



Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung des Wider- stands gegenüber Kornaus- brüchen semidichter Asphalte

**Evaluation d'une méthode d'essai pour déterminer la
résistance à l'arrachement de grains des enrobés semi-
denses**

**Evaluation of a test method to determine the resistance
against aggregate loss of semi-dense asphalt concrete**

**Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa)
Prof. Dr. Christiane Raab**

**Centre de compétences du domaine routier (CCDR)
Dr. Françoise Beltzung
Christophe Marendaz**

**Forschungsprojekt VSS 2015/312 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung des Wider- stands gegenüber Kornaus- brüchen semidichter Asphalte

**Evaluation d'une méthode d'essai pour déterminer la
résistance à l'arrachement de grains des enrobés semi-
denses**

**Evaluation of a test method to determine the resistance
against aggregate loss of semi-dense asphalt concrete**

**Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA)
Prof. Dr. Christiane Raab**

**Centre de compétences du domaine routier (CCDR)
Dr. Françoise Beltzung
Christophe Marendaz**

**Forschungsprojekt VSS 2015/312 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

November 2021

1712

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
Christiane Raab

Mitglieder

Françoise Beltzung
Christophe Marendaz

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsidentin
Sandra Dünner

Mitglieder

Christian Angst
Nicolas Bueche
Michel Pittet
Yvan Ramel
Nenad Radojkovic
Bernard Schmid
Felix Solcà
Sabine Würmli

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	11
Summary	15
1 Einleitung/Ausgangslage	19
2 Stand der Forschung, Forschungsbedarf	21
3 Zielsetzung des Forschungsprojekts	23
3.1 Forschungsziel	23
3.2 Vorgehen	23
3.3 Anpassungen und Modifizierungen	24
3.3.1 Auswahl der Methoden	24
3.3.2 Aufteilung der Phasen	25
3.3.3 Materialien (Mischgut)	25
3.4 Arbeitsschritte	25
4 Materialbeschaffung und Plattenherstellung	27
4.1 Materialbeschaffung	27
4.2 Plattenherstellung	28
4.3 Kennwerte der hergestellten Prüfplatten	29
5 Darmstadt Scuffing Device DSD	31
5.1 Prüfmaschine	31
5.2 Durchführung der Prüfung am Material	32
5.3 Ergebnisse der DSD Prüfungen	34
5.3.1 1. Phase in Darmstadt (SDA 8-16, SDA 4-16 und AC MR 8)	34
5.3.2 2. Phase in Darmstadt (SDA 4-20 und PA 8)	35
5.3.3 3. Phase in Karlsruhe (SDA 8-16, SDA 4-16 und AC MR 8, SDA 4-20 und PA 8)	36
5.3.4 Unterschiede der Ergebnisse Karlsruhe und Darmstadt (SDA 4-20 und PA 8)	36
5.3.5 Vergleiche zwischen Karlsruhe und Darmstadt (SDA 4-20, SDA 8-16 und PA 8)	37
5.3.6 Vergleiche zwischen Karlsruhe und Darmstadt (AC 22 WDL und AC 16 WDL)	38
6 Phase 1 Evaluation der Prüfmethode	41
6.1 Bürstenverfahren	41
6.1.1 Strassenreinigung (Besen)	41
6.1.2 Rechen	43
6.1.3 Spikesreifen	44
6.2 Schälverfahren	46
6.2.1 Provisorische Strassenmarkierung	46
6.2.2 Stahlbänder	50
6.2.3 Fazit	50
6.3 Wasserstrahlverfahren (Wasserjet)	51
6.3.1 Wasserdruckverfahren Runddüse	51
6.3.2 Wasserdruckverfahren Flachdüse	51
6.3.3 Fazit	53
6.4 Haftzugversuch	53
6.4.1 Versuchsdurchführung mit Gerät Proceq DY-216	53
6.4.2 Ergebnisse Haftzugversuch an im Labor hergestellten Platten	55
6.4.3 Fazit	57
6.5 Entscheid Prüfmethode	57

7	Phase 2 Validierung der Haftzugprüfung	59
7.1	Haftzugversuche an allen Belagssorten	59
7.1.1	Versuchsdurchführung mit Empa Gerät	59
7.1.2	Ergebnisse Haftzugversuch bei 10°C und 20°C	61
7.1.3	Ergebnisse Haftzugversuch nach Wasserlagerung	61
7.1.4	Ergebnis Haftzugversuch nach Frost-Tau-Zyklen	62
7.2	Vergleich Proceq DY-216 Gerät mit Empa Methode	62
7.2.1	Durchführung der Prüfungen	62
7.2.2	Ergebnisse der Prüfungen	64
7.3	Haftzugkraft in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit	64
7.3.1	Versuchsaufbau	64
7.3.2	Soll- und Ist-Geschwindigkeit des PROCEQ DY-216 Geräts	65
7.3.3	Einfluss der Geschwindigkeit auf die Haftzugspannung	66
7.4	Einfluss des Anbohrens auf die Haftzugspannung	67
8	Phase 3 Haftzugversuche in situ	69
8.1	Versuchsstrecke Chavannes-les-Forts (FR)	69
8.1.1	Allgemeines	69
8.1.2	Durchführung Vergleichsversuche	69
8.1.3	Vergleichsversuche mit Abzugstempeln von 50 mm und 100 mm	70
8.1.4	Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Schleifverfahren	71
8.1.5	Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Haftzuggeräten	72
8.1.6	Vergleichsversuche bei unterschiedlichen Temperaturen	73
8.1.7	Vergleichsversuche bei unterschiedlichen Hohlraumgehalten	73
8.1.8	Zusammenhang zwischen Haftzugspannung und Kornausbrüchen	73
8.2	Ausgewählte Versuchsstrecken im Kanton Freiburg	74
8.2.1	Allgemeines	74
8.2.2	Methodologie	75
8.2.3	Ergebnisse	76
9	Diskussion	77
9.1	Vergleich Haftzugwerte	77
9.1.1	Laborwerte Empa und CCDR	77
9.1.2	Laborwerte Empa, CCDR und in situ Werte CCDR	78
9.2	Aussagekraft Haftzugverfahren	78
9.2.1	Auswirkung des Abzugstempeldurchmessers	78
9.2.2	Auswirkung der Abzugsgeschwindigkeit	79
9.2.3	Auswirkung des Verdichtungsgrades	80
9.2.4	Auswirkung des Anbohrens	81
9.3	Aussagekraft und Präzision des DSD	81
9.3.1	Präzision	81
9.3.2	Aussagekraft	82
9.3.3	Vergleich Haftzug/DSD	82
10	Schlussfolgerungen	85
10.1	Ausgangslage und Auswahl der Prüfmethode	85
10.2	Evaluation der Prüfmethode an Laborprüfkörpern	85
10.3	Evaluation der Prüfmethode in situ	86
10.4	Bewertung	87
11	Dank	89
	Anhänge	91
	Glossar	117
	Literaturverzeichnis	119
	Projektabschluss	121

Zusammenfassung

Einleitung

Vier europäische Forschungsinstitutionen entwickelten jeweils eine Oberflächen-Verschleiss-Prüfmaschine, um das Kornausbruchverhalten von Asphaltmischungen vorherzusagen. Alle vier Geräte wurden vom CEN-Komitee TC 227 ausgewählt und sind nun Teil der technischen Spezifikation CEN/TS 12697-50 "Resistance to scuffing" [2]. Nach der ersten Veröffentlichung der TS (2016) wurde ein Vergleich zwischen den Prüfverfahren durchgeführt. Das Hauptziel dieser Vergleichsuntersuchung war die Auswahl einer harmonisierten Prüfmethode aus den bestehenden vier. Die Ergebnisse wurden im Jahr 2019 veröffentlicht [17]. Das Prüfprogramm umfasste drei Arten von Asphaltmischungen, wobei das Mischgutdesign leicht modifiziert wurde, um neben einem Referenzmischgut zwei Mischgutproben minderer Qualität zu erhalten.

Es zeigte sich, dass kein Gerät in der Lage war, Unterschiede zwischen den Prüfergebnissen der minderwertigen Mischungen und dem Referenzmischgut festzustellen. Auch waren die Ergebnisse der Geräte untereinander nicht vergleichbar und alle Geräte wiesen grosse Standardabweichungen (oft mehr als 30 %) auf. Die Autoren folgerten, dass die Ergebnisse des Ringversuches unzureichend waren, da sie weder eine gute Korrelation zwischen den Geräten ergaben, noch zwischen gutem und minderwertigem Asphaltmischgut differenzieren konnten. Auch konnte weder ein "bestes" Gerät ermittelt, noch ein "schlechtes" Gerät ausgeschlossen werden.

Zwar zeitgleich doch unabhängig von den oben erwähnten Vergleichsuntersuchungen versuchten die Autoren des vorliegenden Forschungsprojekts, eine neue Methode zur Messung des Oberflächenverschleisses bzw. der Anfälligkeit gegen Kornausbrüche zu entwickeln. Dabei standen zwei Hauptgedanken im Vordergrund: eine praxisnahe Prüfmethode, die das Prinzip der Reifensimulation, wie sie den eingangs erwähnten Prüfmethoden zu Grunde liegt, vermeidet und für die Prüfung vor Ort anwendbar ist. Weiterhin lag der Fokus auf einem kostengünstig und einfach herzustellendem Gerät.

In einem ersten Schritt wurden vier sehr unterschiedliche Techniken: das Bürstenverfahren (analog Krautbesen zur Strassenreinigung), der Schälversuch (analog Schälzug bei Dichtungsbahnen), das Wasserhochdruckverfahren (Wasser-Jet analog Hochdruckreiniger) und der Haftzugversuch (analog EN 1542 [3]) ausgewählt und auf ihre Durchführbarkeit und Aussagekraft hin überprüft. Von diesen vier Techniken war nur der Haftzugversuch aussagekräftig. Er wurde weiterverfolgt und mit der Methode B aus CEN/TS 12697-50, d.h. dem Darmstadt Scuffing Device DSD, verglichen. Diese Methode war 2017 zum Vergleich ausgewählt worden, da sie damals den Forschungsstellen sowohl zuverlässig als auch mit erträglichem Aufwand durchführbar erschien.

Die für das Projekt ausgewählten Asphaltmischungen waren offenporiger Asphalt PA 8 sowie semidichter Asphalt SDA 4 und SDA 8 mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten. Als Kontrollmischung wurde Asphaltbeton Macrorugueux AC MR 8 mit erwartungsgemäss geringem Kornverlust verwendet. Alle Mischungen wurden in einer Mischanlage mit dem gleichen Polymerbitumen PmB 45/80-65 hergestellt.

Alle Laborversuche wurden an im Labor verdichteten Platten der Grösse 590 x 390 x 40 mm durchgeführt. Von diesen Platten wurden auch Probekörper für DSD-Prüfungen entnommen und an die Universitäten Darmstadt und Karlsruhe geschickt.

Genauigkeit der DSD Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurden Proben für die DSD-Prüfung nach Darmstadt geschickt. Später wurde auch die Universität Karlsruhe aus logistischen Gründen mit einbezogen, da sie über eine baugleiche DSD-Prüfmaschine verfügte. Als sich herausstellte, dass die

Prüfergebnisse zwischen den beiden Universitäten signifikant voneinander abwichen, wurde ein Vergleich mit semidichtem Asphalt SDA 4-20, SDA 8-16 und offenporigem Asphalt PA 8 Probekörpern aus derselben Platte durchgeführt. Darüber hinaus wurden an beiden Universitäten auch SDA 4-16 und AC MR 8 Probekörper geprüft, die aus unterschiedlichen Platten stammten. Der Vergleich der Ergebnisse ist in der untenstehenden Abb. 1 (entspricht Abb. 15 im Bericht) dargestellt.



Abb.1 Ermittelte Kornverluste nach 10 Doppelzyklen der Mischgutsorten SDA 4-20, SDA 8-16 und PA 8 sowie schraffiert SDA 4-16 und AC MR 8 im Vergleich Karlsruhe und Darmstadt (entspricht Abb. 15 im Bericht)

Wie bereits erwähnt, gibt es erhebliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Universitäten. Abgesehen von AC MR 8 mit sehr geringem Materialverlust beträgt die mittlere relative Abweichung 28 %, ein Wert, der den Ergebnissen des zuvor erwähnten Ringversuchsprogramms entspricht.

Evaluation der Haftzugprüfung an Laborprobekörpern

In einem ersten Schritt wurde die Aussagekraft des Haftzugverfahrens bewertet, indem zwei Parameter, nämlich die Testtemperatur und die Mischgutsorte variiert wurden. Das Ergebnis ist in Abb.2 (entspricht Abb. 44 im Bericht) dargestellt.

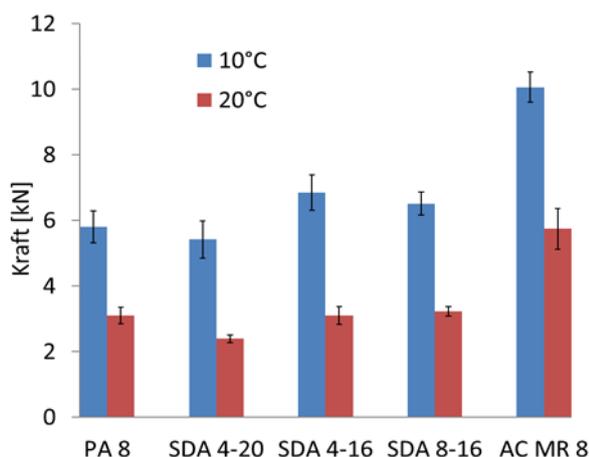


Abb.2 Ergebnisse der Haftzugversuche für alle untersuchten Asphaltmischungen bei 10°C und 20°C (entspricht Abb. 44 im Bericht)

Wie erwartet ist die Haftzugfestigkeit sehr abhängig von der Asphalttemperatur. Andererseits unterscheidet sich die Haftzugfestigkeit der unterschiedlichen Mischgutsorten - abgesehen vom AC MR 8 mit nur 3 % Hohlraumgehalt - kaum. Betrachtet man jedoch

die Ergebnisse im Detail und vergleicht nur den Mischgutttyp SDA 4, so zeigt sich ein signifikanter Anstieg der Haftzugfestigkeit zwischen SDA 4-20 mit 19 % Hohlraumgehalt und SDA 4-16 mit 12 % Hohlraumgehalt.

