

# Straßenbefestigungen aus dünnen Asphaltsschichten auf qualitativ hochwertigen Tragschichten ohne Bindemittel für Bundesstraßen

FA 9.175

Forschungsstellen: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)

RWTH Aachen, Institut für Straßenwesen (isac) (Prof. Dr.-Ing. habil. M. Oeser)

Bearbeiter: Meyer, A. / Wellner, F. / Werkmeister, S. / Oeser, M. / Canon Falla, G.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Dezember 2014

## 1 Einleitung

### 1.1 Vorbemerkungen

Für das Infrastrukturnetz der Bundesrepublik Deutschland spielen Straßen eine zentrale Rolle. Ziel ist es, durch einen effizienten und umweltschonenden Einsatz der vorhandenen Baustoffe haltbare und dauerhafte Befestigungen herzustellen. Die einzelnen Strukturbereiche von Straßenbefestigungen, das heißt die gebundenen und ungebundenen Schichten der Befestigungen, sind hierfür entsprechend ihrer unterschiedlichen Aufgaben und Anforderungen zu optimieren. Straßenaufbauten sollen beispielsweise in der Lage sein, den während des Nutzungszeitraums auftretenden Beanspruchungen ohne vorzeitige Schädigung zu widerstehen. Hierfür sind die gebundenen Schichten adäquat zu stützen. Sowohl in Asphalt- als auch in Betonbefestigungen haben sich für diese Aufgabe (auch bei sehr hoher Verkehrsbelastung) Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) ausgezeichnet bewährt. Dabei beteiligen sich die verschiedenen Schichten auf unterschiedliche Weise an der Gesamttragwirkung. Beispielsweise tragen die gebundenen Schichten Lasten vorrangig über Biegung ab, während in ungebundenen Schichten Lastausbreitung hauptsächlich über Reibung im Korngerüst und den Kontakt normal zur Kornoberfläche erfolgt. In dauerhaften Befestigungen sind diese verschiedenen Mechanismen der Lastabtragung genau aufeinander abgestimmt. Für hochbelastete flexible Befestigungen haben sich hierfür Strukturen mit relativ dicken Asphaltsschichten auf moderat belasteten ToB bewährt.

Da die Rohölressourcen abnehmen und gleichzeitig die Nachfrage nach aus Öl hergestellten Produkten steigt, war in den letzten Jahren eine deutliche Verteuerung von Rohölpreisen zu verzeichnen. Weltweit wird jedoch nach wie vor für den Asphaltstraßenbau aus Rohöl hergestelltes Bitumen eingesetzt. Deshalb ist der Asphaltstraßenbau (besonders bei Befestigungen mit dicken Asphaltsschichten) mit immer höheren Kosten verbunden. Vor diesem Hintergrund sind alternative Wege für einen ökologisch und ökonomisch sinnvollen Bau von Straßen zu entwickeln.

Aufbauend auf den Erfahrungen im Ausland (zum Beispiel Australien, Neuseeland, USA, Schweden, Finnland usw.) erscheint es möglich, für niedrig beanspruchte Straßenbefestigungen eine Bauweise mit dünner Asphaltsschicht auf einer

qualitativ hochwertigen Tragschicht ohne Bindemittel erfolgreich anzuwenden.

### 1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Gesamtziel des Forschungsvorhabens war es, Straßenbefestigungen mit dünnen Asphaltdeckschichten auf einer qualitativ hochwertigen ToB für die Anwendung für Bundesfernstraßen mit geringer Verkehrsbelastung in Deutschland zu konzipieren. Ziele des Forschungsprojekts sind insbesondere:

- Charakterisierung des nicht-linear elastischen und plastischen Verformungsverhaltens von ungebundenen Gesteinskornmischungen unter Berücksichtigung der zyklischen und zugleich hohen Beanspruchungen der ToB in Straßenbefestigungen mit dünnen Asphaltdeckschichten.
- Entwicklung eines einfachen analytischen Dimensionierungsansatzes für niedrig beanspruchte Straßenbefestigungen mit dünnen Asphaltdeckschichten.

