

Verifizierung der Mischgutkonzeptionierung kaltgebundener bitumen-dominanter Tragschichten und Ableitung von Dimensionierungsgrundsätzen

FA 4.329

Forschungsstellen: Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau (Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg)
 Universität Kassel, Sachgebiet Bau und Erhaltung von Verkehrswegen (Dr.-Ing. K. Mollenhauer)
 Bearbeiter: Radenberg, M. / Winter, M. / Mollenhauer, K. / Staschkiewicz, M. / Vienenkötter, L.
 Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn
 Abschluss: Oktober 2022

1 Problemstellung und Zielsetzung

Die politischen Diskussionen um Nachhaltigkeit im Straßenbau und um eine Reduzierung der C_{CO_2} -Emissionen verstärken die europäischen Bemühungen, die Temperatur bei der Herstellung und bei der Verarbeitung von Asphalt grundsätzlich zu reduzieren oder möglichst, sogar vollständig ohne eine Erwärmung der Mischgutkomponenten qualitativ hochwertige gebundene Asphalttragschichten zu bauen. In vielen europäischen Nachbarländern werden Kaltasphalttragschichten bereits häufig eingesetzt, in Deutschland liegen dagegen noch keine anerkannten und wirtschaftlichen Dimensionierungsgrundsätze vor.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, zunächst den Zustand bestehender Strecken mit kaltgebundener, bitumen-dominanter Tragschicht zu erfassen, zu bewerten und gegebenenfalls Aspekte für Dimensionierungsansätze daraus abzuleiten. Hierzu wurden die dimensionierungsrelevanten Eigenschaften der Schichten an Bohrkernen bestimmt, um rechnerische Nachweise und Restnutzungsdauerprognosen zu erstellen. Der Zustand der zehn ausgewählten Praxisstrecken wurde ergänzend anhand der Oberflächenbeschaffenheit und zerstörungsfreier Messungen zur Bestimmung der Tragfähigkeit mittels FWD beurteilt. In einem ergänzenden Laboruntersuchungsprogramm wurden auf Grundlage des Mischgutkonzepts einer Strecke verschiedene Parameter der Mischgutzusammensetzung variiert. An diesen wurden die Performance-Eigenschaften nach unterschiedlich langer Konditionierung der Probekörper quantifiziert. Auch mit den Daten dieser Laboruntersuchungen wurden rechnerische Dimensionierungen durchgeführt und bewertet.

Die Erkenntnisse können letztendlich in die Bearbeitung/Überarbeitung der betreffenden FGSV-Regelwerke einfließen sowie eine Basis zur Beschreibung der Dimensionierungsgrundsätze für diese Bauweise liefern.

2 Untersuchungsprogramm

Das Untersuchungsprogramm ist in sieben Arbeitspakete gegliedert. Das erste Arbeitspaket (AP 1) beinhaltet einen umfassenden Überblick über den nationalen und internationalen wissenschaftlichen Stand der Erkenntnisse zu kaltgebundenen Tragschichten. Zudem wurden in diesem AP für die Probenahme geeignete Straßenabschnitte mit kaltgebundenen Tragschichten beziehungsweise Kaltrecyclingschichten (KRC-Schichten) zusammengestellt, aus der in Abstimmung mit dem Auftraggeber und dem projektbegleitenden Ausschuss zehn Strecken ausgewählt wurden. Im AP 2 wurden die vorhandenen Informationen hinsichtlich Verkehrsbelastung, Befestigungsaufbau, Materialeigenschaften in Eignungs- und Kontrollprüfung sowie Oberflächenzustand der Strecken beschafft und dokumentiert, Bohrkern für die labortechnischen Untersuchungen aus den ausgewählten Strecken entnommen und FWD-Messungen durchgeführt. Im dritten Arbeitspaket wurden die dimensionierungsrelevanten Eigenschaften der KRC-Schichten (Steifigkeit und Ermüdung) an den Bohrkernen bestimmt, um dann im sechsten Arbeitspaket die Möglichkeiten zur Beschreibung von Dimensionierungsgrundsätzen daraus abzuleiten. Für die Laborversuche mit insgesamt acht unterschiedlichen KRC-Konzepten wurde zudem der Einfluss der Lagerungsdauer der Probekörper mit bis zu 180 Tagen betrachtet. Die Untersuchungen zur Ermittlung der dimensionierungsrelevanten Kennwerte wurden durch weitere charakterisierende Laborversuche ergänzt.