Des Weiteren zeigte der Vergleich zwischen verschiedenen Prüfverfahren (Haftzuggerät CDDR und Prüfmaschine Empa), dass es wichtig ist, zu verhindern, dass sich die Platte während der Haftzugprüfung kuppelförmig verformt. Wird diese Verformung nicht verhindert, resultiert dies in einer geringeren Haftzugfestigkeit (Verringerung von ca. 40 % bei 20 °C). Daher muss eine genormte Haftzugprüfung das Aufbringen eines Stahlrings beinhalten. Für die Prüfung vor Ort ist diese Zusatzeinrichtung dagegen nicht notwendig.

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Haftzugsgeschwindigkeit. Eine genormte Haftzugprüfung sollte – aufgrund der bisherigen Erkenntnisse - bei einer festgelegten Geschwindigkeit zwischen 20 N/s und 50 N/s durchgeführt werden.

Ein letzter in die Untersuchungen einbezogener Parameter war die Frage des Einflusses des Anbohrens. Hierzu wurden vor dem Aufkleben der Metallplatte und der Haftzugprüfung der zu testende Belag bis in eine Tiefe von einigen Millimetern angebohrt. Eine durchgeführte Messreihe zeigte allerdings keinen signifikanten Unterschied zwischen den angebohrten und nicht angebohrten Prüfkörpern, weshalb empfohlen wird, diesen zusätzlichen Schritt nicht in das Prüfverfahren aufzunehmen.

Validierung des Haftzugverfahrens in situ

An den beiden in situ Messkampagnen beteiligten sich zwei Laboratorien mit jeweils unterschiedlichen Haftzuggeräten. Die erste Messkampagne fand auf einem Strassenabschnitt statt, der aus mehreren im Jahr 2018 verlegten Testfeldern bestand. Diese Testfelder umfassten eine Vielzahl von unterschiedlichen SDA-Mischungen mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten, darunter SDA 4 und 8, aber auch nicht genormter SDA 2 und 6. Die zweite Messkampagne fand auf verschiedenen Strecken mit SDA 4 statt, die zwischen 2015 und 2017 verlegt worden waren und im Jahr 2021 unterschiedlich starke Kornausbrüche aufwiesen.

Das Ergebnis dieser in situ Messkampagnen ist aus Sicht der Reproduzierbarkeit sehr zufriedenstellend. Da die wichtigsten Parameter wie Oberflächenvorbereitung, Klebverfahren, Asphalttemperatur und Haftzuggeschwindigkeit vergleichbar waren, zeigen die ermittelten Haftzugfestigkeiten eine sehr gute Übereinstimmung beider Geräte. Die durchschnittliche relative Differenz beträgt weniger als 3 %, was z. B. bei einer durchschnittlichen Haftzugfestigkeit von 1.00 N/mm² ein Messintervall von 0.97 ... 1.03 N/mm² ergibt.

Die eigentliche Schwierigkeit vor Ort ist die Temperaturkontrolle der Deckschicht (ganz zu schweigen vom Temperaturgefälle von oben nach unten). Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, muss zum einen der zulässige Oberflächentemperaturbereich reduziert werden (z. B. 15 bis 25 °C) und zum anderen der gemessene Haftzugfestigkeitswert auf den bei einer Standardtemperatur (z. B. 20 °C) ermittelten, korrigiert werden. Dazu finden sich in der Literatur verschiedene Beispiele für normalisierten Versuchsmethoden, bei denen Korrekturfaktoren vorgegeben werden.

Anforderungswerte

Die Definition von Anforderungen in einer Prüfnorm kann erst erfolgen, wenn die Parameter wie Oberflächentemperatur und Haftzuggeschwindigkeit festgelegt sind. Es ist zu erwarten, dass Routineprüfungen an Laborprobekörpern gleiche Haftzugfestigkeiten liefern, es sei denn, es ist ein Fehler bei der Mischgutkonzeption aufgetreten. Ein leichter Unterschied in den Mindestanforderungen könnte in Abhängigkeit von der Art der SDA eingeführt werden.

Andererseits werden die in situ durchgeführten Messungen, abhängig vom Verdichtungsgrad, der Alterung des Bindemittels und des Belagszustands (Ermüdung und bleibende Verformung) eine grössere Bandbreite von Haftzugfestigkeiten ergeben. Erst hier, in einer realen Situation, erhalten die Mindestanforderungen ihre volle Bedeutung. Darüber hinaus haben die Messkampagnen gezeigt, dass zwei unterschiedliche Anforderungswerte berücksichtigt werden sollten: einer nach Einbau des Belags (d.h. zu Beginn der Lebensdauer) und ein weiterer am Ende der 5-Jahres-Garantiefrist.

Abschliessend ist noch anzumerken, dass bisher auch keine Anforderungen für den DSD-Prüfmethode oder andere in der europäischen Richtlinie erhaltene Verfahren definiert wurden.

Ausblick

Auch wenn im vorliegenden Projekt kein ausreichender Grad an methodischer Entwicklung erreicht werden konnte, um den Haftzugversuch als standardisierte Methode in der Schweiz anzubieten, erfüllt die Haftzugmethode die angestrebten Ziele: Vermeidung des Prinzips der Reifensimulation, Anwendbarkeit in situ und einfache Bedienung. Ausserdem hat sich gezeigt, dass verschiedene Haftzugvorrichtungen präzise Werte liefern und sowohl hinsichtlich Wiederholbarkeit als auch Reproduzierbarkeit gut übereinstimmen. Im Gegensatz zu allen in der CEN/TS 12697-50 enthaltenen Laborprüfverfahren, erlaubt die im Forschungsprojekt vorgeschlagene Haftzugprüfung die Untersuchung im Labor und auf der Strasse.

An der in situ Messkampagne in Chavannes-les-Forts hat sich gezeigt, dass die SDA-Korngrösse (4, 6 oder 8 mm) die Haftzugfestigkeit nicht beeinflusst. Dies ist eine Beobachtung, die es verdient, genauer untersucht zu werden. Wenn sie sich bestätigt, bedeutet dies, dass die Frage des Kornausbruchs bei der Entscheidung zwischen SDA 4, 6 oder 8 keine Rolle spielt.

Ein ähnliches Prüfverfahren wie die Haftzugprüfung wird in der EN 12697-51 beschrieben und ist für die Messung der Oberflächenscherfestigkeit für Start- und Landebahnen sowie von Rollwegen auf Flugplätzen vorgesehen. Der Hauptunterschied in dieser Norm ist, dass die Kraft, die auf die Metallplatte ausgeübt wird, eine Torsionskraft ist. Das hier vorgestellte neue Haftzugverfahren zur Messung der Anfälligkeit gegen Kornausbrüche könnte ebenfalls Gegenstand einer Norm sein. Zahlreiche Parameter, die die Haftzugfestigkeit beeinflussen, wurden im Rahmen dieser Arbeit bereits identifiziert und bewertet. Allerdings müssten, um die für eine Norm notwendige Aussagekraft und Klarheit zu erreichen, noch einige offenen technischen Fragen beantwortet werden, insbesondere die der Temperaturkorrektur. Letztendlich sollten, um die Ergebnisse beurteilen zu können, Mindestanforderungen festgelegt werden.

Insgesamt hat das Forschungsprojekt aber die generelle Problematik von Methoden zur Bestimmung des Kornausbruchverhaltens aufzeigen und insbesondere das im europäischen Bereich verwendete Darmstädter Scuffing Device Verfahren DSD als nicht empfehlenswert und nicht normenwürdig herausstellen können.

Résumé

Quatre organismes européens ont développé un dispositif d'arrachement superficiel destiné à prédire le risque de perte de gravillons des enrobés bitumineux. Les quatre dispositifs ont été sélectionnés par le comité TC 227 du CEN et font maintenant partie de la spécification technique CEN/TS 12697-50 *Résistance aux arrachements superficiels* [2]. Suite à la première publication de la TS (2016), un programme de comparaison interlaboratoires a été lancé. L'objectif principal de ce programme était de développer une méthode d'essai harmonisée fondée sur les quatre existantes. Les résultats ont été publiés [17] en 2019. Le programme d'essai comprenait trois types d'enrobés bitumineux et pour chaque type, la formulation du mélange a été légèrement modifiée pour obtenir 1 échantillon standard et 2 échantillons de mauvaise qualité.

Aucun des appareils n'a été capable de faire la distinction entre les échantillons de mauvaise qualité et les échantillons standard. Aucun des appareils n'a fourni les mêmes résultats que les trois autres. En ce qui concerne la dispersion, tous les appareils ont montré des écarts types importants (souvent plus de 30 %). En conclusion, les participants s'accordent à dire que les résultats de la comparaison interlaboratoires étaient médiocres. Ils n'ont pas produit de bonnes corrélations entre les appareils, que ce soit pour tous les mélanges ou pour des mélanges spécifiques. Aucun "meilleur" appareil n'a pu être identifié et aucun "mauvais" appareil n'a pu être exclu du TS.

Dans le même temps et indépendamment de la comparaison interlaboratoires mentionnée ci-dessus, les auteurs du présent projet de recherche ont souhaité développer une nouvelle méthode pour mesurer la susceptibilité à la perte de gravillons. L'objectif était de se concentrer sur deux idées principales : éviter le principe du pneu en mouvement (la contrainte simultanée de compression et cisaillement n'étant pas l'unique sollicitation à l'origine de la perte de gravillon) et développer un essai réalisable à même la route. En outre, l'accent a été mis sur un dispositif peu coûteux et facile à utiliser.

Dans un premier temps, la faisabilité de quatre techniques singulières a été évaluée, à savoir le râteau rotatif, le pelage, le jet d'eau à haute pression et l'essai d'arrachement par traction directe. Parmi ces quatre techniques, seul l'essai d'arrachement par traction directe s'est avéré concluant et a fait l'objet d'une évaluation plus approfondie et d'une comparaison avec la méthode B de la norme CEN/TS 12697-50, à savoir le dispositif d'arrachement Darmstadt DSD (Darmstadt Scuffing Device). Lorsque cette méthode DSD avait été choisie en 2017, les auteurs du présent projet la présument fiable et réalisable avec peu d'effort.

Les mélanges bitumineux choisis pour le projet étaient le PA 8 ainsi que le SDA 4 et le SDA 8 avec différents teneurs en vides. L'enrobé macrorugueux AC MR 8, peu susceptible à la perte de gravillons, a été inclus comme mélange de contrôle. Tous les mélanges ont été produits dans une même centrale d'enrobage et en utilisant le même bitume modifié aux polymères PmB 45/80-65.

Tous les essais en laboratoire ont été réalisés sur des plaques compactées en laboratoire de dimensions 590 x 390 x 40 mm. Des éprouvettes ont été prélevées sur ces plaques pour les essais DSD et envoyées aux universités de Darmstadt et de Karlsruhe.

Fidélité des résultats DSD

Dans un premier temps, les éprouvettes destinées aux essais DSD ont été envoyées à Darmstadt. Par la suite, pour des raisons de logistique, l'université de Karlsruhe, qui possède exactement le même appareillage que Darmstadt, a également participé aux essais. Lorsqu'il s'est avéré que les résultats entre les deux universités différaient de manière significative, une comparaison plus rigoureuse avec des éprouvettes SDA 4-20,

SDA 8-16 et PA 8 provenant de la même plaque a été effectuée. Une vue d'ensemble comprenant les résultats sur une même plaque et sur plaques différentes est montrée dans la figure ci-dessous (Fig. 15 du rapport).



Fig.15 Perte de gravillons des mélanges bitumineux SDA 4-20, SDA 8-16 et PA 8 ainsi que SDA 4-16 et AC MR 8 (hachuré) ; comparaison entre Karlsruhe et Darmstadt

Si l'on ne tient pas compte de l'AC MR 8, dont la perte de gravillons est très limitée, la différence relative moyenne est de 28 %, une valeur qui correspond aux résultats du comparatif interlaboratoires mentionné précédemment.

Développement de l'essai de traction directe sur plaque de laboratoire

Dans un premier temps, la sensibilité de la procédure d'arrachement par traction directe a été évaluée en changeant deux variables à la fois, c'est-à-dire la température de l'essai et la sorte d'enrobé. Le résultat est illustré à la figure ci-dessous (Fig. 44 du rapport).

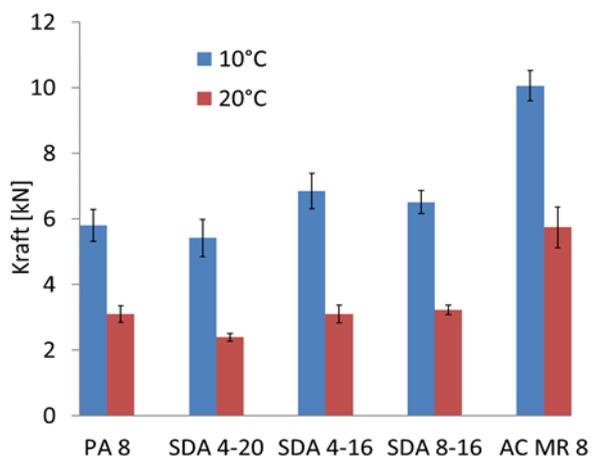


Fig.44 Résultats de l'essai de traction directe pour tous les enrobés étudiés à 10°C et 20°C

Comme prévu, la résistance à l'arrachement par traction directe est très sensible à la température de l'enrobé. D'autre part, on peut difficilement différencier les sortes d'enrobé (sauf pour l'AC MR 8 avec seulement 3 % de vides d'air). Mais en regardant les chiffres en détail et en ne comparant que la sorte SDA 4, il y a tout de même une augmentation significative de la résistance à l'arrachement entre le SDA 4-20 (19 % de vides d'air) et le SDA 4-16 (12 % de vides d'air).

En outre, une comparaison entre deux différents dispositifs expérimentaux a montré qu'il est important d'empêcher la dalle de prendre la forme d'un dôme pendant l'arrachement. Si cette déformation n'est pas empêchée, la résistance maximale à l'arrachement est

beaucoup plus faible (environ moins 40 % à 20 °C). Par conséquent, un essai d'arrachement par traction directe normalisé doit inclure la fixation d'un anneau en acier (voir exemple d'anneau à la Fig. 42 du rapport). Cet élément supplémentaire n'est pas nécessaire pour les essais sur site.

