

## Evaluation ressourcenschonender Tragschichten

FA 6.096

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau (Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg)

Bearbeiter: Radenberg, M. / Sedaghat, N. / Kollar, J. / Flottmann, N.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Februar 2014

### 1 Problemstellung und Zielsetzung

Der Einsatz von rezyklierten Baustoffen (RC-Baustoffen) in Tragschichten ohne Bindemittel ist seit vielen Jahren eine ökologisch und ökonomisch anerkannte Vorgehensweise im Straßenbau. Bei der Dimensionierung solcher Schichten werden in den geltenden Regelwerken im Vergleich zu konventionellen Tragschichten ohne Bindemittel keine spezifischen Vorgaben gemacht. Somit werden selbsterhärtende Eigenschaften der Betonanteile im RC-Baustoffgemisch, die für eine nachträgliche Erhöhung der Tragfähigkeiten einer solchen Schicht führen können, außer Acht gelassen.

Weiterhin bestehen Bedenken bezüglich der dauerhaften Wasserdurchlässigkeit und der Raumbeständigkeit von Schichten aus RC-Baustoffen. Die dauerhafte Durchlässigkeit ist bei einem intakten, dichten Asphaltüberbau zwar nicht von maßgebender Bedeutung, kann aber bei versickerungsfähigen Befestigungen wie Pflasterflächen zu erheblichen Schäden am Oberbau führen.

Die Raumbeständigkeit dieser Schichten wird aufgrund der Vielzahl der im RC-Baustoffgemisch enthaltenen Stoffgruppen und den Möglichkeiten des Auftretens von chemischen Prozessen zwischen diesen teilweise kritisch betrachtet. Hierbei spielen sulfathaltige Inhaltsstoffe eine tragende Rolle. Neben der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR), die zur Quellung von Alkalimetallsilicatgel und somit einer Volumenzunahme des Baustoffs führen können [Benedix, 2011], ist hier der äußere Sulfatangriff zu nennen. Hierbei werden die im Beton vorhandenen kristallisierten Calciumhydroxide durch den Angriff von Sulfaten aufgelöst, wodurch Gips entsteht. Gips kann mit Bestandteilen des Zements zu Ettringit reagieren. Dies hat eine etwa achtfache Volumenvergrößerung zufolge [Knoblauch, 2013]. Ein weiterer Prozess, der durch den Angriff von Sulfaten auf Beton entstehen kann, ist die Bildung von Thaumasit durch Reaktion des Sulfats mit Carbonat, Silicat, Calciumionen und Wasser. Durch Thaumasit werden die CSH-Phasen im Beton abgebaut, was zu einer Auflösung des Betongefüges führt (Benedix, 2011).

In diesem Forschungsvorhaben wurden die Eigenschaften von Tragschichten ohne Bindemittel aus RC-Baustoffen unter Asphaltbefestigungen nach längerer Liegedauer untersucht. Ziel des Vorhabens war der detaillierte Nachweis der Gebrauchseigenschaften solcher Tragschichten. Der Schwerpunkt lag in der Bestimmung der Tragfähigkeit, der Wasserdurchlässigkeit, der stofflichen Zusammensetzung und des Frostverhaltens.

### 2 Untersuchungsprogramm

Zunächst wurden 16 Strecken ausgewählt, die möglichst unterschiedliche Eigenschaften in ihrem Oberflächenzustand, ihrer Verkehrsbelastung, ihrer Bauklasse und ihrer Lage aufweisen sollten. Dabei wurden alle in Deutschland vorhandenen Frosteinwirkungszonen abgedeckt. Die gewählten Strecken sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Neben diesen Strecken standen Daten und Aufzeichnungen einer umfangreichen Versuchsstrecke in Seelow zur Verfügung. Auf dieser Strecke befinden sich insgesamt sechs Straßenabschnitte mit unterschiedlichen Ziegelanteilen zwischen 10 und 40 M.-% im RC-Gemisch.