3 Ergebnisse und Auswertung

Die nationale und internationale Literaturrecherche hat ergeben, dass sich derzeit für Befestigungen mit kaltgebundener bitumen-dominanter Tragschicht kein einheitlicher Dimensionierungsansatz ableiten lässt. Dies scheint allein an der Vielzahl der unterschiedlichen Mischgutkonzepte und der meteorologischen Randbedingungen zu scheitern. Dennoch deutet sich in den letzten, länderübergreifenden Forschungsprojekten ein einfacher Anpassungsfaktor für die Schichtdicke einer KRC-Schicht von 1,5 an (Schichtdicke KRC/Schichtdicke Heiasphalttragschicht). Aus einer Liste mit 155 Streckenabschnitten wurden die in der Tabelle 1 aufgeführten zehn Abschnitte für die Bohrkernentnahme ausgewählt. Die Tabelle enthält Angaben aus den zur Verfügung gestellten Unterlagen sowie die an den Bohrkernen ermittelten Schichtdicken.

Lfd. Nr.	Streckenabschnitt	DTV (SV) [Kfz/d]	Baujahr	Bindemittelgeh. [M.-%]			Schichtdicken [cm]	
				Z	BE	AG	KRC	Asphalt
1	A 30, BA IV; FR Osten	50.000 (21 %)	2003	3,0	3,0	4,0	22,4	28,9
2	A 30, BA IV; FR Westen	50.000 (21 %)	2004	2,0	3,5	4,0	22,4	28,8
3	B 52, Trier - Ehrang	26.000 (15 %)	2009	4,0	4,0	4,0	18,7	16,6
4	B 3, Wahnhausen – Wilhelmsh.	4.176 (6,4%)	2009	4,0	3,7	5,6	16,7	16,8
5	L 49, Niersbach – Heidweiler *)	2.676 (24 %)	2015	3,5/4,0	3,5/3,5	3,1/3,4	17,3	12,4
6	L 48, Leiwien - Zummet	2.307 (7 %)	2015	4,0	3,0	4,0	20,0	12,5
7	L 114, Weibern - Wehr	2.096 (10 %)	2011	3,5	4,0	4,7	13,3	4,5
8	L 205, Gudow-Büchen	1.659 (5 %)	2013	4,4	3,0	4,3	22,8	4,3
9	L 3073, Elpenrod - Nieder-Gemünden	1.220 (2,9 %)	2011	4,0	3,5	4,6	18,4	15,6
10	L 3400, Halsa - Friedrichsbrück	605 (2,5 %)	2012	4,2	3,5	3,4	23,1	18,0

*) zwei EPs für zwei KRC-Materialien

Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten Informationen über die Praxisstrecken

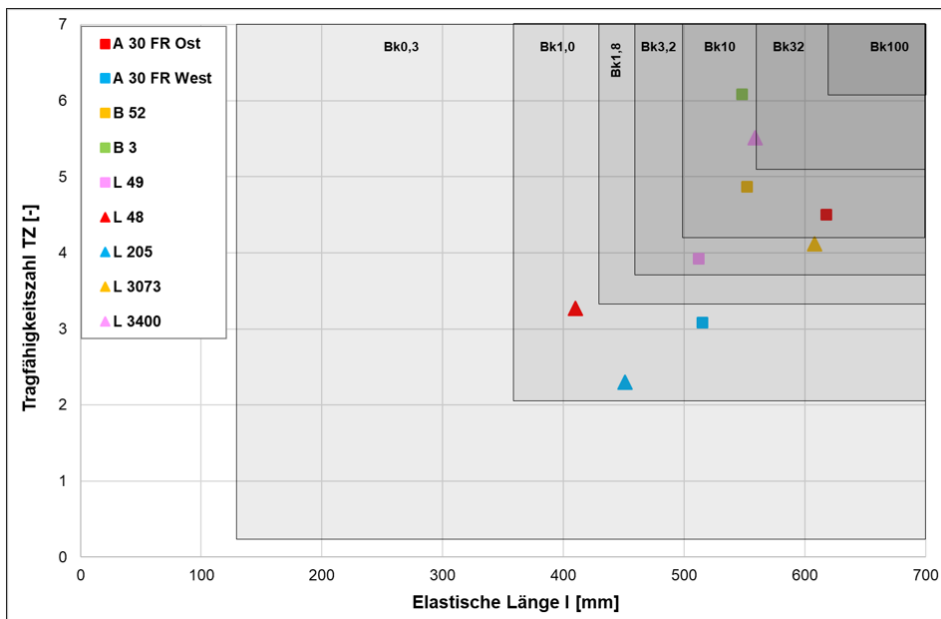


Bild 1: Gegenüberstellung der gemäß der elastischen Länge und der Tragfähigkeitszahl zugeordneten Belastungsklassen