## 2 Literaturanalyse

Zunächst waren anhand der Ergebnisse einer umfassenden Studie ausländischer Literatur die Erfahrungen in anderen Ländern mit dieser Bauweise zusammenzutragen und zu prüfen, inwieweit diese Ansätze auf in Deutschland herrschende Bedingungen und Verhältnisse übertragbar sind. Dabei wurden insbesondere die baulichen, verkehrlichen und klimatischen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung der Bauweise in Deutschland herausgearbeitet. Zudem wurden Erfahrungen in Australien, Neuseeland, den USA und Schweden hinsichtlich der zu erwartenden Nutzungsdauer, Erhaltung und Umweltverträglichkeit von niedrig beanspruchten Straßen (Low Volume Roads, LVR) zusammenzutragen. Hinsichtlich der Untersuchung des klimatischen Einflusses auf das Verhalten von LVR erfolgte eine Analyse des schwedischen Dimensionierungsansatzes. Hier erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit dem Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Prof. Sigurdur Erlingsson, um die Erfahrungen der skandinavischen Länder zusammenzustellen. Bezüglich der Zusammensetzung der Asphaltdeckschichten wurde untersucht, welche Asphaltgemische im Ausland für LVR eingesetzt werden. Im Ergebnis der Literaturstudie wurden Möglichkeiten der Konzeption von Straßenbefestigungen mit dünnen Asphaltdeckschichten auf einer qualitativ hochwertigen ToB für die Anwendung für Bundesfernstraßen mit geringer Verkehrsbelastung in Deutschland entwickelt. In einem weiteren Schritt erfolgten Untersuchungen hinsichtlich der Auswahl geeigneter Baustoffe (Gesteinskornmischungen und Asphalte) für diese Bauweisen.

Für die ToB unter dünnen Decken aus Asphalt sind – besonders im oberflächennahen Bereich – hochwertige Materialien einzusetzen. Hierbei ist – neben der Verformungsresistenz – besonders auf die Realisierung einer guten Kornverzahnung und einer hohen Kornfestigkeit zu achten. Aus diesem Grund sind an diese Materialien besondere bautechnische Anforde-

rungen bezüglich Kornoberfläche, Kornform, Schlagzertrümmerung, Einbauwassergehalt, Lagerungsdichte etc. zu stellen. Um diese Anforderungen einhalten zu können und trotzdem eine wirtschaftliche Umsetzung derartiger Befestigungen sicherzustellen, wird vorgeschlagen, für verschiedene Schichttiefen individuelle Anforderungsprofile zu erstellen. Um dauerhaft ein ausreichend hohes Maß an struktureller Integrität der Befestigungen sicherzustellen, empfiehlt es sich, zukünftig nicht nur die Längs- und Querebenheit sowie die Oberflächeneigenschaften (Risse, Griffigkeit etc.) zu untersuchen, sondern – wie in vielen anderen Ländern bereits üblich – auch die Tragfähigkeit in die Untersuchungen einzubeziehen [BLA 12].

### 3 Laborversuche

Anschließend wurden im Rahmen von Laborversuchen an ausgewählten ungebundenen Baustoffgemischen Triaxialversuche durchgeführt, um die entsprechenden Eingangsparameter für eine rechnerische Dimensionierung zu bestimmen und die Baustoffgemische hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens einzuschätzen. Dabei ist ebenfalls ein Material aus Schweden im Triaxialversuch getestet worden, um eine Validierung des Dimensionierungsansatzes vornehmen zu können.

Die Versuche zur Bestimmung der elastischen Modellparameter wurden prinzipiell nach den Vorgaben der prEN 13286-7 mit einem konstanten Zelldruck durchgeführt. Es wurde lediglich eine Anpassung der Spannungsverhältnisse an die Triaxialanlage der TU Dresden vorgenommen.

Des Weiteren wurden Multi-Stage-Triaxialversuche zur Beschreibung und Einschätzung des plastischen Verformungsverhaltens durchgeführt. Die Wahl der auf die Probekörper aufzubringenden Spannungsverhältnisse orientierte sich dabei an den in Australien und Neuseeland gewonnenen Erfahrungen [GON 09], [ARN 05] bei der Entwicklung einer praxisorientierten Prüfprozedur zur Beschreibung und Einschätzung des plastischen Verformungsverhaltens von ungebundenen Baustoffgemischen. Jedoch erfolgte eine Modifikation der von Arnold [ARN 05] vorgeschlagenen Versuchsprozedur.



