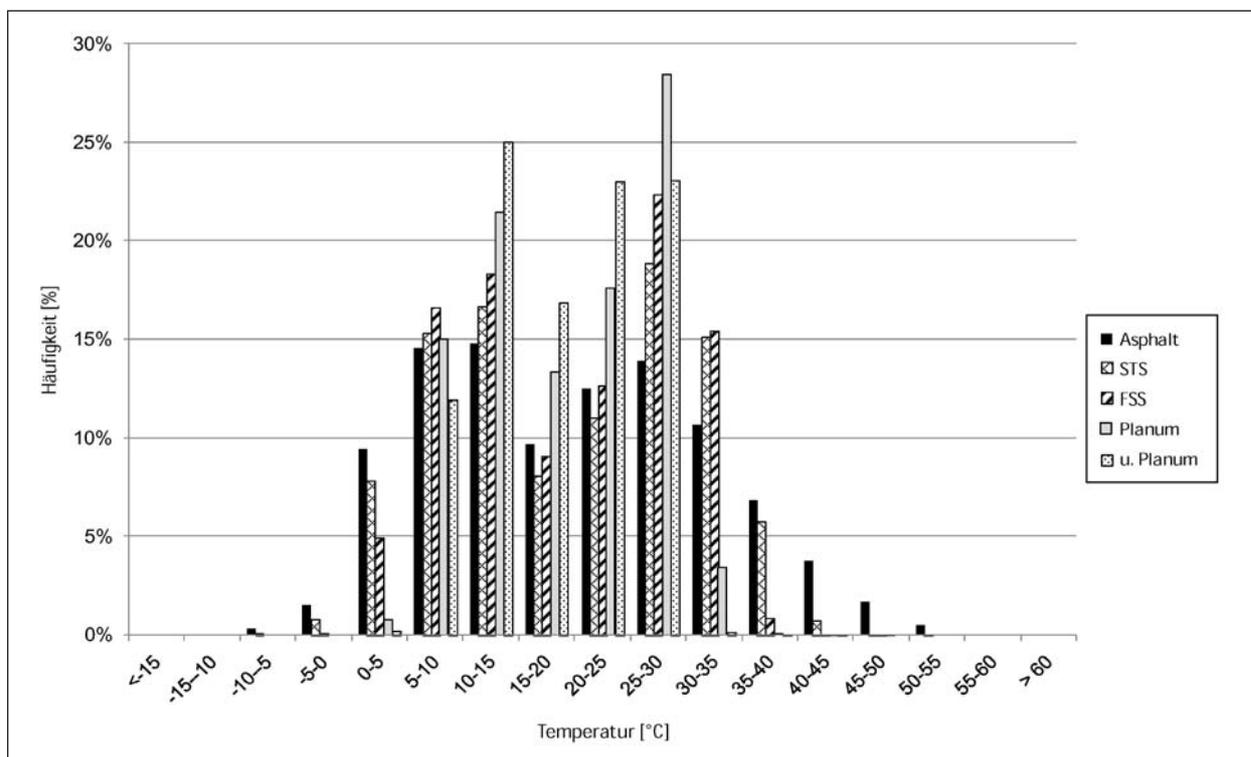


Bild 15: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Temperaturen im Beobachtungszeitraum (4/07 – 3/10)

Sensorposition	maximale Temperatur im Beobachtungszeitraum		minimale Temperatur im Beobachtungszeitraum	
Asphalt (-4,0 cm)	51,9 °C 16.07.2007, 16:00	Station 0+967 1E	-16,5 °C 27.01.2010, 08:00	Station 0+433 3D
STS (-21,5 cm)	45,5 °C 22.04.2008, 21:00	Station 1+067 2E	-12,4 °C 27.01.2010, 10:00	Station 0+567 2D
FSS (-54,5 cm)	42,9 °C 28.05.2007, 10:00	Station 0+967 1E	-6,7 °C 27.01.2010, 11:00	Station 0+767 0D
Planum (-80,0 cm)	40,3 °C 28.05.2007, 10:00	Station 0+967 1E	-2,9 °C 03.01.2010, 15:00	Station 0+567 2D
u. Planum (-130,0 cm)	36,2 °C 28.05.2007, 10:00	Station 0+967 1E	-1,5 °C 25.02.2010, 14:00	Station 0+567 2D

Tab. 15: Maximale und minimale gemessene Temperaturen im Beobachtungszeitraum

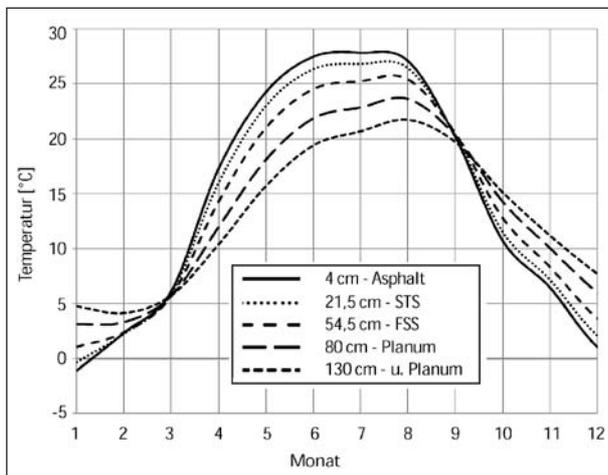


Bild 16: Jahresganglinien der Temperatur in verschiedenen Tiefen

### 6.2.4 Jahresgang

Für jede einzelne Sensorposition wurde eine Jahresganglinie hergeleitet. Hierzu wurde für jeden Monat eine mittlere Temperatur berechnet, indem alle Temperatursensoren der gleichen Tiefenlage der gesamten Erprobungsstreckenlänge im Beobachtungszeitraum betrachtet wurden. Durch die unter Kapitel 6.2.1 beschriebenen Datenlücken sind die Monate Oktober bis Januar bei der Mittelwertbildung etwas unterrepräsentiert.

In Bild 16 sind die Jahresganglinien dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in den Monaten März bis September die mittleren Temperaturen mit zunehmender Tiefe abnehmend sind. Mit zunehmender Tiefe ist zudem eine Abnahme der Temperaturschwankungen über das Jahr hinweg festzustellen.

### 6.2.5 Frosteindringung

Anhand linearer Interpolation zwischen den Messwerten in den verschiedenen Tiefenpositionen wurde die Frosteindringung an den Messpositionen bestimmt. Die aus den Lufttemperaturen berechneten Frosteindringtiefen wurden anschließend den gemessenen bzw. interpolierten Werten gegenübergestellt. In Tabelle 16 sind für drei zufällig ausgewählte Positionen die aus den Lufttemperaturen berechneten Frosteindringtiefen den gemessenen Werten gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass vor allem bei lang anhaltenden Frost- bzw. Kälteperioden bzw. den Perioden mit Frostindizes kleiner circa  $-20 \text{ °C} \cdot \text{d}$  gute Übereinstimmungen von gerechneten und gemessenen Werten vorhanden sind. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass auch im Falle der gemessenen bzw. interpolierten Werte aufgrund der Genauigkeit der Temperaturmessungen von  $\pm 1,5 \text{ K}$  Unsicherheiten hinsichtlich der exakten Frosteindringtiefe bestehen, d. h., durch die Interpolation in Kombination mit der Ungenauigkeit der Messung sind im Extremfall theoretisch über 10 cm Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Frosteindringtiefe möglich.

Die hier festgestellte Abweichung der gemessenen Werte zu den aus den Frostindizes gerechneten Werten bei kurzen Frostauern zeigt auch exemplarisch die Gegenüberstellung der Frosteindringung in der Frostperiode vom 12.12.2009 bis 22.12.2009, vgl. Bild 17.

Im Vergleich der maximalen gemessenen Frosteindringtiefen, vgl. Tabelle 17, ist zu erkennen, dass die Frostperiode Ende Januar bzw. Anfang

Winter	Frostbeginn	Berechnung aus Lufttemperaturen			Messwerte		
		FI [°C · d]	Dauer [d]	z <sub>F</sub> [cm]	St. 0+333	St. 0+567	St. 1+033
					z <sub>F</sub> [cm]	z <sub>F</sub> [cm]	z <sub>F</sub> [cm]
07/08	02.01.2008	-14,0	4	34	23	34	42
	15.02.2008	-4,4	3	24	15	15	16
08/09	22.11.2008	-2,7	4	21	14	< 14 <sup>1</sup>	14
	25.12.2008	-108,5	24	64	61	64	71
	26.01.2009	-9,7	7	31	25	- <sup>2</sup>	18
	12.02.2009	-20,8	10	39	20	- <sup>2</sup>	20
09/10	12.12.2009	-56,0	11	52	39	53	60
	29.12.2009	-230,8	51	80	73	> 130 <sup>3</sup>	80
	04.03.2010	-18,4	8	37	19	> 130 <sup>3</sup>	< 14 <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Stationsausfall  
<sup>2</sup> Frost nur in Asphaltsschicht  
<sup>3</sup> Durchfrostung ohne Unterbrechung

Tab. 16: Gerechnete und gemessene Frosteindringtiefen im Vergleich

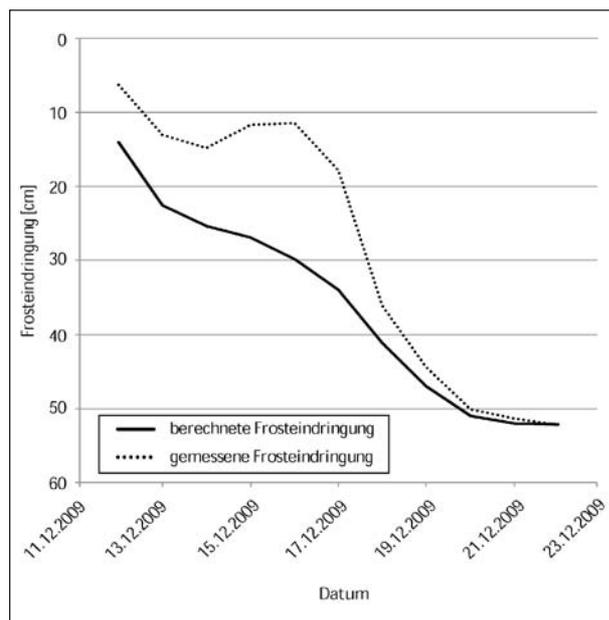


Bild 17: Gerechneter und gemessener Verlauf der Frosteindringung

Station	z <sub>F,max</sub> [cm]	Datum <sup>1</sup>	Station	z <sub>F,max</sub> [cm]	Datum <sup>1</sup>
0+260	76	27.01.2010	0+833	99	29.01.2010
0+280	57	23.01.2009	0+867	96	28.01.2010
0+333	74	28.01.2010	0+933	77	28.01.2010
0+367	63	13.01.2009	0+967	77	28.01.2010
0+433	> 130	03.02.2010	1+033	79	28.01.2010
0+467	79	28.01.2010	1+067	77	28.01.2010
0+533	74	28.01.2010	1+150	80	28.01.2010
0+567	> 130	01.02.2010	1+167	77	28.01.2010
0+633	77	28.01.2010	1+233	71	27.01.2010
0+667	80	29.01.2010	1+267	66	28.01.2010
0+733	113	28.02.2010	1+333	- <sup>2</sup>	-
0+767	105	28.01.2010	1+367	72	27.01.2010

<sup>1</sup> Datum des erstmaligen Auftretens der maximalen Frosteindringung  
<sup>2</sup> keine plausiblen Daten

Tab. 17: Maximale gemessene Frosteindringtiefen

Februar 2010 maßgebend ist. Die maximalen Frosteindringtiefen liegen im Mittel bei rund 84 cm und somit im Bereich des Planums.

### 6.3 Feuchtemessungen

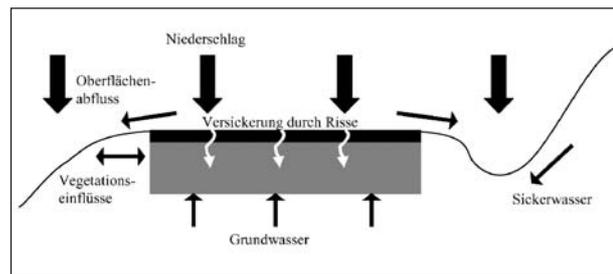
Der Feuchtegehalt in den ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus und im Untergrund bzw. Unterbau wird wesentlich bestimmt durch den Wassereintritt durch die gebundenen Schichten des Oberbaus, sofern diese gerissen sind, durch seitlichen Wassereintritt, angrenzende Vegetation sowie durch anstehendes Grundwasser, vgl. Bild 18.

In vielen Studien wird ein Zusammenhang der Jahreszeit, der klimatischen Randbedingungen, der geografischen Lage und der Art des Straßenoberbaus mit dem Feuchtegehalt im Straßenoberbau festgestellt, vgl. (van GURP, 1995). In diesem Zusammenhang wurde oft ein stetiger Feuchtegehaltsverlauf mit geringer Streubreite und saisonaler Abhängigkeit festgestellt. Der maximale Feuchtegehalt tritt gewöhnlich in den Wintermonaten auf. Hinsichtlich der Abhängigkeit von Niederschlägen und dem Feuchtegehalt im Straßenoberbau bildet sich in der Literatur ein sehr undifferenziertes Bild ab. Im Falle von Straßenbefestigungen mit gebundener Decke werden oft nur schwache bis keine Zusammenhänge festgestellt. Sofern Zusammenhänge festgestellt werden, so treten diese oft sehr zeitverzögert im Bereich von zwei Wochen bis drei Monaten auf, vgl. (PAIGE-GREEN, 2009).

Im Fall der Erprobungsstrecke Seelow ist gemäß dem Baugrundgutachten mit anstehendem Grundwasser nur deutlich unterhalb der Trassengradienten zu rechnen. Zudem befinden sich in unmittelbarer Nähe der Erprobungsstrecke nur vereinzelt Bäume oder vergleichbare Vegetation. Der Feuchtegehalt in den ungebundenen Schichten und im Untergrund bzw. Unterbau wird demnach theoretisch nur durch Sickerwasser beeinflusst.

Da in der Baustofftechnik üblicherweise der Wassergehalt angegeben wird, werden die gemessenen Feuchtegehalte im Folgenden umgerechnet. Für die Umrechnung in den Wassergehalt (M.-% bezogen auf die Trockenmasse) ist der Feuchtegehalt (Vol.-%) durch die Trockenrohddichte zu dividieren. Die Trockenrohddichten wurden bei den Kontrollprüfungen im Rahmen der Verdichtungsprüfung mit dem Ersatzverfahren (Densitometer) bestimmt. Die aus jeweils drei Einzelwerten bestimmten Mittelwerte je Variante sind in Tabelle 18 dargestellt.

Vergleichende Darstellungen der Ganglinien für den Beobachtungszeitraum in der Frostschutz-



**Bild 18:** Einflüsse auf den Feuchtegehalt in einer Straßenbefestigung, vgl. (van GURP, 1995)

Variante	Trockenrohddichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	
	Planum	Frostschutzschicht
5D	1,84	1,87
4D	1,84	1,67
3D	1,91	1,77
2D	1,85	1,80
1D	1,72	1,85
0D	1,83	2,21
0E	1,88	2,23
1E	1,78	1,81
2E	1,85	1,76
3E	1,69	1,74
4E	1,72	1,78
5E	1,71	2,03
Mittelwert	1,80	1,88

**Tab. 18:** Trockenrohddichten (Mittelwerte) aus den Kontrollprüfungen

schicht und im Untergrund bzw. Unterbau finden sich in Bild 19 bzw. Bild 20. Der Wassergehalt an den einzelnen Messposition im Beobachtungszeitraum schwankt um circa 1,5 bis 2,5 M.-%. In den Sommermonaten sind tendenziell höhere Werte festzustellen als in den Wintermonaten. Die Werte bewegen sich im Bereich von circa 3,5 bis 10 M.-% im Untergrund bzw. Unterbau und im Bereich von circa 8 bis 15 M.-% in der Frostschutzschicht. Ausnahmen hiervon sind die Station 0+467 im Unterbau und 1+333 in der Frostschutzschicht sowie einige Werte an anderen Positionen, die durch den un stetigen Verlauf auffallen. Es wird davon ausgegangen, dass es sich hierbei um Messfehler handelt. Systematische Unterschiede im Wassergehalt von Damm und Einschnitt sind nicht festzustellen. Tendenzuell werden im Unterbau (Damm) höhere Wassergehalte gemessen als im Untergrund (Einschnitt). Die umgekehrte Situation ergibt sich tendenziell in der Frostschutzschicht. Eine Reihung

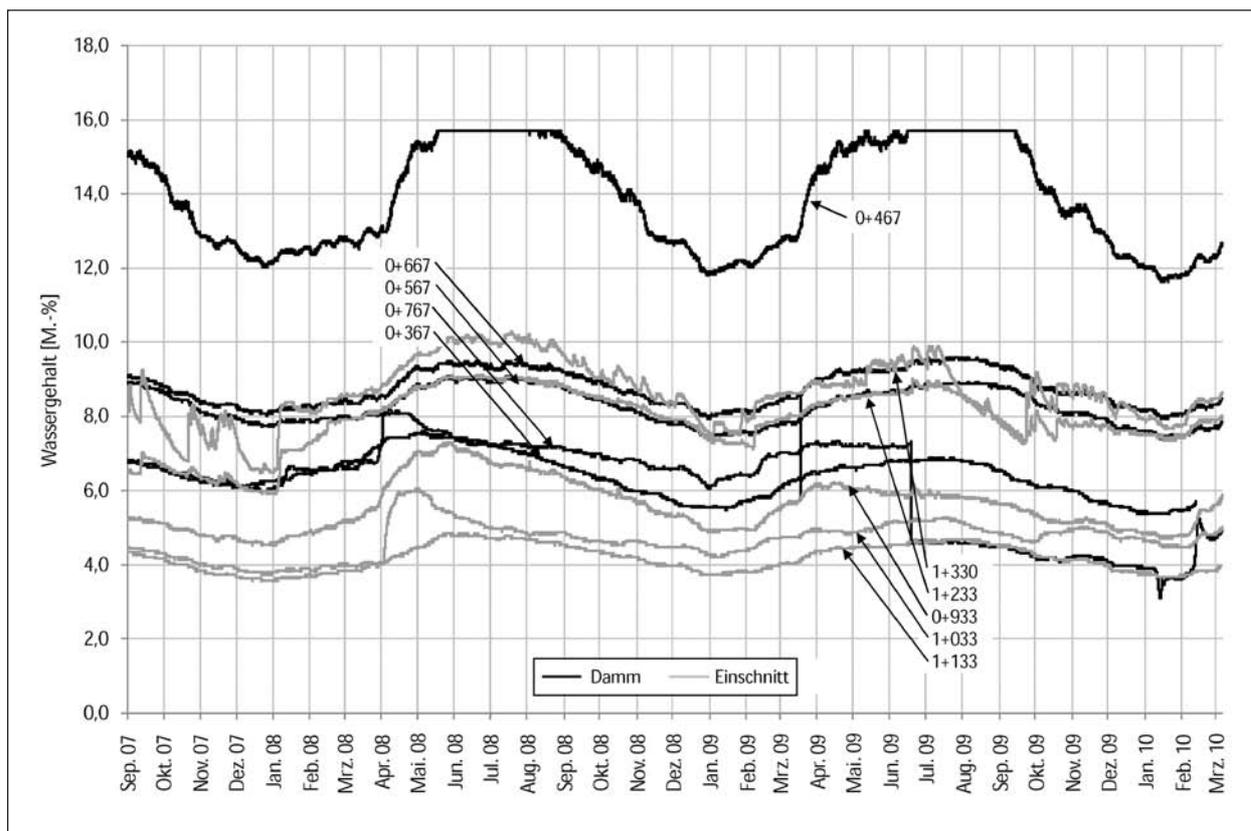


Bild 19: Ganglinien des Wassergehaltes im Untergrund bzw. Unterbau

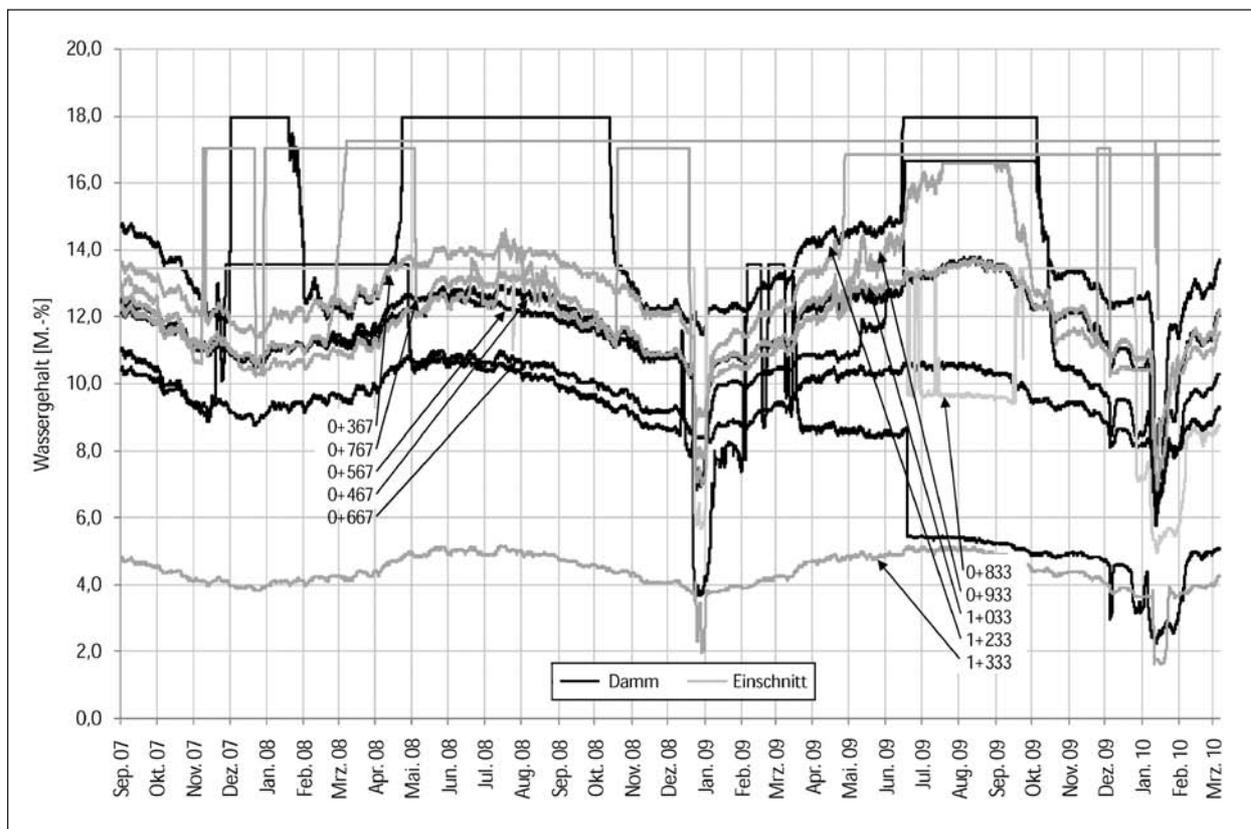


Bild 20: Ganglinien des Wassergehaltes in der Frostschuttschicht

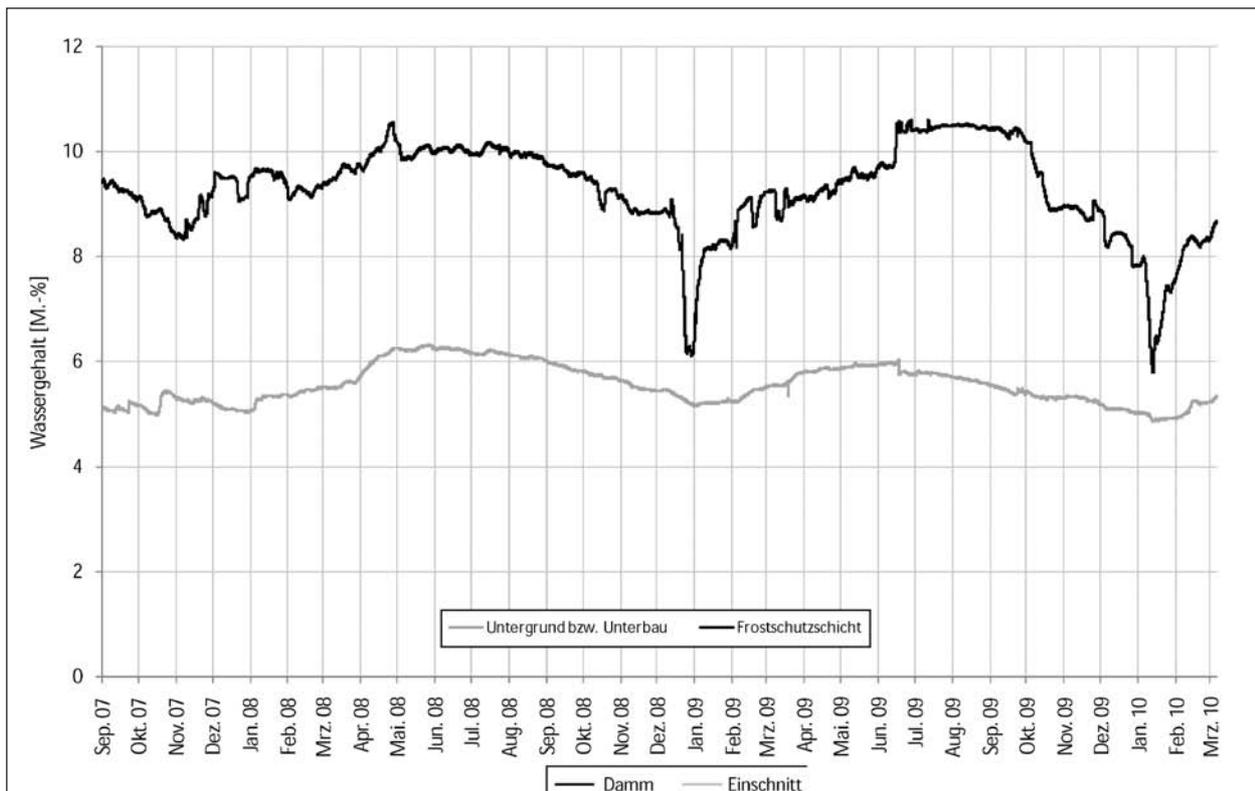


Bild 21: Mittlere Jahresganglinien des Wassergehaltes der Erprobungsstrecke

oder Systematik hinsichtlich der verschiedenen Varianten ist nicht zu erkennen.