Tabelle 1: Auflistung der untersuchten Strecken

Stadt	Straße	Baujahr	Bauklasse	Frostzone
Breddin	L 141, ABS 085	2007	IV	II
Neustadt/Dosse	B 102, ABS 610	2002	III	II
Mützlitz	L 98	2006	III	II
Berliner Stadtgrenze bis Knoten B101n/L 76	B 101 n	2003	SV II	II
Gelsenkirchen	Hofstraße	2001	IV	I
Gelsenkirchen	Weberstraße	1993	IV	I
Gelsenkirchen	Munscheidstraße	1994	III	I
Gelsenkirchen	Overwegstraße	2001/02	III	I
Münster	Frankenweg	2006	IV	I
Münster	Kinderhauser Str.	1999	IV	I
Münster	Vogel-von-Falkenstein-Straße	1997	V	I
Münster	Silberbrink	unbekannt		I
Mülheim a. d. R.	Weseler Straße	2003	III	I
Mülheim a. d. R.	Mannesmannallee	1995	II	I
Chemnitz	Dantestraße	2003	V	III
Chemnitz	Hermersdorfer Str.	2001	IV	III

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden an den Strecken Messungen mit dem Benkelman-Balken (BB) (FGSV-Arbeitspapier Nr. 33 Teil B 1, 2005) und dem Falling Weight Deflectometer (FWD) (FGSV-Arbeitspapier Nr. 33 Teil B 2.1, 2008) durchgeführt. Anhand der gemessenen Einsenkungen wurden zwei Punkte ausgewählt, an denen Bohrkerne mit einem Durchmesser von 300 mm entnommen wurden, sodass auf der Tragschicht aus RC-Baustoffen Lastplattendruckversuche und weitere FWD-Messungen erfolgen konnten. Im Anschluss daran wurde die Wasserdurchlässigkeit der Schicht überprüft und eine Probe des Materials für Laboruntersuchungen entnommen. Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit wurden die österreichischen Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen 11.06.29 Durchlässigkeit Baustellen (RVS – Teil 11.06.29, 1997) herangezogen und der dort beschriebene Ausschüttversuch angewendet. Hierbei wurde im Bohrloch eine Mulde ausgehoben, in die eine definierte Menge Wasser gegeben wurde. Es wurde die Zeit bis zum vollständigen Absickern des Wassers gemessen. Über das bekannte Volumen der Grube konnte so ein Infiltrationsbeiwert abgeschätzt werden.

Das Material aus der Grube wurde für die Bestimmung des In-situ-Wassergehalts luftdicht verpackt.

Im Labor wurden die Materialeigenschaften der RC-Baustoffe bestimmt. Hierzu zählen die Bestimmung der Korngrößenverteilung nach TP Gestein-StB, Teil 4.1.2 (2008), stofflichen Zusammensetzung nach TL Min-StB 94, M RC (2002), Rohdichte nach TP Gestein-StB, Teil 3.2.2 (2008), Wasserdurchlässigkeit mittels Standrohrinfiltrometer nach TP Gestein-StB, Teil 8.3.1 (2012), des Schlagzertrümmerungswerts nach TP Gestein-StB, Teil 5.1.2 (2008) und der Proctordichte nach TP Gestein-StB, Teil 8.1.1 (2012). Letztere wurde für Frosthebungsversuche nach dem Entwurf der TP BF-StB, Teil FHV, basierend auf dem Forschungsbericht "Weiterentwicklung des Frosthebungsversuches" [Weingart & Wieland, 2005], benötigt.

Die Bewertung der Eigenschaften der entnommenen Materialproben erfolgt zunächst basierend auf den zum Einbaupunkt gültigen Regelwerken und weiterhin durch Prüfung der zum Zeitpunkt des Forschungsvorhabens gültigen Anforderungen.

Zusätzlich wurden vorhandene Bauakten ausgewertet, um Erkenntnisse zu den Bedingungen und Eigenschaften der Strecken zum Zeitpunkt des Einbaus zu erlangen. Hierdurch können vergleichende Betrachtungen und damit Veränderungen der Schichteigenschaften abgeleitet werden. Unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnisse wurden Dimensionierungsberechnungen mit dem Programm PaDesTo durchgeführt. Ziel der Berechnungen war es, eine mögliche Reduzierung der Schichtdicken gebundener Schichten durch erhöhte  $E_{v2}$ -Moduln ungebundener Schichten festzustellen. Hierzu wurden exemplarisch Dimensionierungsberechnungen mit typischen Randbedingungen für Straßen der Belastungsklassen Bk100, Bk3,2 und Bk1,0 durchgeführt.