Bild 1: Triaxialanlage der TU Dresden

Die Ergebnisse der Vorversuche wurden zur Einschätzung der Eignung der Baustoffgemische für ToB von niedrig beanspruchten Straßen nach den prEN 13286-7, Anhang C3 "Einstufung von Gesteinskornmischungen anhand von Versuchen zum elastischen Verformungsverhalten" herangezogen. Dabei hat sich gezeigt, dass ein Ranking der Versuchsmaterialien mit dieser Methode möglich ist. Insbesondere kann auch das Verhalten der ungebundenen Baustoffgemische bei hohen Wassergehalten eingeschätzt werden. Aus Sicht der Autoren kann empfohlen werden, dass für den Nachweis der Eignung der Baustoffgemische in LVR die Materialien bei Wassergehalten von 70 und 80 % vom optimalen Wassergehalt  $w_{opt}$  mindestens im Bereich Q2 (gemäß Bild 2) liegen müssen. Somit wären alle untersuchten Baustoffgemische bis auf das Andesit-Material für die Verwendung in ToB von LVR geeignet.

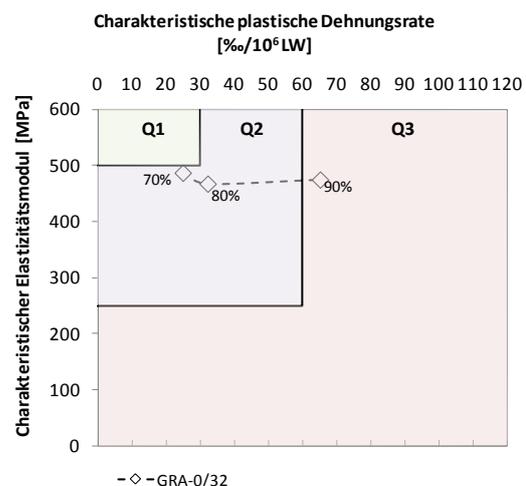


Bild 2: Beispiel für die Einstufung des Granodiorit 0/32 in Klassen

### 4 Validierung der Ergebnisse anhand von Feldversuchen

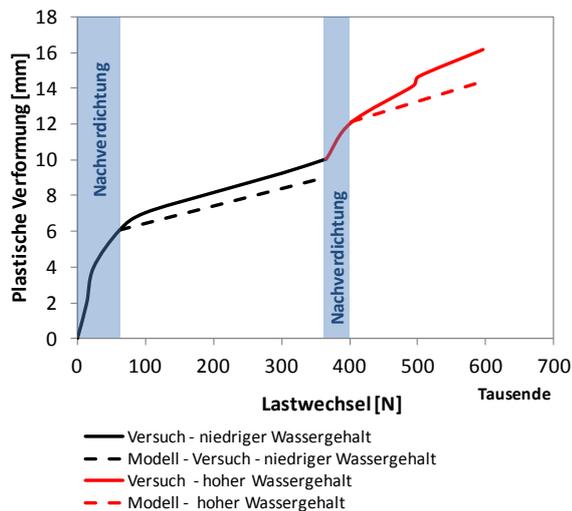
Im Rahmen des Vorhabens wurden die entwickelten Ansätze für ein Dimensionierungsverfahren für LVR exemplarisch mit den Ergebnissen von Feldversuchen verglichen, um eine Validierung der durchgeführten Berechnungen zu ermöglichen. Für diese Untersuchungen wurden vom VTI (Prof. Sigurdur Erlingson) in Linköping, Schweden, Ergebnisse und Materialparameter sowie das ungebundene Gesteinskornmisch von einem ausgewählten HVS (Heavy Vehicle Simulator – Bild 3)-Versuch zur Verfügung gestellt. Für das ungebundene Baustoffgemisch, das in dem HVS-Versuch verwendet wurde, wurden anhand der an der TU Dresden durchgeführten Triaxialversuche die notwendigen Parameter für die Berechnungen bestimmt.