Neben den Verkehrsbelastungen und dem Baujahr finden sich in der Tabelle 1 auch Angaben über das verwendete Bindemittelkonzept. Die Mehrzahl der betrachteten KRC-Strecken haben einen Zementgehalt von über 3,5 M.-% und einen Zugabe-Bitumengehalt der geringer oder gleich dem Zementgehalt ist. Die Gesamtschichtdicken des gebundenen Oberbaus schwanken zwischen 50,3 und 17,8 cm.

Aus den Mittelwerten der mittels FWD-Messungen berechneten Elastischen Längen und der Tragfähigkeitszahl wurde unter Berücksichtigung des FGSV-Arbeitspapiers (AP Trag Teil C 2.1) eine grobe Abschätzung der zum Zeitpunkt der Messungen vorhandenen Gesamttragfähigkeit anhand der Einstufung in eine Belastungsklasse vorgenommen (siehe Bild 1). Auf der Strecke L114, welche bereits einige Schäden aufwies, konnten keine Auswertungen der Tragfähigkeiten anhand der FWD-Messwerte vorgenommen werden. Daher ist auf dieser Strecke der Untergrund beziehungsweise die Gesamtbefestigung als unzureichend tragfähig zu beurteilen. An den Bohrkernen aller gebundenen Schichten der zehn Strecken wurden die

Steifigkeitsmoduln gemäß TP Asphalt-StB, Teil 26 ermittelt. Dies erfolgte bei fünf Temperaturen und sechs Frequenzen, sodass aus den Ergebnissen Masterkurven abgeleitet werden konnten. In Bild 3.2 (links) sind die aus den Masterkurven errechneten Steifigkeiten zwischen -20 und 60 °C dargestellt. Darüber hinaus wurden das Ermüdungsverhalten der KRC-Schichten der Bohrkerns gemäß TP Asphalt-StB, Teil 24 bestimmt. Die aus den Ergebnissen errechneten Ermüdungsfunktionen zeigt das Bild 2 (rechts).

Die Mehrzahl der untersuchten KRC-Schichten der Praxisstrecken zeigt ein, wenn auch verringertes temperaturabhängiges Steifigkeitsverhalten analog einer Asphaltsschicht. An den Bohrkernen der B49, der L205 und der L3400 konnte dieses temperaturabhängige Materialverhalten nicht festgestellt werden. Die Bohrkerns der B49 zeigen sogar einen entgegen gerichteten Temperatureinfluss auf den Steifigkeitsmodul.

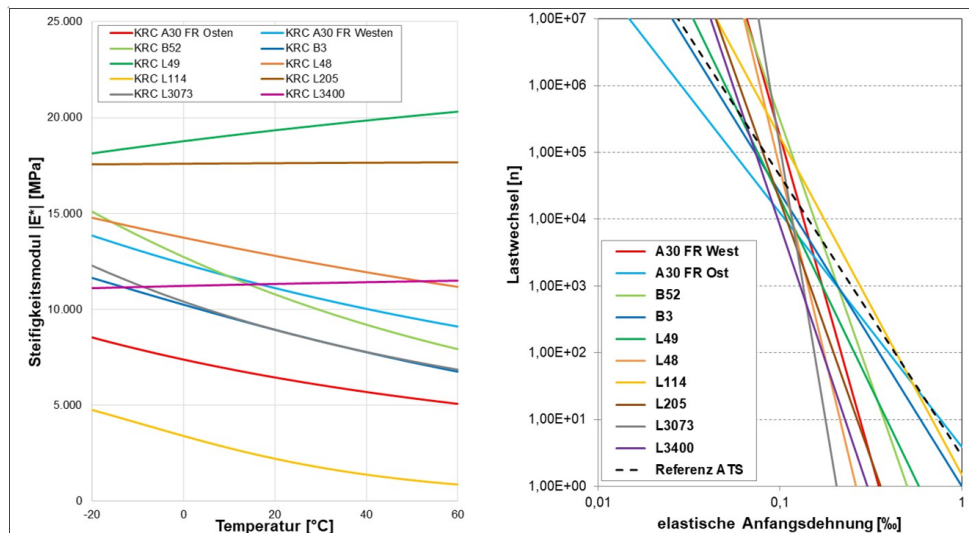


Bild 2: Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen der KRC-Schichten berechnet aus den Hauptkurven für 20 °C und 10 Hz (links) und Ermüdungsfunktionen (rechts)