### 3 Untersuchungsergebnisse

An den in Tabelle 1 aufgeführten Untersuchungsstrecken wurde zunächst der optische Zustand festgestellt. Die meisten Strecken befanden sich in einem guten Zustand mit keinen oder nur gelegentlichen, punktuellen Schadstellen. Einige der Strecken zeigten deutlichere Schädigungen, vor allem in Form von Flickstellen. Visuell und auch unter Berücksichtigung der Messergebnisse ließ sich aber an keiner Strecke ein Zusammenhang zwischen Schaden und mangelhafter Funktionalität der ungebundenen Tragschicht feststellen.

An den ausgewählten Strecken beziehungsweise Messpunkten wurden folgende Schichteigenschaften ermittelt:

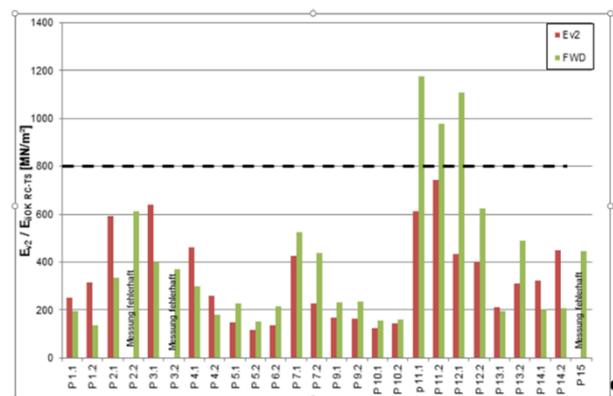
- Tragfähigkeit  $E_{\alpha, BB}$  auf der Asphaltoberfläche mittels Benkelman-Balken
- Tragfähigkeit  $E_{\alpha, FWD}$  auf der Asphaltoberfläche mittels FWD
- Tragfähigkeit  $E_{\alpha, RC-TS}$  auf der Tragschicht aus RC-Baustoffen mittels FWD
- Wasserdurchlässigkeit der Tragschicht aus RC-Baustoffen

Die Tragfähigkeiten der einzelnen Messpunkte mittels Lastplattendruckversuch und die aus den FWD-Messungen ermittelten äquivalenten E-Moduln auf der Oberkante der ungebundenen

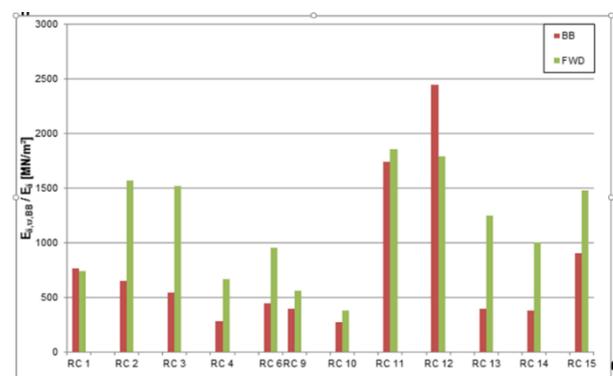
Tragschicht sind in Bild 1 gegenübergestellt. Es zeichnet sich unterhalb des Werts von 800 MN/m<sup>2</sup> ein qualitativ gleichwertiger Verlauf der Tragfähigkeitsmoduln ab. Die Differenzen zwischen den FWD-Messungen und den Ergebnissen der Lastplattendruckversuche liegen zwischen 17 MN/m<sup>2</sup> (P 10.2 beziehungsweise P 13.1) und 255 MN/m<sup>2</sup> (P 2.1). Es lässt sich die Tendenz ableiten, dass mit steigender Tragfähigkeit der RC-Schicht die Differenzen zwischen den einzelnen Messmethoden zunehmen.

Bei der Gegenüberstellung der Mittelwerte der Tragfähigkeiten an der Oberfläche, ermittelt durch den Benkelman-Balken und das FWD, in Bild 2 lässt sich tendenziell ein vergleichbares Bild erkennen wie auf der Oberkante der RC-Schicht. Die Strecken 11 und 12 weisen auch auf der Asphaltdeckschicht sehr hohe Tragfähigkeiten auf, was die hohen äquivalenten E-Moduln auf der Oberkante der Tragschicht bestätigt.