Die Zeitpunkte der Frosteindringung in der Frostschuttschicht spiegeln sich im Wassergehalt durch einen plötzlichen Einbruch der Messwerte wider, vgl. Bild 20 im Januar 2009 und Januar 2010. Dies lässt vermuten, dass nicht nur die Temperaturen zu diesen Zeitpunkten unter 0 °C betragen, sondern sich auch Eis in den Schichten gebildet hat.

In Bild 21 sind die aus dem Mittelwert aller Stationen (ausgenommen wurden die für nicht plausibel erachteten Datensätze) gebildeten Jahresganglinien dargestellt. Die genannten jahreszeitlichen Schwankungen und die Zeitpunkte der Frosteindringung sind erkennbar.

Abhängigkeiten der Ganglinien von den gemessenen Niederschlägen können nicht festgestellt werden. In Einzelfällen sind Tendenzen der Wassergehalte des Untergrundes bzw. Unterbaus erkennbar. Der Jahresgang spiegelt sich tendenziell auch in den monatlichen Niederschlagssummen wider. Quantitative Zusammenhänge sind jedoch nicht erkennbar.

## 6.4 Höhenmessungen

Zur Dokumentation der zu erwartenden Frosthebungen wurden regelmäßige Höhenmessungen auf der Erprobungsstrecke durchgeführt. Als Bezugshöhe dient die Nullmessung im Oktober 2007. Eine vorausgegangene Messung im April 2007 erlaubt durch den Vergleich die Abschätzung der Konsolidierung der Konstruktion.

Ohne weitere Differenzierung der Messpositionen wurden auf der Erprobungsstrecke nur geringe Hebungen bzw. Senkungen festgestellt. Aus Bild 22 ist zu erkennen, dass die am häufigsten gemessenen Höhendifferenzen zur Nullmessung im Bereich von  $\pm 2$  mm liegen.

### 6.4.1 Konsolidierung

Nach (von BECKER, 1976) können vier Betriebsphasen einer Straßenkonstruktion unterschieden werden: die Bauphase, die Konsolidierungsphase, die Beharrungsphase und die Ermüdungsphase. Außer bei der Bauphase können die Anfangs- und Endzeitpunkte sowie die Dauern der einzelnen Betriebsphasen nur grob abgeschätzt bzw. beobachtet werden. Die Konsolidierungsphase zeichnet sich vor allem aus durch Nachverdichtungen und

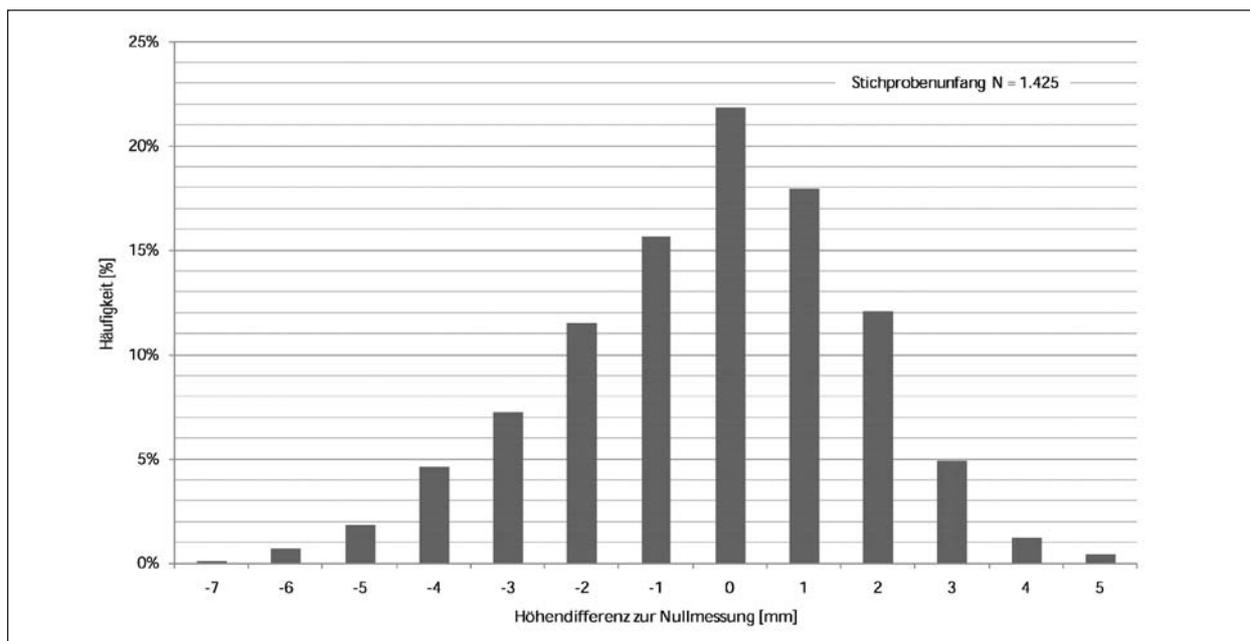


Bild 22: Häufigkeitsverteilung der Höhendifferenzen zur Nullmessung, gesamte Erprobungsstrecke

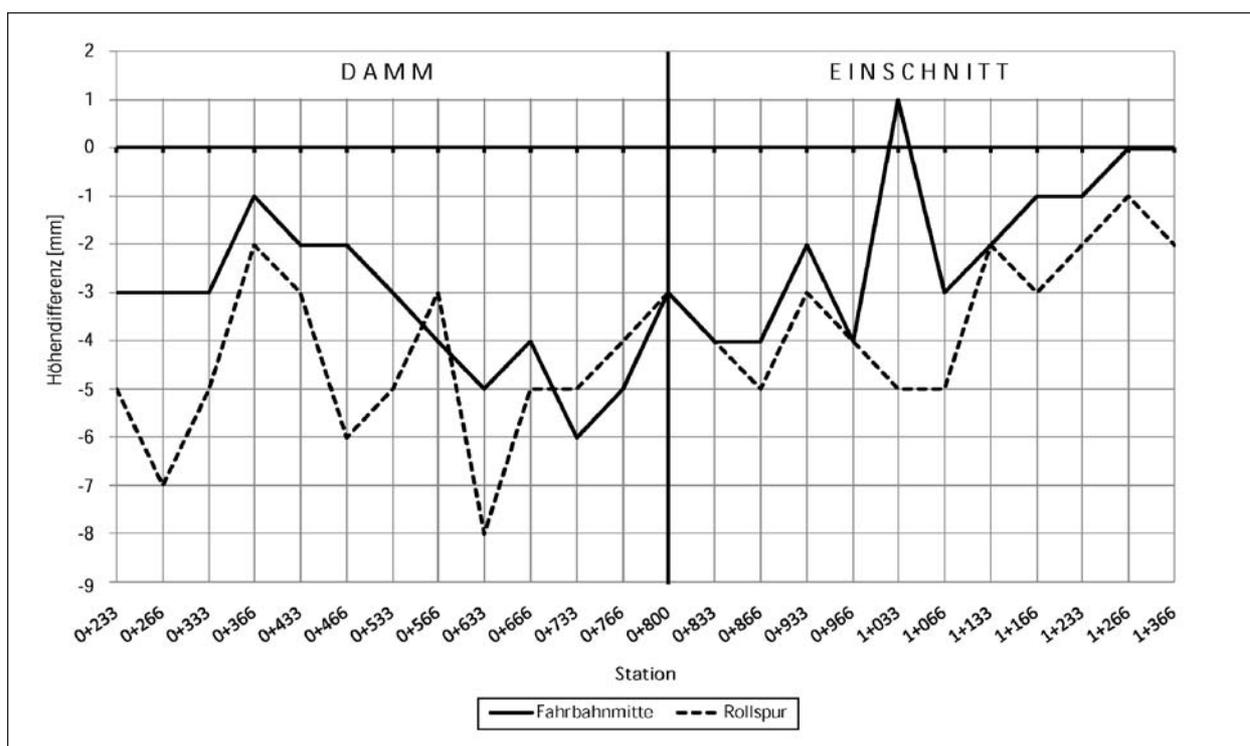
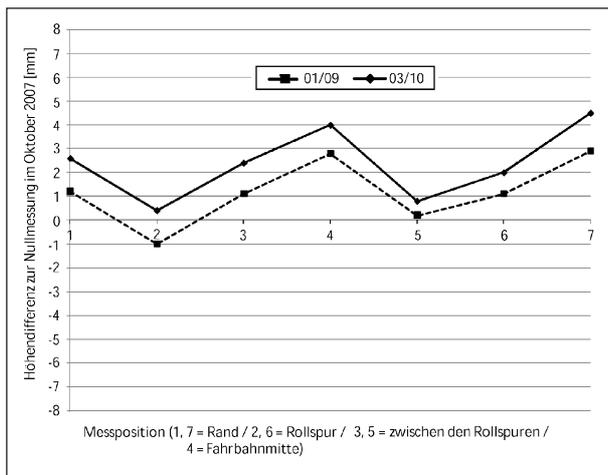


Bild 23: Mittlere Differenz der Höhenmessungen im April und Oktober 2007 (Konsolidierungsphase)

Nachverspannungen sowie die selbstständige Regulierung des durch die Bauphase gestörten Wasserhaushaltes im Untergrund. Setzungen und unschädliche Spurrinnenverformungen sind äußere Merkmale der Konsolidierungsphase. Die Konsolidierung kann nach zwei bis längstens 60 Monaten abgeschlossen sein. Die Dauer der Konsolidierung und die Größenordnung der Setzungen sind u. a.

von der Verkehrsbelastung und der beim Bau erreichten Verdichtungsgrade abhängig.

Die Konsolidierung der Erprobungsstrecke kann anhand der Messungen nach Bauende im April 2007 und Oktober 2007 beobachtet werden. In Bild 23 sind die Differenzen beider Messungen für die Messlinie in Fahrbahnmitte und rechter Roll-



**Bild 24:** Spurrinnenbildung als Beispiel der Messung im Januar 2009 und März 2010, Position 0+333, Variante 4D (jeweils bezogen auf die Nullmessung im Oktober 2007)

spur dargestellt. Tendenziell ist zu erkennen, dass mehr Setzungen im Dammbereich aufgetreten sind als im Einschnittbereich. Zudem ist die Spurrinnenbildung bei Vergleich mit den Setzungen in Fahrbahnmitte zu erkennen, vgl. auch Bild 24.

Werden im Weiteren die Höhendifferenzen des Referenzabschnittes Variante 0 ausgewertet, die weitestgehend von Frosthebungen unbeeinflusst sein sollten, so ist festzustellen, dass im März 2007 weitere Setzungen von im Mittel 4 mm gemessen worden sind, und bei den Folgemessungen bis einschließlich März 2010 keine, bzw. nur sehr geringe ( $\pm 1$  mm) Setzungen aufgetreten sind. Es kann daher angenommen werden, dass die Konsolidierungsphase der Erprobungsstrecke zwischen 8 und 11 Monaten angedauert hat.

### 6.4.2 Frosthebungen

In Tabelle 19 und Tabelle 20 sind die Höhendifferenzen der Frosthebungsmessungen im Frühjahr zu den jeweiligen Messungen im Herbst davor dargestellt. Zusätzlich enthalten die Tabellen noch die Differenzen die sich von Frühjahr zu Herbst einstellen. Dargestellt sind jeweils die Messpositionen 1 (Fahrbahnrand) und 4 (Fahrbahnmitte), vgl. auch Kapitel 5.2. Auf die Darstellung der übrigen Positionen wurde verzichtet, da die Werte tendenziell vergleichbar sind und im Falle der Messungen in den Rollspuren (Positionen 2 und 6) nicht quantifizierbare Einflüsse aus der Spurrinnenbildung und der Abnutzung der Messnägelsköpfe durch den Verkehr vermutet werden.

Messpunkt 1 Monat/Jahr	Mittelwert der Messung in Variante [mm]										
	5D	4D	3D	2D	1D	0	1E	2E	3E	4E	5E
03/08 <sup>1</sup>	1	1	0	-1	-2	-3	-4	-1	0	0	-1
10/08 <sup>2</sup>	1	2	2	2	1	2	3	0	0	-1	1
01/09 <sup>1</sup>	-1	-2	-1	0	1	0	0	-1	0	1	1
03/09 <sup>1</sup>	-3	-2	-2	1	2	1	2	2	1	1	1
10/09 <sup>2</sup>	2	1	0	-2	-1	-1	-1	1	1	1	1
03/10 <sup>1</sup>	2	1	1	0	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-1

<sup>1</sup> Differenz zur Herbstmessung des Vorjahres  
<sup>2</sup> Differenz zum Vorgänger

**Tab. 19:** Höhendifferenzen an Messpunkt 1 (Fahrbahnrand)

Messpunkt 4 Monat/Jahr	Mittelwert der Messung in Variante [mm]										
	5D	4D	3D	2D	1D	0	1E	2E	3E	4E	5E
03/08 <sup>1</sup>	1	2	0	-1	-1	-4	-4	-1	0	0	-1
10/08 <sup>2</sup>	1	1	2	2	1	1	3	1	-1	-1	0
01/09 <sup>1</sup>	-2	-1	-2	-1	0	1	-2	-2	-1	0	-1
03/09 <sup>1</sup>	-4	-2	-1	0	2	2	2	1	0	1	0
10/09 <sup>2</sup>	3	1	0	-2	-1	-2	-1	0	0	0	0
03/10 <sup>1</sup>	1	1	1	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-3

<sup>1</sup> Differenz zur Herbstmessung des Vorjahres  
<sup>2</sup> Differenz zum Vorgänger

**Tab. 20:** Höhendifferenzen an Messpunkt 4 (Fahrbahnmitte)

Aus den Tabellen ist zu erkennen, dass die Setzungen und Hebungen hauptsächlich zwischen  $\pm 2$  mm auftreten. Die größeren Setzungen bei der Messung im März 2008 (03/08) sind evtl. auf weitere Konsolidierungen zurückzuführen. Auffällig ist zudem die Setzung von 3 mm bzw. 4 mm im Abschnitt 5D bei der Messung 03/09. Diese Beobachtung deckt sich mit dem Ergebnis der visuellen Zustandserfassung und den Tragfähigkeitsmessungen in diesem Abschnitt, vgl. Kapitel 6.7. Es wurde dort im Frühjahr ein deutlicher Tragfähigkeitsverlust festgestellt, der sich im Oberflächenbild durch Netzrisse mit deutlicher Setzungsmulde zeigt.

Deutliche und systematische variantenabhängige Frosthebungen sind nicht festzustellen. Insgesamt werden mehr Hebungen und Beharrungen festgestellt als Senkungen. Insgesamt betrachtet sind die Höhendifferenzen jedoch als sehr gering und unschädlich für die Straßenkonstruktion einzuordnen.

## 6.5 Tragfähigkeitsmessungen

### 6.5.1 FWD-Messungen

Ein anerkannter Bewertungshintergrund für Deflexionsmessungen mit dem FWD lag zum Zeitpunkt der Berichterstellung nicht vor. Durch das Vorhandensein eines Referenzabschnittes, Variante 0, und den angestrebten Variantenvergleich innerhalb der Erprobungsstrecke können bestehende Ansätze sowie Vergleiche der Deflexionen bzw. Deflexionsmulden zur Bewertung der FWD-Messungen herangezogen werden.

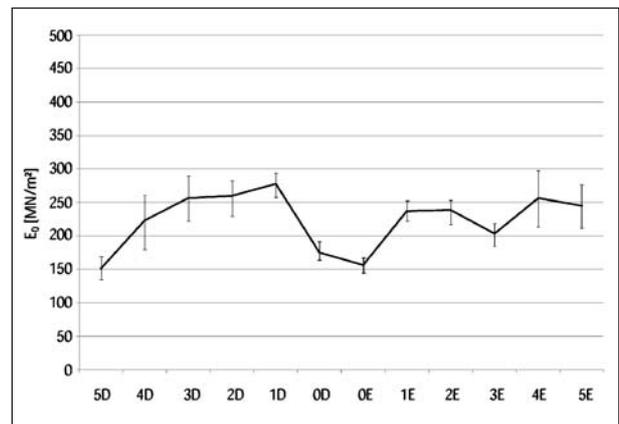
Zur Auswertung der Tragfähigkeitsmessungen werden die Schichtmoduln einzelner Teilschichten aus den Deflexionsmulden zurückgerechnet und bewertet. Im Falle des Untergrundes bzw. Unterbaus wird der Verformungsmodul auf dem Planum zurückgerechnet. Mit Hilfe von weiteren Berechnungen nach der Mehrschichtentheorie werden anschließend Vergleichswerte zur Bewertung der Varianten berechnet.

Die Rückrechnung der Schichtmoduln erfolgt hier nach WEINGART (WEINGART, 2009). Dabei wird eine rechnerische Deflexionsmulde iterativ mit einer Näherungsfunktion der gemessenen Deflexionsmulde unter Veränderung der Schichtmoduln  $E_0$  und  $E_1$  angepasst, vgl. Bild 25. Mit Hilfe einer temperaturabhängigen Näherungslösung für den Schichtmodul der Asphaltschicht bei 10 Hz Belastungsfrequenz ist es anschließend möglich, den Schichtmodul der Tragschicht ohne Bindemittel zu bestimmen.

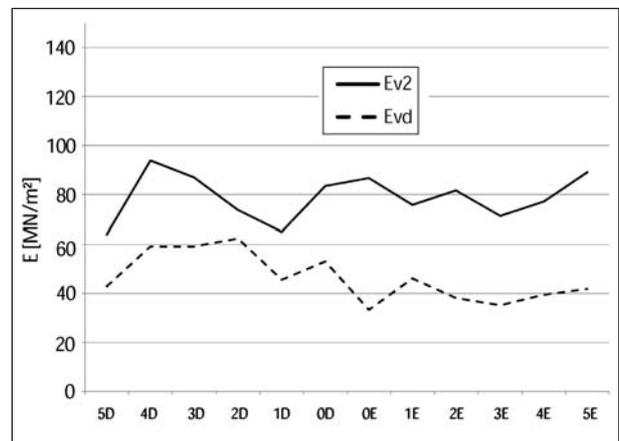
Die Ergebnisse der Rückrechnung des Verformungsmoduls auf dem Planum  $E_0$  sind als Mittelwert mit der jeweiligen Wertespanne für jede Variante in Bild 26 dargestellt. Zur besseren Darstellung sind Verbindungslinien zwischen den Mittel-

werten dargestellt, eine Interpolation der Werte über die jeweilige Variante ist nicht zulässig.

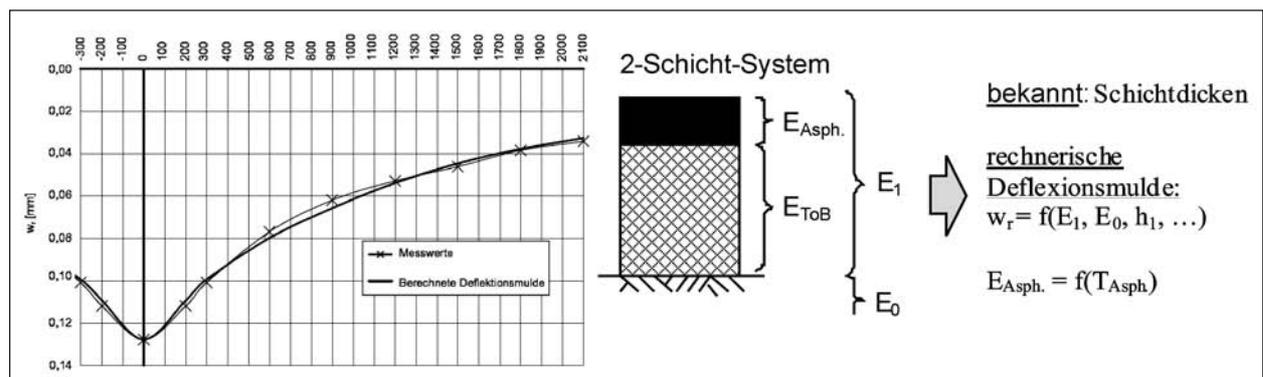
Es ist zu erkennen, dass die Tragfähigkeit des Untergrundes bzw. Unterbaus bei den Varianten 5D, 0D und 0E etwas geringer ist als bei den übrigen Varianten. Der Vergleich in Bild 27 mit den Verfor-



**Bild 26:** Verformungsmodul  $E_0$  auf dem Planum (aus Rückrechnung FWD Deflexionsmulden/Mittelwerte der Messungen Herbst 2007 bis Frühjahr 2010, mit Angabe der Wertespanne)



**Bild 27:** Verformungsmodul  $E_{v2}$  und  $E_{vd}$  (Messung während der Bauphase)



**Bild 25:** Schematische Darstellung der Rückrechnung von Schichtmoduln ( $E_0$  = Verformungsmodul) aus Deflexionsmulden

mungsmodul, die während der Bauphase mit dem statischen und dynamischen Plattendruckversuch auf dem Planum gemessen worden sind, zeigt, dass diese Tragfähigkeitsunterschiede hier nicht vorhanden sind. Hierfür können zwei Ursachen vermutet werden: Erstens, die Tragfähigkeitsunterschiede sind auf die Nachverdichtung durch den Einbau und die Verdichtung der darüber liegenden Schichten zurückzuführen, oder zweitens, die Tragfähigkeitsunterschiede resultieren aus der Rückrechnung der FWD-Deflexionen, da hierbei die exakte Tiefenlage von  $E_0$  nicht bestimmt werden kann und somit die Berechnungsposition von  $E_0$  auch geringfügig über dem Planum liegen kann. In allen Fällen wird jedoch die Mindesttragfähigkeit von  $115 \text{ MN/m}^2$  erfüllt, die sich aus der Umrechnung der Mindestanforderung an den statischen Verformungsmodul ( $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$  für F2- und F3-Böden) in den dynamischen Verformungsmodul durch Multiplikation mit 2,5 ergibt, vgl. (STRAUBE, et al., 2010).