Im Ergebnis der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass im ersten Stadium des Tests (zwischen Lastwechsel 50 000 und 350 000) die plastische Verformungsrate sehr gut mit der im Versuch beobachteten Rate übereinstimmt. Im zweiten Teststadium, also nach Erhöhung des Wassergehalts auf 80 %  $w_{opt}$ , ergibt sich jedoch ein Unterschied zwischen der im Versuch beobachteten und berechneten Rate der plastischen Verformungen, das heißt, die experimentelle Verformungsrate ist größer als die rechnerisch bestimmte Rate (Bild 4). Dies kann gegebenenfalls daran liegen, dass im Experiment bei Erhöhung

des Wassergehalts auch der Boden signifikant zum plastischen Verformungszuwachs beiträgt, was in den Berechnungen ausgeschlossen wurde. Es kann jedoch geschlussfolgert werden, dass das plastische Verformungsverhalten von ToB in situ nach Beendigung der Nachverdichtungsphase mit dem verwendeten Modell unter Verwendung der Ergebnisse der Triaxialversuche und in Zusammenhang mit den Finite Elemente (FE)-Rechnungen gut nachgebildet werden kann.



**Bild 3: HVS (Heavy Vehicle Simulator) des VTI in Schweden [WIE 08]**



**Bild 4: Spurrinnenentwicklung in Test SE05, Befestigung 1 (gebrochener Kies) und Befestigung 2 (Schotter) [WIE 08]**

## 5 Entwicklung von Dimensionierungsansätzen für LVR

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Dimensionierungsansätze für LVR entwickelt. Dabei ist zu beachten, dass das plastische Verformungsverhalten von Befestigungen mit dünner Asphalttschicht ganz wesentlich durch das Verhalten der ToB und nachgeordnet des Untergrunds beeinflusst wird. Im Ergebnis der Untersuchungen wurden zunächst aus den Ergebnissen der Triaxialversuche funktionale Zusammenhänge zwischen den aufgetragten Beanspruchungen, der Lastwechselzahl und der akkumulierten plastischen Dehnung aufgestellt. Diese Zusammenhänge wurden auf eine solche Weise in den Dimensionierungsprozess implementiert, dass eine Prognose der permanenten Oberflächenverformungen der Befestigung infolge des Verkehrs gelingt. Durch Definition einer maximal zulässigen Oberflächenverformung kann dann beanspru-

chungsspezifisch die zulässige Lastwechselzahl bestimmt werden.

Zur Festlegung der Steifigkeiten von geeigneten Asphalten für die LVR wurde auf Ergebnisse von an der TU Dresden durchgeführten Forschungsprojekten aufgebaut. Dabei konnten für die Asphaltdeckschicht, insofern keine Ergebnisse von Spaltzugschwellversuchen vorliegen, für die Tauperiode ein Elastizitätsmodul von 10 000 MPa und für normale Bedingungen ein Elastizitätsmodul von 3 000 MPa definiert werden.

Nachweise werden für die bleibenden Verformungen auf dem Planum und auf der Oberfläche der ToB geführt, mit dem Ziel, eine ausreichende Querebenheit der Befestigungen zu gewährleisten und die Entstehung von Spurrinnen zu vermeiden.

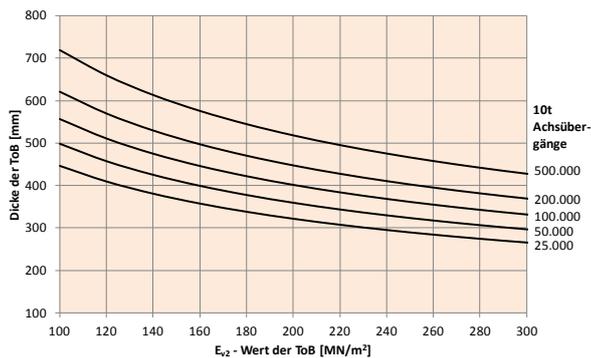
Zur Nachweisführung der bleibenden Verformungen auf dem Planum wird ein mechanistisch-empirischer Ansatz vorgeschlagen. Hierbei sind mithilfe eines Berechnungsverfahrens die maximalen elastischen Vertikaldehnungen (dimensionierungsrelevante Beanspruchungen) unmittelbar unterhalb des Planums zu ermitteln. Diese Dehnungen werden in eine Transferfunktion eingesetzt, mit deren Hilfe die ertragbare Anzahl von Lastwechseln unter dieser Beanspruchung ermittelt werden kann. Der Vorgang ist für alle Kombinationen aus Achslasten und Dimensionierungsfällen zu wiederholen und der Nachweis mithilfe der Miner-Hypothese zu führen.