Zusammenfassend zeigt sich somit, dass die durch den Lastplattendruckversuch und durch die FWD-Messungen ermittelten Tragfähigkeiten der ungebundenen Schicht bei allen Strecken, bis auf St. 11 und 12, als gleichwertig betrachtet werden können. Durch den Abgleich mit den Tragfähigkeiten an der Oberfläche lässt sich erkennen, dass für die zwei abweichenden Strecken die äquivalenten E-Moduln aus den FWD-Messungen vermutlich glaubwürdiger sind.



**Bild 1: Vergleich der verschiedenen E-Moduln auf der Tragschicht aus RC-Baustoff-Gemischen**



**Bild 2: Vergleich der mittleren Tragfähigkeiten auf der Asphalt-oberfläche aller Strecken**

Die Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeitsmessungen in situ zeigten für alle Strecken einen undurchlässigen Zustand. Bei den Messungen wurde der Versuch abgebrochen, da sich die

Höhe des Wasserspiegels nach mindestens 45 Minuten Prüfdauer nicht veränderte, was einem Infiltrationsbeiwert von  $< 5 \times 10^{-7}$  m/s entspricht. Lediglich an zwei Messpunkten konnte ein Absinken des Wassers und somit eine messbare Durchlässigkeit der Schicht mit  $k_{is} = 3 \times 10^{-4}$  m/s und  $k_{is} = 3 \times 10^{-5}$  m/s festgestellt werden. Die Ursache dafür lag aber unter Berücksichtigung der übrigen Prüfergebnisse in einer unzureichenden Verdichtung an diesen Punkten.

An den Ausbauproben der RC-Baustoffe wurden folgende Laboruntersuchungen durchgeführt:

- Lagerungsdichte
- Rohdichte
- In-situ-Wassergehalt
- Korngrößenverteilung
- Schlagzertrümmerungswert
- stoffliche Zusammensetzung
- Mineralogie (an ausgewählten Proben)
- Wasserdurchlässigkeit im Laborversuch
- Verhalten im Frosthebungsversuch

Die erschwerten Untersuchungsbedingungen in bis zu 40 cm Tiefe und die ohnehin sensible Dichtebestimmung mittels Flüssigkeitsersatzverfahren führte an einigen Messpunkten zu nicht plausiblen Messergebnissen in den Lagerungsdichten, sodass diese nicht bei der Auswertung berücksichtigt wurden.

Die Wassergehalte der Entnahmeprobe wiesen große Schwankungen, auch zwischen den Einzelproben einer Strecke, auf. Dies ist vermutlich durch zwischenzeitliche, starke Niederschlagsereignisse zu begründen.

Der Schlagzertrümmerungswert überschritt bei drei Proben den Grenzwert von 28 M.-% für Schottertragschichten nach den gültigen Regelwerken. Hier wurden lediglich die Anforderungen an ein Baustoffgemisch für Frostschutzschichten erreicht, was für RC-Baustoffe nicht ungewöhnlich ist. Mit dem Standrohr-Infiltrimeter wurde im Labor ebenfalls die Wasserdurchlässigkeit der RC-Baustoffe untersucht. An sieben Proben konnte hier ein Infiltrationsbeiwert  $k_{10}$  gemessen werden, der im Bereich einer schwachen Durchlässigkeit lag. Die restlichen Proben erwiesen sich auch im Laborversuch als undurchlässig.