In Bild 28 sind die Ergebnisse der Rückrechnung des Schichtmoduls der Tragschicht ohne Bindemittel  $E_{\text{ToB}}$  als Mittelwert für jede Variante und jeden Messzeitpunkt dargestellt. Zur besseren Darstellung sind Verbindungslinien zwischen den Mittel-

werten dargestellt, eine Interpolation der Werte über die jeweilige Variante ist nicht zulässig.

Es ist zu erkennen, dass die Varianten ohne natürliche Gesteinskörnungen (Variante 1 bis 4) ein deutlich höheres Tragfähigkeitsniveau aufweisen. Die Schichtmoduln der Varianten 0 und 5 liegen in einem für Tragschichten ohne Bindemittel aus natürlichen Gesteinskörnungen üblichen Bereich von rund  $300$  bis  $800 \text{ MN/m}^2$ , vgl. (von BECKER, 1976). Mit abnehmendem Ziegelanteil und somit zunehmendem Betonbruchanteil nimmt die Tragfähigkeit zu (Variante  $4 < \text{Variante } 1$ ). Trotz gleich bleibenden Ziegelanteiles ist die Tragfähigkeit der Variante 5 niedriger als die der Variante 4, was durch den teilweisen Ersatz von Betonbruch durch weniger tragfähiges Baustoffgemisch aus natürlichen Gesteinskörnungen zurückzuführen ist. Im Falle der Varianten 1 bis 4 ist zudem in den meisten Fällen eine Abnahme der Tragfähigkeit mit zunehmender Liegedauer zu beobachten.

In Tabelle 21 ist die Reihung der Schichtmoduln  $E_{\text{ToB}}$  über die Zeit dargestellt. Mit Ausnahme der Variante 0 ist festzustellen, dass die Tragfähigkeiten der Herbstmessung in der Regel höher sind als die der Frühjahrmessungen. Des Weiteren sind

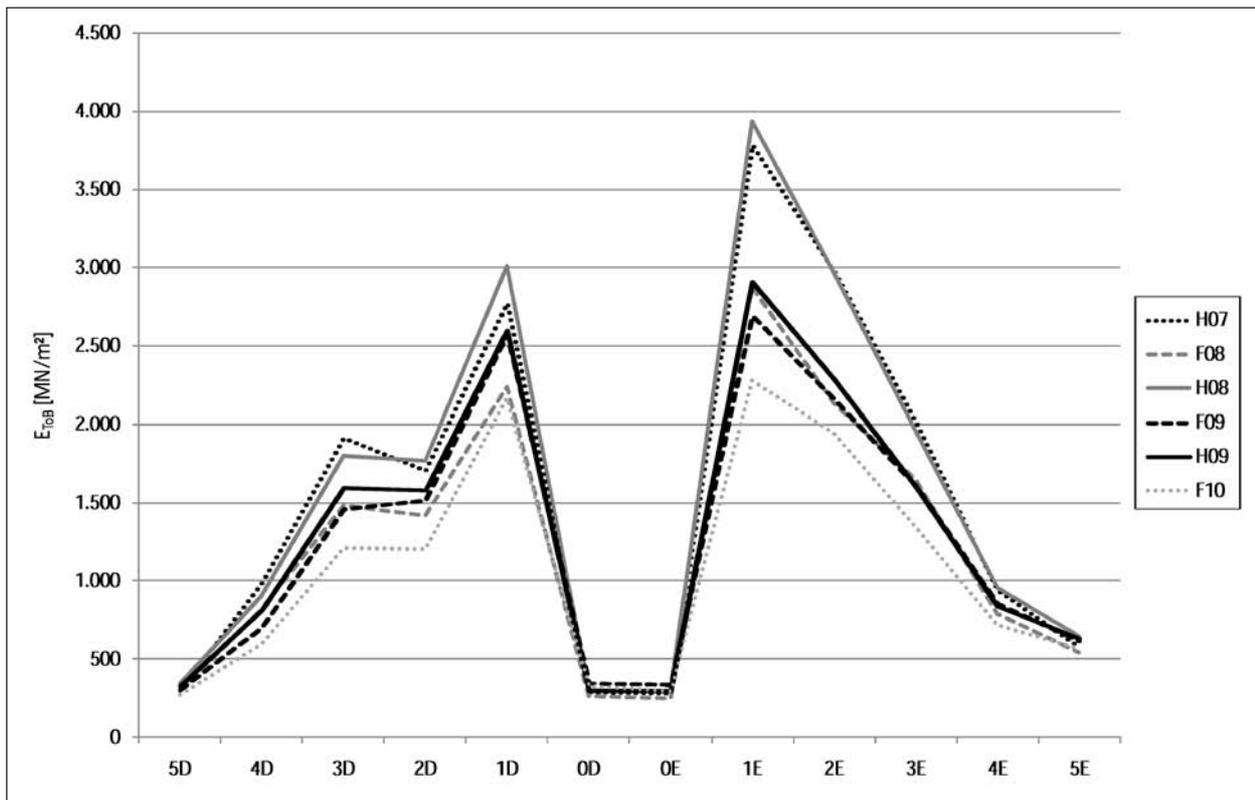


Bild 28: Schichtmodul  $E_{\text{ToB}}$  der ToB (aus Rückrechnung FWD Deflexionsmulden)

Variante											
5D	4D	3D	2D	1D	0D	0E	1E	2E	3E	4E	5E
Reihung $E_{ToB}$ (oben = maximaler Wert)											
H08	H07	H07	H08	H08	F09	F09	H08	H07	H07	H08	H08
H09	H08	H08	H07	H07	F10	H09	H07	H08	H08	H07	H09
H07	F08	H09	H09	H09	H08	H08	H09	H09	F08	F09	F09
F09	H09	F08	F09	F09	H09	F10	F08	F09	F09	H09	H07
F08	F09	F09	F08	F08	H07	H07	F09	F08	H09	F08	F10
F10	F10	F10	F10	F10	F08	F08	F10	F10	F10	F10	F08
Delta (max-min) [MN/m <sup>2</sup> ]											
70	389	698	569	841	78	81	1655	1038	668	234	98

Tab. 21: Reihung der Schichtmoduln  $E_{ToB}$  getrennt nach Varianten in Bezug zum Messzeitpunkt

die Spannweiten der maximalen zu minimalen  $E_{ToB}$  je Variante dargestellt. Mit zunehmendem Ziegelanteil nehmen die Spannweiten ab. Die Variante 5 verhält sich demnach trotz des hohen Ziegelanteils ähnlich der Variante 0. Ähnlich den Unterschieden im Niveau der Schichtmoduln, s. o., scheint auch hier der Anteil an Betonbruch einen maßgeblichen Einfluss auf das Tragverhalten zu haben als der Ziegelanteil.

Für eine bauklassenbezogene Bewertung der Tragfähigkeit des Gesamtsystems im Herbst 2007 und Frühjahr 2010 wird hier die in Regelbauweise ausgeführte Variante 0 als Referenzsystem für die Bauklasse IV (RStO 01, Tafel 1, Zeile 3) gewählt. Die Bewertung wird wie folgt durchgeführt:

### Schritt 1

In einem Mehrschichtenprogramm wird ein Dreischichten-System, bestehend aus einer Asphalt-schicht, einer ToB und dem Untergrund bzw. Unterbau, abgebildet. Die Schichtdicken werden entsprechend der RStO 01, Tafel 1, Zeile 3, Bauklasse IV gewählt, wobei die Dicke des frostsicheren Oberbaues den Verhältnissen der Erprobungsstrecke entspricht. Mit Kenntnis von  $E_0$  und  $E_{ToB}$  der Variante 0 wird der vorab per Näherungslösung bestimmte Schichtmodul der Asphalt-schicht  $E_{Asph}$  iterativ im Mehrschichtenprogramm derart bestimmt, dass die berechnete Verformung im Lastzentrum der gemessenen Deflexion im Lastzentrum entspricht. Die Neubestimmung von  $E_{Asph}$  wird zur Vermeidung geringer Berechnungsfehler erforderlich, die durch die Verwendung kom-

plexer Mehrschichtenrechnungen statt der o. g. Näherungsfunktion für das Zwei-Schichten-System entstehen.

### Schritt 2

Für jede Bauklasse wird mit Kenntnis der Schichtdicken (die Dicke des frostsicheren Oberbaues bleibt konstant) und der Moduln  $E_0$ ,  $E_{ToB}$  Variante 0 und  $E_{Asph}$ , vgl. Tabelle 22, die Deflexion im Lastzentrum mit dem Mehrschichtenprogramm berechnet.  $E_0$  wird dabei als einzige Variable den Verhältnissen der zu untersuchenden Variante bzw. des Messpunktes angepasst, da  $E_0$  einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Tragfähigkeit des Gesamtsystems besitzt, vgl. (STRAUBE, et al., 2010).

### Schritt 3

Die Zuordnung der gemessenen Deflexion zu einer Bauklasse erfolgt durch Vergleich mit der in Schritt 2 berechneten Deflexion, vgl. Tabelle 23 und Tabelle 24.

Die Ergebnisse der Messung im Herbst 2007 (Tabelle 23) und der im Frühjahr 2010 (Tabelle 24) dürfen miteinander verglichen werden, da das Referenzsystem Variante 0 nur zur Rückrechnung des temperaturabhängigen Asphalt-E-Moduls unter Berücksichtigung der jeweiligen E-Moduln der ToB und des Untergrundes bzw. Unterbaus verwendet worden ist, d. h., der Bewertungsmaßstab wird nicht den saisonalen Verhältnissen angepasst.

Aus Tabelle 23 ist zu erkennen, dass die Tragfähigkeiten der Varianten 1, 2 und 3 der Bauklasse SV genügen, die der Variante 4 der Bauklasse II und die der Variante 5 der Bauklasse III bzw. IV. Die ziegelreichen Varianten übertreffen somit die Anforderungen der Soll-Bauklasse IV, wobei auch hier anzunehmen ist, dass der Anteil an Betonbruch einen maßgeblicheren Anteil an der Tragfähigkeit besitzt, als der Ziegelanteil. Des Weiteren zeigt Tabelle 24, dass im schlechtesten eingetretenen Fall, nämlich

Angaben der Soll-Bauklasse IV, wobei auch hier anzunehmen ist, dass der Anteil an Betonbruch einen maßgeblicheren Anteil an der Tragfähigkeit besitzt, als der Ziegelanteil. Des Weiteren zeigt Tabelle 24, dass im schlechtesten eingetretenen Fall, nämlich

Bauklasse	SV	I	II	III	IV	V	VI
Asphaltdicke	30 cm	26 cm	22 cm	18 cm	14 cm	12 cm	10 cm
ToB Dicke	50 cm	54 cm	58 cm	62 cm	66 cm	68 cm	70 cm
frostsich. Oberbau	80 cm	80 cm	80 cm	80 cm	80 cm	80 cm	80 cm
<b>Messung Herbst 2007:</b> E <sub>Asph</sub> = 12.500 MN/m <sup>2</sup> (Rückrechnung V0) E <sub>ToB</sub> = 285 MN/m <sup>2</sup> (vgl. Variante 0) E <sub>0</sub> in Abhängigkeit vom Messpunkt				<b>Messung Frühjahr 2010:</b> E <sub>Asph</sub> = 10.100 MN/m <sup>2</sup> (Rückrechnung V0) E <sub>ToB</sub> = 298 MN/m <sup>2</sup> (vgl. Variante 0) E <sub>0</sub> in Abhängigkeit vom Messpunkt			
<b>Querkontraktion:</b> Last = 50 kN	μ <sub>Asph</sub> = 0,35	μ <sub>ToB</sub> = 0,35	μ <sub>0</sub> = 0,35	Flächenpressung = 0,707 N/mm <sup>2</sup>			
	Lastradius = 15 cm						

Tab. 22: Eingabegrößen für die Mehrschichtenrechnung – Messung Herbst 2007

Variante		E <sub>0</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	w <sub>0</sub> [mm]	Bauklasse w <sub>min</sub> [mm]	Bauklasse w <sub>max</sub> [mm]	Ist- Bauklasse	Soll- Bauklasse
1	Damm	294	0,077	-	0,102	SV	IV
	Einschnitt	244	0,073	-	0,111	SV	
2	Damm	283	0,096	-	0,104	SV	
	Einschnitt	254	0,080	-	0,109	SV	
3	Damm	290	0,091	-	0,104	SV	
	Einschnitt	219	0,102	-	0,117	SV	
4	Damm	262	0,125	0,122	0,139	II	
	Einschnitt	298	0,127	0,101	0,132	II	
5	Damm	170	0,234	0,196	0,236	IV	
	Einschnitt	277	0,157	0,136	0,161	III	

Tab. 23: Ergebnisse der Mehrschichtenrechnungen zur Bestimmung der Ist-Bauklasse – Messung Herbst 2007

Variante		E <sub>0</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	w <sub>0</sub> [mm]	Bauklasse w <sub>min</sub> [mm]	Bauklasse w <sub>max</sub> [mm]	Ist- Bauklasse	Soll- Bauklasse
1	Damm	258	0,102	-	0,116	SV	IV
	Einschnitt	223	0,106	-	0,124	SV	
2	Damm	230	0,135	0,123	0,137	I	
	Einschnitt	217	0,115	-	0,126	SV	
3	Damm	223	0,135	0,124	0,139	I	
	Einschnitt	185	0,144	0,136	0,151	I	
4	Damm	180	0,196	0,173	0,201	III	
	Einschnitt	214	0,173	0,161	0,188	III	
5	Damm	135	0,295	0,268	0,297	V	
	Einschnitt	212	0,190	0,188	0,228	IV	

Tab. 24: Ergebnisse der Mehrschichtenrechnungen zur Bestimmung der Ist-Bauklasse – Messung Frühjahr 2010

der Messung im Frühjahr 2010, die Tragfähigkeiten der Varianten 1 bis 4 noch deutlich übertroffen werden und die Variante 5 die Mindestanforderung erfüllt, bzw. im Falle der Variante 5D nicht mehr erfüllt.

### 6.5.2 Benkelman-Balken-Messungen

In Bild 29 sind die Mittelwerte der mit dem Benkelman-Balken gemessenen Einsenkungen für jede Variante der Erprobungsstrecke dargestellt. Zur besseren Darstellung sind Verbindungslinien zwischen den Mittelwerten dargestellt, eine Interpolation der Werte über die jeweilige Variante ist nicht zulässig. Die Werte wurden nicht auf eine Standardoberbautemperatur von 20 °C korrigiert, da sie bei ähnlichen Temperaturen gemessen worden sind.

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Ziegelanteil die Tragfähigkeit abnimmt. Wie schon bei der Auswertung der FWD-Messungen zu erkennen, ist trotz gleich bleibenden Ziegelanteiles die Variante 5 weniger tragfähig als die Variante 4, woraufhin vermutet werden kann, dass der Anteil an Betonbruch für die Tragfähigkeit maßgebender als der Ziegelanteil ist. Die Varianten 1 bis 5 weisen im Einschnittbereich bessere Tragfähigkeiten auf als im Dammbereich. Bei den Varianten 1D bis 5D ist eine

Abnahme der Tragfähigkeit mit zunehmender Liegedauer zu erkennen.

Für eine quantitative Beurteilung der Tragfähigkeiten wurden die Messergebnisse der Herbstmessung 2008 gemäß dem Arbeitspapier Tragfähigkeit (FGSV, 2005) auf eine Standardoberbautemperatur von 20 °C korrigiert. Anschließend wurden die nach LEYKAUF definierten bauklassenabhängigen Einsenkungsgrenzwerte (Summe aus Mittelwert und Standardabweichung pro Variante), vgl. (FGSV, 2005), zur Beurteilung zugrunde gelegt, vgl. Bild 30.

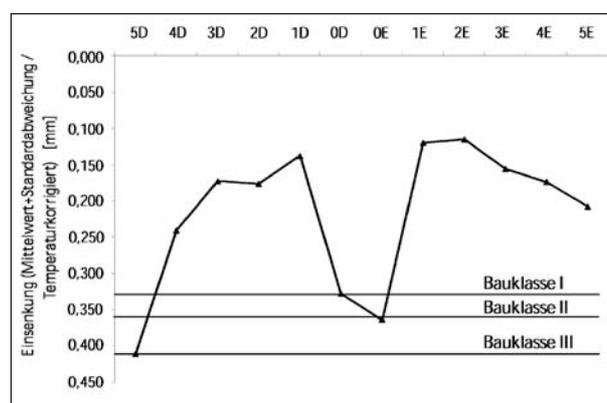


Bild 30: Herbstmessung 2008 – Bauklassengrenzen nach LEYKAUF

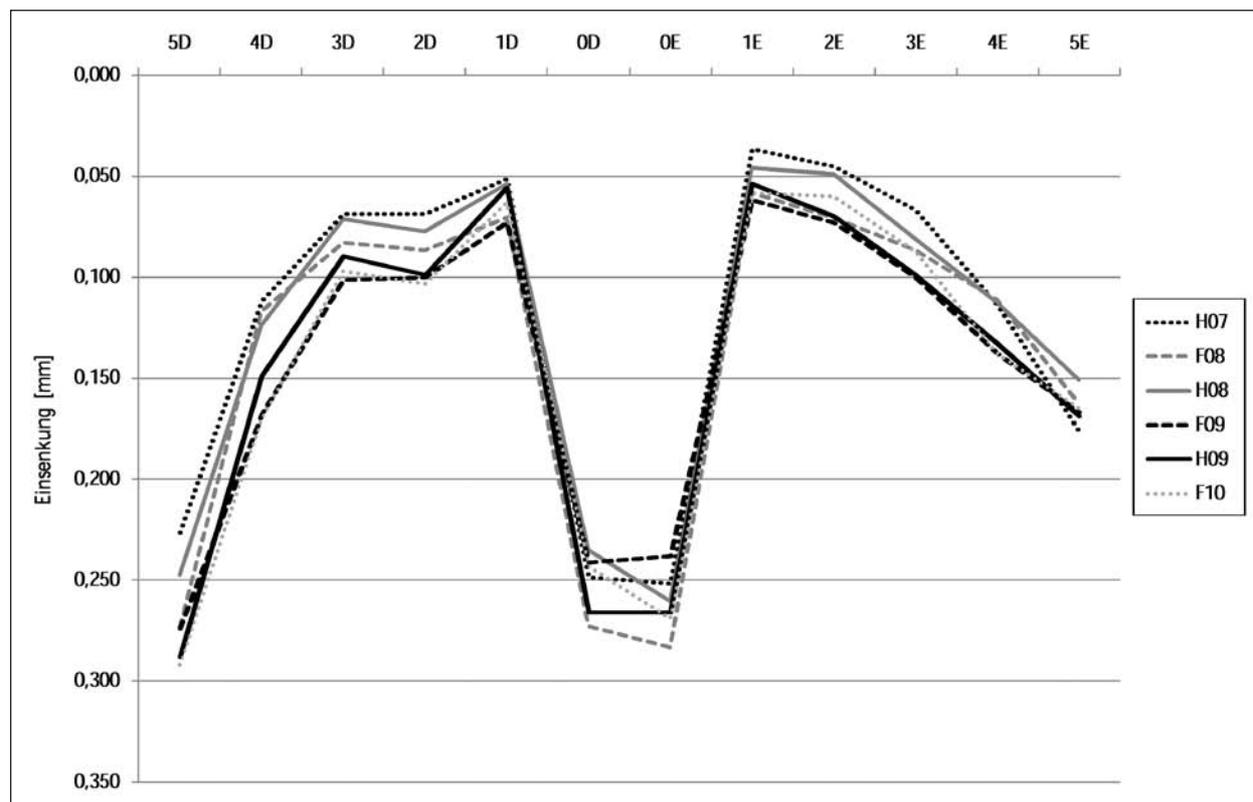


Bild 29: Ergebnisse der Benkelman-Balken-Messungen (Mittelwerte; ohne Temperaturkorrektur)

Die Tragfähigkeit der Variante 5D entspricht der Bauklasse III bis IV. Die Tragfähigkeit der Varianten 4D bis 1D entspricht der Bauklasse I, die Varianten 0D und 0E der Bauklasse II bis III sowie die Varianten 1E bis 5E der Bauklasse I. Die Soll-Bauklasse IV wird in allen Fällen erfüllt.

### 6.5.3 Vergleich Messwerte FWD und Benkelman-Balken

Da die FWD-Messungen und Einsenkungsmessungen mit dem Benkelman-Balken zeitlich und örtlich parallel durchgeführt worden sind, ist ein Vergleich der Messwerte möglich. Rein qualitativ betrachtet bilden beide Messsysteme die Tragfähigkeit des Gesamtsystems ähnlich ab. In den Bildern 31 bis 36 sind die direkten Vergleiche beider Messsysteme dargestellt. Für alle Messtermine ist festzustellen, dass die Übereinstimmung zwischen den Messwerten BB und FWD im Bereich der größeren

Werte besser ist als im Bereich der Abschnitte mit niedrigen Werten, d. h. hoher Tragfähigkeit. Zudem ist festzustellen, dass die Differenzen der Messwerte des BB von Messpunkt zu Messpunkt größer sind als bei den FWD-Werten. Da die Benkelman-Balken-Messungen ohne Krümmungsmesser durchgeführt worden sind, ist ein Vergleich der Einsenkungsmulden nicht möglich.