Tabelle 2: Angaben über die Zusammensetzungen der Laborgemische

Variantenbezeichnung	Erläuterung	BE [M.-%]	HRB [M.-%]	Korngemischzusammensetzung
B3,5 H2 B und B3,5 H2 K	Referenz	3,5	2,0	MG _{Referenz}
B3,0 H2 B	geringerer Bitumengehalt	3,0	2,0	MG _{Referenz}
B4,0 H2 B	höherer Bitumengehalt	4,0	2,0	MG _{Referenz}
B5,0 H2 B	höchster Bitumengehalt	5,0	2,0	MG _{Referenz}
B3,5 H1 K	geringerer HRB-Gehalt	3,5	1,0	MG _{Referenz}
B3,5 H4 K	höherer HRB-Gehalt	3,5	4,0	MG _{Referenz}
B3,5 H2 Fuller K	höherer Feinkornanteil (Natarsand)	3,5	2,0	MG-V1
B3,5 H2 o22/32 K	ohne 22/32 mm – 10 M.-% mehr AG	3,5	2,0	MG-V2

Die an den KRC-Schichten ermittelten Ermüdungsfunktionen variieren recht deutlich und liegen im hohen Dehnungsbereich klar unter dem Kurvenverlauf der Referenzasphalttragschicht nach den RDO Asphalt 09. Im niedrigen Dehnungsbereich zeigen einige KRC-Schichten sogar eine bessere Ermüdungsbeständigkeit im Vergleich zum RDO-Referenzasphalt.

Um einen Bezug zu einer der zehn Praxisstrecken herzustellen, wurde die auf der BAB30 (A30, BA IV; FR Westen) verwendete Mischgutzusammensetzung weitgehend nachgestellt. Der Gehalt an Bitumenemulsion lag damit bei 3,5 M.-% und der Gehalt des hydraulischen Boden- und Tragschichtbinders (HRB) bei 2,0 M.-%. Diese "Referenzmischung" wurde in zwei Laboren (B und K) hergestellt und geprüft.

Bei weiteren Labor-Mischgutvarianten wurde der Bindemittelgehalt (Bitumenemulsion oder HRB) variiert. Die resultierenden Zusammensetzungen der neun Mischgutvarianten sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Analog zu den Untersuchungen an den Bohrkernen wurden auch an den Laborgemischen die Steifigkeiten gemäß TP Asphalt-StB, Teil 26 und das Ermüdungsverhalten gemäß TP Asphalt-StB, Teil 24 ermittelt. Da eine Veränderung der Materialeigenschaften mit

zunehmender Lagerungsdauer zu erwarten war, wurden Prüfungen nach bis zu 180 Tagen durchgeführt. Im Bild 3 sind die aus den Masterkurven errechneten Steifigkeiten zwischen -20 und 50 °C nach 28 Tagen (links) und nach 180 Tagen (rechts) dargestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen eine Zunahme der Steifigkeiten insbesondere im hohen Gebrauchstemperaturbereich. Dies konnte an allen Mischgutvarianten beobachtet werden. Die Steifigkeiten im sehr niedrigen Gebrauchstemperaturbereich sind annähernd konstant über den Betrachtungszeitraum geblieben. Die Ermüdungskurven der KRC-Gemische, die im Bild 4 zu sehen sind, liegen fast alle unterhalb der Ermüdungskurve der RDO-Referenzasphalttragschicht. Erst bei sehr geringen elastischen Anfangsdehnungen wird der Bereich der RDO-Referenzasphalt erreicht und vornehmlich nach 180 Tagen Lagerungsdauer. Auch hier zeigt sich durchweg ein Anstieg des Ermüdungswiderstands aller KRC-Gemische mit zunehmender Lagerungsdauer.