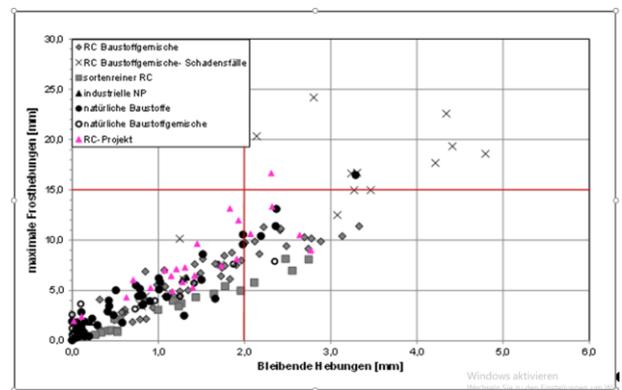
Die Korngrößenverteilungen der RC-Baustoffe zeigten zum Teil Abweichungen in den Einzelproben eines Baustoffs, aber größtenteils auch Abweichungen zu den zulässigen Grenzbereichen für eine STS 0/45 mm beziehungsweise FSS 0/45 mm. Diese wurden vor allem im Bereich der groben Gesteinskörnung offensichtlich bei RC-Baustoffen häufig nicht eingehalten. Vermutlich ist dies durch mangelnde oder fehlende Materialkontrolle in allen Produktionsschritten sowie Materialentmischungen bei Anlieferung und Einbau zu erklären.

Die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung ergab bei acht von 14 untersuchten Proben Abweichungen von den Sollwerten in einer oder zwei Stoffgruppen. Dies betraf alle reglementierten Stoffgruppen mit Ausnahme der Gruppe "Klinker, dichte Ziegel". Die Ergebnisse sind allerdings vor dem Hintergrund zu sehen, dass nur eine punktuell entnommene Probe

untersucht wurde. Die Prüfergebnisse der stofflichen Zusammensetzungen mit den orange markierten Sollwertüberschreitungen sind in Tabelle 2 dargestellt.

An ausgewählten Proben wurde die Mineralogie eines repräsentativen Probenteils mittels Röntgendiffraktometrie analysiert. Im Vordergrund stand hierbei die Untersuchung auf die raumunbeständigen Inhaltsstoffe Gips, Thaumasit und Ettringit. Diese konnten in keiner der Proben nachgewiesen werden, wodurch eine Raumunbeständigkeit aufgrund von treibenden Prozessen im Baustoff nicht zu befürchten ist.

Bei der Untersuchung des Frosthebungsverhaltens wurden je Probe unter anderem die maximale Hebung und die Resthebung nach dem Auftauprozess aufgezeichnet. Die Ergebnisse des Versuchs sind in Bild 3 aufgeführt. Die aufgetragenen Daten sind das am Lehrstuhl für Verkehrswegebau bisher ermittelte Gesamtdatenkollektiv vieler Projekte. Die Datenpunkte des hier behandelten Projekts sind als magentafarbenes Dreieck dargestellt. Die Proben der 15 Untersuchungsstrecken zeigten ein für RC-Baustoffe typisches Frosthebungsverhalten.



**Bild 3: Maximale und bleibende Hebung der RC-Proben im Frosthebungsversuch**

Zur Bewertung der Eigenschaften der Tragschichten aus RC-Baustoffen wurde der Einfluss der stofflichen Zusammensetzung der Baustoffe beziehungsweise der maßgebenden Stoffgruppe (Beton) auf die Tragfähigkeit und die Wasserdurchlässigkeit (Infiltration) überprüft.

Bild 4 stellt den Einfluss des Betonanteils auf die Verformungsmoduln aus den Lastplattendruckversuchen ( $E_{v2}$ ) dar. In Bild 5 wird der Einfluss auf die Verformungsmoduln aus FWD-Messungen ( $E_{aOKRC-TS}$ ) gezeigt. Es lässt sich in beiden Fällen tendenziell erkennen, dass eine Tragschicht aus RC-Baustoffgemischen tragfähiger ist, je höher der Betongehalt im RC-Baustoff ist. Es können Wirkungsbereiche des Betongehalts auf die Tragfähigkeit der SoB entnommen werden. Beide Bilder zeigen, dass die Tragfähigkeit bei einem Betongehalt unter 40 M.-% höchstens  $400 \text{ MN/m}^2$  beträgt, ab einem Betongehalt von 60 M.-% aber überwiegend Werte über  $500 \text{ MN/m}^2$  erreicht werden.