Die Feststellung korrelativer Zusammenhänge der beiden Messsysteme ist umstritten, da u. a. zwei grundsätzlich verschiedene Belastungssituationen vorliegen. Mit rein informativem Charakter ist in Bild 37 der Zusammenhang der Messwerte beider Messsysteme auf der Erprobungsstrecke dargestellt. Die Problematik der Bestimmung korrelativer Zusammenhänge wird bei der Auswertung einschlägiger Literatur deutlich. So werden beispielsweise je nach Literaturquelle, die mit dem Benkelman-Balken gemessenen Einsenkungen vergrö-

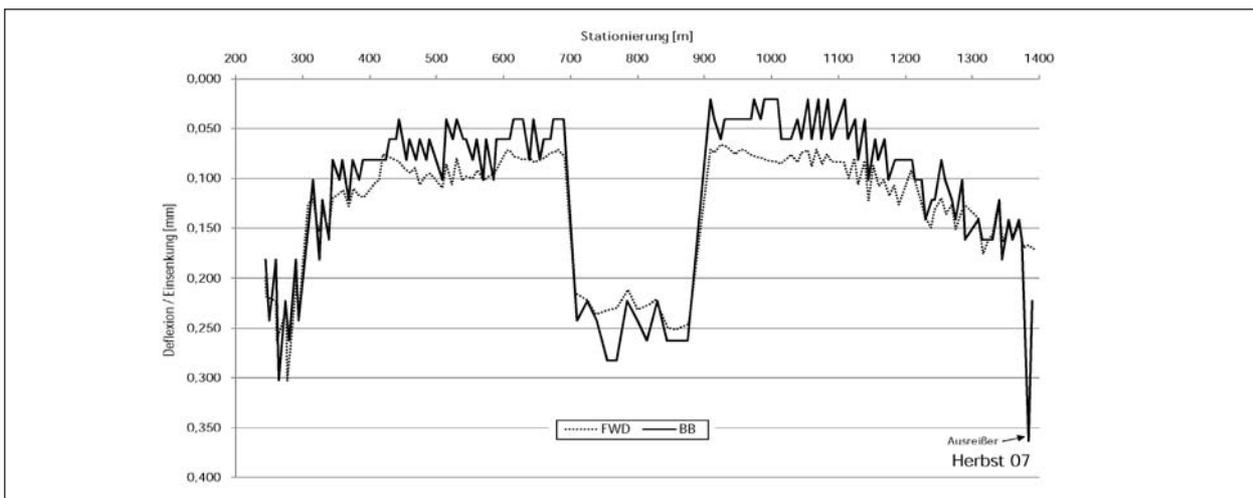


Bild 31: Vergleich der mit dem FWD gemessenen Deflexionen und der BB-Einsenkungen, Erprobungsstrecke Seelow, Herbst 07

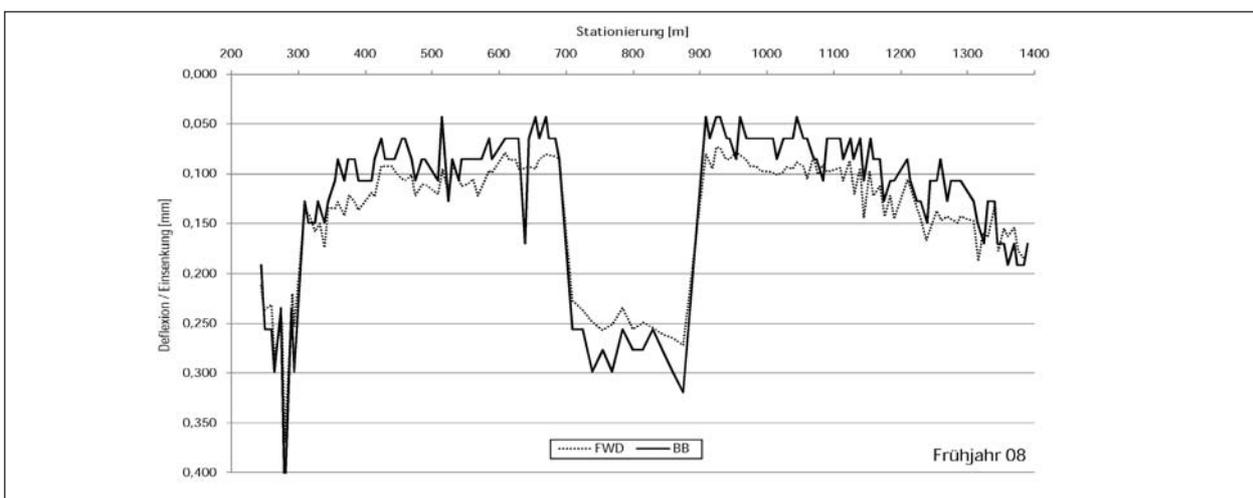
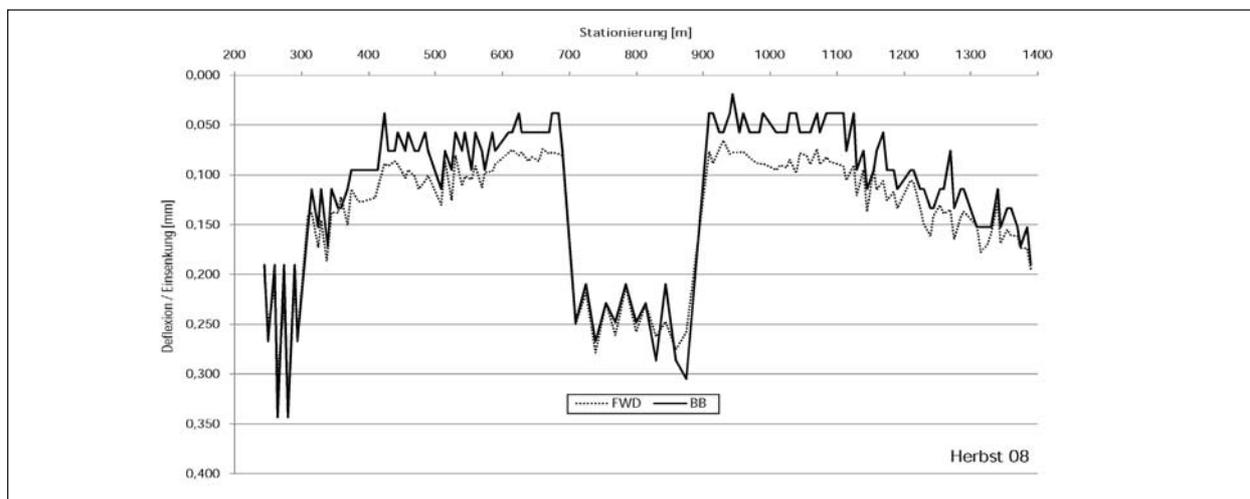
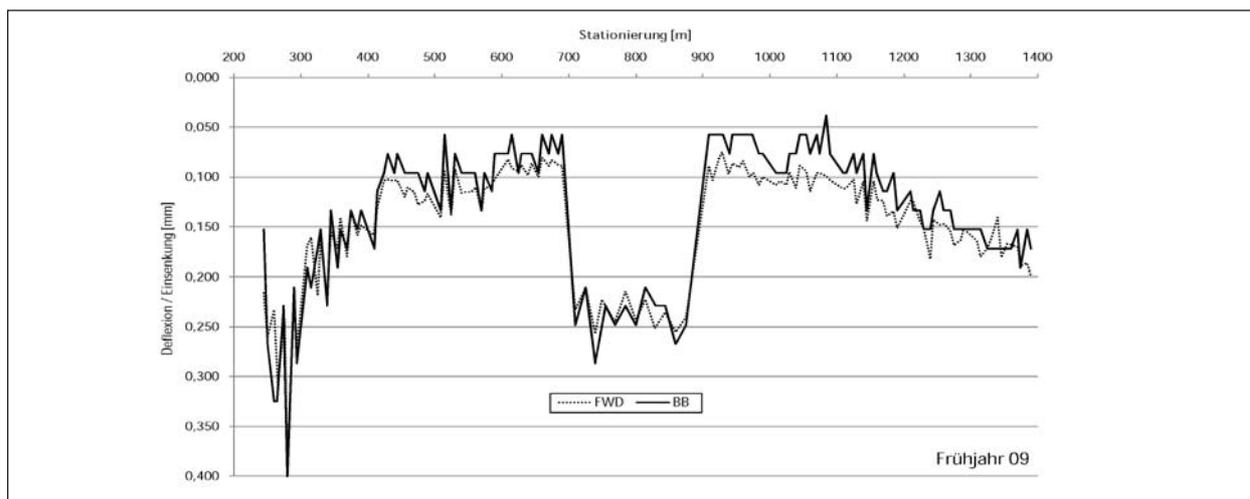


Bild 32: Vergleich der mit dem FWD gemessenen Deflexionen und der BB-Einsenkungen, Erprobungsstrecke Seelow, Frühjahr 08

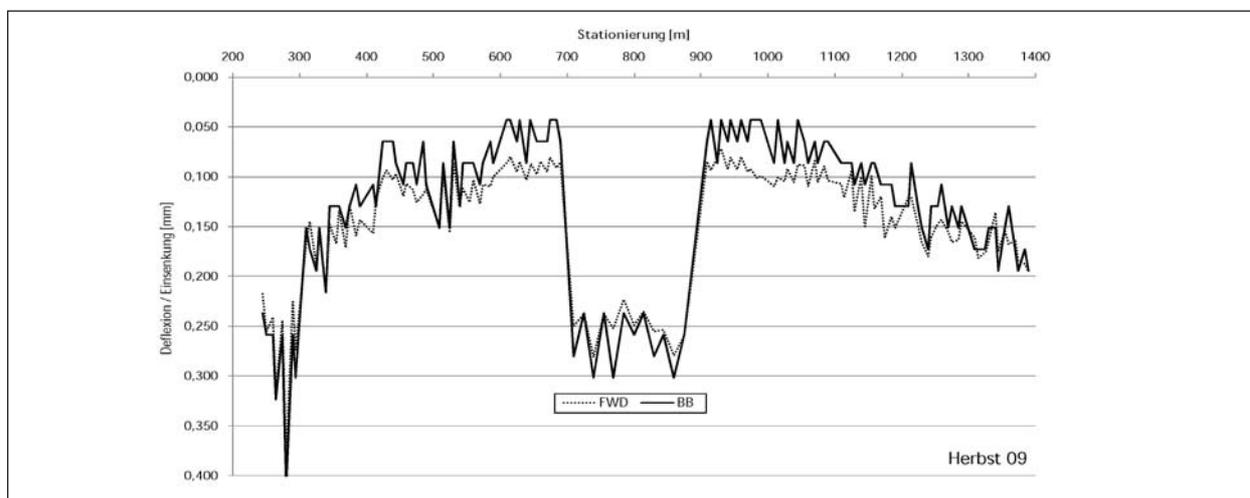
ßert oder verkleinert, um die zugehörige FWD-Deflexionen bei gleich großer Last zu berechnen, vgl. (WSDOT, 2010) (Transport Research, 1997) (Infralab, 2010) (SCHELLENBERGER, 1999).



**Bild 33:** Vergleich der mit dem FWD gemessenen Deflexionen und der BB-Einsenkungen, Erprobungsstrecke Seelow, Herbst 08



**Bild 34:** Vergleich der mit dem FWD gemessenen Deflexionen und der BB-Einsenkungen, Erprobungsstrecke Seelow, Frühjahr 09



**Bild 35:** Vergleich der mit dem FWD gemessenen Deflexionen und der BB-Einsenkungen, Erprobungsstrecke Seelow, Herbst 09

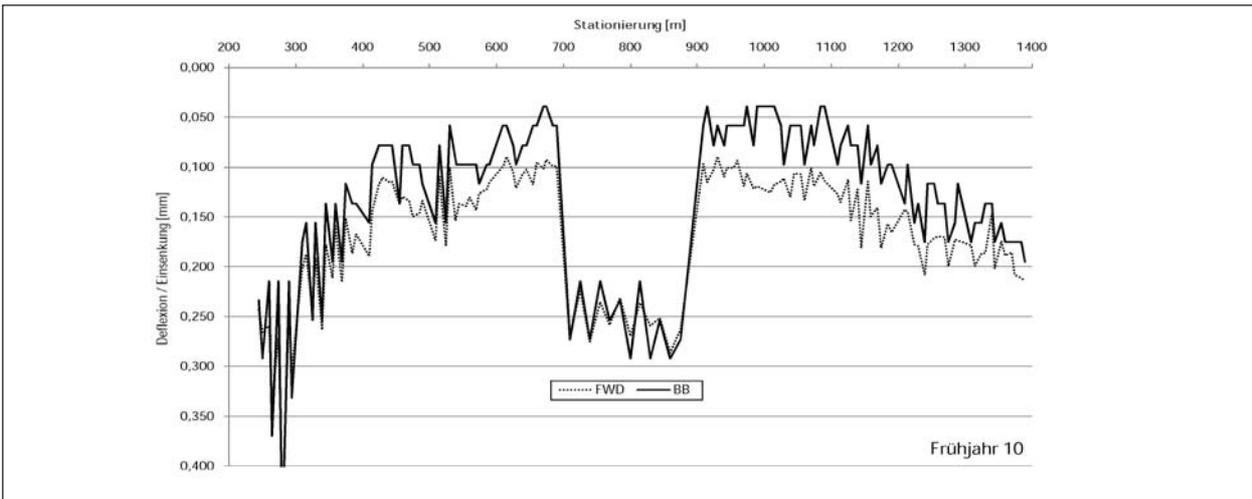


Bild 36: Vergleich der mit dem FWD gemessenen Deflexionen und der BB-Einsenkungen, Erprobungsstrecke Seelow, Frühjahr 10

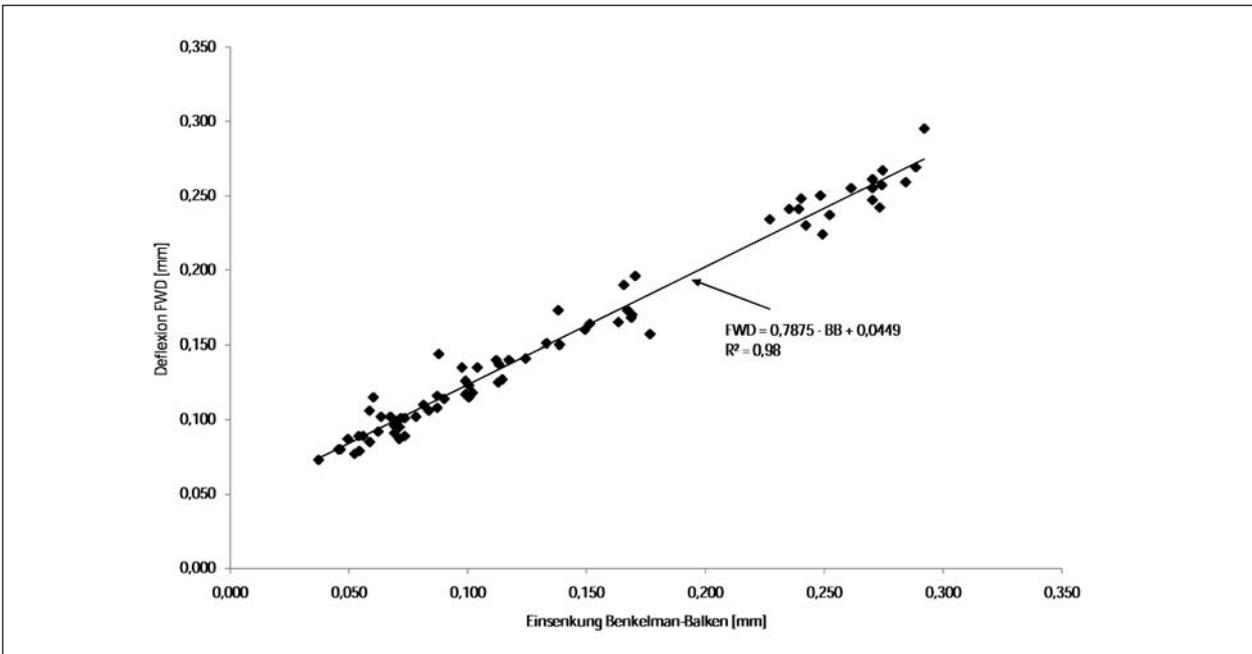


Bild 37: Korrelation von Benkelman-Balken und FWD, Erprobungsstrecke Seelow

### 6.6 Verkehrszählung

Die Verkehrsdaten der an der Erprobungsstrecke installierten Dauerzählstelle Dolgeln wurden für jeden Monat im Beobachtungszeitraum hinsichtlich der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) ausgewertet. Die Auswertung erfolgte richtungsgetreunt für den Gesamtverkehr und den Schwerverkehr (SV), d. h. der Fahrzeuge mit über 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht.

Die Ergebnisse der Verkehrszählung sind in Bild 38 dargestellt. Die für die Dimensionierung relevante Verkehrsstärke des Schwerverkehrs  $DTV^{SV}$  liegt im Mittel bei rund 150 [Fzg/24h] mit einer kurzfristigen

Zunahme von 100 % in den Monaten September 2009 bis Oktober 2009. Insgesamt liegen die Werte unterhalb der Prognose kurz vor Baubeginn von  $DTV^{SV} = 262$  [Fzg/24h] und einer noch jüngeren ursprünglichen Prognose für das Jahr 2012 von  $DTV^{SV} = 720$  [Fzg/24h].

Der Vergleich mit den Daten der Dauerzählstation Carzig, vgl. u. a. (FITSCHEN & KLOßMANN, 2006), circa 10 km südlich im Streckenverlauf der B 167 gelegen, plausibilisiert zum einen die Daten der Zählstelle Dolgeln und lässt aufgrund vergleichbarer SV-Werte vermuten, dass die Erprobungsstrecke als Teil der Ortsumgebung Seelow durch den Schwerverkehr angenommen wird, vgl. Tabelle 25.

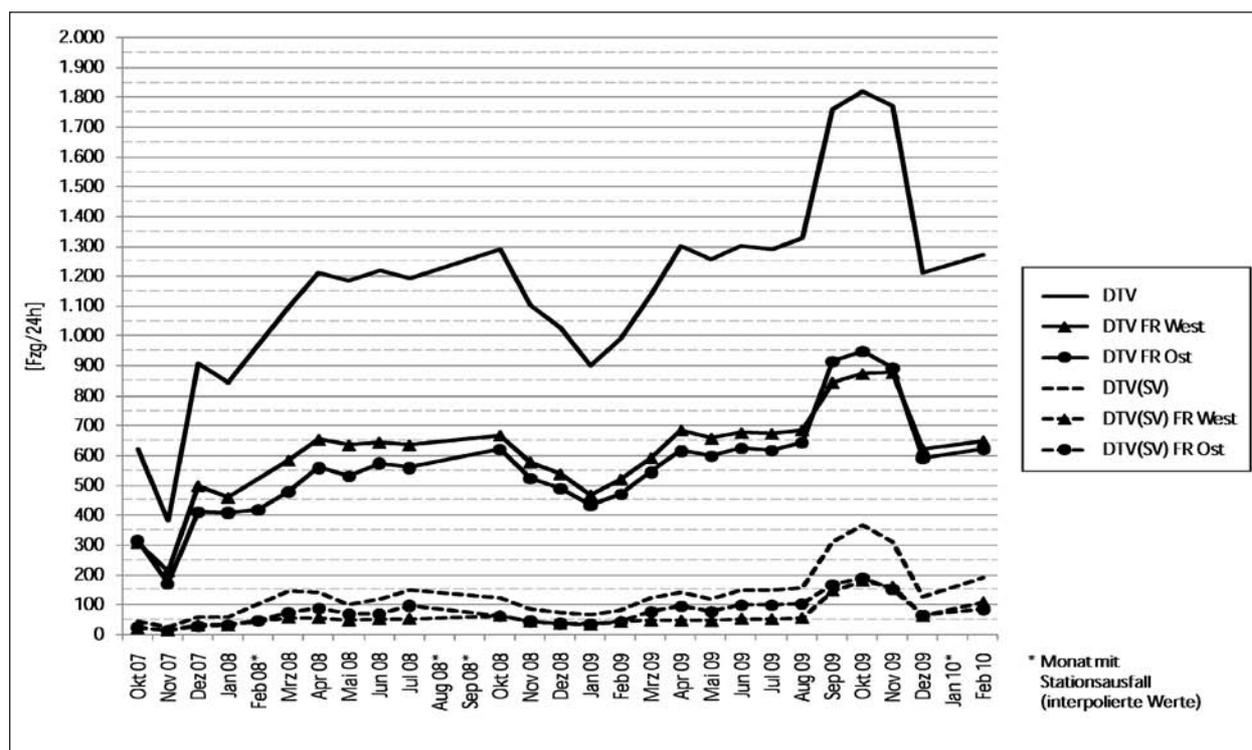


Bild 38: Verkehrsbelastung an der Dauerzählstation Dolgeln

B 167 – Zählstation Carzig (Nr. 3552/3710)			
Jahr	DTV [Fzg/24h]	SV-Anteil [%]	SV [Fzg/24h]
2004	3.919	6,0	235
2005	3.630	5,5	200
2006	3.527	5,9	208
2007	3.275	5,7	187
2008	3.580	5,9	211
Bauklassenberechnung Erprobungsstrecke Seelow			
Bauklasse	DTV <sup>SV</sup> [Fzg/24h]		RSto 01/ Methode 1.2/ N = 30 Jahre/ DTV <sup>SV</sup> für gesam- ten Querschnitt
	von	bis	
III	134	498	
IV	51	133	

Tab. 25: Vergleichswerte der Dauerzählstation Carzig und Bauklassenzuordnung

Die Erprobungsstrecke wurde zum einen aufgrund ihrer ursprünglichen Bestimmung als Interimslösung und zum anderen zur zeitraffenden Belastung eine Bauklasse unterdimensioniert. D. h., die Ausführung erfolgte als Bauklasse IV statt III. Die Bestimmung der Bauklasse anhand der Daten der Zählstelle Dolgeln ergibt bei Betrachtung des Spitzenwertes (368 Fzg/24h) und des Mittelwertes (137 Fzg/24h), trotz der gegenüber den Prognosen niedrigeren Ver-

kehrsbelastung, eine Einordnung in die Bauklasse III, vgl. Tabelle 25. Die gewünschte Überlastung der Erprobungsstrecke stellt sich somit ein.

## 6.7 Visuelle Zustandserfassung

Im Rahmen einer Streckenbegehung am 26. April 2010 wurde eine visuelle Zustandserfassung der Erprobungsstrecke durchgeführt, da nach dem Winter 2009/2010 vermehrt Risse im Asphalt festgestellt worden sind.

Im Bereich der Station 0+280, Variante 5D, Fahrtrichtung Süd, ist zwischen den Rollspuren eine Risshäufung in Kombination mit einer Einsenkung erkennbar, vgl. Bild 39. Aufgrund des Schadensbildes wurde die Ursache in der unzureichenden Tragfähigkeit der ungebundenen Schichten vermutet. Zur Klärung der Schadensursache erfolgte im Sommer 2010 eine Bohrkernentnahme ( $\varnothing$  300 mm) im geschädigten Bereich. Dabei wurde festgestellt, dass im genannten Bereich lediglich 11,8 cm von gefordert 14 cm Asphalt eingebaut worden sind. Aufgrund des fortgeschrittenen Zerfalls konnte keine Unterscheidung zwischen Deck- und Asphalttragschicht getroffen werden. Die Schädigung ist daher auf die Unterschreitung der Sollschichtdicke zurückzuführen.