Un autre paramètre important est la vitesse d'arrachement. Un essai d'arrachement normalisé doit indiquer une vitesse qui, selon notre expérience acquise en cours de projet, devrait être choisie entre 20 N/s et 50 N/s.

Une dernière étude a porté sur l'effet d'un pré-carottage. Il s'agit d'un carottage de la surface d'essai à une profondeur de quelques millimètres avant le collage de la plaque métallique et la traction. Les mesures réalisées n'ont pas montré de différence significative avec ou sans pré-carottage. Cela signifie que la diminution en terme d'interface de rupture après sciage des grains situés à la circonférence de la plaque métallique n'influence pas ou très peu la force d'arrachement. Nous recommandons de ne pas inclure cette étape dans la procédure d'essai.

Validation de l'essai de traction directe sur site

Deux laboratoires, disposant chacun d'un appareil d'arrachement portable de marque différente, ont participé aux campagnes de mesure. La première campagne sur site a eu lieu sur une section de route composée de plusieurs planches d'essai posées en 2018. La série de planches est constituée d'une grande variété d'enrobés SDA, notamment des SDA 4 et 8 mais aussi des SDA 2 et 6 non normalisés, chacun formulés avec différents teneurs en vides (les composants de base restant identiques). La deuxième campagne sur site a eu lieu sur plusieurs sections plus anciennes de SDA 4 posées entre 2015 et 2017 et qui présentent en 2021 différents degrés de gravité de perte de gravillons.

Le résultat de ces essais sur site est très satisfaisant du point de vue de la reproductibilité. Étant donné que les paramètres les plus importants (préparation de la surface, procédure de collage, température de l'enrobé, vitesse de traction) étaient identiques, la résistance à l'arrachement montre un très bon accord entre les deux appareils. La différence relative moyenne est inférieure à 3 %.

La véritable difficulté sur site est le contrôle de la température de la couche de roulement (sans même parler du gradient de température entre le haut et le bas de celle-ci). Pour obtenir des résultats comparables, il faut, d'une part, réduire la plage de température de surface autorisée (par exemple de 15 à 25 °C) et, d'autre part, corriger la valeur de résistance mesurée en la rapportant à une température de référence (par exemple 20 °C).

Exigences minimales

À une vitesse de traction de 100 N/s, avec des plaques métalliques de 50 mm de diamètre et à une température de surface aussi proche que possible de 20 °C, les valeurs de résistance à l'arrachement sur site étaient comprises entre 0,7 et 1,8 N/mm². Des valeurs plus élevées de 1,3 ... 1,8 N/mm² ont été trouvées sur les planches d'essai de 2018 ; des valeurs plus faibles de 0,7 ... 1,2 N/mm² ont été mesurées sur les couches de roulement SDA 4 dégradées datant de 2015 et 2016.

La prescription d'exigences dans une norme produit ne peut se faire qu'une fois les paramètres de température de surface et de vitesse d'arrachement fixés. De manière générale, on peut s'attendre à ce que les essais de routine sur des éprouvettes de laboratoire donnent des résultats de bon niveau, à moins qu'une erreur ne se soit produite lors de la formulation ou de la fabrication du mélange. Cependant, une légère différence dans les exigences minimales pourrait être introduite en fonction de la sorte de SDA. D'autre part, les mesures sur site fourniront une gamme plus large de résistances à

l'arrachement, en fonction de l'intensité du compactage, de l'état de durcissement du liant et de l'état de fatigue et de déformation permanente de la superstructure. C'est ici, dans une situation réelle, que les exigences minimales prennent tout leur sens. De plus, les campagnes de mesure ont montré que deux niveaux d'exigence devraient être prescrits, à savoir, l'un pour la première année de service et l'autre qui s'appliquerait, par exemple, à la fin de la période de garantie de 5 ans.

Il convient de noter que, jusqu'à présent, aucune exigence n'a été définie pour le test DSD.

Perspectives

Même si le présent projet n'a pas permis d'atteindre une procédure d'essai suffisamment élaborée pour rédiger une norme, la méthode de l'arrachement par traction directe répond à tous les objectifs : éviter la simulation de trafic à l'aide d'un pneu, être réalisable sur site et facile d'utilisation. De plus, il a été démontré que les différents dispositifs d'arrachement fournissent des valeurs précises, tant en répétabilité qu'en reproductibilité. Contrairement à toutes les méthodes présentées dans la CEN/TS 12697-50, la méthode proposée ici est réalisable aussi bien sur des éprouvettes de laboratoire que directement sur la chaussée.

De la campagne de mesures à Chavannes-les-Forts, il ressort que la granulométrie du SDA (4, 6 ou 8 mm) n'est pas un paramètre qui influence la résistance à l'arrachement. C'est une observation qui mériterait d'être étudiée plus en détail. Si elle était confirmée, elle pourrait signifier que la question de la perte de gravillons ne devrait pas influencer le choix entre un SDA 4, 6 ou 8.

Une méthode d'essai similaire est décrite dans la norme EN 12697-51 consacrée à la mesure de la résistance au cisaillement des pistes d'aéroport. La principale différence dans cette norme est que la force appliquée sur la plaque métallique est une torsion. La nouvelle méthode d'arrachement par traction directe pour mesurer la susceptibilité à la perte de gravillons pourrait également faire l'objet d'une norme. De nombreux paramètres qui influencent la résistance à l'arrachement ont déjà été identifiés et évalués au cours de ce travail. Cependant, pour atteindre la clarté et la rigueur d'une norme, il reste encore des questions complémentaires à résoudre, notamment en ce qui concerne la correction de température. Enfin, pour pouvoir évaluer les résultats, des exigences minimales doivent être prescrites.

Dans l'ensemble, cependant, le projet de recherche a pu exposer la problématique des méthodes de détermination de la résistance à l'arrachement des gravillons et, en particulier, mettre en évidence que la méthode DSD (Darmstadt Scuffing Device) préconisée dans l'espace CEN n'est pas recommandable et ne mérite pas d'être normalisée.

Summary

Introduction

Four different entities in Europe have developed a scuffing device designed to predict the raveling potential of asphalt mixtures. All four devices were selected by the CEN committee TC 227 and are now part of the technical specification CEN/TS 12697-50 *Resistance to scuffing* [2]. Following the first publication of the TS (2016), a round robin testing program was undertaken. The main goal of the round robin was to develop one harmonised test method out of the existing four. The outcome was published [17] in 2019. The testing program included three types of asphalt mixtures and for each type the mix design was slightly modified to obtain 1 standard specimen and 2 poor-quality specimens.

None of the devices was able to discriminate between both poor-quality and the standard specimens. None of the devices provided the same results as the other three. With regard to accuracy, all devices showed large standard deviations (often more than 30 %). As a conclusion, the participants agree that the results of the round robin were poor. They did not produce good correlations between devices, whether for all mixtures or for specific mixtures. No “best” device could be identified nor any “bad” device could be excluded from the TS.

At the same time but independently of the above mentioned round robin test, the authors of this research project sought to develop a new method for measuring the susceptibility for raveling. It was intended to focus on two main ideas: a practical test method avoiding the principle of tire simulation and be applicable for on-site testing. Further, the focus was on an inexpensive and easy to operate device.

In a first step, the feasibility of four very different techniques was evaluated i.e. a rotating wire brush or rake, peeling, high-pressure water jet and pull-out test. Of these four techniques, only the pull-out test was conclusive and was further evaluated and compared to the method B from CEN/TS 12697-50, i.e. the Darmstadt Scuffing Device DSD.

The asphalt mixtures chosen for the project were PA 8 as well as SDA 4 and SDA 8 with different air void contents. To these was added a so-called macrorugueux AC MR 8 with expected limited aggregate loss as control mixture. The mixtures were produced in a mixing plant using the same polymer modified bitumen PmB 45/80-65.

All laboratory tests were conducted on laboratory compacted slabs of size 590 x 390 x 40 mm. From a number of these slabs, specimens for DSD tests were taken and sent to the universities of Darmstadt and Karlsruhe. The remaining slabs were distributed between EMPA and CCDR.

Accuracy of the DSD results

In a first step specimens for DSD testing were sent to Darmstadt. Later, university of Karlsruhe was also involved in the testing. When it was found that test results between the two universities - although having exactly the same testing device – differed significantly, a closer comparison with SDA 4-20, SDA 8-16 and PA 8 specimens from the same slab was conducted. The overall outcome including results from the same slab and from different slabs is given in the figure shown below (Fig. 15 in the main document).

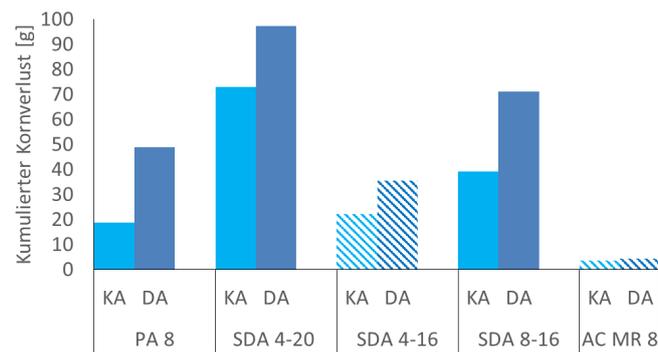


Fig.15 Aggregate loss after 10 double cycles for asphalt mixtures SDA 4-20, SDA 8-16 and PA 8 as well as SDA 4-16 and AC MR 8 (hatched) in comparison between Karlsruhe and Darmstadt (Figure 15 in main document)

As mentioned earlier, there are substantial differences between the results from both universities. Leaving aside AC MR 8 with very limited loss of material, the mean relative difference is 28 %, a value that meets the findings of the previously mentioned round robin program.

Development of the pull-out test on laboratory slabs

In a first step the sensitivity of the pull-out test procedure was evaluated by changing two variables at once, i.e. the test temperature and the type of asphalt. The result is depicted in the figure shown below (Fig. 44 in the main document).

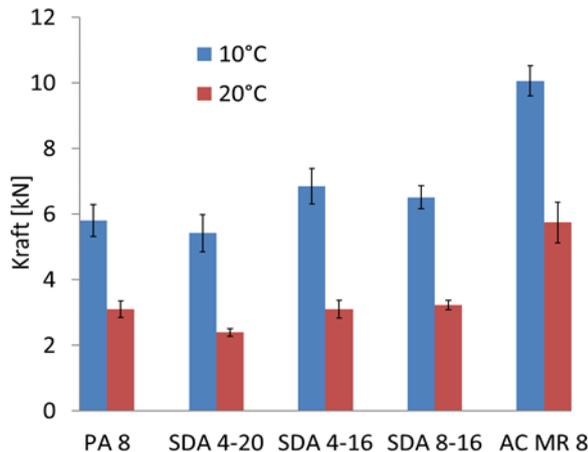


Fig.2 Results of pull-out tests for all investigated asphalt mixtures at 10°C and 20°C (Fig. 44 in the main document)

As expected the pull-out strength is highly sensitive with respect to the asphalt temperature. On the other hand, one can hardly differentiate the mix designs (except for AC MR 8 with only 3 % of air voids). But looking at the numbers in detail and comparing only the SDA 4 type there is still a significant increase of pull-out strength between SDA 4-20 (19 % air voids) and SDA 4-16 (12 % air voids).

Further, a comparison between two different test procedures showed that it is important to prevent the slab from rising into a dome shape during the pull-off. If this deformation is not prevented the maximal pull-out strength is much lower (about 40 % lower at 20 °C). Therefore, a standardized pull-out test must include the attachment of a steel ring. This supplementary apparatus is not necessary for on-site testing.

Another important parameter is the pulling speed. A standardized pull-out test must indicate a speed that according to our knowledge should be chosen between 20 N/s and 50 N/s.

One last parameter has been studied. It is about drilling to a depth of a few millimeters before gluing the metal plate and testing. A series of measurements showed no significant difference with or without pre-drilling. We would recommend that it is not necessary to include this step into the test procedure.

Validation of the pull-out test on-site

Two laboratories with each having a different type of pull-out apparatus participated in the measurement campaigns. The first on-site campaign took place on a road section made up of several test boards laid in 2018. The series of boards consist of a great variety of SDA mix designs, including SDA 4 and 8 but also the non-standardized SDA 2 and 6, each with multiple air voids contents. The second on-site campaign took place on several older SDA 4 sections laid between 2015 and 2017 and which in 2021 show different levels of raveling.

The outcome of these on-site tests is very satisfactory from the point of view of the reproducibility. Given that the most important parameters (surface preparation, gluing procedure, asphalt temperature, pulling speed) were identical, the pull-out strength shows very good agreement for both apparatuses. The average relative difference is less than 3 %, which gives as an example for an average pull-out strength of 1.00 N/mm² a measuring interval of 0.97 ... 1.03 N/mm².

The real difficulty on-site is the temperature control of the wearing course (not to mention the temperature gradient from top to bottom of it). To achieve comparable results, on the one hand the permitted surface temperature range must be reduced (say 15 to 25 °C) and on the other hand the measured strength value must be corrected to that at a standard temperature (say 20 °C). The latter can be achieved with the help of a linear regression or an abacus.

Requirement values

At a pulling speed of 100 N/s, with metal plates 50 mm in diameter and at a surface temperature as near as possible to 20 °C, the on-site pull-out strength values ranged between 0.7 and 1.8 N/mm². Higher values of 1.3 ... 1.8 N/mm² were found on the test boards from 2018; lower values of 0.7 ... 1.2 N/mm² characterized the distressed SDA 4 wearing courses from 2015 and 2016.

The definition of requirements in a test standard can only be done once the parameters of surface temperature and pulling speed are set. It can be expected that routine tests on laboratory specimens will deliver the same good level of pull-out strengths unless an error occurred during the mix-design. A slight difference in minimal requirements could be introduced as a function of the sort of SDA. On the other hand, on-site measurements will provide a wider range of pull-out strengths, depending on the compaction intensity, the state of hardening of the binder and the state of fatigue and permanent deformation. It is here, in a real situation that the minimum requirements take on their full meaning. Further, the measurement campaigns have shown that two sets of requirements should be considered: one for the beginning of the service life and another that applies for instance at the end of the 5-year warranty period.