Tabelle 2: Stoffliche Zusammensetzungen der untersuchten RC-Proben

Strecke	Festgestein	Kies	Beton	Schlacke	Ausbauasphalt	Klinker, dichte Ziegel	Kalksandstein, Putz	Leicht-, Dämm- baustoffe	Fremdstoffe
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
Sollwerte	-	-	-	-	≤ 30	≤ 25	≤ 5	≤ 1	≤ 0,2
St. 1	18,9	3,1	35,8	18,6	7,5	16,1	0,0	0,0	0,0
St. 2	9,3	5,4	76,9	0,5	3,5	4,3	0,0	0,0	0,1
St. 3	4,1	6,9	82,1	2,9	0,1	3,5	0,0	0,0	0,4
St. 4	18,1	6,4	28,4	16,3	9,7	8,8	11,7	0,2	0,4
St. 5	35,6	11,0	26,2	4,1	9,8	11,4	0,4	0,6	0,9
St. 6	34,5	4,3	27,3	9,2	6,8	3,0	14,5	0,0	0,4
St. 7	11,8	8,6	57,1	1,4	19,1	1,4	0,6	0,0	0,0
St. 8	18,9	3,3	60,9	6,8	8,0	2,0	0,0	0,0	0,1
St. 9	27,2	4,1	13,7	35,1	0,9	13,9	5,1	0,1	0,0
St. 10	28,2	1,9	10,3	7,7	45,8	5,5	0,6	0,0	0,0
St. 11	6,4	3,4	81,9	0,0	0,3	7,8	0,0	0,0	0,2
St. 12	20,8	5,0	53,4	0,2	14,0	5,9	0,5	0,0	0,2
St. 13	50,4	6,8	23,5	9,3	0,8	2,8	4,0	2,1	0,4
St. 14	9,5	5,7	5,4	12,1	62,8	1,0	3,4	0,0	0,1

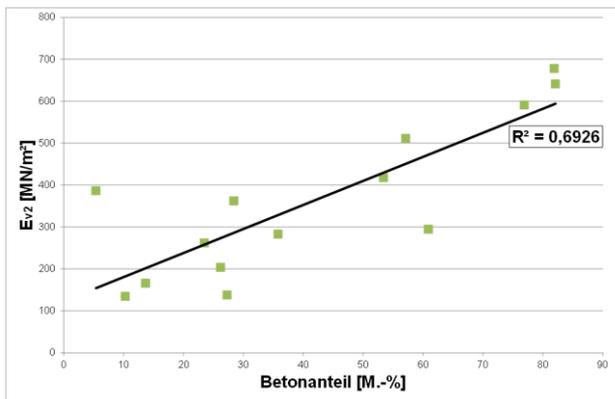


Bild 4: Einfluss des Betonanteils auf das Verformungsmodul  $E_{v2}$

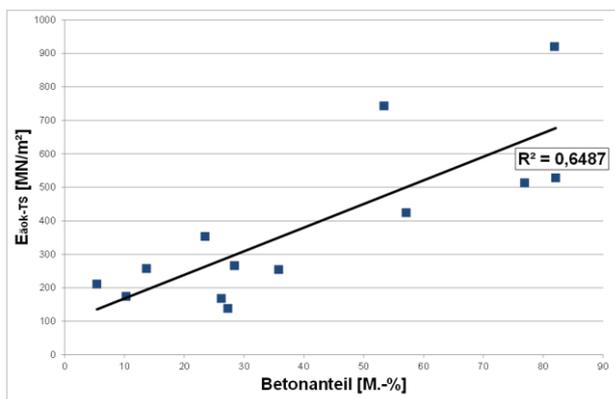


Bild 5: Einfluss des Betonanteils auf das Verformungsmodul  $E_{aok-TS}$

Hier lässt sich kein klarer Trend erkennen. Zwar weisen die RC-Baustoffe mit den geringsten Betonanteilen (5,4 beziehungsweise 13,7 M.-%) die niedrigsten bleibenden Hebungen im Frosthebungsversuch auf (Bild 6), mit zunehmendem Betonanteil ist aber keine statistisch signifikante Abhängigkeit zur bleibenden Hebung festzustellen.