**Bild 39:** Rissaufnahme April 2010, Variante 5D – Netzrisse im Bereich der Richtungsmarkierung



**Bild 40:** Rissaufnahme April 2010 – Querriss im Asphalt mit Fortsetzung im Bankett

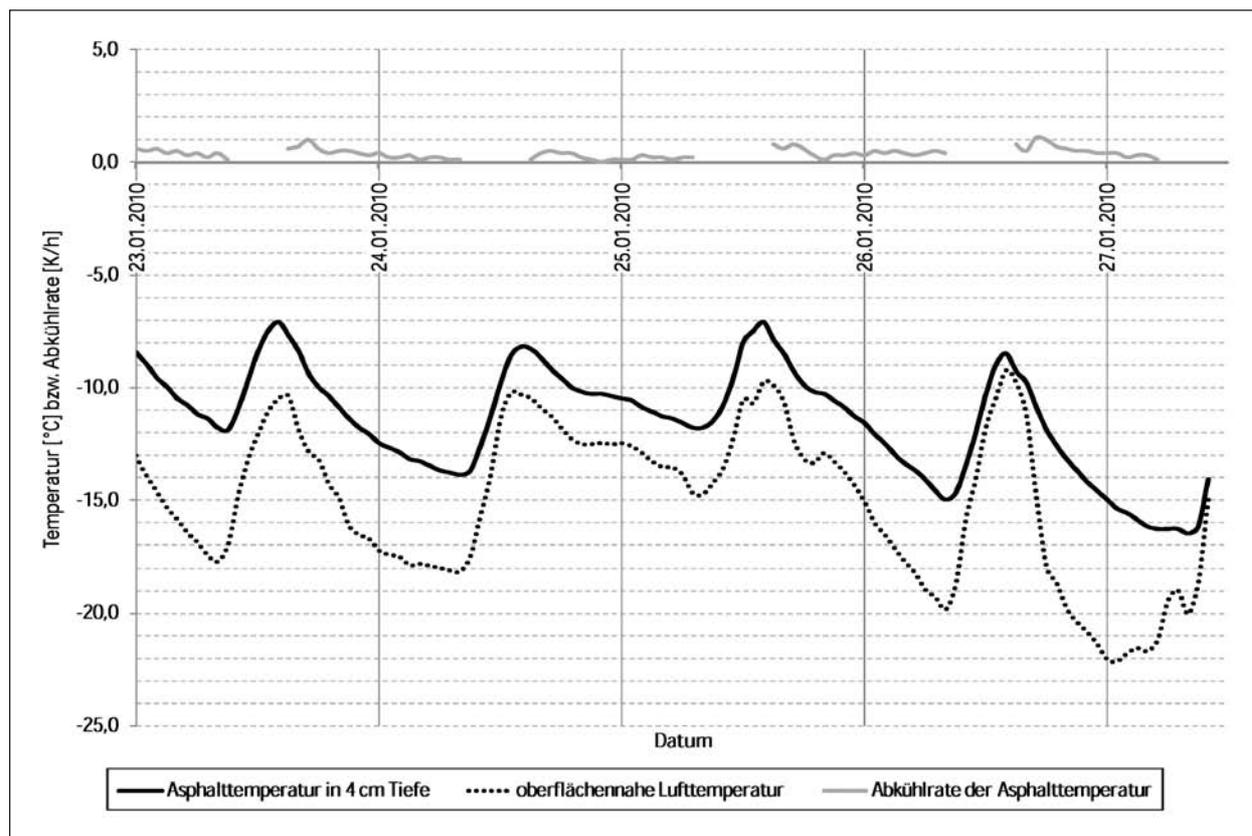
Des Weiteren wurden mehrere Querrisse im Asphalt dokumentiert. Die über die gesamte Fahrbahnbreite durchgehenden Querrisse treten vermehrt in den Varianten 1 und 2 auf, vgl. Tabelle 26. Die Querrisse verlaufen nahezu senkrecht zur Fahrtrichtung und haben Öffnungsweiten zwischen 3 und 8 mm. Zudem setzt sich der Verlauf der Risse in den meisten Fällen deutlich im Bankett fort, vgl. Bild 40. Aufgrund des Schadensbildes wurde zunächst vermutet, dass die Ursache für die Querrisse Dehnungen im Bereich der ToB sind. Zur Klärung der Schadensursache erfolgte an zwei Risspositionen (Variante 1D und 3D) die Entnahme eines Bohrkerns ( $\varnothing$  300 mm), bzw. Ausbaustückes (ca. 0,5 x 1,0 m). Die Schichtdicken der Asphalttschicht entsprachen mit 14,8 cm und 14,0 cm den Sollschichtdicken. Die im Entnahmestück bzw. an der verbleibenden Wandung zu erkennenden Rissverläufe verlaufen, nach Deutung der Öffnungsweiten, von der Deck- in die Asphalttragschicht. Der Rissverlauf setzt sich, trotz leichter Verfestigungen der Schottertragschicht und Frostschutzschicht, nicht in den ungebundenen Schichten fort.

Zur weiteren Beurteilung wurden der Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie der Nadelpenetrationwert am aus den Entnahmestücken extrahier-

Station	Variante	Kommentar
0+258	5D	Querriss Fahrstreifen FR Nord, Verlängerung der Induktionsschleife in FR Süd (Querschnittschwächung, vermutl. thermisch induzierter Asphalttriss)
0+406	3D	Querriss Fahrstreifen FR Süd
0+547	2D	Querriss durchgehend
0+630	1D	Querriss durchgehend
0+687	1D	Querriss durchgehend
0+925	1E	Querriss durchgehend
0+948	1E	Querriss durchgehend
0+997	1E	Querriss durchgehend
1+027	2E	Querriss Fahrstreifen FR Süd
1+056	2E	Querriss durchgehend
1+096	2E	Querriss durchgehend

**Tab. 26:** Ergebnis der Rissaufnahme 26. April 2010

ten Bindemittel bestimmt. Beide Werte lassen im Vergleich zu den Sollwerten des Neubitumens und den Ergebnissen der Kontrollprüfung (EP RuK rd. +17 %/Pen. rd. -60 %) erkennen, dass eine deutli-



**Bild 41:** Station 0+433, 23.01.2010-27.01.2010 – Beispiel für Asphalttemperaturverlauf und Abkühlraten bei negativen Extremtemperaturen

che Alterung des Bindemittels eingetreten ist. In Verbindung mit den tiefen Temperaturen in der Asphaltsschicht im Januar 2010 kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Querrissen um Kälterisse aufgrund des mangelnden Relaxationsvermögens bei tiefen Temperaturen des Asphaltes handelt. Hier sind insbesondere die kurzfristig eingetretenen Asphalttemperaturen von bis zu rund  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  im Winter 2009/2010 zu nennen. Begünstigt wird dies durch Temperaturdifferenzen innerhalb eines Tages im Asphalt von annähernd 10 K, vgl. Bild 41.

## 6.8 Frosthebungsversuche

Durch die BAST wurden im Rahmen des Projektes neben der wissenschaftlichen Begleitung und Beratung ergänzende Laboruntersuchungen durchgeführt. Dazu gehörte die Durchführung des Frosthebungsversuches (FHV) mit dem Frosthebungsgerät nach TP BF-StB (Entwurf). Für eine vollständige Beurteilung wurden die stoffliche Zusammensetzung, die Korngrößenverteilung vor und nach dem Frosthebungsversuch, die Wassergehalte der Proben und die CBR-Werte nach der Befrostung be-

stimmt. Für die Versuche wurden von allen Varianten der Frost- und Schottertragschicht auf der Baustelle Proben entnommen und der BAST zugesendet.

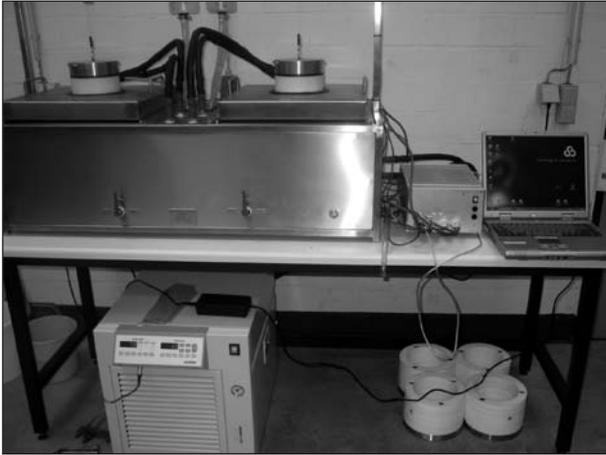
### 6.8.1 Versuchsdurchführung

Der Zweck des Frosthebungsversuches besteht darin, die Frostempfindlichkeit von Böden und Bodenverbesserungen sowie von Gemischen aus Recyclingbaustoffen und industriellen Nebenprodukten für Schichten ohne Bindemittel zu ermitteln.

Ausgangspunkt der durchgeführten Frosthebungsversuche ist die nachfolgend beschriebene Arbeitsanweisung (HILLMANN, BRANG, HAGEMANN, & STÜBBE, 2006) auf der Grundlage des Entwurfs der „Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau“, Teil „Frosthebungsversuch“ (FGSV, 2004).

Beim Frosthebungsversuch, vgl. Bild 42 und Bild 43, wird ein Prüfkörper von der Oberseite beaufrostet, während die Prüfkörperunterseite im Wasserbad gelagert ist und ungefroren bleibt. Der maximale Korndurchmesser des im Frosthebungsversuch ge-

prüfen Materials beträgt 22,4 mm. Die Proben der Schottertragschicht sind entsprechend abgesiebt und werden mit dem optimalen Wassergehalt mit einfacher Proctordichte in Anlehnung an DIN 18127 (DIN, 1997) eingebaut. Die Prüfzylinder, vgl.

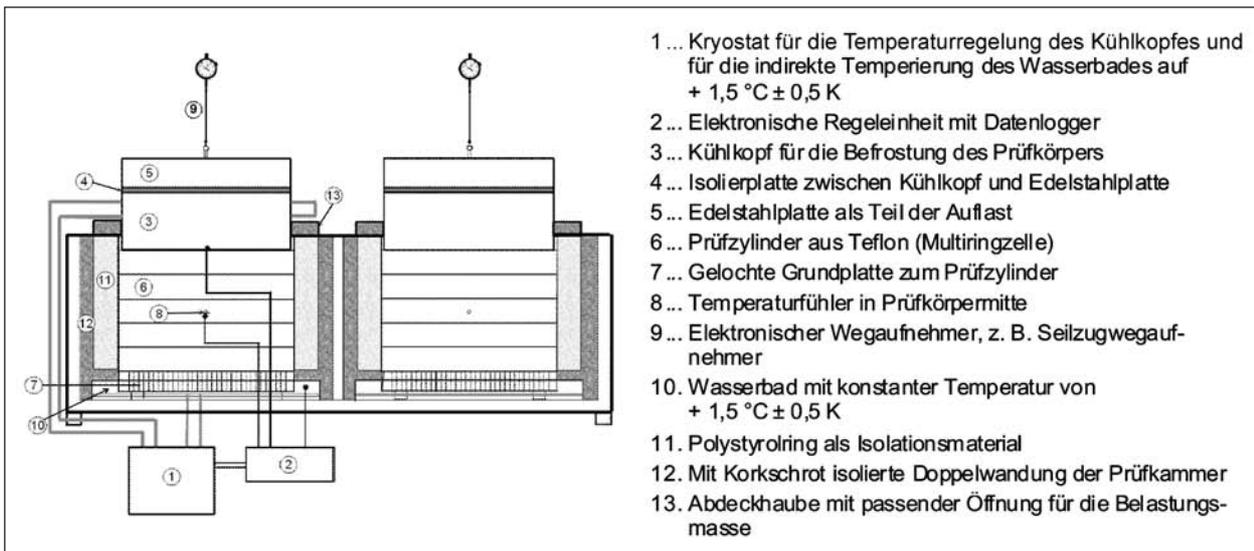


**Bild 42:** FHV Versuchseinrichtung mit Klimakammer für zwei Prüfzylinder

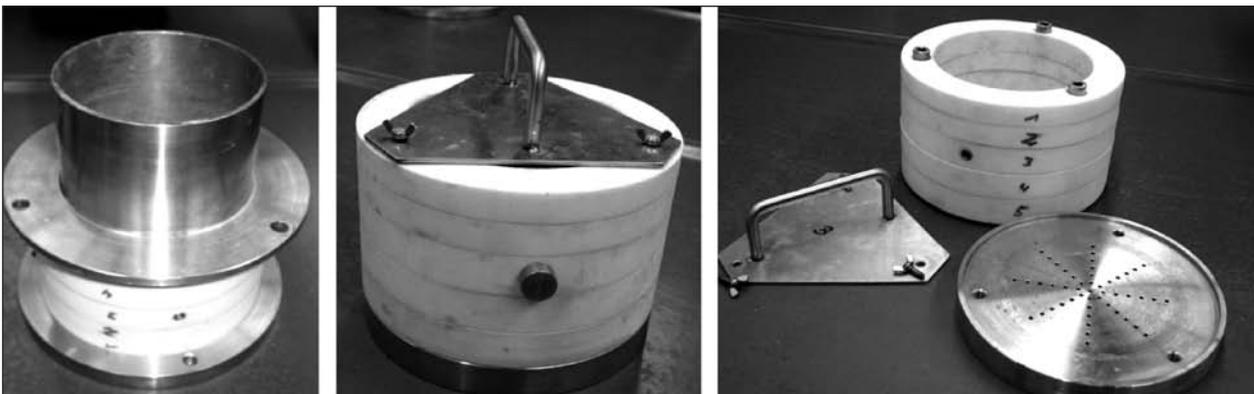
Bild 44, haben eine Höhe von  $h = 125 \text{ mm}$  und einen Innendurchmesser von  $d_i = 150 \text{ mm}$ .

Der Frosthebungsversuch wird mit einer Auflast von  $0,5 \text{ N/cm}^2$  durchgeführt und simuliert die Belastung durch eine ca. 20 cm dicke Tragschicht oder Betondecke. Diese Auflast wird durch die Gesamtmasse von 9 kg von Edelstahlzylinder, Isolierplatte und Kühlkopf gebildet. Dadurch wird die Frosthebung verringert und eine Konsolidierung des Probenmaterials während der Tauphase bewirkt.

Der Frosthebungsversuch wird bei konstanter Umlufttemperatur und Wasserbadtemperatur von  $+1,5 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$  durchgeführt. Die eingebauten Prüfkörper werden vor der Befrostung 24 Stunden lang bei dieser Temperatur temperiert (Temperierungsphase). In dieser Zeit können Quellvorgänge stattfinden. Die Hebungen, die dadurch verursacht werden können, müssen nach dem Frosthebungsversuch von den hervorgerufenen Hebungen wieder abgezogen werden.



**Bild 43:** FHV-Systemskizze



**Bild 44:** Prüfzylinder und Geräte zum Einbau und Transport des Prüfgutes

Die Befrostung erfolgt von der Oberseite, sodass in einer Tiefe von ca. 57,5 mm (Prüfkörpermitte) die Temperatur innerhalb von 4 Tagen annähernd linear von +1,5 °C auf 0 °C abgesenkt (Absenkphase) und anschließend die 0-°C-Isotherme in dieser Tiefe für weitere 3 Tage konstant gehalten wird (Befrostungsphase). Während der Absenk- und Befrostungsphase findet das Einsetzen der Eislin-senbildung statt. Die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit ist der Anstieg der Frosthebungskurve zwischen dem 7. und dem 8. Versuchstag.

Nach der Befrostung erfolgt der Auftauprozess mit einer Kühlkopftemperatur von +10 °C ±0,5 K über einen Zeitraum von 24 Stunden (Tauphase).

Ein Frosthebungsversuch dauert insgesamt 9 Tage zuzüglich der Zeit für Probenvorbereitung, Ein- und Ausbau und die durchzuführenden Nachuntersuchungen.

Um einen möglichen Tragfähigkeitsverlust durch Frosthebung zu ermitteln, wird im Anschluss an den Frosthebungsversuch der CBR-Wert ( $CBR_{FH}$ ) analog zu den TP BF-StB Teil B 7.1 bestimmt und die Differenz zum CBR-Wert ( $CBR_0$ ) der unbefrostenen Probe berechnet. Die Abnahme des CBR-Wertes durch die Befrostung ( $\Delta CBR$ ) wird durch Gleichung (2) bestimmt:

$$\Delta CBR = CBR_0 - CBR_{FH} \quad (2)$$

Untersuchungen haben ergeben (WEINGART & WIELAND, 2005), dass es im Probekörper durch die Verdichtung zu einer lokalen Zunahme oder Minderung des Wassergehaltes kommen kann.

Nach der Befrostungsphase dauert es ca. 8 Stunden bis die Probe aufgetaut ist. Nach der Tauphase (d. h. 24 Stunden nach dem Ende der Befrostung) wurden die Wassergehalte an der Probenoberseite, der Probenunterseite und in Probenmitte ermittelt.

### 6.8.2 Probenbezeichnung

Die untersuchten Proben (gemäß den Einbauvarianten in Kapitel 4.2.2) der Frostschutzschicht (FSS) und der Schottertragschicht (STS) wurden wie folgt mit V\* gekennzeichnet:

- Variante 0  $V0^*_{FSS}, V0^*_{STS}$ ,
- Variante 1  $V1^*_{FSS}, V1^*_{STS}$ ,
- Variante 2  $V2^*_{FSS}, V2^*_{STS}$ ,
- Variante 3  $V3^*_{FSS}, V3^*_{STS}$ ,
- Variante 4  $V4^*_{FSS}, V4^*_{STS}$ ,
- Variante 5  $V5^*_{FSS}, V5^*_{STS}$ .

### 6.8.3 Stoffliche Zusammensetzung

Die Prüfung der stofflichen Zusammensetzung im Rahmen der Eignungsprüfung (vgl. Kapitel 4.2.3) und der Kontrollprüfungen (vgl. Kapitel 4.2.4) erfolgte in Anlehnung an die „Brandenburgische Technische Richtlinie für die Verwertung von Recycling-Baustoffen im Straßenbau“ (BTR RC-StB). In der BAST wurde das angelieferte Material nach dem Merkblatt RC über die „Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als RC-Baustoffe im Straßenbau“ untersucht. Im Merkblatt RC werden im

Stoffgruppe	Variante 1 V1*		Variante 2 V2*		Variante 3 V3*		Variante 4 V4*		Variante 5 V5*	
	FSS M.-%	STS M.-%								
Klinker, dichte Ziegel, Steinzeug	8,9	9,0	17,4	15,6	18,8	23,6	32,1	30,5	31,5	32,3
Sollwert	10 ±1		20 ±2		30 ±2		40 ±2		40 ±2	
weichgebrannte Ziegel	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,6	0,0	0,2
mineralische Leichtbaustoffe	0,1	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Beton	66,1	76,9	60,8	67,3	60,4	61,8	55,5	54,3	35,0	31,3
Kies	4,2	1,2	3,0	1,4	1,7	1,3	1,1	1,4	16,2	14,8
Festgestein	12,0	3,6	11,2	6,5	9,6	7,2	7,5	8,5	15,7	20,1
Asphalt	8,1	8,9	6,8	8,2	9,3	5,7	3,1	4,1	1,0	0,9
Fremdstoffe, wie Holz, Kunststoffe	0,3	0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	0,5	0,2	0,1
Schlacke	0,2	0,3	0,6	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	0,3	0,3

Tab. 27: Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung der FSS und STS (nach dem Merkblatt RC)

Vergleich mit der BTR RC-StB die Angaben der stofflichen Einteilungen differenzierter betrachtet und zum Teil auch unterschiedliche Begriffe verwendet, vgl. Kapitel 4.2.6. Die Stoffbestimmungen der BAST unterteilt nach Frostschutz- und Schottertragschicht sind in der Tabelle 27 zusammengefasst.

Die stoffliche Zusammensetzung dieser Proben entsprach, wahrscheinlich aufgrund der Probenahme, nicht vollständig den geplanten Anforderungen der Erprobungsstrecke. Insbesondere die Ziegelanteile weichen deutlich von den Vorgaben für die verschiedenen Varianten ab.

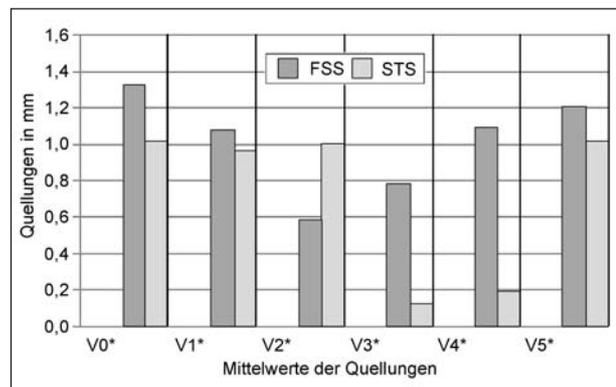
**6.8.4 Ergebnisse der Frosthebungsversuche**

Die Frosthebungsversuche wurden entsprechend der Arbeitsanweisung mit je zwei Proben pro Material durchgeführt. Die Baustoffgemische der Schottertragschicht wurden für den Frosthebungsversuch auf ein Größtkorn von 22,4 mm abgeseibt. Nach (STRASSER, HENÖGL, PREMSTALLER, & WALDHANS, 2001) ist eine Eliminierung der groben Kornfraktion ohne Einfluss auf die Frosthebung möglich. Zur Auswertung der Proben wurden die Diagramme und Auswerteprotokolle der Frosthebungsversuche hinzugezogen. Bild 45 zeigt den Verlauf eines Frosthebungsversuchs am Beispiel der Variante V3\*<sub>FSS</sub>, Probe 1. Die Auswerteprotoko-

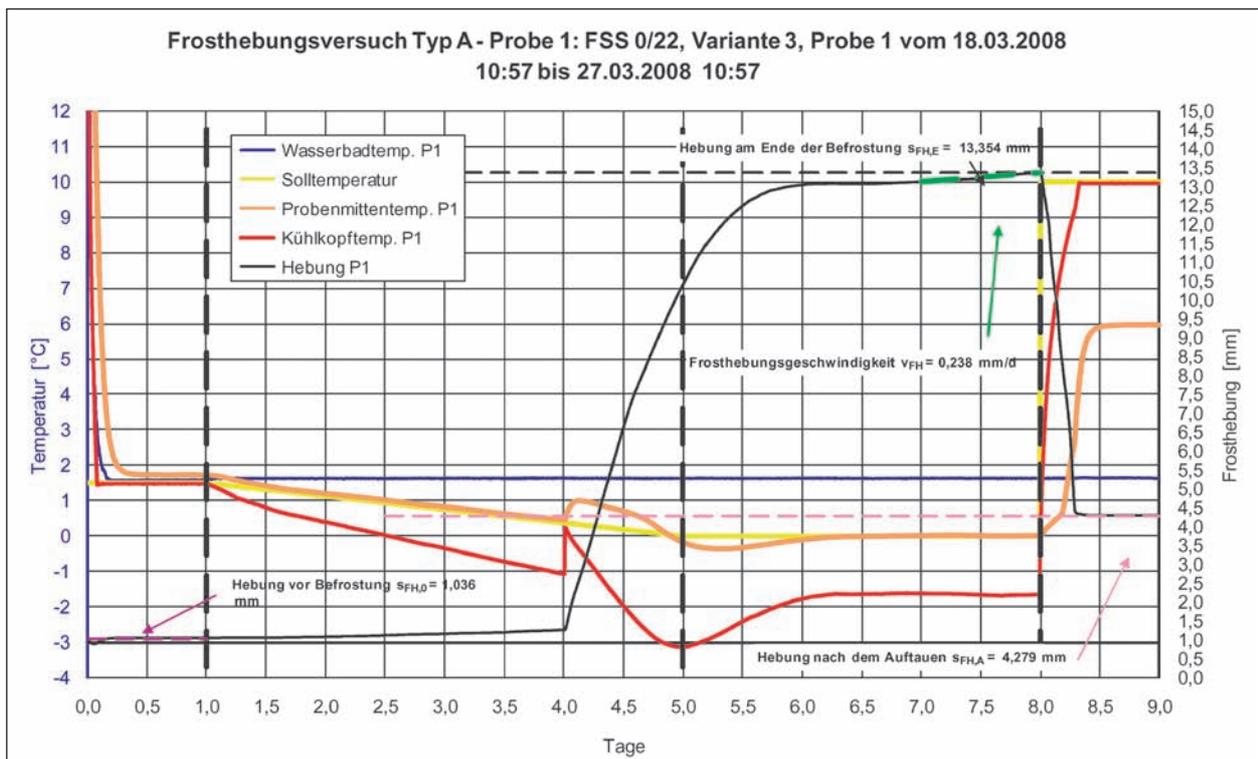
olle zum Frosthebungsversuch sind in den Tabellen 29 und 30 zusammengefasst.