It should be noted, that so far no requirements have been defined for the DSD test.

Outlook

The pull-out method meets all objectives: avoid the principle of tire simulation, applicable on-site and easy to operate. Further, it has been shown that different pull-out devices provide precise values, both in repeatability and reproducibility.

From the on-site campaign in Chavannes-les-Forts it appears that the SDA grain size (4, 6 or 8mm) is not a parameter that influences the pull-out strength. This is an observation that deserves to be studied in more detail. If confirmed, it could mean that the issue of raveling should not influence the choice of SDA 4, 6 or 8.

A similar test method is described in EN 12697-51 and designed for measuring the surface shear strength for airfield runways and taxiways. The main difference in this standard is that the force applied on the metal plate is a torsion. The new pull-out method for measuring the susceptibility for raveling could also be the subject of a standard. Numerous parameters which influence the pull-out strength have already been identified and assessed in the course of this work. However, to achieve the clarity of a standard more has to be done on some specific remaining technical questions, particularly about the temperature correction. And finally, in order to be able to assess the results, minimum requirements should be set.

Overall, however, the research project was able to demonstrate the problematic nature of methods to predict the raveling potential and, in particular, to highlight the Darmstadt Scuffing Device method DSD used in the European area as not recommendable and not worthy of standardization.

1 Einleitung/Ausgangslage

Semidichte Asphalte SDA nach VSS 40 436 [1] werden umfangreich bei Lärmsanierungen eingesetzt. Zum Beispiel im Kanton Genf, wo 130 km Strassen als besonders lärmkritisch gelten, waren im März 2018 110 km (sprich 83 %) davon bereits saniert [4]. Im Kanton Waadt kommen für Lärmsanierungen sowohl SDA 4 als auch hohlraumreicher AC MR 8 in Betracht. Alleine mit SDA 4 wurde eine sanierungsbedürftige Gesamtlänge von 162 km festgelegt, davon sind - Stand März 2021 - 43 km bereits eingebaut. Der akustische Gewinn ist zumindest direkt nach dem Einbau sehr deutlich wahrnehmbar, kann aber im Laufe der Nutzung rapide abnehmen. Gründe dafür sind zum Teil nicht direkt vom Verkehrsaufkommen verursacht, wie zum Beispiel nachträgliche kleinere Bauarbeiten (für Wasser- oder Netzkabelleitungen), Kehr-Saug-Ausmagerungen, Schneepflug-Panzer-Schäden und/oder Verschmutzungen. Aber auch die üblichen Strassenschäden, wie Ausschwitzen von Bitumen, Nachverdichtung in Form von Spurrinnen, Risse, grossflächiges Ablösen und Kornausbrüche tragen stark zu einer Verschlechterung der akustischen Eigenschaften bei.

Es wird stets versucht Strassenschäden zu vermeiden oder zu verlangsamen. Dank den Hochleistungsbitumen PmB der Klasse CH-E konnte der Widerstand gegen Kälte- und Wärme-Einflüsse sowie die Affinität zwischen Gesteinskörnung und Bitumen deutlich verbessert werden [5]. Trotzdem kommt es je nach Geometrie und Lage der Strasse durch Verkehrslast und Alterung zu Kornausbrüchen.

Der hohlraumreiche SDA ist empfindlich gegenüber Wettervariationen [6]. Abkühlung und Erwärmung der ganzen Schicht erfolgen fast simultan mit der Lufttemperatur, der Sonnenstrahlung und der Windstärke, so dass die Amplitude und die Frequenz der Temperaturzyklen im Vergleich zu einem dichten Belag relativ hoch sind. Die höhere Wetterempfindlichkeit und dadurch beschleunigte Alterung des Bindemittels ergeben zusammen mit verkehrsbedingten mechanischen reinen Schubbeanspruchungen Kornausbrüche. Da Kornausbrüche auf einem progressiven Prozess beruhen, d.h. mit zunehmender Anzahl immer schneller voranschreiten, können sie abgesehen von Sicherheits- und Dauerhaftigkeitsproblemen schnell auch zu einer negativen Beeinflussung der Lärminderung führen.

Tab. 1 *Grobe Beschreibung der vier Methoden aus der SNR CEN/TS 12697-50 [2]. A und B wurden an den TU Aachen und Darmstadt, C bei der niederländischen Firma Heijmans und D am IFSTTAR in Nantes entwickelt.*

Methode	A Aachener Raveling Tester ARTe	B Darmstadt Scuffing Device DSD	C Rotating Surface Abrasion Test RSAT	D Triboroute
Grobbeschreibung	Probetisch seitlich beweglich; 2 Reifen auf einer Achse	Probetisch seitlich beweglich; drehende Probe; 1 Reifen	Rotierende Probe; 1 Reifen seitlich beweglich	Modul eingebaut in hydraulische Prüfmaschine; Stahlkufe mit Gummi bezogen
Reifendruck	200 kPa	300 kPa		
Gewicht auf Probe	250 kg	100 kg	35 kg	Sinusförmige Belastung; 250 kg
Prüftemperatur	20°C	40°C	20°C	20°C
Anzahl Zyklen / Versuchsdauer	600 / 2 Stunden	5 / 10 Minuten	86600 / 24 Stunden	10000 / 2 Stunden
Prüfkörperabmessungen	500 x 500 mm	260 x 260 mm	500 x 500 mm	185 x 247 mm

Um die Beständigkeit von SDA gegenüber Kornausbrüchen einerseits zu kontrollieren und andererseits zu verbessern, wurde auf CEN Ebene eine Technische Spezifikation [2] entworfen. Diese enthält vier unterschiedliche Prüfverfahren (Tab. 1), drei davon

beanspruchen die Oberfläche einer Mischgutplatte mit einem Reifen, das vierte mit einer logarithmisch geformten gummibestückten Kufe. Alle vier Versuchsaufbauten benötigen technisch komplexe Einrichtungen und lassen sich ausschliesslich im Labor und nicht in situ verwenden. Keine der vier Methoden vermag es, überzeugend zu wirken. Die scheinbare Praxisnähe wegen des rollenden Reifens ist nicht gegeben. Kritikpunkte sind ausserdem der gewählte Druck, das Reifenprofil, die Methode zur Bestimmung der Ausbruchmenge, keine Berücksichtigung von Wasser und Eis sowie die Versuchsdauer. Zudem wird keine reine Schubbeanspruchung sondern immer auch eine Normalkraft aufgebracht, wodurch die Körner wieder in die Belagsoberfläche hineingedrückt werden statt Kornausbrüche zu provozieren (Tab. 1). Die drei Methoden A, B und C erfordern vom konstruktiven Standpunkt aus heikle Maschinen weil Druck, Verdrehung (Torsion) und Ermüdung das Material stark beanspruchen und der Verschleiss dieser mechanischen Teile des Öfteren zu Pannen führen kann. Ähnliches gilt auch für die sehr ausgefallene Methode D, die eigentlich nicht zur Ermittlung des Widerstandes gegenüber Kornausbrüchen sondern zur Ermittlung des Haftverhaltens im Labor entwickelt wurde.

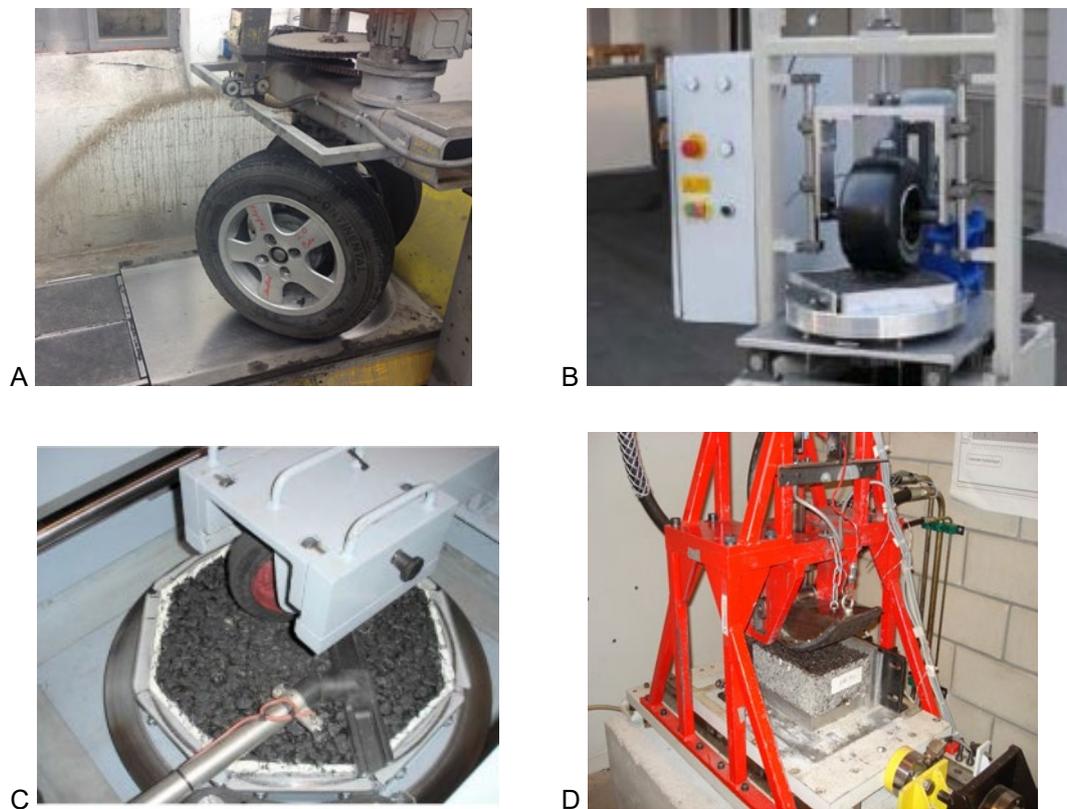


Abb.1 Darstellung der in der CEN/TS 12697-50 vorgeschriebenen Geräte: A Aachener Raveling Tester, B Darmstadt Scuffing Device, C Rotating Surface Abrasion Test RSAT und D Triboroute Maschine

Dem gegenüber will das Forschungskonsortium EMPA/CCDR vier einfache, im Labor und in situ verwendbare Prüfmethoden untersuchen. Die Geräte dafür sind in den meisten Labors in der Grundkonfiguration schon vorhanden mit entsprechend bescheidenen Kosten des Verbrauchsmaterials, weshalb zu erwarten ist, dass die Untersuchung nicht nur von wenigen spezialisierten sondern auch von relativ bescheiden ausgerüsteten akkreditierten Labors ausgeführt werden kann. Dadurch wird es möglich, relativ einfach aussagekräftige Ringversuche durchführen zu können, was bei komplexen Geräten praktisch unmöglich ist.

2 Stand der Forschung, Forschungsbedarf

Die Forschung rund um die vier Prüfmethoden, die in der CEN/TS 12697-50 beschrieben sind, wurde in Publikationen festgehalten. Das Gerät A wurde zum Beispiel 2011 in [8] und 2015 in [9] vorgestellt. Der Umstand, dass zwei Räder verwendet werden, wird seitens des Konsortiums als Nachteil empfunden, da dadurch und durch die Tatsache, dass profilierte Räder verwendet werden Unsicherheiten geschaffen werden (sind die beiden Räder wirklich vergleichbar?). Demgegenüber wird das Gerät B mit nur einem nicht profilierten Rad betrieben, ähnlich dem französischen Spurbildungstester, wodurch die Angriffsfläche auf die Oberfläche erhöht und gleichmässiger wird. Details, zum Gerät B finden sich in den Publikationen [8] und [10] und es ist auch schon eine gewisse Verbreitung dieses Gerätes feststellbar. Beispielsweise ist es nicht nur in Darmstadt sondern bereits auch am KIT in Karlsruhe und am BRRC in Belgien im Einsatz. Dieser Umstand trägt dazu bei, dass dieses Gerät im vorgeschlagenen Projekt als vergleichendes Gerät eingesetzt wird.

Das etwas ausgefallene zur Messung des Reibungswiderstands zwischen profilierten Reifen und Belag im Labor 2008 entwickelte Gerät D [11] unterliegt heute einem französischen Patent (FR 06 50 054). Dies ist grundsätzlich verständlich und kann sinnvoll sein, doch ist jeweils genau zu prüfen, inwieweit damit nicht riskiert wird, an der eigentlichen Fragestellung vorbei zu forschen und auf Kosten der Fokussierung auf ein bereits vorhandenes Gerät wichtige Aspekte zu vergessen. Ebenso das mit einem unprofilierten Reifen Gerät C, welches einen „Minirundlauf“ darstellt, 2004 vorgestellt [12] und von Hejijmans N.V. bei OHIM unter der Trademark 014288948 registriert wurde (<https://tmdb.eu/trademark/014288948/eu/es/rsat>). Bezüglich der Geräte C und D scheint es zudem wenig praxismässig, durch staatliche Forschungsgelder gefördert, in Normen Prüfverfahren mit patentierten und geschützten Gerätschaften vorzuschreiben, und damit quasi durch die öffentliche Hand mitfinanzierte Wettbewerbsvorteile für bestimmte Firmen zu zementieren. Dies ist eine der Motivationen, warum in dem hier vorgestellten Projekt eine einfache, für möglichst viele Labors anwendbare Methode entwickelt wurde.

Ein Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Kornausbrüche wurde in [13] untersucht. Die geschädigte Stelle mit Kornausbruch, im Vergleich zu einer ungeschädigten Stelle desselben Strassenabschnitts, zeigt, dank Prüfungen mit einem Bending-Beam-Rheometer und einem dynamischen Scherrheometer, eine eindeutige Verhärtung des Bindemittels, sowohl bei tiefen als auch bei hohen Temperaturen.

Insbesondere für die Bauherren ist eine Verfolgung und eine fachliche Begleitung der mechanischen und akustischen Eigenschaften der SDA Beläge eine wichtige Entscheidungsquelle [14]. Die bis heute in der Schweiz unternommenen Untersuchungen im Rahmen des Forschungspakets „Lärmarme Beläge innerorts“ [15] haben mehrere interessante Schlussfolgerungen geliefert. Ein besseres Verständnis dieser Wechselwirkung führt sicher zu einer Optimierung der SDA Produkte. Dazu gehört eine einfache, kurze, reproduzierbare und wiederholbare Prüfmethode für die Quantifizierung von Kornausbrüchen.