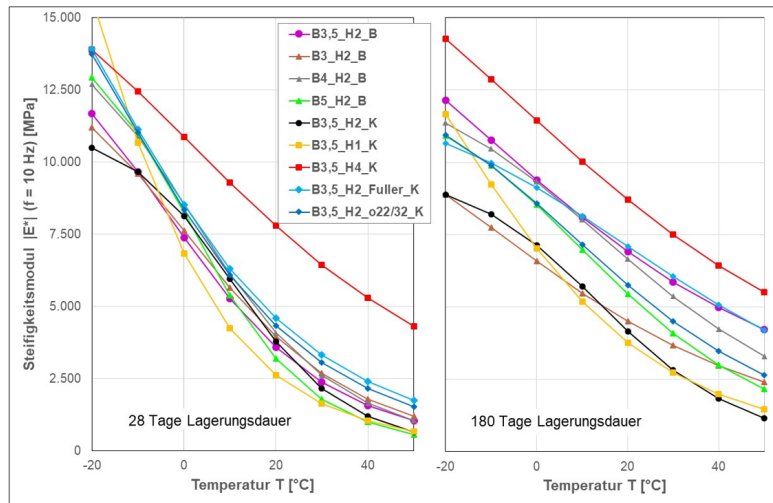


Bild 3: Steifigkeitsmodule der Laborgemische nach 28 d (links) und 180 Tagen (rechts)

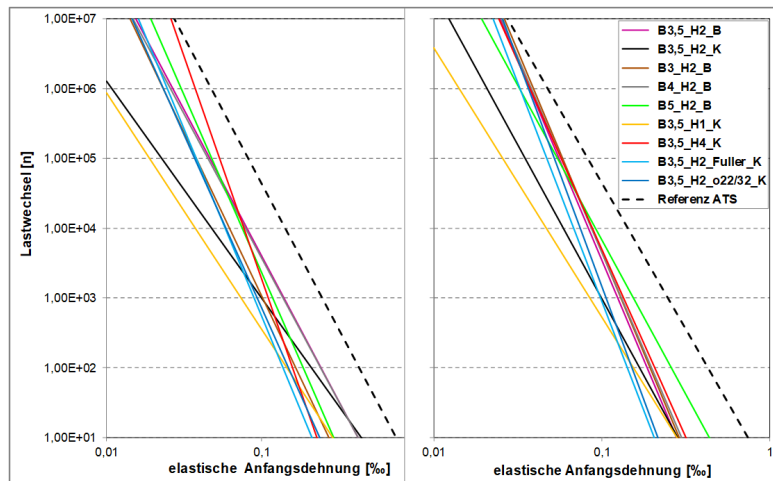


Bild 4: Ermüdungsfunktionen der Laborgemische nach 28 d (links) und 180 Tagen (rechts)

Tabelle 3: Erforderliche Dicke der KRC-Schichten für einen äquivalenten Ermüdungszustand zur Referenz

Belastungs- klasse	RStO - Tafel 1, Zeile 1			
	RStO-Referenz	KRC-Z ₂₈	KRC-B ₂₈	KRC-B ₁₈₀
Bk0,3	10 cm	16,7 cm (67 %)	19,5 cm (95 %)	15,5 cm (55 %)
Bk1,0	14 cm	20 cm (43 %)	25 cm (79 %)	19,3 cm (38 %)
Bk3,2	12 cm	17,9 cm (49 %)	23,9 cm (99 %)	17,3 cm (44 %)
Bk32	18 cm	22,4 cm (24 %)	32,9 cm (83 %)	23,1 cm (28 %)
Belastungs- klasse	RStO - Tafel 1, Zeile 2.2			
	RStO-Referenz	KRC-Z ₂₈	KRC-B ₂₈	KRC-B ₁₈₀
Bk0,3	-	15 cm (0 %)	15 cm (0 %)	15 cm (0 %)
Bk1,0	-	15 cm (0 %)	15 cm (0 %)	15 cm (0 %)
Bk3,2	15 cm	22,7 cm (53 %)	37,2 cm (148 %)	24,4 cm (63 %)
Bk32	15 cm	20,6 cm (37 %)	37,5 cm (150 %)	22,8 cm (52 %)
Belastungs- klasse	RStO - Tafel 4, Zeile 1			
	RStO-Referenz	KRC-Z ₂₈	KRC-B ₂₈	KRC-B ₁₈₀
Bk0,3	22 cm	25,9 cm (18 %)	34,7 cm (58 %)	26,2 cm (19 %)
Bk1,0	26 cm	29,2 cm (12 %)	> 40,0 cm	30,2 cm (16 %)
Bk3,2	26 cm	28,7 cm (10 %)	> 40,0 cm	30,4 cm (17 %)
Bk32	30 cm	31,4 cm (5 %)	> 40,0 cm	34,1 cm (14 %)