Nach dem Einbau wurden die Proben 24 Stunden im Wasserbad temperiert und konnten so den Unterschied im Einbauwassergehalt ausgleichen. Die hervorgerufenen Quellungen der Frostschutz- und der Schottertragschicht sind in Bild 46 als Mittelwerte in mm dargestellt.

Bis auf V2\*<sub>FSS</sub> haben die Materialien der Frostschutzschicht in der Temperierungsphase mehr Wasser nachgezogen als die Varianten der Schottertragschicht. Die Mittelwerte der Quellungen der Frostschutzschicht liegen zwischen 0,58 und 1,32 mm. Die Varianten der Schottertrag-



**Bild 46:** Mittelwerte der Quellungen in der FSS und STS während der Temperierungsphase



**Bild 45:** Diagramm des Frosthebungsversuches Variante V3\*<sub>FSS</sub>, Probe 1

schicht V3\*<sub>STS</sub> und V4\*<sub>STS</sub> haben die geringsten Quellungen von 0,12 und 0,19 mm. Im Mittel zeigen die übrigen Varianten Quellungen von ca. 1 mm.

	Variante 0		Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4		Variante 5	
	Pr1	Pr2										
FSS	3,9	4,5	3,7	3,7	3,2	4,0	3,0	3,8	3,7	3,8	2,7	3,6
STS	2,7	2,8	3,3	3,6	2,5	2,8	2,7	2,6	3,5	3,8	3,0	4,0

Tab. 28: Einsetzen der Eislinnenbildung in Tagen nach Frostbeginn

Kenngrößen zum Frosthebungsversuch	Kennzeichen	Einheit	FSS V0Pr.1	FSS V0Pr.2	FSS V1Pr.1	FSS V1Pr.2	FSS V2Pr.1	FSS V2Pr.2	FSS V3Pr.1	FSS V3Pr.2	FSS V4Pr.1	FSS V4Pr.2	FSS V5Pr.1	FSS V5Pr.2
Probendurchmesser	d <sub>i</sub>	mm	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Probenhöhe	h	mm	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Einbauwassergehalt	w <sub>E</sub>	M.-%	5,7	5,5	12,1	11,3	14,2	13,5	10,8	10,8	14,70	14,70	10,6	10,7
Feuchtdichte nach dem Einbau	ρ <sub>E</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2,275	2,278	2,112	2,085	2,026	2,044	2,035	2,035	2,061	2,017	2,049	2,089
Trockendichte nach dem Einbau	ρ <sub>dE</sub>	g/cm <sup>3</sup>	2,152	2,159	1,884	1,873	1,774	1,801	1,837	1,837	1,797	1,759	1,853	1,887
Nulleinstellung der Wegaufnehmer	s <sub>0</sub>	mm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Hebung vor Befrostung	s <sub>FH,0</sub>	mm	1,384	1,259	1,126	1,005	0,657	0,506	1,036	0,523	1,285	0,884	1,400	1,003
Hebung vor dem letzten Befrostungstag	s <sub>FH,7</sub>	mm	3,729	3,058	11,149	9,390	12,857	12,263	13,116	10,676	10,396	9,088	4,866	3,355
Hebung am Ende der Befrostung	s <sub>FH,E</sub>	mm	3,841	3,121	11,189	9,437	12,894	11,884	13,354	10,724	10,528	9,128	5,120	3,608
Hebung nach dem Auftauen	s <sub>FH,A</sub>	mm	1,853	1,523	3,805	3,407	3,531	3,402	4,279	3,256	3,783	3,155	2,447	1,808
Quellung in der Temperierungsphase	Δs <sub>0</sub>	mm	1,384	1,259	1,126	1,005	0,657	0,506	1,036	0,523	1,285	0,884	1,400	1,003
Maximale Frosthebung	Δs <sub>FH,max</sub>	mm	2,457	1,862	10,063	8,432	12,237	11,378	12,318	10,201	9,243	8,244	3,720	2,605
Verbleibende Resthebung	Δs <sub>FH,R</sub>	mm	0,469	0,264	2,679	2,402	2,874	2,896	3,243	2,733	2,498	2,271	1,047	0,805
Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit	v <sub>FH</sub>	mm/d	0,112	0,063	0,040	0,047	0,037	-0,379	0,238	0,048	0,132	0,040	0,254	0,253
Quellung in der Temperierungsphase	Δs <sub>0</sub>	%	11,072	10,072	9,008	8,040	5,256	4,048	8,288	4,184	10,280	7,072	11,200	8,024
Maximale Frosthebung	Δs <sub>FH,max</sub>	%	19,656	14,896	80,504	67,456	97,896	91,024	98,544	81,608	73,944	65,952	29,760	20,840
Verbleibende Resthebung	Δs <sub>FH,R</sub>	%	3,752	2,112	21,432	19,216	22,992	23,168	25,944	21,864	19,984	18,168	8,376	6,440
Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit	v <sub>FH</sub>	%/d	0,896	0,504	0,320	0,376	0,296	-3,032	1,904	0,384	1,056	0,320	2,032	2,024

Kenngrößen zum Frosthebungsversuch	Kennzeichen	Einheit	FSS V0Pr.1	FSS V0Pr.2	FSS V1Pr.1	FSS V1Pr.2	FSS V2Pr.1	FSS V2Pr.2	FSS V3Pr.1	FSS V3Pr.2	FSS V4Pr.1	FSS V4Pr.2	FSS V5Pr.1	FSS V5Pr.2
<b>CBR-Versuch nach Frostbeanspruchung</b>														
CBR-Wert nach dem Auftauen	CBR <sub>FH</sub>	%	113,7	97,8	54,4	74,7	31,0	34,1	38,9	41,3	45,4	46,4	102,3	128,4
CBR-Wert nach dem Auftauen ohne Nullpunktkorrektur	CBR <sub>FH,ohneN</sub>	%	96,4	97,8	43,7	65,5	22,8	28,7	38,9	35,4	45,4	46,4	95,2	124,7
Wassergehalt unter dem Stempel	w <sub>A,0</sub>	M.-%	7,1	6,9	13,9	12,1	16,9	16,1	14,4	15,4	15,6	16,6	11,3	13,2
Wassergehalt in Probenmitte	w <sub>A,m</sub>	M.-%	7,1	6,8	13,9	14,0	15,8	16,4	14,8	14,5	15,9	15,6	11,7	12,0
Wassergehalt an der Probenunterseite	w <sub>A,u</sub>	M.-%	7,2	7,4	13,6	14,2	15,9	16,7	15,4	15,9	15,3	15,2	13,0	14,4
CBR-Wert der unbefrostenen Probe <sup>1)</sup>	CBR <sub>0</sub>	%	-	-	59,0	59,0	55,0	55,0	52,0	52,0	48,0	48,0	127,0	127,0
Abnahme des CBR-Wertes durch Befrostung	ΔCBR	%	-	-	4,6	-15,7	24,0	20,9	13,1	10,7	2,6	1,6	24,7	-1,4
	ΔCBR <sub>ohneN</sub>	%	-	-	15,3	-6,5	32,2	26,3	13,1	16,6	2,6	1,6	31,8	2,3

Kenngrößen zum Frosthebungsversuch	Einheit	FSS V0Pr.1	FSS V0Pr.2	FSS V1Pr.1	FSS V1Pr.2	FSS V2Pr.1	FSS V2Pr.2	FSS V3Pr.1	FSS V3Pr.2	FSS V4Pr.1	FSS V4Pr.2	FSS V5Pr.1	FSS V5Pr.2
Einbau für den FHV													
zusätzliche Schläge/2. Lage		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
zusätzliche Schläge/3. Lage		-	-	12	12	-	-	-	-	-	-	12	12
Ausgleichssand	g	49,4	42,7	-	-	90,3	93,2	31	79	-	-	70	50
Korngrößerverteilung			5,4		5,9		7,6		8,2		8,3		2,8
Durchgang < 0,063 mm	M.-%	5,3	5,4	7,9	7,5	9,6	10,8	10,6	9,8	10,4	7,8	3,5	2,9
CBR Versuch	%	96,4	97,8	43,7	65,5	22,8	28,7	38,9	35,4	45,4	46,4	95,2	124,7
Einsetzen der Eislinnenbildung nach Versuchsbeginn	Tag	4,9	5,5	4,7	4,7	4,2	5	4	4,8	4,7	4,8	3,7	4,6
Hebungsverlauf vom 7.-8. Tag	Tag	Eisenkung 6,5.-7,5.T.	Eisenkung 7,5.T.	ab dem 6.T. gleichbleibend	ab dem 6.T. gleichbleibend	ab dem 6.T. gleichbleibend	6,7.T. Neg. Steigung	ab dem 6.T. geringe Steigung	ab dem 6.T. gleichbleibend	ab dem 6.T. geringe Steigung	ab dem 6.T. gleichbleibend	leicht ansteigend	leicht ansteigend

Tab. 29: Ergebnisse der Frosthebungsversuche am Frostschutzschichtmaterial

Kenngrößen zum Frosthebungsversuch			Kennzeichen	Einheit	FSS V0Pr.1	FSS V0Pr.2	FSS V1Pr.1	FSS V1Pr.2	FSS V2Pr.1	FSS V2Pr.2	FSS V3Pr.1	FSS V3Pr.2	FSS V4Pr.1	FSS V4Pr.2	FSS V5Pr.1	FSS V5Pr.2
Probendurchmesser	$d_i$	mm	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Probenhöhe	h	mm	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Einbauwassergehalt	$w_E$	M.-%	7,0	7,2	13,7	13,8	10,5	12,9	12,9	13,0	16,30	16,40	8,4	8,4		
Feuchtdichte nach dem Einbau	$\rho_E$	g/cm <sup>3</sup>	2,214	2,279	2,112	2,042	1,971	1,958	2,008	1,946	2,016	2,017	2,129	2,129		
Trockendichte nach dem Einbau	$\rho_{dE}$	g/cm <sup>3</sup>	2,069	2,126	1,858	1,794	1,784	1,734	1,779	1,722	1,733	1,733	1,964	1,964		
Nulleinstellung der Wegaufnehmer	$s_0$	mm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Hebung vor Befrostung	$s_{FH,0}$	mm	1,239	0,789	1,085	0,827	1,249	0,737	0,160	0,081	0,149	0,231	1,239	0,785		
Hebung vor dem letzten Befrostungstag	$s_{FH,7}$	mm	4,657	7,075	5,472	4,953	6,935	6,765	6,849	7,880	6,110	6,013	4,868	3,426		
Hebung am Ende der Befrostung	$s_{FH,E}$	mm	5,020	7,386	5,748	5,244	7,188	7,066	6,993	8,271	6,553	6,262	5,120	3,622		
Hebung nach dem Auftauen	$s_{FH,A}$	mm	1,733	1,854	1,955	1,748	3,065	2,475	2,229	2,122	2,055	2,044	1,949	1,261		
Quellung in der Temperierungsphase	$\Delta s_0$	mm	1,239	0,789	1,085	0,827	1,249	0,737	0,160	0,081	0,149	0,231	1,239	0,785		
Maximale Frosthebung	$\Delta s_{FH,max}$	mm	3,781	6,597	4,663	4,417	5,939	6,329	6,833	8,190	6,404	6,031	3,881	2,837		
Verbleibende Resthebung	$\Delta s_{FH,R}$	mm	0,494	1,065	0,870	0,921	1,816	1,738	2,069	2,041	1,906	1,813	0,710	0,476		
Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit	$v_{FH}$	mm/d	0,363	0,311	0,276	0,291	0,253	0,301	0,144	0,391	0,443	0,249	0,252	0,196		
Quellung in der Temperierungsphase	$\Delta s_0$	‰	9,912	6,312	8,680	6,616	9,992	5,896	1,280	0,648	1,192	1,848	9,912	6,280		
Maximale Frosthebung	$\Delta s_{FH,max}$	‰	30,248	52,776	37,304	35,336	47,512	50,632	54,664	65,520	51,232	48,248	31,048	22,696		
Verbleibende Resthebung	$\Delta s_{FH,R}$	‰	3,952	8,520	6,960	7,368	14,528	13,904	16,552	16,328	15,248	14,504	5,680	3,808		
Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit	$v_{FH}$	‰/d	2,904	2,488	2,208	2,328	2,024	2,408	1,152	3,128	3,544	1,992	2,016	1,568		

Kenngrößen zum Frosthebungsversuch			Kennzeichen	Einheit	FSS V0Pr.1	FSS V0Pr.2	FSS V1Pr.1	FSS V1Pr.2	FSS V2Pr.1	FSS V2Pr.2	FSS V3Pr.1	FSS V3Pr.2	FSS V4Pr.1	FSS V4Pr.2	FSS V5Pr.1	FSS V5Pr.2
<b>CBR-Versuch nach Frostbeanspruchung</b>																
CBR-Wert nach dem Auftauen	CBR <sub>FH</sub>	%	113,7	97,8	54,4	74,7	31,0	34,1	38,9	41,3	45,4	46,4	102,3	128,4		
CBR-Wert nach dem Auftauen ohne Nullpunktkorrektur	CBR <sub>FH,ohneN</sub>	%	58,1	72,7	97,7	77,2	49,7	46,9	59,3	54,6	78,5	68,4	89,5	67,4		
Wassergehalt unter dem Stempel	$w_{A,0}$	M.-%	5,1	6,2	13,9	13,7	16,8	15,0	16,9	16,7	13,6	15,9	9,9	9,7		
Wassergehalt in Probenmitte	$w_{A,m}$	M.-%	5,9	7,5	12,1	12,5	14,9	13,7	16,8	16,4	15,9	17,5	10,9	9,9		
Wassergehalt an der Probenunterseite	$w_{A,u}$	M.-%	6,5	7,4	12,4	14,2	17,3	16,6	16,3	17,5	15,6	16,6	9,8	10,6		
CBR-Wert der unbefrostenen Probe <sup>1)</sup>	CBR <sub>0</sub>	%	–	–	78,0	78,0	66,0	66,0	55,0	55,0	54,0	54,0	98,0	98,0		
Abnahme des CBR-Wertes durch Befrostung	$\Delta CBR$	%	–	–	-25,1	-6,6	10,9	13,9	-10,2	-6,4	-42,7	-19,9	-3,5	18,0		
	$\Delta CBR_{ohneN}$	%	–	–	-19,7	0,8	16,3	19,1	-4,3	0,4	-24,5	-14,4	8,5	30,6		

Kenngrößen zum Frosthebungsversuch			Einheit	FSS V0Pr.1	FSS V0Pr.2	FSS V1Pr.1	FSS V1Pr.2	FSS V2Pr.1	FSS V2Pr.2	FSS V3Pr.1	FSS V3Pr.2	FSS V4Pr.1	FSS V4Pr.2	FSS V5Pr.1	FSS V5Pr.2	
Einbau für den FHV	zusätzliche Schläge/2. Lage		–	6	–	–	–	–	–	–	–	6	–	–	–	
	zusätzliche Schläge/3. Lage		18	12	6	12	6	6	6	6	6	–	–	–	–	
	Ausgleichssand	g	44,3	76,4	60,7	143,5					29	37,2	159,3	102,1		
Korngrößenverteilung Durchgang < 0,063 mm	vor FHV			5,8		4,1		3,5		4,5		4,4		2,1		
	nach FHV	M.-%	7,1	8,6	5,1	4,7	5,8	5,3	5,7	5,9	6,5	5,7	3,5	3,6		
CBR Versuch		%	58,1	72,7	97,7	77,2	49,7	46,9	59,3	54,6	78,5	68,4	89,5	67,4		
Einsetzen der Eislinsenbildung nach Versuchsbeginn		Tag	3,7	3,8	4,3	4,6	3,5	3,8	3,7	3,6	4,5	4,8	4	5		
Hebungsverlauf vom 7.-8. Tag		Tag	normal	normal	normal	6,7 T. leichte Einsenkung	normal	7.T. leichte Einsenkung								

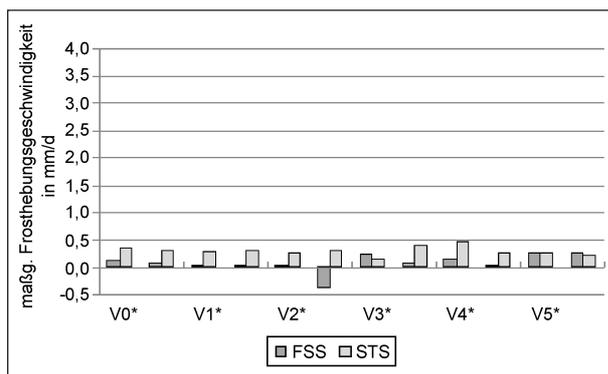
Tab. 30: Ergebnisse der Frosthebungsversuche am Schottertragschichtmaterial

Während der Befrostung wird der Kurvenverlauf der Frosthebung aufgezeichnet. Die aus den Aufzeichnungen entnommenen Werte (siehe Tabelle 28), zeigen den Beginn der Eislinsenbildung nach Frostbeginn in den Varianten der Frostschutz- und der Schottertragschicht.

In der Frostschutzschicht beginnt die Eislinsenbildung, bis auf Probe1 V5\*<sub>FSS</sub>, erst nach dem 3. Befrostungstag. In der Schottertragschicht setzt die Eislinsenbildung im Vergleich der Varianten früher

ein, mit Ausnahme der Variante V5\*<sub>STS</sub>. Die doppelbestimmten Proben haben meist übereinstimmende Zeitpunkte der Eislinsenbildung. Im Mittel beginnen die Hebungen der Frostschutzschicht nach 3,6 Tagen und die Hebungen der Schottertragschicht nach 3,1 Tagen.

In Bild 47 sind die maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten (Anstieg der Frosthebungskurve zwischen dem 6. und dem 7. Befrostungstag) dargestellt. Auffällig ist, dass die Frostschutzschicht



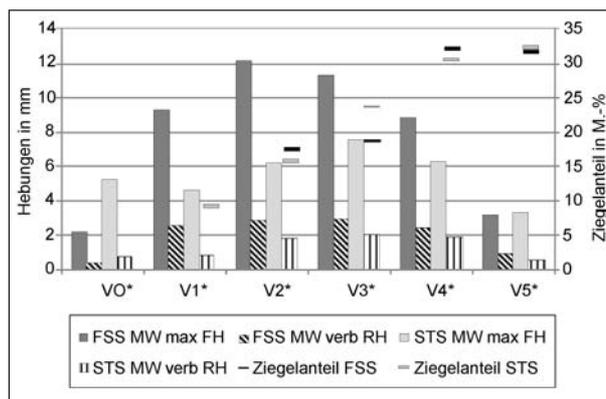
**Bild 47:** Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit zwischen dem 6. und 7. Befrostungstag in mm/d aller Proben der FSS und STS

eine geringere Frosthebungsgeschwindigkeit aufweist als die Schottertragschicht. Die maßgebenden Hebungsgeschwindigkeiten der Frostschutzschicht und der Schottertragschicht zeigen, dass keine progressive Zunahme der Frosthebung mehr stattfindet. Im Falle der Probe 1, Variante V2\*<sub>FSS</sub>, senkt sich die Probe um 0,227 mm, infolge dessen eine negative Frosthebungsgeschwindigkeit festgestellt wird. Eine Erklärung hierfür konnte anhand der Daten des Versuchsablaufs nicht gefunden werden. Möglicherweise hängt dies mit den äußeren Rahmenbedingungen, wie der Auflast zur Symbolisierung der Straßendecke, zusammen.

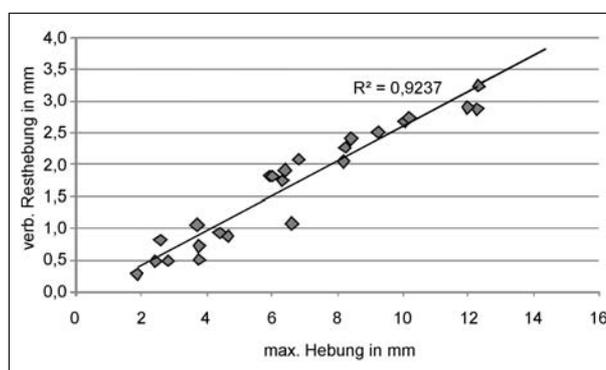
Nach einer siebentägigen Befrostungsphase und einer anschließend 24-stündigen Auftauphase werden die maximalen Hebungen und verbleibenden Resthebungen bestimmt. In Bild 48 sind die Mittelwerte der maximalen Frosthebungen (MW max FH) und der verbleibenden Resthebungen (MW verb RH) als auch die von der BASt ermittelten Ziegelanteile in M.-% dargestellt.

Bei allen RC-Baustoffen V1\* bis V4\* zeigt die Frostschutzschicht eine deutlich höhere maximale Hebung und Resthebung als die Schottertragschicht. Das natürliche Baustoffgemisch V0\* hat in der Schottertragschicht die höhere Hebung. Hingegen ist bei Variante V5\* kein deutlicher Unterschied zwischen der Frostschutzschicht und Schottertragschicht zu erkennen. Die höchsten maximalen Hebungen weisen die Varianten V2\* und V3\* auf, obwohl sie nicht den höchsten Ziegelanteil haben. Die Varianten V5\* zeigen deutlich geringere Hebungen als die Varianten V4\*, bei gleichem Ziegelanteil, jedoch enthalten die Varianten V5\* neben RC-Materialien auch Naturstein-Anteile.

Die verbleibenden Resthebungen der Frostschutzschicht sind bei allen Recycling-Baustoffen ver-



**Bild 48:** Mittelwerte der maximalen Frosthebung (MW max FH) und der verbleibenden Resthebung (MW verb RH) der Frostschutzschicht (FSS) und der Schottertragschicht (STS)



**Bild 49:** Korrelation zwischen der max. Hebung und der Resthebung aller FHV

gleichbar und betragen im Mittel 2,7 mm. V0\*<sub>FSS</sub> hat Resthebungen von 0,4 mm und V5\*<sub>FSS</sub> eine verbleibende Resthebung von 0,9 mm. In der Schottertragschicht zeigen die Varianten V2\* bis V4\* verbleibenden Resthebungen von ca. 2,0 mm und sind höher als die verbleibenden Resthebungen der Varianten V0\*, V1\* und V5\* von ca. 0,6 mm.

In Bild 49 sind alle verbleibenden Resthebungen den maximalen Hebungen der Frostschutz- und Schottertragschicht gegenübergestellt. Es ist eine deutliche Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,92$  zwischen den maximalen Hebungen und den Resthebungen zu erkennen.

Die Gegenüberstellung der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit und der maximalen Frosthebung (ohne Darstellung) zeigt keine korrelativen Zusammenhänge. Der in (RADENBERG & CETINKAYA, 2009) festgestellte Zusammenhang von Frosthebungsgeschwindigkeit und Frostempfindlichkeit für ziegelreiche Materialien kann hier nicht bestätigt werden, allerdings ist anzumerken, dass

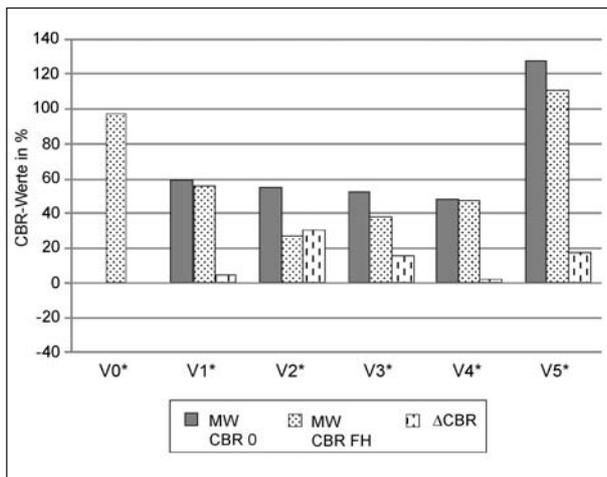
die Stichprobenanzahl hier vergleichsweise gering ist.