3 Zielsetzung des Forschungsprojekts

3.1 Forschungsziel

Zur Erreichung der in der Forschungsausschreibung genannten Ziele:

- Entwicklung einer praxisnahen Prüfmethode zur Bestimmung von Kornausbrüchen inkl. Vorschlägen für Anforderungswerte
- Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von SDA Belägen gegen Kornausbrüche unter Einbeziehung von Witterungsbedingungen (Temperaturen, Wasser, Frost)

wird in einem ersten Schritt, die Entwicklung mehrerer einfacher Prüfmethoden in Angriff genommen.

Im Gegensatz zu den in der Europäischen Normung vorgesehenen Methoden, sollen die vom Forscherkonsortium entwickelten Prüfmethoden in jedem Labor/Prüfstelle ohne Anschaffung aufwändiger Prüfgeräte, zum anderen sowohl im Labor als auch in situ durchführbar sein. Die Durchführbarkeit in situ ist wichtig, um eine aussagekräftige Zustandsbeurteilung von Deckschichten über die Betriebsdauer und eine aussagekräftige Validierung der Labormethode zu ermöglichen. Wesentlich ist auch, dass berücksichtigt wird, dass Kornausbrüche vor allem durch Schub in Kombination mit Haftzug am Korn erfolgen. Bestehende Verfahren, wie das kürzlich vorgestellte IMPACT Gerät [16] oder die EN-Verfahren [2] kombinieren jedoch immer mit dem Schub auch vertikale Druckbeanspruchungen. Dadurch wird das Korn in die Oberfläche des Belages hineingedrückt und der Schub/Zugmechanismus zum Herauslösen des Kornes blockiert. Dies verlängert die Prüfdauer und beeinträchtigt die Aussagekraft. Somit wird mit solchen Geräten eher die Veränderung der Griffigkeit unter Verkehr als der Widerstand gegen Kornausbrüche getestet. Bei den meisten Geräten werden zudem durch die Hin- und Herbewegung des Belastungsrades die Körner geradezu in den Belag hineingeknetet, wodurch die Effizienz und Aussagekraft ebenfalls leidet. Zudem wird vergessen, dass Kornausbrüche nicht nur unter Verkehr entstehen, sondern insbesondere auch an Belagsstellen, die nicht durch den Verkehr beansprucht werden. Diesem Umstand wird mit reifenbestückten Geräten nicht Rechnung getragen. Mit den zur Evaluation vorgeschlagenen Verfahren, wird beabsichtigt, sich auf das Herauslösen der Körner zu konzentrieren und dadurch eine effizientere und differenziertere Aussage über diese für die Sicherheit und Dauerhaftigkeit speziell wichtige Eigenschaften zu erhalten.

3.2 Vorgehen

Das Konsortium verfolgt unterschiedliche Ansätze zur Erzeugung von Kornausbrüchen, wobei insbesondere die 5 nachfolgend aufgeführten Methoden zur Evaluation eingesetzt werden:

1. Bürstenverfahren (analog Krautbesen zur Strassenreinigung)
2. Schälversuch (analog Schälzug bei Dichtungsbahnen)
3. Eis-Abriß-Versuch (Aufbringen und Abziehen einer Eisschicht auf dem Belag)
4. Wasser-Jet (analog Kärcher)
5. Haftzugversuch (analog EN 1542 [3])

Die unterschiedlichen Ansätze werden auf ihre Durchführbarkeit und Aussagekraft überprüft. In einem weiteren Schritt werden die brauchbaren und erfolgversprechenden Methoden ausgetestet und schliesslich die am besten geeignete Methode weiter optimiert.

Zur Korrelation der Prüfmethoden mit der Europäischen Normung CEN/TS 12697-50 wird das dort aufgeführte Darmstädter Gerät (DSD Darmstadt Scuffing Device, siehe Abb. 2) eingesetzt.



Abb.2 DSD – Darmstadt Scuffing Device nach CEN/TS 12697-50

Die Untersuchungen im Rahmen der Prüfmethodeevaluation sollten an zwei SDA-Mischungen (SDA 8-12 und SDA 8-16) durchgeführt werden, wobei Prüfkörper aus mit dem Laborverdichter der EMPA hergestellten Platten herausgeschnitten werden, um so eine möglichst praxisnahe Verdichtung und Oberfläche zu erreichen. Dabei wird auch evaluiert, inwieweit der Bindemittelfilm an der Oberfläche entfernt werden muss, zumal Kornausbrüche in der Regel nicht unmittelbar nach dem Einbau erfolgen.

Zur Erreichung des zweiten Forschungsziels, der Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von SDA Belägen gegen Kornausbrüche unter Einbeziehung von Witterungsbedingungen (Temperaturen, Wasser, Frost) werden unterschiedliche Temperatur- und Klimabeanpruchungen gewählt und getestet. Zum einen werden der Einfluss des Wassers (Bindemittelablösung, Wasserlagerung bei 60°C) und andererseits der Einfluss der Kälte mit Frost-Tau-Zyklen untersucht.

Zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von SDA-Belägen gegen Kornausbrüche im Vergleich mit anderen Belagskonzepten sollten neben vier SDA Mischgütern (SDA 4-12, SDA 4-16, SDA 8-12 und SDA 8-16) noch ein dichter AC 8 und ein offenporiger Asphalt PA 8 und ein hohlraumreichen SDA 4-20 zur Beurteilung des oberen Grenzwertes in die Untersuchungen einbezogen werden. Alle Mischgutsorten werden direkt von der Mischanlage entnommen und im Labor mit Hilfe des oben vorgestellten Laborverdichters hergestellt.

3.3 Anpassungen und Modifizierungen

3.3.1 Auswahl der Methoden

Die ursprünglich vorgesehene Eis-Abriss-Methode (Aufbringen und Abziehen einer Eisschicht auf dem Belag) als Methode zur Bestimmung von Kornausbrüchen erwies sich bereits in Voruntersuchungen als nicht geeignet und wurde daher in den nachstehenden Ausführungen nicht mit einbezogen.

Dafür wurde zusätzlich der Haftzug als weitere Methode zur Bestimmung von Kornausbrüchen mit einbezogen und schlussendlich als zu verfolgende Methode für die Phase 2 ausgewählt.

3.3.2 Aufteilung der Phasen

Die ursprünglich in der Ausschreibung und dem Projektbeschrieb vorgesehenen 2 Phasen wurden mit einer 3. Phase ergänzt, in der die mit der Haftzugprüfung in situ durchgeführten Untersuchungen beschrieben werden.

3.3.3 Materialien (Mischgut)

In Abänderung der ursprünglich in der Phase 1 vorgesehenen Materialien SDA 8-12 und SDA 8-16 wurden in Absprache und auf Wunsch der Begleitkommission SDA 8-16 und SDA 4-16 gewählt, um schon hier den Einfluss der Korngrösse auf die Ergebnisse besser abschätzen zu können.

Zusätzlich wurde der ursprünglich in der Phase 2 vorgesehene Asphaltbeton AC 8 in Absprache mit der Begleitkommission durch einen Macrorugueux AC MR 8 ersetzt und schon in der ersten Phase untersucht.

Die nachstehende Übersichtstabelle zeigt die definitive Auswahl der Mischgutsorten und ihre Verwendung für die jeweiligen Prüfungen.

Tab 2. Mischgutsorten und ihre Verwendung

Phase	Kurzbeschreibung	Mischgutsorten
1	Vorversuche an Laborplatten	SDA 4-16, SDA 8-16, AC MR 8
	davon nach Darmstadt	SDA 4-16, SDA 8-16, AC MR 8
2	Validierungsversuche an Laborplatten	SDA 4-16, SDA 4-20, SDA 8-16, AC MR 8, PA 8
	davon nach Darmstadt und Karlsruhe	SDA 4-20, SDA 8-16, PA 8
3	in situ Versuche in Chavannes-les-Forts	SDA 2-10, SDA 4-5, SDA 4-15, SDA 4-20, SDA 6-20, SDA 8-16
	in situ Versuche in Grandsivaz, Sviriez, Cottens-Neyruz, Billens, Montbrelloz und Estavayer	Sapaphone 4, Famsiphonogrip

3.4 Arbeitsschritte

Das Arbeitsprogramm wurde in drei Phasen durchgeführt:

Phase 1: Entwicklung von einer (oder mehreren) Prüfmethode(n)

Phase 2: Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von SDA-Belägen gegen Kornausbrüche im Vergleich mit anderen Belagskonzepten

Phase 3: Haftzugverfahren in situ

Phase 1 Prüfungsevaluation

- Beschaffung von Mischgut gemäss Tab. 2 und Herstellung von Platten 40x60 cm mit dem Laborverdichter, Zuschneiden von Prüfkörpern
- Prüfgeräteentwicklung und Optimierungsversuche: Bürstenverfahren, Schälverfahren, Wasserhochdruckverfahren, Haftzugverfahren
- Erste Versuche zum Einfluss von Wärme mit den Bürsten- und Haftzugverfahren
- Vergleich mit dem DSD (Koordination mit Darmstadt, Prüfkörperversand, Beobachtung des Prüfungsverlaufs vor Ort, Interpretation der Ergebnisse)
- Entscheid über zu wählenden Prüfmethode(n)
- Zwischenbericht 1

Phase 2 Labor-Validierung

- Beschaffung von zusätzlichem Mischgut SDA 4-20 und PA 8 und Herstellung von Platten mit dem Laborverdichter, Zuschneiden von Prüfkörpern
- Durchführen von Prüfungen mit dem Haftzugverfahren
- Systematische Untersuchung von Witterungseinflüssen und Wasser (Wasserlagerung bei 60 °C, Frost-Tau-Zyklen zwischen -15 °C und + 15 °C)
- Vergleich mit dem DSD gemäss Tab. 2 (Koordination mit Darmstadt und Karlsruhe, Prüfkörperversand, Interpretation der Ergebnisse)
- Festlegung von Anforderungswerten
- Bewertung des Verfahrens auch im Hinblick auf eventuelle Auswirkungen auf die Europäische Normung einerseits und die Norm VSS 40 436 für SDA-Mischgut und Deckschichten andererseits
- Zwischenbericht 2

Phase 3 In situ-Validierung

- Begutachtung zweier Versuchstrecken, eine mit neuem Belag, die andere mit eher altem Belag
- Vergleichsmessungen mit einem zweiten Labor
- Vorschlag von Anforderungswerte
- Korrelation der ausgewählten Prüfmethode mit dem in situ vorhandenem Schadensbild
- Schlussbericht

4 Materialbeschaffung und Plattenherstellung

4.1 Materialbeschaffung

Die Materialbeschaffung erfolgt in Zusammenarbeit mit der BAV Belag AG Volketswil, die die gewünschten Mischgutsorten teilweise extra für das Forschungsprojekt herstellen liessen. Die Mischgutentnahme erfolgte mit einem Rahmen-Schachtel-System, wie es in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt ist.



Abb.3 Mischgutentnahme mit Rahmen-Schachtel-System

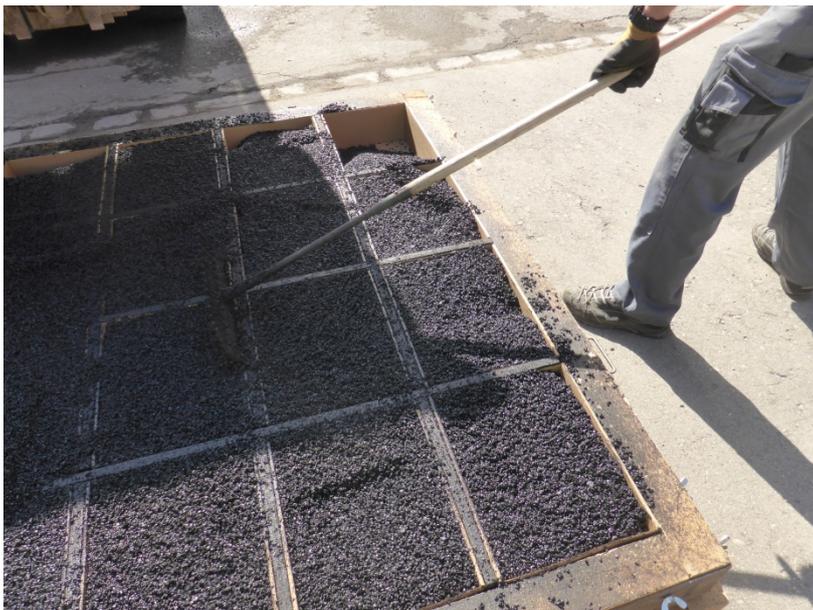


Abb.4 Mischgutentnahme mit Rahmen-Schachtel-System

Die erste Mischgutentnahme fand am 15. Juni 2017 statt, und es wurden die Mischgüter AC MR 8, SDA 4-16 und SDA 8-16 entnommen. Die Mischgutsorten PA 8 und SDA 4-20 wurden am 18. November 2018 entnommen. Im Anhang I sind die von der Empa ermittelten Mischgut- und Bindemittelkennwerte am rückgewonnenen Bindemittel aufgeführt.

4.2 Plattenherstellung

In Abänderung der ursprünglich vorgesehenen Herstellung mit dem grossen Plattenverdichter der Empa erfolgte die Plattenherstellung mit dem modifizierten Verdichtungsgerät des Spurrinntests (siehe auch Abbildungen 5 und 6).

Dazu wurde einerseits eine doppelt breite Prüfform (590 mm x 390 mm) verwendet und zusätzlich wurde der Verdichtungsreifen durch eine Stahlwalze ersetzt, wodurch die Oberflächenbeschaffenheit der Platten besser derjenigen der Praxis entspricht.

Die Platten wurden auf eine Höhe von 40 mm verdichtet, und die Mischguteinwaage so berechnet, dass der jeweils angestrebte Hohlraumgehalt gewährleistet war.

Insgesamt wurden pro Mischgutttyp 11 Platten hergestellt.