Zum Nachweis der bleibenden Verformungen auf der Oberfläche der ToB sind mithilfe eines geeigneten Berechnungsmodells (für jede Kombination aus Achslast und Dimensionierungsfall) plastische Dehnraten zu ermitteln, die den Beitrag eines spezifischen Schichtdickenabschnitts (einer Subschicht) der ToB zum Anwachsen der plastischen Dehnungen der gesamten ToB liefern. Zur Bestimmung der plastischen Dehnraten sind zunächst die elastischen Vertikaldehnungen in verschiedenen Schichttiefen (Mittelpunkte der Subschichten) zu berechnen. Sind diese bekannt, können die plastischen Dehnraten bestimmt werden. Diese sind dann mit den Dicken der jeweiligen Subschichten zu multiplizieren und über alle Subschichten aufzuaddieren. Die so bestimmte bleibende Verformungsrate ist dann mit der vorhandenen Anzahl der Lastwechsel zu multiplizieren, die für diese spezielle Kombination aus Achslast und Dimensionierungsfall erwartet wird. Daraus folgt der Anteil der bleibenden Verformung der ToB infolge dieser speziellen Kombination aus Achslast und Dimensionierungsfall. Abschließend ist über die Verformungsanteile aller Kombinationen aus Achslast und Dimensionierungsfall zu summieren und so die bleibende Gesamtverformung der ToB zu berechnen.

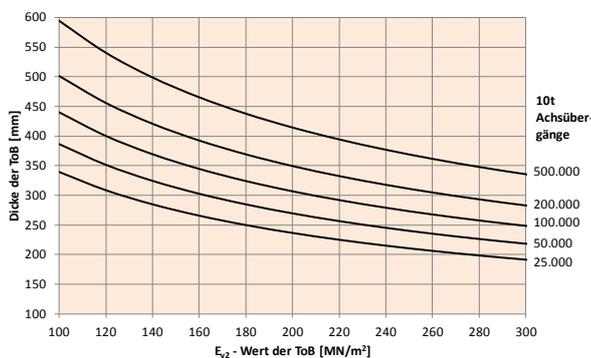
Vom Berechnungsmodell müssen insbesondere die Geometrie der Befestigung und das nicht-lineare Materialverhalten der ToB berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Projekts wurden Dimensionierungsnomogramme (Bild 5 und 6) für ausgewählte Randbedingungen erarbeitet, die eine effektive Anwendung des Verfahrens ermöglichen sollen. Grundgedanke dieser Nomogramme ist es, den Anwendern Informationen zur ToB-Schichtdicke und den einzuhaltenden  $E_{v2}$ -Werten auf der Oberfläche der ToB zur Verfügung zu stellen, die in Abhängigkeit der erwarteten Lastwechsel die Überschreitung der Grenzwerte vermeiden und

damit die Entstehung von Spurrinnen und zu großen Querunebenheiten verhindern.



**Bild 5: Dimensionierungsnomogramm – LVR mit einer Asphaltdeckschicht von weniger als 40 mm Dicke**



**Bild 6: Dimensionierungsnomogramm – LVR mit einer Asphaltdeckschicht von 50 mm Dicke**

Bevor diese Dimensionierungsnomogramme in Anwendung gebracht werden dürfen, ist zu prüfen, ob der beabsichtigte Dimensionierungsfall die Voraussetzungen erfüllt, unter welchen die Dimensionierungsnomogramme erstellt wurden. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Nomogramme das Resultat eines ersten Entwicklungsversuchs sind und dass weitere Forschung und Erprobung notwendig sind, um die Nomogramme mit ausreichender Sicherheit anwenden zu können.