### 6.8.5 Ergebnisse der CBR-Versuche

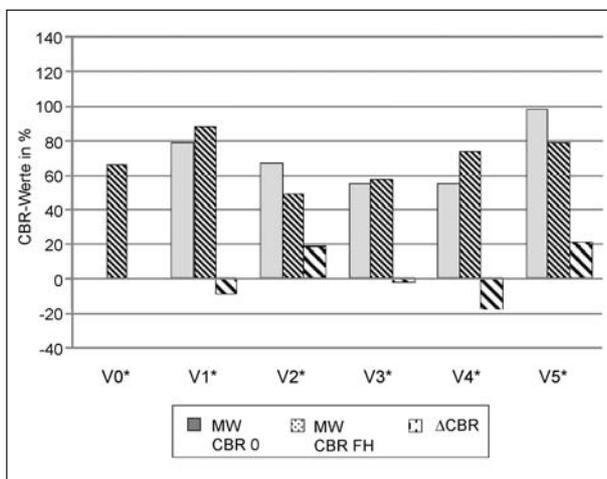
Um einen möglichen Tragfähigkeitsverlust durch die Frosthebung festzustellen, wurde unmittelbar nach dem Frosthebungsversuch der  $CBR_{FH}$ -Wert bestimmt und die Mittelwerte mit dem  $CBR_0$ -Wert aus der Eignungsprüfung (EP) verglichen (Bild 50 und Bild 51). Da für das Naturgestein im Vorfeld kein  $CBR_0$ -Wert bestimmt wurde, sind nur die  $CBR_{FH}$ -Werte in den Abbildungen dargestellt.

In der Frostschutzschicht nimmt der  $CBR_0$ -Wert von den Varianten  $V1^*_{FSS}$  bis  $V4^*_{FSS}$  mit zunehmendem Ziegelanteil um ca. 10 % ab. Nach dem

Frosthebungsversuch zeigen Variante  $V2^*_{FSS}$  und  $V3^*_{FSS}$  die höchste Abnahme. Die  $CBR_{FH}$ -Werte von Variante  $V1^*_{FSS}$  und  $V4^*_{FSS}$  verändern sich nur minimal durch die Befrostung. Variante  $V5^*_{FSS}$  zeigt durch den Frosthebungsversuch einen niedrigeren  $CBR_{FH}$ -Wert, dieser liegt jedoch noch über dem  $CBR_0$ -Wert von Variante  $V0^*_{FSS}$ . In der Schottertragschicht sind die  $CBR_0$ -Werte höher als die der Frostschutzschicht, jedoch ist mit zunehmendem Ziegelanteil eine deutlichere Abnahme des  $CBR_0$ -Wertes festzustellen, mit Ausnahme Variante  $V5^*_{STS}$ . Nach dem Frosthebungsversuch nehmen die  $CBR_{FH}$ -Werte von den Varianten  $V2^*_{STS}$  und  $V5^*_{STS}$  ab. Die Varianten  $V1^*_{STS}$ ,  $V3^*_{STS}$  und  $V4^*_{STS}$  zeigen nach der Befrostung einen höheren  $CBR_{FH}$ -Wert. Es kann kein eindeutiger Tragfähigkeitsverlust mit zunehmendem Ziegelanteil festgestellt werden.



**Bild 50:** CBR-Mittelwerte der FSS vor dem FHV ( $CBR_0$ -Werte der EP) und nach dem FHV ( $CBR_{FH}$ ) sowie Differenz zum  $CBR_0$ -Wert ( $\Delta CBR$ )



**Bild 51:** CBR-Mittelwerte der STS vor dem FHV ( $CBR_0$ -Werte der EP) und nach dem FHV ( $CBR_{FH}$ ) sowie Differenz zum  $CBR_0$ -Wert ( $\Delta CBR$ )

### 6.8.6 Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung

Am ersten Tag des Frosthebungsversuchs, in der Temperierungsphase, konnten die eingebauten Proben Wasser ziehen und dadurch die Unterschiede im Einbauwassergehalt ausgleichen. Nach Versuchsende wurden die Wassergehalte unter dem Stempel an der Probenoberseite, in der Probenmitte und an der Probenunterseite ( $w_0$ ,  $w_m$ ,  $w_u$ ) ermittelt. In Bild 52 und Bild 53 wird der optimale Wassergehalt  $w_{PR}$  beim Einbau der Proben und der Wassergehalt der drei Teilproben nach der Befrostung dargestellt.

In der Frostschutz- und der Schottertragschicht zeigen die Varianten  $V0^*$  und  $V5^*$  vor und nach der Befrostung einen deutlich geringeren Wassergehalt als die Varianten  $V1^*$  bis  $V4^*$ . Die meisten Proben haben nach dem Frosthebungsversuch einen höheren Wassergehalt als vorher. Es zeigt sich tendenziell eine Zunahme des Wassergehaltes von Probenoberseite zu Probenunterseite. In der Frostschutzschicht variiert die Zunahme im Mittel zwischen 1,4 M.-% ( $V0^*_{FSS}$ ) und 4,5 M.-% ( $V3^*_{FSS}$ ). Die Schottertragschicht zeigt bei den Varianten  $V0^*$  und  $V1^*$  im Mittel nach der Befrostung einen geringeren Wassergehalt und weist bei den restlichen Proben eine Zunahme des Wassergehaltes zwischen 0,3 M.-% ( $V4^*_{STS}$ ) und 5,8 M.-% ( $V2^*_{STS}$ ) auf.

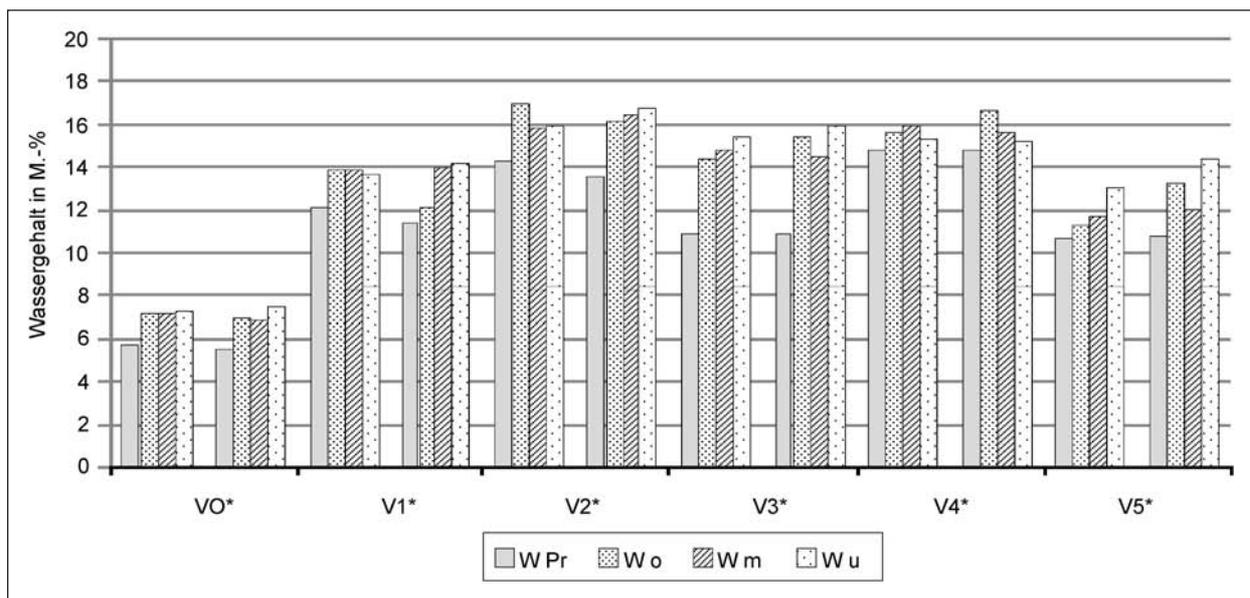


Bild 52: Wassergehalte der FSS vor und nach der Befrostung

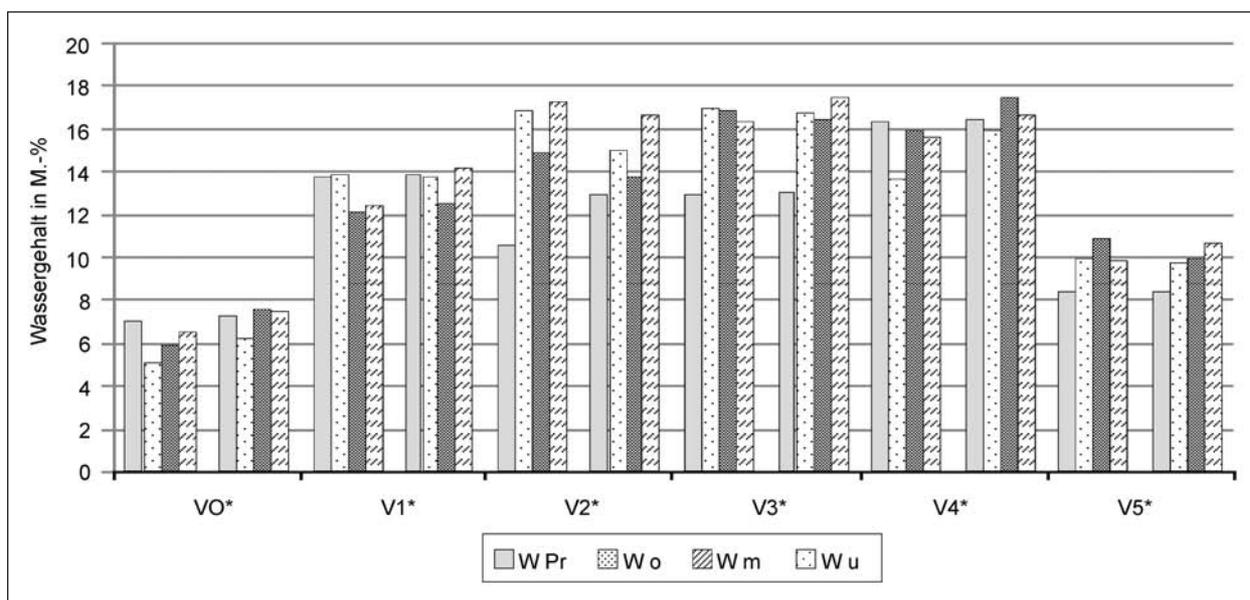


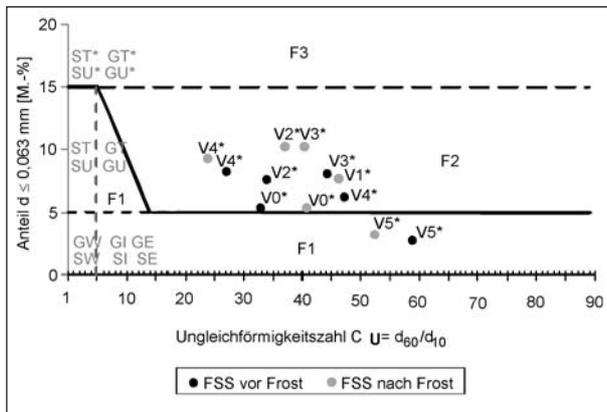
Bild 53: Wassergehalte der STS vor und nach der Befrostung

### 6.8.7 Korngrößenverteilung

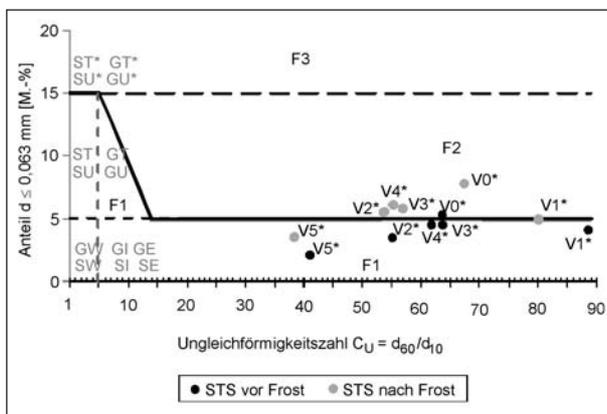
Von den Materialien der Frostschutzschicht und Schottertragschicht wurde vor und nach dem Frosthebungsversuch die Korngrößenverteilung bestimmt, vgl. Kapitel 6.8.4. Durch die Befrostung verändert sich der Feinkornanteil des Naturgesteins nicht. Die Varianten V0\* bis V4\* haben vor und nach dem Frosthebungsversuch einen Feinkornanteil von über 4 M.-%. Nur das Kies-Sand-Gemisch V5\* weist einen geringeren Feinkornanteil auf. Zur Verdeutlichung wurden die Proben gemäß ZTV E-StB nach ihrem Feinkornanteil und ihrer Ungleichförmigkeitszahl, vgl. Bild 2, den Frostempfind-

lichkeitsklassen für Böden zugeordnet. Bild 54 und Bild 55 zeigen die Einteilung der Proben vor und nach dem Frosthebungsversuch. Es ist eine leichte Tendenz zur Kornverfeinerung festzustellen, die jedoch keine Veränderung der theoretischen Frostempfindlichkeitsklasse bedingt. Demnach ist Variante V5\*<sub>FSS</sub> in Frostempfindlichkeitsklasse F1 als nicht frostempfindlich einzuordnen und die übrigen Varianten in F2 als gering bis mittelfrostempfindlich einzustufen.

Auch bei dem Material der Schottertragschicht ist nach dem Frosthebungsversuch eine Tendenz zur Kornverfeinerung festzustellen. Die Varianten V2\*,



**Bild 54:** Theoretische Bestimmung der Frostempfindlichkeitsklassen gemäß den ZTV E-StB des FSS-Materials vor und nach dem FHV



**Bild 55:** Theoretische Bestimmung der Frostempfindlichkeitsklassen gemäß den ZTV E-StB des STS-Materials vor und nach dem FHV

V3\* und V4\* überschreiten die Grenze der Frostempfindlichkeitsklasse F1 und müssen F2 zugeordnet werden.

### 6.8.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Frosthebungsversuche gemäß den TP BF-StB (Entwurf) und die zusätzlichen Prüfungen wurden an Proben durchgeführt, die auf der Baustelle entnommen und der BASt zugesandt wurden. Die Ziegelanteile in den Proben weichen teilweise deutlich von den für die Erprobungsstrecke angestrebten Anteilen ab. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen beziehen sich nur auf den tatsächlichen Ziegelanteil der Proben, vgl. Tabelle 27.

Während des Frosthebungsversuches konnten die Proben in der Temperierungsphase Wasser nachziehen und den Unterschied zum Einbauwassergehalt ausgleichen. Die Varianten der Frostschuttschicht zeigten größere Quellungen als die der

Schottertragschicht. In der anschließenden Temperatur-Absenkephase setzte bei den meisten Varianten der Schottertragschicht die Eislinnenbildung bis zum 4. Befrostungstag ein. In der Frostschuttschicht begann dieser Prozess bei annähernd allen Varianten etwa einen Tag später. Die Konsequenz einer frühen Eislinnenbildung ist, dass über eine längere Zeit Wasser zur Frostfront nachgesaugt werden kann. Nach dem 7. und 8. Befrostungstag wurde eine geringe maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit in der Frostschuttschicht von 0,04 bis 0,25 mm/d und in der Schottertragschicht von 0,14 bis 0,44 mm/d festgestellt. Das Abklingen der Frosthebungskurve deutet auf das Ende des Wasser-nach-Saugens und auf das Ende der Eislinnenbildung hin. Die Frosthebungsgeschwindigkeit der RC-Gemische unterscheidet sich kaum von den V0\*-Materialien (ausschließlich „Natursteine“).

Nach dem Frosthebungsversuch zeigten die Varianten V1\* bis V4\* der Frostschuttschicht eine deutlich höhere maximale Hebung und Resthebung als die Varianten der Schottertragschicht. Des Weiteren konnte eine Zunahme der maximalen Frosthebungen und verbleibenden Resthebungen bei steigendem Ziegelanteil bis Variante V3\* in der Frostschuttschicht und der Schottertragschicht festgestellt werden. Hingegen wurden bei den Varianten V4\* und V5\*, trotz höheren Ziegelanteiles geringere Hebungen bestimmt. Die Varianten V0\* (ausschließlich „Natursteine“) und V5\* (ca. 15 M.-% „Natursteine“) zeigen vergleichbare Hebungen. Die maximalen Frosthebungen und die verbleibenden Resthebungen lassen mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,92$  eine deutliche Korrelation erkennen. Die Annahme, dass mit zunehmendem Ziegelanteil eine höhere Frostempfindlichkeit besteht, konnte nicht bestätigt werden. Auch konnte kein Zusammenhang zwischen dem Frosthebungsbeginn und den maximalen Frosthebungen festgestellt werden. Die Gegenüberstellung der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten und der maximalen Frosthebungen zeigte keine korrelativen Zusammenhänge. Ferner konnte kein Zusammenhang zwischen Tragfähigkeitsverlust und zunehmendem Ziegelanteil nach dem Frosthebungsversuch festgestellt werden. Die Bestimmung des Feinkornanteils zur Einteilung des Materials in die Frostempfindlichkeitsklassen nach den ZTV E-StB zeigt, dass nach Einbau, Verdichtung und Befrostung eine Tendenz zur Kornverfeinerung festzustellen ist.

## 7 Schlussfolgerungen

Ziel des Projektes ist, die Eignung von ziegelreichen Tragschichten ohne Bindemittel am Beispiel einer Erprobungsstrecke nachzuweisen. Hierzu wurden bislang Daten in einem Beobachtungszeitraum von drei Jahren gesammelt.

Zum Nachweis der Eignung ziegelreicher Baustoffgemische müssen mindestens folgende Anforderungen erfüllt sein:

- Einhaltung der Grenzwerte für die stoffliche Zusammensetzung (entfällt hier),
- Einhaltung der mechanischen und umweltrelevanten Anforderungen vor dem Einbau,
- Einhaltung der mechanischen Anforderungen und bautechnische Eignung beim Einbau,
- Widerstand gegen Frostbeanspruchung (im Laborversuch und in situ),
- Frostunempfindlichkeit bezogen auf Frosthörungen, Tragfähigkeitsverluste und Oberflächenmerkmale.

Im Folgenden werden die einzeln durchgeführten Auswertungen, vgl. Kapitel 6, hinsichtlich des Projektziels in Verbindung gebracht und zusammen ausgewertet.

### 7.1 Voruntersuchungen und baubegleitende Untersuchungen

Die eingesetzten Baustoffe für die Tragschichten ohne Bindemittel erfüllten nicht alle die gemäß Regelwerk geforderten Anforderungen an die mechanische Beanspruchung und Verwitterungsbeanspruchung. Die umweltrelevanten Anforderungen wurden bei allen Baustoffgemischen erfüllt. In der Bauphase wurden u. a. fortlaufend die Verdichtungsgrade und Verformungsmoduln kontrolliert. Alle Varianten der Erprobungsstrecke konnten anforderungsgerecht hergestellt werden. Die Infiltrationsmessungen an der Oberfläche der Schottertragschichten ergaben, dass diese durchlässig bis schwach durchlässig sind.

Des Weiteren wurde die stoffliche Zusammensetzung sowohl in den Voruntersuchungen als auch beim Einbau bestimmt. Es zeigte sich, dass durch die in der Regel nicht sortenreine Aufbereitung des Bauschutts die genaue Dosierung des Ziegelanteils

schwierig sein kann. Insbesondere die Zusammensetzung der Variante 5 mit theoretisch 60 M.-% natürlicher Gesteinskörnung und 40 M.-% Ziegelanteil stellte sich als nicht möglich dar, weshalb effektiv ein Gemisch mit rund 30 M.-% natürliche Gesteinskörnung, 30 M.-% Betonbruch und 40 M.-% Ziegelanteil angestrebt wurde.

### 7.2 Beurteilung des Beobachtungszeitraums

Wichtig für die Beurteilung der Eignung verschiedener Baustoffgemische in der Erprobungsstrecke sind das Auftreten von Frost-Tau-Wechseln und die Frosteindringung in den Straßenoberbau. Der Beobachtungszeitraum erstreckt sich über drei Winterperioden. Der Winter 2007/2008 war relativ mild mit nur 19 Frosttagen und einem maximalen Frostindex von  $-20,7 \text{ °C} \cdot \text{d}$ . Im Winter 2008/2009 konnten dagegen vier Kälteperioden mit insgesamt 45 Frosttagen und einem maximalen Frostindex von  $-108,5 \text{ °C} \cdot \text{d}$  beobachtet werden. Der im Beobachtungszeitraum strengste Winter im Jahreswechsel 2009/2010 zeichnete sich durch insgesamt 80 Frosttage, verteilt auf drei Kälteperioden, und einen maximalen Frostindex von  $-230 \text{ °C} \cdot \text{d}$  aus.

Sowohl die Berechnung der Frosteindringtiefe über die Lufttemperatur als auch die direkten Messungen im Straßenoberbau und Untergrund bzw. Unterbau zeigen, dass in den Winterperioden Frost bis zur Tiefe des Planums und teilweise darüber hinaus eingedrungen ist. Auch wenn die maximalen Frostindizes nicht für eine Einordnung in die Frosteinwirkungszone II bzw. III reichen, in der die Erprobungsstrecke gemäß den RStO einzuordnen ist, lagen dennoch die Voraussetzungen vor, um eine Beurteilung der Frosteinwirkung auf die Erprobungsstrecke und die RC-Baustoffe vorzunehmen.

Hinsichtlich der Verkehrsbelastung sind nicht die prognostizierten Werte eingetreten, dennoch ist die Erprobungsstrecke bei Dimensionierung nach den RStO unterdimensioniert, d. h., eine zeitraffende Beobachtung ist in Ansätzen möglich.

### 7.3 Tragfähigkeit

#### 7.3.1 In-situ-Messungen

Mit Hilfe der mit dem Falling-Weight-Deflectometer gemessenen Deflexionsmulden wurden die Verformungsmoduln des Untergrundes bzw. Unterbaus

und die Schichtmoduln der Tragschicht ohne Bindemittel für verschiedene Messzeitpunkte zurückgerechnet. Die Einwirkung der Frost-Tau-Wechsel auf die Tragfähigkeit konnte durch die Anordnung der Messungen im Herbst und Frühjahr beobachtet werden. Die mit dem FWD gemessenen Werte spiegelten sich qualitativ auch in den mit dem Benkelman-Balken gemessenen Werten wider.

Rein qualitativ betrachtet wurden bei den Varianten 1 bis 4 mit RC-Baustoffen deutlich höhere Tragfähigkeiten festgestellt als bei den Varianten 0 und 5 mit Anteilen von natürlichen Gesteinskörnungen in der Tragschicht ohne Bindemittel. Die Tragfähigkeiten der letztgenannten Varianten bleiben jedoch über den Beobachtungszeitraum nahezu konstant, während die Varianten mit ausschließlich RC-Baustoffen deutlich den Einflüssen aus den Frost-Tau-Wechseln unterliegen. Diese Einflussnahme reduziert sich mit steigendem Ziegelanteil. Die im Frühjahr gemessenen Tragfähigkeiten der ToB sind niedriger als die Herbstwerte des Vorjahres, zudem ist eine Abnahme über die Nutzungsdauer erkennbar.