Abb.5 Spurrinnenverdichter mit modifizierter Verdichtungseinrichtung (Walze)



Abb.6 Mit dem modifizierten Spurrinnenverdichter hergestellte Platte

4.3 Kennwerte der hergestellten Prüfplatten

Tabelle 3 zeigt die Kennwerte der hergestellten Prüfplatten für alle untersuchten Mischgutsorten. Da im Fall der Prüfplatten der Mischgutsorten AC MR 8, SDA 4-16 und SDA 8-16 eine unzureichende Verdichtung gewählt worden war, musste die Herstellung dieser Platten wiederholt werden. In der Tabelle 3 sind die Kennwerte der unzureichend verdichteten Prüfplatten in **rot** angegeben.

In Übereinstimmung mit der Begleitkommission wurde die Herstellung der Prüfplatten der Belagssorte PA 8 und SDA 4-20 nicht wiederholt.

Insgesamt muss aber gesagt werden, dass, wie Tabelle 3 zeigt, die vom Lieferwerk angegebenen Hohlraumgehalte für SDA 16er Beläge nicht erreicht werden konnten.

Tab. 3 Kennwerte der Belagsplatten aller untersuchten Mischgutsorten; in Rot, solche Platten die ungenügend verdichtet wurden. Die Probenahme erfolgte am 15. Juni 2017 für AC MR 8, SDA 4-16 und SDA 8-16 und am 8. November 2018 für SDA 4-20 und PA 8. Die Raumdichte A-1850 wurde mittels Tauchwägung ermittelt. Alle anderen wurden geometrisch berechnet.

Belagssorte	Labor-Code EMPA	Raumdichte Marshall [g/cm ³]	Raumdichte (Bohrkern aus Platte) [g/cm ³]	Verdichtungsgrad [%]	Hohlraumgehalt (Bohrkern aus Platte) [Vol-%]
AC MR 8	A-1850	2.342	2.351	100.4	3.9
AC MR 8	A-1553	2.255	2.082	92.3	
SDA 4-16	A-1554	2.139	2.151	100.6	12.5
SDA 4-16			1.834	85.8	
SDA 8-16	A-1555	2.134	2.101	98.5	13.6
SDA 8-16			1.817	85.1	
SDA 4-20	A-1778	2.077	1.991	95.9	19.2
PA 8	A-1777	2.033	2.015	99.1	18.7

5 Darmstadt Scuffing Device DSD

5.1 Prüfmaschine

Der Prototyp der Oberflächen-Verschleiss-Prüfmaschine OVPM, die in dem Entwurf der technischen Spezifikation DSD (Darmstadt Scuffing Device) genannt wird, wurde in der Dissertation Root [7] gezielt dafür entwickelt, den Widerstand von Asphaltdeckschichten gegen Schubbelastung an der Oberfläche zu prüfen. Das Prüfverfahren simuliert dabei eine reale Belastungssituation. Anhand des Prototyps der TU Darmstadt wurde eine Maschine von InfraTest entwickelt, die den europäischen Sicherheitsstandards entspricht und die grösstenteils über einen PC bedient werden kann (siehe Abbildung 7).



Abb.7 DSD (links: Auslieferungszustand, rechts: ohne Sicherheitskäfig)

Die Maschine simuliert den Lenkvorgang eines langsam rollenden Pkw an einem warmen Tag. Die Bewegung gleicht der eines langsamen rangierenden Pkw aus einem Parkstand. Erreicht wird diese Bewegung durch einen vor und zurück bewegendem Tisch, auf dem die Probevorspanneinrichtung um 180° oszillierend schwenkt (Abbildung 8). Durch eine vertikale Last von 1000 N wird ein profilloses Prüfrad (Reifendruck 300kPa) auf eine Probeplatte (26 x 26 cm) in der Probeeinspannvorrichtung gedrückt. Die Beanspruchung durch das Prüfrad entspricht der Spannung, die ein Standardreifen eines Standard-Pkw auf die Asphaltoberfläche ausübt. Die Standardprüftemperatur beträgt $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Die Prüfung besteht aus 2 x 5 Zyklen (10 Doppelschubzyklen) und dauert ca. 10 Minuten.

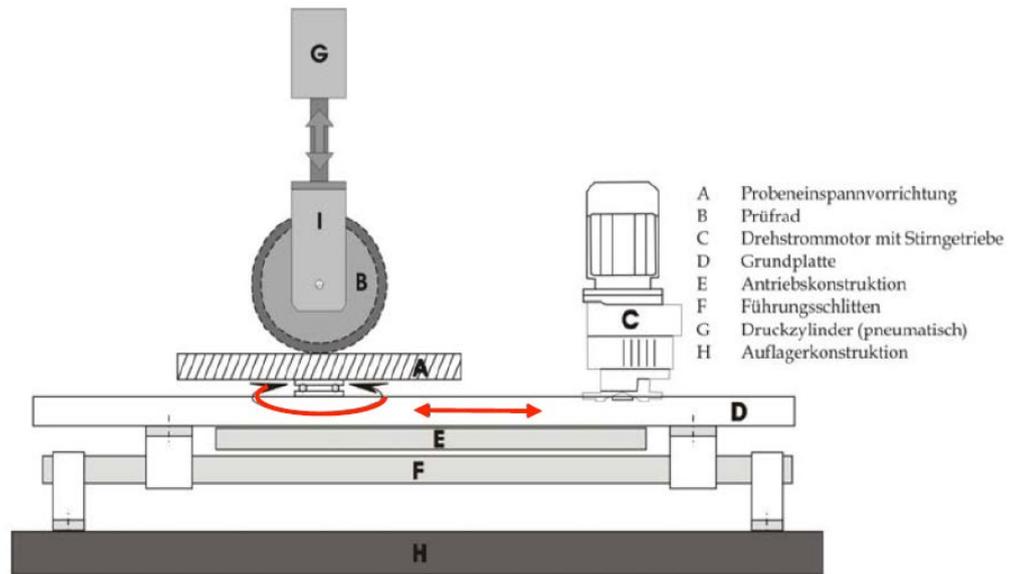


Abb.8 DSD Schema

5.2 Durchführung der Prüfung am Material

Die Probepplatten werden mit dem modifizierten Spurrinnenverdichter hergestellt und auf die Größe von 260 * 260 mm zugeschnitten. Sie wurden in Holzkisten verpackt und an die TU Darmstadt geschickt. Nach Norm ist eine Doppelbestimmung (d.h. 2 Platten) pro Material- bzw. Mischguttyp vorgesehen. Da bisher wenig Erfahrung mit der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bestand, wurde im vorliegenden Forschungsprojekt in der Phase 1 eine Prüfung an jeweils 4 Platten vorgesehen.

Während dieser Phase 1 wurden am 23. März 2018, im Beisein der Projektleiterin, Christiane Raab, je 2 Platten aus SDA 4-16 und AC MR 8 Mischgut geprüft. Der Rest der Prüfplatten wurde am 5. April 2018 geprüft.

Wie Abbildungen 9 und 10 zeigen, wird der Kornausbruch nach jedem Zyklus durch Entfernen der am Reifen haftenden bzw. sich auf der Oberfläche befindlichen losen Körner ermittelt. Dabei wird die Masse der Körner bestimmt und mit dem Gewicht der Prüfplatte zu Beginn und zu Ende der Prüfung verglichen.

Als problematisch wurde empfunden, dass die Prüfung nicht in einer Klimakammer (Probekörper liegt auf einer Heizplatte) stattfindet, was in Folge von Nachheizen (40 ± 2 °C) zu einer Verlängerung der Versuchsdauer einerseits und andererseits zu einer Abkühlung der Platte während des Versuchs und damit leicht variierenden Prüftemperaturen führt.



Abb.9 Prüfplatte mit anhaftenden Körnern während der Prüfung



Abb.10 Entfernen der ausgebrochenen Körner während der Prüfung

5.3 Ergebnisse der DSD Prüfungen

5.3.1 1. Phase in Darmstadt (SDA 8-16, SDA 4-16 und AC MR 8)

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der in Phase 1 geprüften Platten.

Bei diesen Prüfkörpern handelt es sich, was zu diesem Zeitpunkt aber nicht bekannt war, um Prüfkörper aus Belagsplatten mit zu geringer Verdichtung (siehe Tab. 3).

Normalerweise wird der Versuch, wie beschrieben, als Doppelbestimmung durchgeführt, Zur Überprüfung der Abweichungen zwischen den einzelnen Prüfplatten wurde der Versuch in der Phase I an jeweils 4 Platten einer Mischgutsorte durchgeführt. Bei SDA 4-16 und AC MR 8 wurde festgestellt, dass das Prüfergebnis je nach Prüfdatum hohe, nicht erklärbare Unterschiede aufweist.

Tab. 4 In Phase 1 geprüfte Platten

Probe Nr.	Mischgut	Prüfdatum	Kornverlust nach 10 Doppelschubzyklen [g]
1	SDA 4-16	23.3.2018	129
2		23.3.2018	134
3		5.04.2018	105
4		5.04.2018	95
5	AC MR 8	23.3.2018	72
6		23.3.2018	64
7		5.04.2018	16
8		5.04.2018	24
9	SDA 8-16	5.04.2018	251
10		5.04.2018	180
11		5.04.2018	201
12		5.04.2018	232

Abbildung 11 zeigt die ermittelten Kornverluste der untersuchten Mischgutsorten in Abhängigkeit der Anzahl an Doppelschubzyklen.

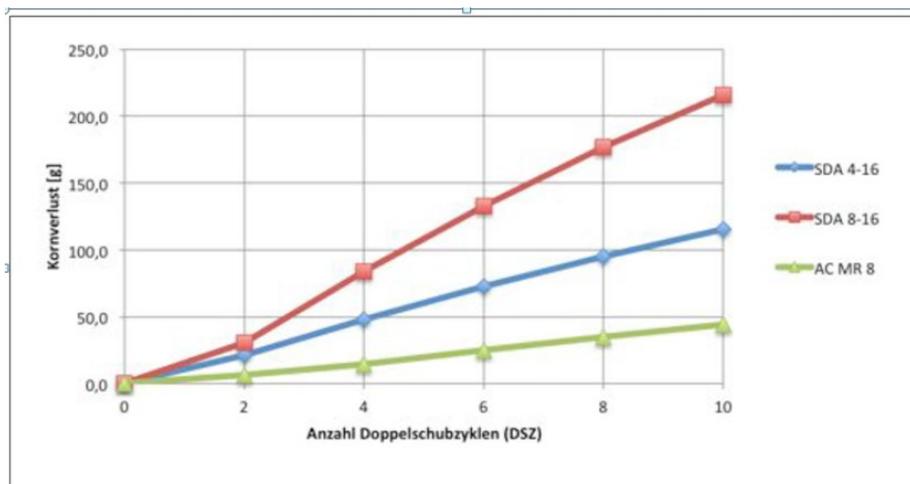


Abb. 11 Ermittelte Kornverluste der untersuchten Mischgutsorten SDA 8-16, SDA 4-16 und AC MR 8 (ungenügende Verdichtung)

Die Ergebnisse der Asphaltplatten lieferten in Abhängigkeit von der gewählten Rezeptur des Mischgutes unterschiedliche Kornverluste (vgl. auch Tabelle 5):

Tab. 5 DSD Kornverlust nach 10 Doppelschubzyklen [g]; Mittelwert von 4 Platten

Mischgut.	Mittelwert	Min	Max
AC MR 8	44.0	15.8	73.2
SDA 4-16	115.5	95.2	133.6
SDA 8-16	215.7	179.5	250.0

Fazit: Mit Hilfe des Darmstadt Scuffing Device DSD ist es möglich, deutliche Unterschiede im Kornausbruchverhalten zwischen den einzelnen Mischgutsorten festzustellen: Im Versuch zeigt der AC MR 8 die geringsten, der SDA 8-16 den grössten Kornverlust auf. Es zeigt sich weiterhin, dass die Abweichung zwischen den einzelnen Prüfplatten einer Mischgutsorte relativ gross ist (auch gibt es Unterschiede in Bezug auf das Prüfdatum). Eine Beobachtung wofür Darmstadt keine Erklärung liefern konnte.

5.3.2 2. Phase in Darmstadt (SDA 4-20 und PA 8)

Nach Fertigstellung der Prüfplatten waren auch Prüfkörper der Mischgutsorten SDA 4-20 und PA 8 zur Prüfung nach Darmstadt geschickt worden, wobei es sich um dem vorgegebenen Verdichtungsgrad entsprechende Prüfkörper handelte. Die Durchführung der Prüfung erfolgte am 10. Januar 2019. Es wurden normkonform jeweils nur 2 Prüfplatten (Doppelbestimmung) untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt:

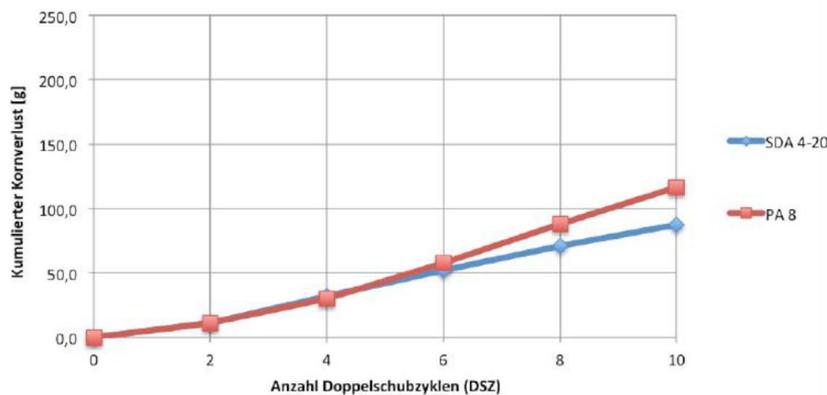


Abb.12 In Darmstadt ermittelten Kornverluste der untersuchten Mischgutsorten SDA 4-20 und PA8

Die Ergebnisse der Asphaltplatten lieferten in Abhängigkeit von der gewählten Rezeptur des Mischgutes unterschiedliche Kornverluste (vgl. auch Tabelle 6):

Tab. 6 DSD Kornverlust nach 10 Doppelschubzyklen [g]; Mittelwert von zwei Platten

Mischgut	Mittelwert	Min	Max
SDA 4-20	87.6	79.5	95.6
PA 8	116.6	110.3	122.9

Fazit: die Ergebnisse legen nahe, dass gut verdichtete Platten geringere Streuung aufweisen.