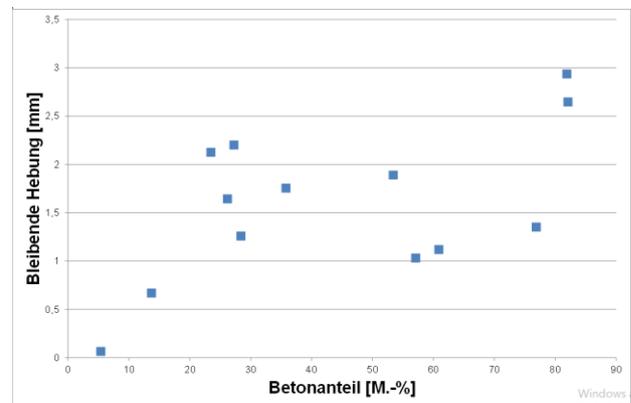
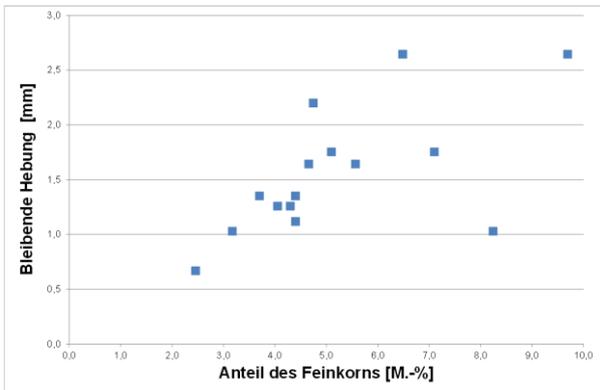


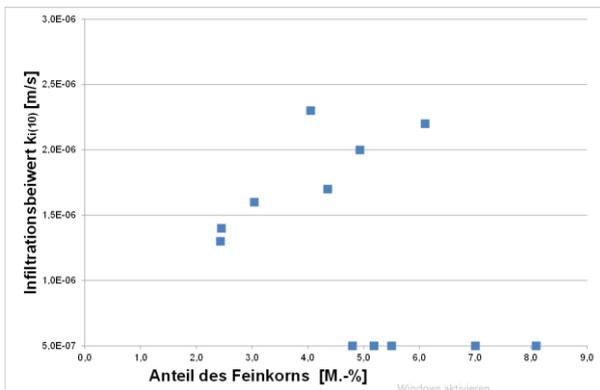
Bild 6: Einfluss des Betonanteils auf das Frosthebungsverhalten

Weiterhin wurde der Einfluss des Feinanteils der Baustoffgemische auf die bleibenden Hebungen und Wasserdurchlässigkeiten geprüft, wie in Bild 7 und Bild 8 zu erkennen ist.

Es ist in Bild 7 der erwartete Trend zu erkennen, dass die bleibenden Hebungen mit zunehmendem Feinanteil steigen. Bild 8 führt zu dem Schluss, dass bis zu einem Feinanteil von 5 bis 6 M.-% noch geringe Infiltrationsraten festgestellt werden können, die allerdings im Bereich der Prüfstreuung schwanken und keinen Zusammenhang erkennen lassen.



**Bild 7: Einfluss des Feinkornanteils auf das Frosthebungsverhalten**



**Bild 8: Einfluss des Feinkornanteils auf die Durchlässigkeit**

Weiterer Gegenstand des Untersuchungsprogramms war die Durchführung einer rechnerischen Dimensionierung mit dem Dimensionierungsprogramm PaDesTo, basierend auf den gemessenen Tragfähigkeiten der RC-Schichten. Hierzu wurden exemplarisch Dimensionierungsberechnungen mit typischen Randbedingungen für Straßen der Belastungsklassen Bk100 (mit  $B = 100,35$  Mio.), Bk3,2 (mit  $B = 3,19$  Mio.) und Bk1,0 (mit  $B = 0,996$  Mio.) nach RStO 12 durchgeführt. Die Schottertragsschicht aus RC-Baustoffen hatte dabei für alle Belastungsklassen eine Dicke von 20 cm. Für die Tragfähigkeiten wurde ein minimaler Wert von  $E_{v2} = 150$  MN/m<sup>2</sup> gewählt. Obwohl die Untersuchungen in Bild 1 Tragfähigkeiten von bis zu rd. 750 MN/m<sup>2</sup> dokumentieren, wurde als maximaler Wert ein Verformungsmodul von  $E_{v2} = 260$  MN/m<sup>2</sup> angesetzt. Die Dimensionierungsberechnungen ergaben, dass die erforderliche Dicke des Asphaltpakets bei einer Tragfähigkeit der ungebundenen Tragsschicht von  $E_{v2} = 260$  MN/m<sup>2</sup> um 1 cm bei Bk100 und Bk3,2 sowie um 2 cm bei Bk1,0 reduziert werden kann.