Die rückgerechneten Verformungsmoduln des Untergrundes bzw. Unterbaus liegen bei den ziegelreichen Varianten 1 bis 4 deutlich über den aus der RStO bzw. ZTV-E abgeleiteten Anforderungen. Die rückgerechneten Schichtmoduln der aus Schottertragschicht und Frostschutzschicht zusammengesetzten Tragschicht ohne Bindemittel liegen im Falle der Varianten 1 bis 4 deutlich über den üblichen aus der Literatur bekannten Werten für Schichten ohne Bindemittel. Die Schichtmoduln sind unabhängig vom Messzeitpunkt mit zunehmendem Ziegelanteil abnehmend. Das Tragfähigkeitsniveau wird hier entscheidend von den Anteilen an Beton-RC und natürlichen Gesteinskörnungen bestimmt.

Zur quantitativen Bewertung der mit dem FWD gemessenen Deflexionen wurde das Bauklassensystem der RStO verwendet. Mit Hilfe der Referenzbauweise Variante 0 erfolgte die Berechnung bauklassenbezogener Grenzwerte im Mehrschichtenprogramm. Zum Zeitpunkt der Nullmessung im Herbst 2007, also ohne Frosteinwirkung, aber bereits nach einigen Monaten der Konsolidierung, sind die Varianten 1, 2 und 3 der Bauklasse SV und die Variante 4 der Bauklasse II zuzuordnen. Die ziegelreichen Varianten übertreffen somit deutlich die erforderliche Soll-Bauklasse IV und zeigen eine sehr hohe Tragfähigkeit. Die Variante 5 mit rund 30

M.-% natürlichen Gesteinskörnungen ist der Bauklasse III bzw. IV zuzuordnen und somit ausreichend tragfähig. Obwohl eine Abnahme der Tragfähigkeiten zum Ende des Beobachtungszeitraums festzustellen ist, sind die Tragfähigkeiten im Frühjahr 2010 der Varianten 1 bis 3 den Bauklassen SV und I sowie die der Variante 4 der Bauklasse III zuzuordnen. Die Variante 5E ist der Bauklasse IV und die Variante 5D der Bauklasse V zuzuordnen.

Hierzu ist anzumerken, dass die Tragfähigkeiten der Variante 5D von Anfang an deutlich geringer als bei den übrigen Varianten war, also nicht von einem Versagen aufgrund von Frost-Tau-Wechseln ausgegangen werden kann. Eine Ausnahme stellt der Bereich um Station 0+280 in Variante 5D dar. Hier sind ein deutlicher Tragfähigkeitsverlust und Oberflächenschäden eingetreten. Durch eine Bohrkernentnahme an dieser Stelle konnte festgestellt werden, dass die Schäden auf eine deutliche Unterschreitung der Solldicke der Asphalttschicht zurückzuführen sind.

### 7.3.2 Laborversuche

Die Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen in situ spiegeln sich in den Ergebnissen aus den Tragfähigkeitsmessungen im Labor (CBR-Werte) nur insofern wider, als dass nur geringe Tragfähigkeitsänderungen durch die Frostbeanspruchung festgestellt wurden. Die in situ deutlich höheren Tragfähigkeiten der ziegelreichen Varianten sind im Laborversuch nicht zu erkennen. Im Falle des Frostschutzschicht-Materials liegen die Tragfähigkeiten der ziegelreichen Varianten sogar deutlich unter denen der Varianten mit natürlichen Gesteinskörnungen.

### 7.3.3 Fazit

Aufgrund der In-situ-Messungen konnte festgestellt werden, dass sich ein hoher Ziegelanteil im RC-Baustoffgemisch für die Tragschicht ohne Bindemittel nicht negativ auf die Tragfähigkeit auswirkt. Die Tragfähigkeit nimmt zwar mit steigendem Ziegelanteil ab, allerdings liegen die Tragfähigkeiten aller untersuchten Varianten mit ausschließlich RC-Material deutlich über den Anforderungen und über den Tragfähigkeiten der Varianten mit natürlichen Gesteinskörnungen. Der Ziegelanteil nimmt dabei eine relativ passive Rolle ein, d. h., dass das Niveau der Tragfähigkeit überwiegend von den übrigen ToB-Baustoffen abhängig ist. Im Falle der Va-

rianten ohne natürliche Gesteinskörnungen ist zudem festzustellen, dass ein steigender Ziegelanteil sich positiv auf die Reduzierung der saisonalen Tragfähigkeitsschwankungen auswirkt.

## 7.4 Frosthebungen

### 7.4.1 In-situ-Messungen

Die Frosthebungen wurden mit Hilfe von Feinnivellements jeweils im Herbst und Frühjahr dokumentiert. Hierzu wurden pro Variante zwei bis drei Querprofile mit sieben Messpunkten aufgenommen.

Die gemessenen Hebungen und auch Senkungen auf dem Streckenabschnitt liegen im Bereich von rund  $\pm 2$  mm. Die Höhendifferenzen sowohl aus der Konsolidierung als auch aus Frosthebungen sind als sehr gering und unschädlich für die Straßenkonstruktion einzuordnen. Deutliche und systematische variantenabhängige Frosthebungen sind nicht festzustellen. Insgesamt werden mehr Hebungen und Beharrungen festgestellt als Senkungen.

### 7.4.2 Laborversuche

Die Frosthebungsversuche gemäß den TP BF-StB (Entwurf) und die zusätzlichen Prüfungen wurden an Proben durchgeführt, die auf der Baustelle entnommen und der BASt zugesendet wurden. Die stoffliche Zusammensetzung dieser Proben entsprach, wahrscheinlich aufgrund der Probennahme, nicht vollständig den geplanten Anforderungen der Erprobungsstrecke. Insbesondere die Ziegelanteile weichen deutlich von den Vorgaben für die verschiedenen Varianten ab.

Im Falle des Frostschuttschicht-Materials zeigen die ziegelreichen Varianten V1\* bis V4\* deutlich höhere maximale Frosthebungen als die Varianten mit natürlichen Gesteinskörnungen. Allerdings ist kein Zusammenhang mit dem Ziegelanteil festzustellen, d. h., die maximalen Frosthebungen der Variante V1\* sind vergleichbar mit denen der Variante V4\*. Die Proben der Schottertragschicht weisen im Vergleich mit der Frostschuttschicht, im Falle der Varianten V1\* bis V4\*, geringere maximale Frosthebungen auf. Ein deutlicher Unterschied zwischen den Varianten mit RC-Baustoffen und der ausschließlich natürlichen Gesteinskörnung (V0\*<sub>STS</sub>) ist in der Schottertragschicht nicht festzustellen. Jedoch zeigt die Variante V5\*, die sich von der Variante V4\* im Wesentlichen nur durch die unter-

schiedlichen Anteile an Betonbruch und Naturstein unterscheidet, in der Frost- und Schottertragschicht deutlich geringere maximale Hebungen.

Die oben genannten Aussagen lassen sich weitestgehend auch auf die verbleibenden Frosthebungen übertragen. Die verbleibenden Hebungen des Schottertragschicht-Materials sind mit Ausnahme der Variante V0\*<sub>STS</sub> geringer als die des Frostschuttschicht-Materials.

### 7.4.3 Fazit

In situ wurden nahezu keine Frosthebungen festgestellt. Zusammenhänge zwischen der Frosthebung und dem Ziegelanteil im RC-Baustoffgemisch konnten nicht festgestellt werden. Die dokumentierten Frosthebungen, aber auch Setzungen der Erprobungsstrecke sind als sehr gering und unschädlich für die Straßenkonstruktion einzuordnen. Im Laborversuch wurden Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt. Ungünstige Einflüsse, die ausschließlich auf den Ziegelanteil zurückzuführen sind, konnten nicht festgestellt werden.

## 7.5 Oberflächenbild

Neben den in Kapitel 7.3.1 genannten Netzzissen mit Einsenkung der Oberfläche im Bereich der Station km 0+280 wurden mehrere Querrisse im Asphalt dokumentiert. Die Querrisse verlaufen über die gesamte Fahrbahnbreite. Sie befinden sich fast ausschließlich in den Abschnitten der Varianten mit 10 und 20 M.-% Ziegel, also in den Abschnitten mit hohem Betonbruchanteil im RC-Baustoffgemisch. Aufgrabungen bzw. Bohrkernentnahmen im Sommer 2010 haben gezeigt, dass die Risse sich nicht in der ToB fortsetzen. Aufgrund der tiefen Temperaturen im Winter 2009/2010 und der nachgewiesenen Verhärtung des Bindemittels in der Asphalt-schicht sind die Risse auf kryogene Spannungen zurückzuführen.

### 7.6 Fazit

Aufgrund der Ergebnisse der Tragfähigkeitsmessungen und Frosthebungsmessungen in situ und im Labor sowie aufgrund des Oberflächenbildes und der Einbaubarkeit der ziegelreichen RC-Baustoffgemische stellen sich die ziegelreichen RC-Baustoffe für den Einsatz in Tragschichten ohne Bindemittel als geeignet dar.

Mit zunehmendem Ziegelanteil reduzieren sich die saisonalen Schwankungen der Tragfähigkeit. Das Tragfähigkeitsniveau sinkt mit steigendem Ziegelanteil, ist jedoch immer noch deutlich höher als die Tragfähigkeiten der Varianten mit natürlichen Gesteinskörnungen.

## 8 Zusammenfassung

Ziel des Projektes war der Nachweis der Eignung von ziegelreichen RC-Baustoffen in Tragschichten ohne Bindemittel. Hierzu wurde im Osten Brandenburgs eine Erprobungsstrecke als Teil einer Bundesstraße angelegt. Auf rund 1.200 m Länge wurden 12 Abschnitte realisiert. Es kamen sechs Varianten an Baustoffgemischen für die ToB (Schottertragschicht und Frostschutzschicht), jeweils einmal in Dammlage und einmal in Einschnittlage, zum Einsatz:

- Variante 0 V0..... ausschließlich natürliche Gesteinskörnungen,
- Variante 1 V1..... RC-Baustoff mit 10 M.-% Ziegelanteil,
- Variante 2 V2..... RC-Baustoff mit 20 M.-% Ziegelanteil,
- Variante 3 V3..... RC-Baustoff mit 30 M.-% Ziegelanteil,
- Variante 4 V4..... RC-Baustoff mit 40 M.-% Ziegelanteil,
- Variante 5 V5..... rd. 30-40 M.-% Ziegel, rd. 30-40 M.-% Betonbruch und rd. 20 M.-% natürliche Gesteinskörnung.

Zur zeitraffenden Belastung durch den Verkehr wurde die Erprobungsstrecke eine Bauklasse niedriger (Bauklasse IV) gebaut, als es bei Dimensionierung gemäß den RStO 01 zulässig gewesen wäre. Die Erprobungsstrecke wurde umfangreich instrumentiert. In jedem Abschnitt wurden an zwei bzw. einer Position die Temperatur und der Feuchtegehalt in den Schichten des Oberbaues und im Untergrund/Unterbau stündlich gemessen. Zudem wurden an der Erprobungsstrecke eine Wetterstation und eine automatische Verkehrszählung eingerichtet. Zweimal pro Jahr, im Herbst und im Frühjahr, wurden Tragfähigkeitsmessungen an festgelegten Messpunkten mit dem Falling-Weight-

Deflectometer und dem Benkelman-Balken durchgeführt. Des Weiteren wurden im Herbst und bei Frostereignissen Höhenmessungen (Feinnivellament) zur Feststellung von Frosthebungen angeordnet. Umfangreiche Eignungs- und Kontrollprüfungen sowie Frosthebungsversuche im Labor vervollständigten die Datenbasis.

Für den Beobachtungszeitraum von drei Jahren wurden zunächst die Frostereignisse ausgewertet. Nach einem relativ milden Winter 2007/2008 konnten im Winter 2008/2009 und 2009/2010 ausreichend lange und strenge Frost- bzw. Kälteperioden registriert werden. Die maximale Frosteindringtiefe betrug rechnerisch 80 cm (Planum) bzw. bei Auswertung der installierten Temperatursensoren im Mittel 80 cm und punktuell über 130 cm. Die Messungen der Feuchtegehalte erbrachten keine wesentlichen Ergebnisse. Tendenziell wurden im Sommer höhere Feuchtegehalte gemessen als im Winter.

Die im Bereich der Varianten 1 bis 4 gemessenen Tragfähigkeiten sind deutlich höher als bei der Variante 5 und als bei der als Referenzbauweise dienenden Variante 0. Mit zunehmendem Ziegelanteil nimmt die Tragfähigkeit zwar leicht ab, es reduzieren sich aber auch die jahreszeitlichen Schwankungen der Tragfähigkeit. Rein qualitativ betrachtet bilden die beiden Messsysteme Falling-Weight-Deflectometer und Benkelman-Balken die Gesamttragfähigkeit auf der Erprobungsstrecke gleich ab.

Die durch regelmäßige Höhenmessungen registrierten Hebungen und Senkungen sind mit rund  $\pm 2$  mm sehr gering. Eindeutige kurzfristige und bleibende Hebungen infolge von Frost konnten nicht festgestellt werden. Die an Proben im Labor durchgeführten Frosthebungsversuche zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Gemischen mit natürlichen Gesteinskörnungen und den reinen RC-Baustoffgemischen. Deutliche Einflüsse des Ziegelanteils wurden nicht festgestellt.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse in Kombination mit dem zum Anlass genommenen Projekt FE 06.073/2000/FGB (KRASS & KOLLAR, 2004) und den ergänzenden Untersuchungen des Projektes FE 89.0182/2006/AP (RADENBERG & CETINKAYA, 2008) kann die mit Einführung der TL Gestein in 2004 umgesetzte Erhöhung des zulässigen Ziegelanteils in RC-Baustoffen von 30 M.-% als unkritisch angesehen werden. Die untersuchten Varianten mit 40 M.-% zeigten zwar auch keine negativen Einflüsse, spielen aber für die tatsächlich am

Markt vorhandene Baustoffsituation eine eher vernachlässigbare Rolle. Es ist jedoch zu beachten, dass die meisten in der Erprobungsstrecke eingesetzten Baustoffgemische die Anforderungen an die mechanische Beständigkeit und Verwitterungsbeständigkeit im Rahmen der Eignungsprüfung nicht erfüllt haben und somit gemäß den TL Gestein-StB und TL SoB-StB nicht zugelassen wären.

## Literatur

- Baugrundinstitut Franke-Meißner. (2005): Geotechnisches Streckengutachten
- BLUME, U. (2010): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, S63, Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten. Bremerhaven: NW-Verlag
- BLUME, U., & PLEHM, T. (2009): Aktualisierung der Frostzonenkarte zur Dimensionierung des frostsicheren Straßenoberbaus. Straße und Autobahn (12/09), S. 793-799
- Deutscher Wetterdienst. (2010a): Abgerufen am 04.05.2010 von <http://www.dwd.de>
- Deutscher Wetterdienst. (2010b): Stundenwerte der Lufttemperatur und Stundensummen der Niederschlagshöhen, Wetterstation Münchenberg
- DIN (1997) DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Proctorversuch
- DIN (1998) DIN 18130-1: Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts, Teil 1: Laborversuche
- FGSV (2010): Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes von Tragschichten ohne Bindemittel, Entwurf
- FGSV (2005): Arbeitspapier Tragfähigkeit, Teil C1, Benkelman-Balken: Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (1994): Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen, Heft 105. Bonn: Kirschbaum-Verlag
- FGSV (1980): Merkblatt über Anforderungen an Untersuchungsstrecken. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2002): Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (1996): Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Querschnitte (RAS-Q). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2001): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2007c): Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – Ausgabe 2004/Fassung 2007. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2007a): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Ausgabe 2004/Fassung 2007. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2000): Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2004): Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil: Frosthebungsversuch, TP BF-StB Teil FHV, Entwurf. unveröffentlicht
- FGSV (1994): Technische Prüfvorschriften für hydraulisch gebundene Tragschichten (HGT). Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2009): Zusätzlich Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. Köln: FGSV-Verlag
- FGSV (2007b): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau – Ausgabe 2004/Fassung 2007. Köln: FGSV-Verlag
- FITSCHEN, A. (2009): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V178, Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2007. Bremerhaven: NW-Verlag
- FITSCHEN, A., & KLOßMANN, I. (2006): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V140, Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004. Bremerhaven: NW-Verlag
- FITSCHEN, A., & KLOßMANN, I. (2007): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V160,

- Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005. Bremerhaven: NW-Verlag
- FITSCHEN, A., & KLOßMANN, I. (2008): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V166, Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006. Bremerhaven: NW-Verlag
- FITSCHEN, A., & NORDMANN, H. (2010): Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, V191, Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2008. Bremerhaven: NW-Verlag
- HILLMANN, R., BRANG, C., HAGEMANN, H.-J., & STÜBBE, M. (2006): Arbeitsanweisung zum Frosthebungsversuch im Rahmen des Ringversuches, AP 05 321/S2, unveröffentlicht
- Infralab. (2010): Abgerufen am 31.05.2010 von [www.infralab.ch/pdf/info\\_fwd\\_de.pdf](http://www.infralab.ch/pdf/info_fwd_de.pdf)
- Ingenieurgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen et al. (1996): Wiederholungsmessungen an flexiblen Fahrbahnbefestigungen ehemaliger Untersuchungsstrecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 730, Bonn: Bundesministerium für Verkehr
- KRASS, K., & KOLLAR, J. (2004): Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 884, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
- KRASS, K., BRÜGGEMANN, M., & GÖRENER, E. (2004): Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 2001 – Teil 1: Recycling-Baustoffe. Straße und Autobahn (4/04), S. 193-202
- KRASS, K., JUNGELD, I., & TROGISCH, H. (2002): Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1999 – Teil 1: Recycling-Baustoffe. Straße und Autobahn (1/02), S. 22-30
- KÜBLER, G. (1964): Der Einfluss der Witterungsfaktoren auf die Frostgefährdung von Straßen – Wissenschaftliche Berichte der Bundesanstalt für Straßenbau, Heft 3. Berlin, München: Ernst & Sohn Verlag
- LEHMANN, K., & WICHTER, L. (2008): Erprobungsstrecke Seelow Los 6 – 1. Zwischenbericht über Untersuchungen zum Einsatz von ziegelreichen Recyclingmaterial in ungebundenen Tragschichten. Unveröffentlicht
- LEHMANN, K., & WICHTER, L. (2009): Erprobungsstrecke Seelow Los 6 – 2. Zwischenbericht über Untersuchungen zum Einsatz von ziegelreichen Recyclingmaterial in ungebundenen Tragschichten. Unveröffentlicht
- LEHMANN, K., & WICHTER, L. (2007): Erprobungsstrecke Seelow Los 6 – Bericht über Untersuchungen zum Einsatz von ziegelreichen Recyclingmaterial in ungebundenen Tragschichten. Unveröffentlicht
- Ministerien des Landes Brandenburg (2004): Brandenburgische Technische Richtlinien für die Verwertung von Recycling-Baustoffen im Straßenbau; Herstellung, Prüfung, Auslieferung und Einbau (BTR RC-StB)
- PAIGE-GREEN, P. (2009): Lessons learned during regular monitoring of in situ pavement bearing capacity conditions. In: Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (S. 1505-1516). London: Taylor & Francis Group
- PLEHM, T., & KIRCHNER, S. (1999): Klimatologische Untersuchungen zur Präzisierung der Frosteinwirkungszonen im Land Brandenburg. Straße und Autobahn (04/99), S. 183-185
- RADENBERG, M., & CETINKAYA, R. (2009): Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten in den Wirtschaftsjahren 2005 und 2006. Abgerufen am 10.06.2010 von [http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/verkehrswegbau/forschung/abgeschlosseneprojekte/umfrage\\_2005-2006\\_veroeffentlichung.pdf](http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/verkehrswegbau/forschung/abgeschlosseneprojekte/umfrage_2005-2006_veroeffentlichung.pdf)
- RADENBERG, M., & CETINKAYA, R. (2008): Schlussbericht zum FE 89.0182/2006/AP „Frosthebungsversuche an ziegelreichen RC-Baustoffen“
- SCELLENBERGER, W. (1999): Vergleichende Tragfähigkeitsmessungen mit verschiedenen Meßgeräten auf flexiblen Straßenkonstruktionen. Straße und Autobahn (6/99), S. 314-322
- STRASSER, W., HENÖGL, O., PREMSTALLER, M., & WALDHANS, H. (2001): Frosthebungsverhalten von ungebundenen Tragschichten, Straßenforschung, Heft 508. Wien: Bundesmi-

nisterium für Verkehr, Innovation und Technologie

- STRAUBE, E., JANSEN, D., GRÄTZ, B., HOTHAN, J., KARCHER, C., LORENZL, H., et al. (2010): Bewertung der Tragfähigkeit der Unterlage einer Asphaltbefestigung mit Tragschichten ohne Bindemittel durch FWD-Messungen. Straße und Autobahn (01/2010), S. 19-24
- TOUSSAINT, A. (1997): Zur Verwitterungsbeständigkeit von RC-Baustoffen. Straße und Autobahn (9/97), S. 497-501
- Transport Research. (1997): COST 324: Long Term Performance of Road Pavements, Final report of the action. Luxemburg
- van GURP, C. (1995): Characterization of seasonal influences on asphalt pavements with the use of Falling Weight Deflectometers. Delft: Technische Universiteit, Faculteit der Civiele Techniek
- von BECKER, P. (1976): Zur Annahme wirklickeitsnäherer E-Moduli als Kennwerte für das elastische Verformungsverhalten flexibler Straßenbefestigungen bei elastizitätstheoretischen Beanspruchungsrechnungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 204, Bonn: Bundesministerium für Verkehr
- WEINGART, W. (2009): Eignung von Gemischen für hydraulisch gebundene Tragschichten nach Europäischer Norm für Anwendungen in Deutschland. Straße und Autobahn (5/2009), S. 299-305
- WEINGART, W. (2007-2010): Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer – Prüfberichte Erprobungsstrecke Seelow. Unveröffentlicht
- WEINGART, W., & WIELAND, M. (2005): Weiterentwicklung des Frosthebungsversuchs. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 927, Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
- WOLF, M. (2006): Ermittlung der Infiltrationsrate in situ mit dem Doppelring-Infiltrometer (Prüfbericht). Unveröffentlicht
- WSDOT (2010): Abgerufen am 26.05.2010 von [http://training.ce.washington.edu/wsdot/Modules/09\\_pavement\\_evaluation/09-5\\_body.htm](http://training.ce.washington.edu/wsdot/Modules/09_pavement_evaluation/09-5_body.htm)

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

### 2000

S 20: 36. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 14,00

S 21: Walzbeton: Ergebnisse aus neuester Forschung und langjähriger 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-Tragschicht an der B54 bei Stein-Neukirch  
Eisenmann, Birmann

Teil 4: Temperaturdehnung, Schichtenverbund, vertikaler Dichteverlauf und Ebenheit von Walzbeton  
Burger € 17,00

### 2001

S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenerhaltung  
€ 19,50

S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen  
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany, v. d. Elshout, Sym € 10,50

### 2002

S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - 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 Konsolidationsverfahren  
Koch € 17,50

S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 16,50

### 2003

S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - 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 Bundesfernstraßen – 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 Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saarbrücken € 13,50

### 2004

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

### 2005

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

### 2006

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 polymermodifizierten 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

### 2007

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](http://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](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

## 2008

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](http://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](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hirsch € 16,00

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  
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)  
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

## 2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen  
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt  
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode  
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

## 2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 21./22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes  
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten  
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA) Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus  
Freudenstein, Birmann € 14,00

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen  
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.  
Ripke

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen  
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen  
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.  
Jansen, Kurz € 16,00

---

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](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.