5.3.3 3. Phase in Karlsruhe (SDA 8-16, SDA 4-16 und AC MR 8, SDA 4-20 und PA 8)

Da das Karlsruher Institut für Technologie KIT eine baugleiche Prüfmaschine des DSD besitzt, wurde am dortigen Institut für Strassen- und Eisenbahnwesen die Wiederholungsprüfung der Prüfplatten SDA 8-16, SDA 4-16 und AC MR 8 mit ausreichender Verdichtung durchgeführt. Gleichzeitig wurden auch noch Prüfkörper der Belagsplatten Phase 2 (SDA 4-20 und PA 8) versandt.

Die Prüfung fand dort am 15. August 2019 teilweise im Beisein der Projektleiterin statt. Wie bereits für die Phase 2 Prüfkörper in Darmstadt wurde eine Doppelbestimmung durchgeführt. Abbildung 13 zeigt die Prüfergebnisse.

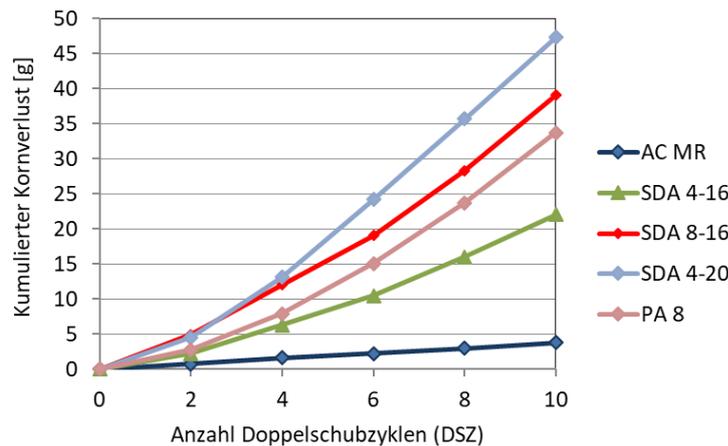


Abb.13 In Karlsruhe ermittelten Kornverluste der untersuchten Mischgutsorten SDA 8-16, SDA 4-16, AC MR 8, SDA 4-20 und PA 8

Die Ergebnisse der Asphaltplatten lieferten in Abhängigkeit von der gewählten Rezeptur des Mischgutes unterschiedliche Kornverluste (vgl. auch Tabelle 7):

Tab. 7 DSD Kornverlust nach 10 Doppelschubzyklen [g]

Mischgut	Mittelwert	Min	Max
AC MR 8	3.8	3.0	4.2
SDA 4-16	22.1	19.9	24.2
SDA 8-16	39.1	35.3	42.9
SDA 4-20	47.4	43.2	51.5
PA 8	33.7	30.6	36.8

Fazit: der gut verdichtete AC MR 8 ist erwartungsgemäss sehr widerstandsfähig gegen Kornverlust. Von den beiden SDA 4 zeigt der auch weniger gut verdichtete SDA 4-20 erwartungsgemäss einen höheren Kornverlust. Auch der weniger gut verdichtete SDA 8-16 zeigt trotz geringerem Hohlraumgehalt im Vergleich zu PA 8 einen höheren Kornverlust. Daraus folgt die Annahme, dass nicht nur der Hohlraumgehalt allein, sondern ebenso der Verdichtungsgrad ausschlaggebend für DSD Kornverlust ist.

5.3.4 Unterschiede der Ergebnisse Karlsruhe und Darmstadt (SDA 4-20 und PA 8)

Beim Vergleich der am Karlsruher Institut für Technologie KIT und an der Technischen Universität Darmstadt TU ermittelten Prüfergebnisse der Prüfplatten SDA 4-20 und PA 8 zeigten sich nicht erklärbare Unterschiede.

Wie in Abb. 14 dargestellt, ergaben sich dabei im Fall der Prüfung in Darmstadt jeweils deutlich mehr Kornausbrüche. Auch war das Verhältnis der beiden Mischgutsorten genau

umgekehrt (in Darmstadt hatte der PA 8 in Karlsruhe der SDA 4-20 die meisten Kornausbrüche). Beim SDA 4-20 betrug die Menge der ausgebrochenen Körner in Darmstadt 87.6 g gegenüber der in Karlsruhe ermittelten Menge von 47.4 g, beim PA 8 entsprach die Menge der ausgebrochenen Körner in Darmstadt 116.6 g im Vergleich mit 33.7 g in Karlsruhe.

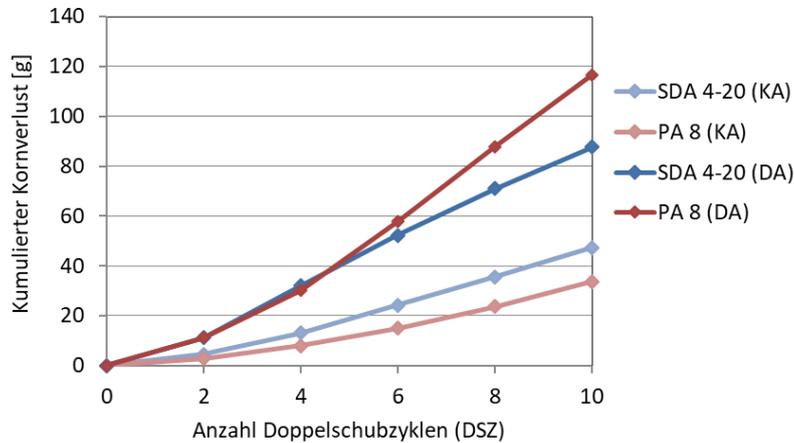


Abb.14 Ermittelten Kornverluste der Mischgutsorten SDA 4-20 und PA 8 im Vergleich Karlsruhe (KA) und Darmstadt (DA)

5.3.5 Vergleiche zwischen Karlsruhe und Darmstadt (SDA 4-20, SDA 8-16 und PA 8)

Zur Überprüfung der Unterschiede zwischen den beiden Prüfstellen und um eine allfällige ungleichmässige Verdichtung der Prüfplatten ausschliessen zu können, wurden erneut aus Platten der Belagssorten SDA 4-20, SDA 8-16 und PA 8 jeweils 2 Prüfkörper entnommen und einer nach Darmstadt, der andere nach Karlsruhe geschickt.

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse nach 10 Doppelschubzyklen. Zusätzlich sind im Diagramm schraffiert die an nicht identischen Prüfplatten gefundenen Ergebnisse für SDA 4-16 und AC MR 8 eingefügt.

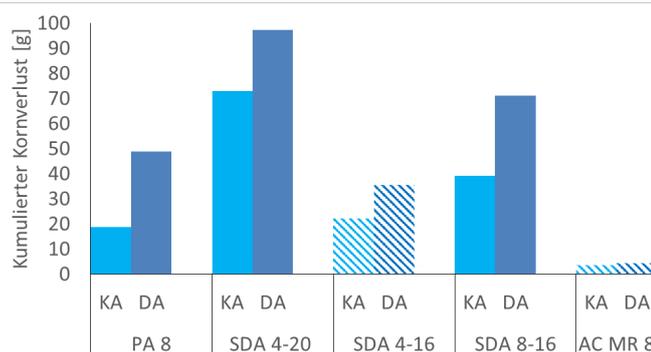


Abb.15 Ermittelten Kornverluste nach 10 Doppelzyklen der Mischgutsorten SDA 4-20, SDA 8-16 und PA 8 sowie schraffiert SDA 4-16 und AC MR 8 im Vergleich Karlsruhe und Darmstadt

Abgesehen von der Belagssorte AC MR 8, bei der in beiden Fällen nur geringe Unterschiede wohl auch auf Grund des geringen Kornausbruchs festgestellt wurden, finden sich für alle anderen Belagsarten jeweils in Darmstadt bis zu 30 g höhere Kornausbrüche.

Da es sich einerseits zum grössten Teil um aus derselben Prüfplatte entnommene Prüfkörper handelt, kann der Unterschied nicht auf eine unterschiedliche Verdichtung und

damit Qualität der Prüfplatten zurückgeführt werden. Auch scheint es sich um einen irgendwie systematisch begründeten Unterschied zu handeln.

Da es sich einerseits bei den Geräten beider Prüfstellen um baugleiche Typen handelt, nachweislich die exakt gleiche Prüfvorschrift verwendet wurde und zum anderen die Projektleiterin Christiane Raab jeweils bei einem Teil der Prüfungsdurchführung anwesend war und keine grundsätzlichen Unterschiede in der Handhabung feststellen konnte, lassen sich die ermittelten Unterschiede nicht erklären, stellen das Prüfverfahren aber doch sehr in Frage.

5.3.6 Vergleiche zwischen Karlsruhe und Darmstadt (AC 22 WDL und AC 16 WDL)

Nach Rücksprache mit beiden Prüfstellen wurde der Empa zugesichert, sich dem Problem anzunehmen und eine weitere Überprüfung durchzuführen. Von beiden Prüfstellen wurde in einem ersten Schritt die Kalibration und Tauglichkeit ihrer Geräte überprüft und bestätigt.

Weiterhin fand eine Vergleichsuntersuchung zwischen beiden Prüfgeräten mit zwei wasserdurchlässigen (WDL) und mit Kohlenfasern verstärkten Asphalten AC 16 WDL mit 21.5 % Hohlraumgehalt und AC 22 WDL mit 22.7 % Hohlraumgehalt statt (siehe Abb. 16).

Nach 10 Doppelzyklen betragen der Mittelwert und die Standardabweichung von drei Platten in der Prüfeinrichtung der TU Darmstadt 22.5 ± 10.4 g und 22.1 ± 9.1 g für AC 16 WDL bzw. AC 22 WDL. Im Vergleich dazu ist die Streuung der Ergebnisse in Karlsruhe mit 16.9 ± 2.6 g und 22.8 ± 5.3 g deutlich geringer.

Im Prüfbericht der TU Darmstadt wurde folgendes Fazit festgehalten: *"Die Schwankungen der Einzelergebnisse sind in der Prüfeinrichtung der TU Darmstadt grösser als an der Prüfeinrichtung am KIT. Die Abweichungen im Durchschnitt zwischen den beiden Prüfeinrichtungen sind bei beiden Mischgutsorten sehr gering und innerhalb der Toleranzen."*

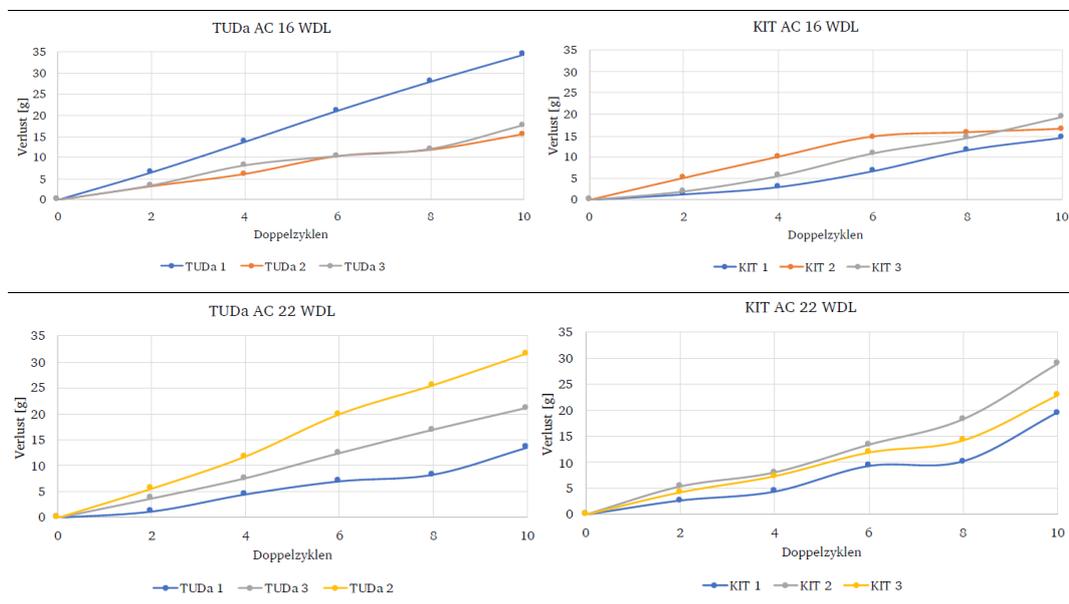


Abb.16 Ermittelten Kornverluste nach 10 Doppelzyklen der Mischgutsorten AC 16 WDL (oben) und AC 22 WDL (unten) im Vergleich Darmstadt (TUDA) und Karlsruhe (KIT) (aus Prüfbericht TU Darmstadt).

Nach Rücksprache mit den Verantwortlichen aus Darmstadt ist die Sache damit aber keineswegs geklärt, und so besteht in dieser Angelegenheit weiter Handlungsbedarf. Bis zum Zeitpunkt des Berichtsabschlusses wurden aber noch keine weiteren Schritte unternommen.

Nach Auffassung der Forschungsstellen ist die Vergleichsuntersuchung auch nur begrenzt aussagekräftig, da die untersuchten Mischgüter einen vergleichsweise relativ geringen Kornausbruch aufweisen, die Unterschiede zwischen beiden Prüfinstituten aber vor allem bei hohem Kornausbruch zutage traten.

6 Phase 1 Evaluation der Prüfmethoden

6.1 Bürstenverfahren

6.1.1 Strassenreinigung (Besen)

Das erste gewählte Verfahren war das sogenannte Bürstenverfahren. Hier sollte analog zu einem für die Strassenreinigung verwendeten Krautbesen, die Kornausbrüche durch eine rotierende Bürste erzeugt werden.

Die im ersten Schritt gewählte Bürste (siehe Abbildung 17) wurde an den Drehkopf einer Bohrmaschine befestigt und auf einer Asphaltplatte getestet.

Abbildung 24 zeigt den Versuchsaufbau. In Abbildung 18 ist die Plattenoberfläche nach dem Versuch dargestellt.