[]-Werte: prozentualer Schichtdickenmehrbedarf der KRC-Schicht gegenüber der Referenz

Das höhere Steifigkeitsniveau der aus den Strecken entnommenen Bohrkernproben lässt erwarten, dass sich die Steifigkeiten mit fortgesetzter Lagerungsdauer weiter erhöhen werden und sich auch das Ermüdungsverhalten noch verbessern wird. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass mit den acht unterschiedlichen Mischgutansätzen noch nicht alle Optimierungsmöglichkeiten abgedeckt werden konnten, womit den KRC-Gemischen ein hohes Potenzial als Tragschicht in einer Straßenbefestigung unterstellt werden kann. Um das Potenzial der KRC-Schichten bei einer rechnerischen Dimensionierung zu überprüfen, wurden die Materialkennwerte für eine Berechnung nach den RDO Asphalt 09 verwendet. Dazu wurden jeweils drei mittlere Steifigkeits- und Ermüdungsfunktionen aus den Prüfergebnissen abgeleitet. Das Material KRC-Z₂₈ repräsentiert ein eher zementreicheres Gemisch nach 28 Tagen Lagerungsdauer, das Material KRC-B₂₈ ein eher bitumenreicheres Gemisch nach 28 Tagen und das Material KRC-B₁₈₀ das bitumenreichere Gemisch nach 180 Tagen Lagerungsdauer. Die Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse dieser Dimensionierungen für drei Bauweisen mit jeweils vier Belastungsklassen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsprojekts zusammengefasst.

4.1 Ergebnisse zur Anwendbarkeit von Prüfverfahren gemäß TP Asphalt-StB

Hinsichtlich der Anwendung von Asphalt-Prüfverfahren zur Bestimmung der Eigenschaften von KRC-Baustoffen können folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

- Für die Herstellung von Probekörpern aus KRC-Baustoffen können Probeplatten mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät unter Anwendung des Verdichtungsregimes gemäß TP Asphalt-StB, Teil 33 hergestellt werden.
- Nach der Verdichtung ist eine ausreichend lange Lagerungszeit der KRC-Probekörper beziehungsweise KRC-Probeplatten vor der Durchführung von mechanischen Prüfungen beziehungsweise der Herstellung von Probekörpern durch Bohren und Schleifen erforderlich. Insbesondere bei KRC-Gemischen mit geringen Anteilen an hydraulischem Bindemittel wird eine Lagerungsdauer von mindestens 14 Tagen vor dem Herausschneiden von Proben aus verdichteten Probeplatten empfohlen.
- Unterschiedliche Konditionierungen der Probekörper beeinflussen die Materialeigenschaften. So führte das beschleunigte Trocknen von Probekörpern nach der Herstellung über Nacht bei einer Temperatur von 40 °C zu abweichenden Spaltzugfestigkeiten als die Lagerung bei Raumbedingungen. Für die Anwendung von

Anforderungen an Steifigkeiten und Festigkeiten sind die Lagerungsbedingungen präzise zu beschreiben und einzuhalten. Für die Festlegung eines Konditionierungsverfahrens sind die hier durchgeführten Untersuchungen nicht ausreichend. Hierfür sind weitere Untersuchungen mit variierenden Lagerungsbedingungen notwendig.

- Für die Erfassung dimensionierungsrelevanter Materialeigenschaften, welche das Langzeitverhalten abbilden, wäre ein Lagerungsverfahren sinnvoll, welches zum Beispiel durch erhöhte Lagerungstemperatur eine beschleunigte Trocknung erlaubt. Gleichzeitig ist jedoch eine Störung der Festigkeitsentwicklung insbesondere des hydraulischen Bindemittels zu vermeiden.
- Spaltzug-Schwellversuche zur Bestimmung von Kennwerten zur Beschreibung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens können gemäß den TP Asphalt-StB, Teile 24 und 26 für die Prüfung von KRC-Gemischen eingesetzt werden. Dies betrifft auch das Schleifen der Probekörper-Endflächen, welches einen großen Einfluss auf die ermittelten Eigenschaften hat.
- Die Bestimmung von Bruchdehnung und E-Modul durch Messung der Querdehnung in Spaltzugversuchen gemäß TP Asphalt-StB, Teil 23 hat sich als nicht hinreichend robust erwiesen, da die Ergebnisse eine erhebliche Streuung aufweisen und zudem die Vergleichbarkeit nicht gegeben ist. Als mögliche Ursache ist die unzureichende Beschreibung des Prüfverfahrens zu nennen.