## 6 Entwicklung von Ansätzen zur Abschätzung der Restnutzungsdauer von LVR

Anhand der Ergebnisse von Feldversuchen an der CAPTIF-Anlage in Christchurch/Neuseeland wurde ein Ansatz zur Abschätzung des Risikos der Entstehung plastischer Verformungen in LVR auf der Grundlage von zentralen FWD-Deflexionen erarbeitet. Im Rahmen des Forschungsprojekts sollten basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen die Ansätze zur Abschätzung der Restnutzungsdauer von LVR zunächst dahingehend geprüft werden, inwieweit diese Verfahrensweise auch auf in Deutschland herrschende Verhältnisse übertragbar ist. Prinzipiell ist dieser Ansatz auch auf in Deutschland herrschende Verhältnisse übertragbar. Die verwendeten ungebundenen Baustoffgemische werden sich nach denselben Gesetzmäßigkeiten verhalten, da die Zusammensetzung der Gemische hinsichtlich der Sieblinie ähnlich und die Gesteinsmorphologie vergleichbar ist. Zudem wurden in den Feldversuchen ungebundene Baustoffgemische verwendet, die auch in ähnli-

cher Zusammensetzung mit vergleichbaren Verformungseigenschaften in Deutschland anzutreffen sind.

Als weiterer Ansatz zur Ermittlung der Restnutzungsdauer von LVR wird von den Autoren die rechnerische Ermittlung der Entstehung plastischer Verformungen in LVR vorgeschlagen. Grundlage dieses Ansatzes bilden die Ergebnisse von zyklischen Triaxialversuchen. Dabei sind aus der ToB der Befestigung Proben zu entnehmen, aus denen im Labor Probekörper für Triaxialversuche hergestellt werden. Für die zu untersuchenden LVR sind dabei zunächst allgemeine Materialkenndaten in Form der Eigenschaften der Asphaltdeckschicht (Steifigkeitsmodul) sowie die Parameter für geeignete elastische und plastische Stoffmodelle anhand der Ergebnisse von Spaltzugschwellversuchen (Versuche am Asphalt) und Triaxialversuchen (Multi-Stage-Versuche an den ungebundenen Baustoffgemischen) zu bestimmen. Auf Grundlage der Ergebnisse der Laborversuche ist anschließend mit einem geeigneten FE-Programm eine rechnerische Abschätzung der plastischen Verformungen (Lastwechselzahl bis zum Erreichen einer plastischen Verformung von 15 mm) der Befestigungen vorzunehmen, um den Nutzungsausfallzeitpunkt (NAZ) der Befestigung zu bestimmen.

## 7 Ausblick

Anhand der Ergebnisse des Forschungsprojekts wurden wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der analytischen Dimensionierung für die niedrig beanspruchten Straßen (LVR) gewonnen. Anhand der Ergebnisse der analytischen Dimensionierung können für den Einzelfall optimierte wirtschaftliche Lösungen für den Aufbau von niedrig beanspruchten Straßen (LVR) ermittelt werden. Es erscheint möglich, für LVR (< 100 000 10-t-Standardachsen) eine Reduzierung der derzeit in Deutschland vorgeschriebenen Mindestasphaltschichtdicke von 12 cm vorzunehmen. Bei dieser Bauweise wird jedoch die ToB in hohem Maße beansprucht, sodass hier eine rechnerische Dimensionierung unter experimenteller und theoretischer Berücksichtigung des nicht-linearen Verhaltens ungebundener Baustoffgemische unabdingbar ist. Anhand der experimentellen Ergebnisse (Triaxialversuche) in Verbindung mit numerischen Berechnungen mit einem FE-Programm kann eine wirtschaftliche Schichtdickenermittlung für Befestigungen mit dünnen Asphaltdeckschichten erfolgen. Weiterhin kann auf der Grundlage der Ergebnisse des Forschungsprojekts ein wirtschaftlicher Einsatz von Recycling (RC)-Baustoffen beziehungsweise Baustoffgemischen nachgewiesen/geprüft werden. Mithilfe der im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelten Prozedur für Triaxialversuche ist es weiterhin möglich, unterschiedliche ungebundene Baustoffgemische beziehungsweise RC-Baustoffe bezüglich ihrer Eignung als ToB-Material, insbesondere für LVR, zu beurteilen. Im Ergebnis dieses Projekts stehen somit die Grundlagen für die Dimensionierung von LVR im Rahmen einer rechnerischen Dimensionierung von Straßenbefestigungen zur Verfügung. Dies wiederum ermöglicht einen effizienten und umweltschonenden Einsatz der vorhandenen Baustoffe, um haltbare und dauerhafte Straßenbefestigungen auch mit dünnen Asphaltdeckschichten herzustellen.