## 4 Folgerungen für die Praxis

Die Feld- und Laborversuche im Rahmen des hier dokumentierten Forschungsprojekts führten zu folgenden Erkenntnissen:

- Die Tragfähigkeiten der Schichten aus RC-Baustoffen liegen in der Regel über den für die Bauweise erforderlichen Werten.
- Die Frostempfindlichkeiten und Raumbeständigkeiten sind als unbedenklich einzustufen.

- Die geringen Wasserdurchlässigkeiten sind nur bei "dichter" Überbauung unbedenklich.

Die sehr geringen Wasserdurchlässigkeiten sollten beim Einsatz unter Pflasterbefestigungen und anderen versickerungsfähigen Flächen kritisch hinterfragt werden.

Die teilweise ungleichmäßigen stofflichen und granulometrischen Eigenschaften der RC-Baustoffe können grundsätzlich an vielen Stellen der Produktionskette einschließlich der punktuellen Probenahme entstanden sein. Eine Materialkontrolle nach allen Produktionsschritten wäre zur Ursachenermittlung sinnvoll.

Aufgrund der im Vergleich zu den erforderlichen Werten hohen Tragfähigkeiten ist der Baustoff für ungebundene Tragschichten geeignet. Hierbei lässt sich rechnerisch eine Verminderung der Dicke des Asphaltüberbaus um bis zu zwei cm erreichen. Da die Tragfähigkeit in Abhängigkeit vom Betonanteil variiert, sind gegebenenfalls Anforderungen an die Höhe des Betonanteils solcher spezieller RC-Baustoffe zu formulieren.

## 5 Literaturverzeichnis

Benedix, R.: Bauchemie. Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten; Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011

FGSV: Tragfähigkeiten – Benkelman-Balken: Gerätebeschreibung, Messdurchführung; Arbeitspapier Nr. 33, Teil B 1, Köln, 2005

FGSV: Tragfähigkeiten – Falling Weight Deflectometer (FWD): Gerätebeschreibung, Messdurchführung – Asphaltbauweisen; Arbeitspapier Nr. 33, Teil B 2.1, Köln, 2008

FGSV: Merkblatt über die Wiederverwendung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau; M RC. Köln, 2002

FGSV: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen; RStO 12, Köln, 2012

FGSV: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – Einpunkt-Proctorversuch und Dreipunkt-Proctorversuch; TP BF-StB, Teil B 6.2. Köln, 1999

FGSV: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau – Frosthebungsversuch; Entwurf TP BF-StB, Teil FHV, Köln, 2009

FGSV: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Rohdichte; TP Gestein-StB, Teil 3.2.2, Köln, 2008

FGSV: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebung; TP Gestein-StB, Teil 4.1.2, Köln, 2007

FGSV: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Schlagprüfung an Gesteinskörnungen der Kornklasse 8/12,5 mm; TP Gestein-StB, Teil 5.1.2, Köln, 2008

FGSV: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Bestimmung der Proctordichte; TP Gestein-StB, Teil 8.1.1, Köln, 2012

- FGSV: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Bestimmung des Infiltrationsbeiwertes mit dem Standrohr-Infiltrometer – Laborverfahren; TP Gestein-StB, Teil 8.3.1, Köln, 2012
- FSV: Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen – Qualitätssicherung Bau – Prüfungen – Steinmaterial – Teil 29: Durchlässigkeit Baustelle, RVS 11.06.29, Wien, 1997
- Knoblauch, H., Schneider, U.: Bauchemie; Werner Verlag, Köln, 2013
- PaDesTo: Pavement Design Tool, TU Dresden, 2002
- Tabbert, G.: Qualität von mineralischen Straßenbaustoffen, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 13, Bergisch Gladbach, 1996
- Weingart, W., Wieland, M.: Weiterentwicklung des Frosthebungsversuches; Heft 927, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 2005