4.2 Erkenntnisse aus der Untersuchung von Praxisstrecken mit KRC-Tragschicht

Die Überprüfung von zehn mehrjährig beanspruchten Straßenbefestigungen mit Tragschichten aus KRC-Gemischen zeigt, dass bei keiner der betrachteten Strecken eine ungewöhnlich frühzeitige Schädigung eingetroffen ist. Insgesamt weisen die Ergebnisse der Zustandserfassung und -bewertung, der Tragfähigkeitsmessungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) und der rechnerischen Überprüfung der Substanz darauf hin, dass diese Befestigungen vergleichbare Nutzungsdauern zulassen wie Befestigungen mit konventionellem Asphaltüberbau. Im Rahmen der Untersuchungen wurden auch drei deutlich unterdimensionierte Befestigungen untersucht. Zwei Landesstraßen, bei denen über der KRC-Schicht lediglich eine Asphaltdeckschicht eingebaut wurde, zeigen bei gleichwertigen Zustandswerten unterschiedliche Ergebnisse der Berechnung der Nutzungsdauer aus der Basis der Materialeigenschaften der Ausbauproben.

Insgesamt sind die auf Grundlage der rechnerischen Ermüdungsrissbildung erfolgten Überprüfungen der Bestandsstrecken mitunter nicht plausibel. Die bei manchen Strecken

identifizierten erheblichen Schädigungssummen korrelieren nicht zu den anderen erfassten Substanzmerkmalen. So weisen die Ergebnisse insbesondere der KRC-Varianten, welche augenscheinlich hohe Gehalte an hydraulischem Bindemittel beinhalten und keine asphalttypischen, temperaturabhängigen Steifigkeitsmoduln zeigen, daraufhin, dass andere Schädigungskriterien wichtiger zur Dauerhaftigkeitsbewertung sind als die klassische Ermüdungsrisssbildung infolge horizontaler Dehnungsbeanspruchung. Hier fehlt somit ein Verfahren zur materialspezifischen Berücksichtigung von KRC-Tragschichten mit starren Eigenschaften. Als Hinweise für eine nicht sinnvolle Anwendbarkeit des Ermüdungsnachweises nach den RDO Asphalt 09 kann die nicht vorhandene Temperaturabhängigkeit des Steifigkeitsmoduls sowie eine sehr steil verlaufende Ermüdungsfunktion angesehen werden.

4.3 Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses variierteter Zusammensetzungen

Durch die systematische Variation der Zusammensetzung der KRC-Gemische können folgende Schlussfolgerungen anhand der durchgeführten Laborprüfungen gezogen werden:

- Die Erhöhung der Zugabegehalte der Bitumenemulsion
 - führt zu einer Erhöhung der Spaltzugfestigkeit trocken konditionierter Probekörper. Die Lagerungszeit (zwischen 28 und 180 Tagen) hat dabei keinen Einfluss auf die Unterschiede zwischen den untersuchten KRC-Varianten.
 - führt zu einer geringen Erhöhung der Spaltzugfestigkeit von drei Tagen bei 40 °C in Wasser gelagerten Probekörpern, während die Lagerungsdauer keine weitere Veränderung bewirkt. Dadurch erhöht sich scheinbar die anhand des ITSr-Werts abgeleitete Wasserempfindlichkeit.
 - verändert die nach 28 Tagen ermittelten Steifigkeitsmoduln nur geringfügig, während nach 180 Tagen die Zunahme der Steifigkeitsmoduln sich mit zunehmendem Bitumenemulsionsgehalt erhöht.
 - beeinflusst den Ermüdungswiderstand nur geringfügig.
- Die Erhöhung der Zugabeanteile des hydraulischen Tragschicht- und Bodenbinders
 - führt zu ansteigenden Spaltzugfestigkeiten trocken und nass gelagerter Probekörper und zu geringerer Wasserempfindlichkeit.
 - führt zu erheblich höheren Steifigkeitsmoduln nach 28 Tagen Lagerung der Probekörper.

Eine weitere Erhöhung infolge längerer Lagerungsdauer ist dagegen nur gering.

- führt zu einer deutlichen Erhöhung des mittels Spaltzug-Schwellversuchen ermittelten Ermüdungswiderstands.
 - Die Optimierung der Zusammensetzung des Mischgranulats hin zu geringerem Hohlraumgehalt zwischen den Gesteinskörnern beziehungsweise Granulatstücken
 - führt nicht zu einer Veränderung der Spaltzugfestigkeit trocken gelagerter Probekörper, jedoch zu einem leichten Anstieg der Spaltzugfestigkeit von bei 40 °C für drei Tage in Wasser gelagerten Probekörpern und somit zu einer Verringerung der Wasserempfindlichkeit.
 - führt zu einem Anstieg des Steifigkeitsmoduls der 180 Tage lang gelagerten Probekörper, während an 28 Tagen konditionierten Proben kaum ein Einfluss erkennbar ist.
 - führt zu einer Erhöhung des Ermüdungswiderstands.
 - Mittels Triaxialversuche konnte für die Variante B3,5_H2_K nach sieben Tagen Lagerungsdauer eine Beeinflussung der Scherfestigkeit von der Radialspannung nachgewiesen werden. Diese Abhängigkeit wird durch eine längere Lagerungsdauer (28 Tage) reduziert.
- ### 4.4 Erkenntnisse zur Dimensionierung von Asphaltbefestigungen unter Nutzung von KRC-Tragschichten
- Unter Voraussetzung eines asphalt-typischen Schädigungsverhaltens können unter Anwendung des Dimensionierungsverfahrens gemäß RDO Asphalt 09 Befestigungen mit KRC-Tragschichten als Ersatz von Asphalttragschichten oder Verfestigungen konzeptioniert werden. Die dazu erforderlichen Materialparameter sollten nach möglichst langer Konditionierungszeit der Probekörper bestimmt werden, um die dann noch veränderlichen Steifigkeits- und Ermüdungseigenschaften repräsentativ abzubilden.
 - Die an im Labor hergestellten Proben bestimmten Steifigkeitsmoduln und Ermüdungswiderstände weisen kleinere Werte auf als die an Bohrkernproben aus langjährig beanspruchten Befestigungen bestimmten Werte. Es ist somit zu erwarten, dass die berechneten Aufbauvarianten eine gewisse Dimensionierungsreserve aufweisen.
 - Durch Vergleich zum RDO-Referenzasphalt konnten Schichtdickenzuschläge für KRC-Tragschichten für den Ersatz von Asphalttragschichten und Verfestigungen in Befestigungen gemäß den RStO bestimmt werden:

- Bei Ersatz der Asphalttragschicht in Befestigungen gemäß Tafel 1, Zeile 1 wurden erforderliche Schichtdickenzuschläge zwischen 24 bis 67 % ermittelt.
 - Bei Ersatz der Zementverfestigung durch eine KRC-Tragschicht in einer Befestigung gemäß RStO, Tafel 1, Zeile 2.2 wurden für Belastungsklassen Bk3,2 und Bk32 prozentuale Schichtdickenaufschläge von bis zu 63 % ermittelt. Bei den betrachteten Befestigungen der Belastungsklassen Bk0,3 und 1,0 zeigte sich die KRC-Schicht sogar der Zementverfestigung überlegen.
 - Bei Ersatz der Asphalttragschicht im vollgebundenen Oberbau nach Tafel 4, Zeile 1 wurden erforderliche Schichtdickenzuschläge von maximal 19 % ermittelt.
- Insbesondere weil die infolge Nutzungsdauer zu erwartende Erhöhung der Steifigkeiten und des Ermüdungswiderstands eine gewisse Dimensionierungsreserve bewirkt, scheint der Einsatz von KRC-Gemischen als Ersatz der Asphalttragschichten mit einem Schichtdickenzuschlag von 50 % bei Anwendung der RStO, Tafel 1, Zeile 1 und von 20 % bei Anwendung eines vollgebundenen Oberbaus gemäß RStO, Tafel 4 praktikabel. Bei der baulichen Umsetzung ist dann aber dringend eine hinreichende Gleichmäßigkeit der KRC-Schicht zu gewährleisten.