Abb. 17 Erster Versuch einer Bürste analog Strassenreinigung zur Erzeugung von Kornausbrüchen

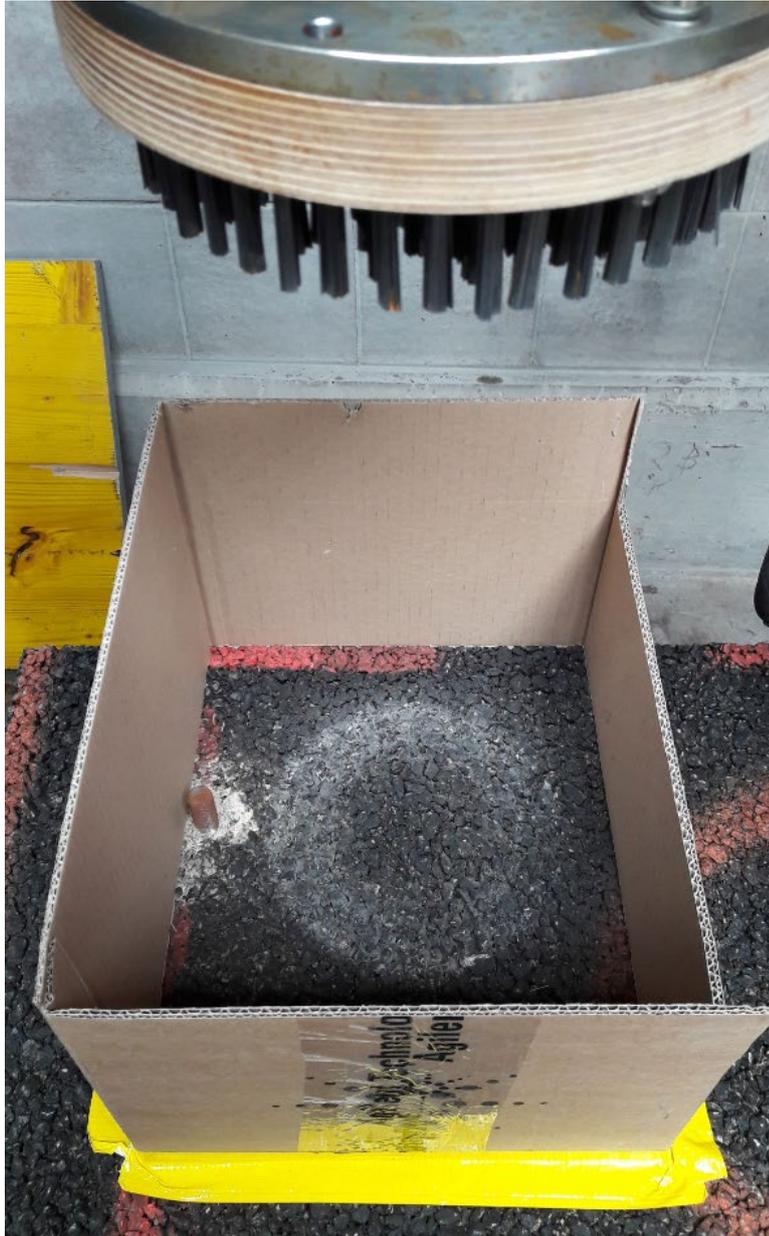


Abb. 18 Kornausbrüche bzw. Abrieb durch Bürsten

Der Versuch musste abgebrochen werden, da es aufgrund der grossen Anzahl an Borsten und der hohen Drehgeschwindigkeit zur Erwärmung der Oberfläche durch Reibung bis zum Funkenflug kam. Ausserdem war auch der durch die Bürste verursachte Kornausbruch nur sehr gering.

6.1.2 Rechen

In einem zweiten Schritt wurde eine Bürste in Form eines Rechens konstruiert (vergleiche Abbildung 19). Hierbei wurde einerseits die Anzahl der Borsten (hier Zinken) deutlich verringert und dieselben wurden so angeordnet, dass ein Herausreißen der Körner erfolgen sollte.

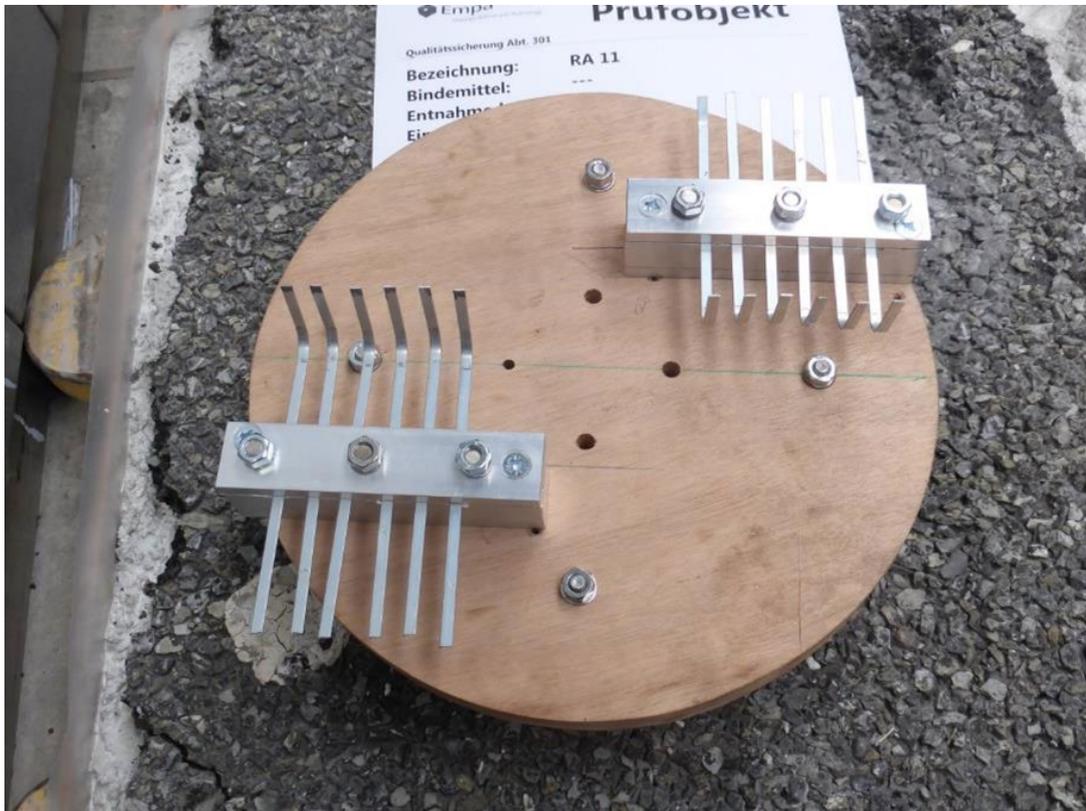


Abb. 19 zweiter Versuch einer Bürste analog Rechen zur Erzeugung von Kornausbrüchen

Auch diese Konstruktion erwies sich leider als wenig geeignet, da die Stabilität der Zinken zu gering war, und es während des Versuchs zu Verformung derselben, nicht aber zu einem wesentlichen Kornaustrag kam.

6.1.3 Spikesreifen

In einer dritten Konstruktion wurde versucht den durch Spikesreifen hervorgerufenen Kornausbruch zu simulieren. Hierzu wurde die in Abbildungen 20 und 21 dargestellte Konstruktion angefertigt. Die Metallplatte mit den durchgesteckten Schrauben M8 befindet sich auf einem elastischen Gummistück, welches ein gewisses Nachfedern der Schrauben gewährleistet.

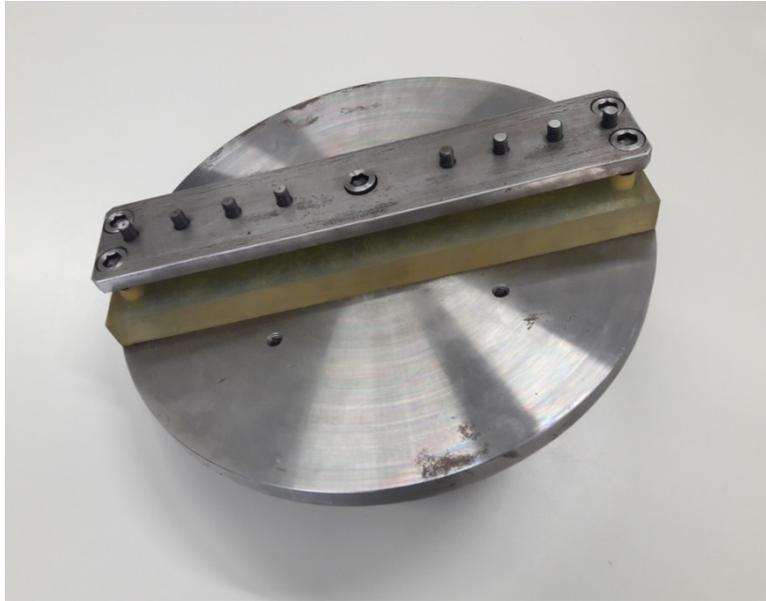


Abb. 20 Dritter Versuch einer Bürste analog Spikesreifen zur Erzeugung von Kornausbrüchen

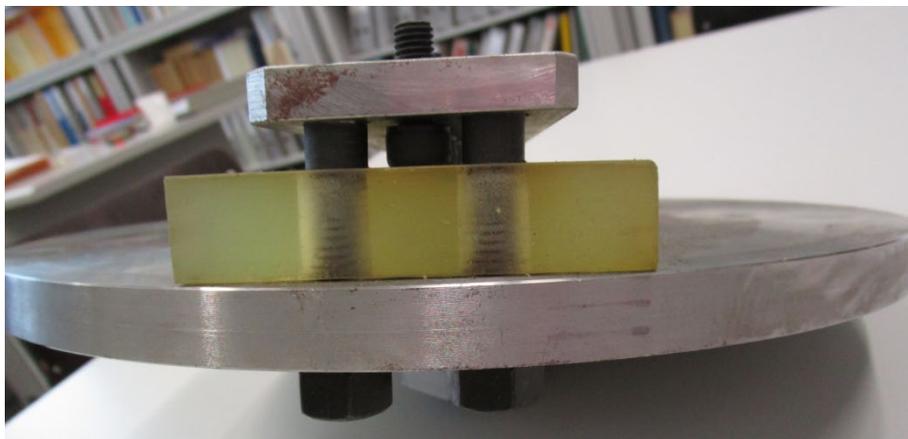


Abb. 21 Dritter Versuch einer Bürste analog Spikesreifen zur Erzeugung von Kornausbrüchen

Erste Versuche wurden an einem AC MR 6 Belagsstück durchgeführt (vgl. Abb. 22). Der hervorgerufene Kornausbruch war dabei, wie im rechten Teil der Abbildung zu sehen, sehr gering.

Der Versuch wurde dann noch an im Labor hergestellten Prüfplatten SDA 4-16 bei Raumtemperatur von ca. 20°C und bei einer Temperatur von 60°C durchgeführt (Abb. 30). Auch hier konnte unabhängig von der gewählten Temperatur keine wesentlichen Kornausbrüche erzeugt werden.



Abb. 22 Belagsstück AC MR 6 nach der Prüfung bei 20°C



Abb. 23 Prüfplatte nach der Prüfung bei 20°C (links) und bei 60°C (rechts)

Wie Abbildung 23 zeigt, kommt es durch die Schrauben zu einer Kratzwirkung, unabhängig von der gewählten Temperatur nicht aber zur Erzeugung von Kornausbrüchen. Abbildung 24 zeigt die im Laufe des Versuchs verformten Schrauben.



Abb. 24 Ansicht der Bürsten Konstruktion analog Spikes nach der Prüfung

Fazit: Es konnte keine geeignete Bürstenkonstruktion gefunden werden. Keine der 3 gewählten Konstruktionen erwies sich zur Erzeugung von Kornausbrüchen als brauchbar.

Ein Hauptproblem war dabei auch vor allem die nicht regelbare Geschwindigkeit der Bohrmaschine. Dieses Problem würde sich auch bei der Verwendung eines Bohranhängers für in situ Prüfungen stellen. Das Verfahren wird als nicht geeignet eingestuft und nicht weiterverfolgt.

6.2 Schälverfahren

6.2.1 Provisorische Strassenmarkierung

Die Idee dieser Methode ist das Herausreißen von Mineralstoffkörnern aus einer Belagsoberfläche mit Hilfe eines Schälversuchs (analog Schälzug bei Dichtungsbahnen). Dies sollte mit Aufkleben eines Metall- oder Markierungstreifens geschehen.

In einem ersten Versuch am CCDR wurde eine provisorische Fahrbahnmarkierung des Typs 3M Scotch-Lane A651, der Breite 100mm (siehe Abbildung 25) aufgeklebt und mit Hilfe eines Schälzuggeräts für Dichtungsbahnen versucht abzuziehen. Dieser Versuch war allerdings erfolglos, da der von der Firma vorgeschriebene Anpressdruck von 90kg nicht aufgebracht werden konnte und das Markierungsband daher nicht haftete.

Der Versuch wurde in der Empa wiederholt, da hier mit Hilfe des Grossverdichters (siehe Abbildung 26) der benötigte Anpressdruck aufgebracht werden konnte. Für den Versuch wurde eine für das Projekt hergestellten Platten SDA 8-16 verwendet, wobei kein Abtrag des Bitumenfilms von der Belagsoberfläche durchgeführt wurde. Das Aufbringen der Klebmarkierung erfolgte dabei nach Herstellerangaben mit Hilfe eines 3M Primers für Scotch-Lane P50. Nach 15 Minuten Trocknungszeit wurden, wie in Abb. 22 ersichtlich, 2 Markierungstreifen bei Raumtemperatur (ca. 18°C) durch dreimaliges, langsames Überrollen angeedrückt, wodurch laut Herstellerangabe der Kleber unter der Folie aktiviert wird.

Der Schälzugversuch erfolgte eine halbe Stunde später mit Hilfe des Empa Hallenkrans (siehe Abbildungen 27 und 28).



Abb.25 Aufbringen der Markierungstreifen 3M Scotch-Lane A651



Abb.26 Anpressen der Markierungsstreifen mit Walzverdichter



Abb.27 Abziehen des Markierungsstreifens mit Hallenkran



Abb.28 Abziehen des Markierungsstreifens mit Hallenkran

Der erste Streifen wird langsam abgezogen. Dabei bleiben 3 Körner an der Klebemarkierung haften. In einem zweiten Versuch (2. Streifen) wird eine ca. 10mal so hohe Geschwindigkeit gewählt, mit dem Ergebnis, dass 8 Körner haften bleiben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 29 dargestellt.

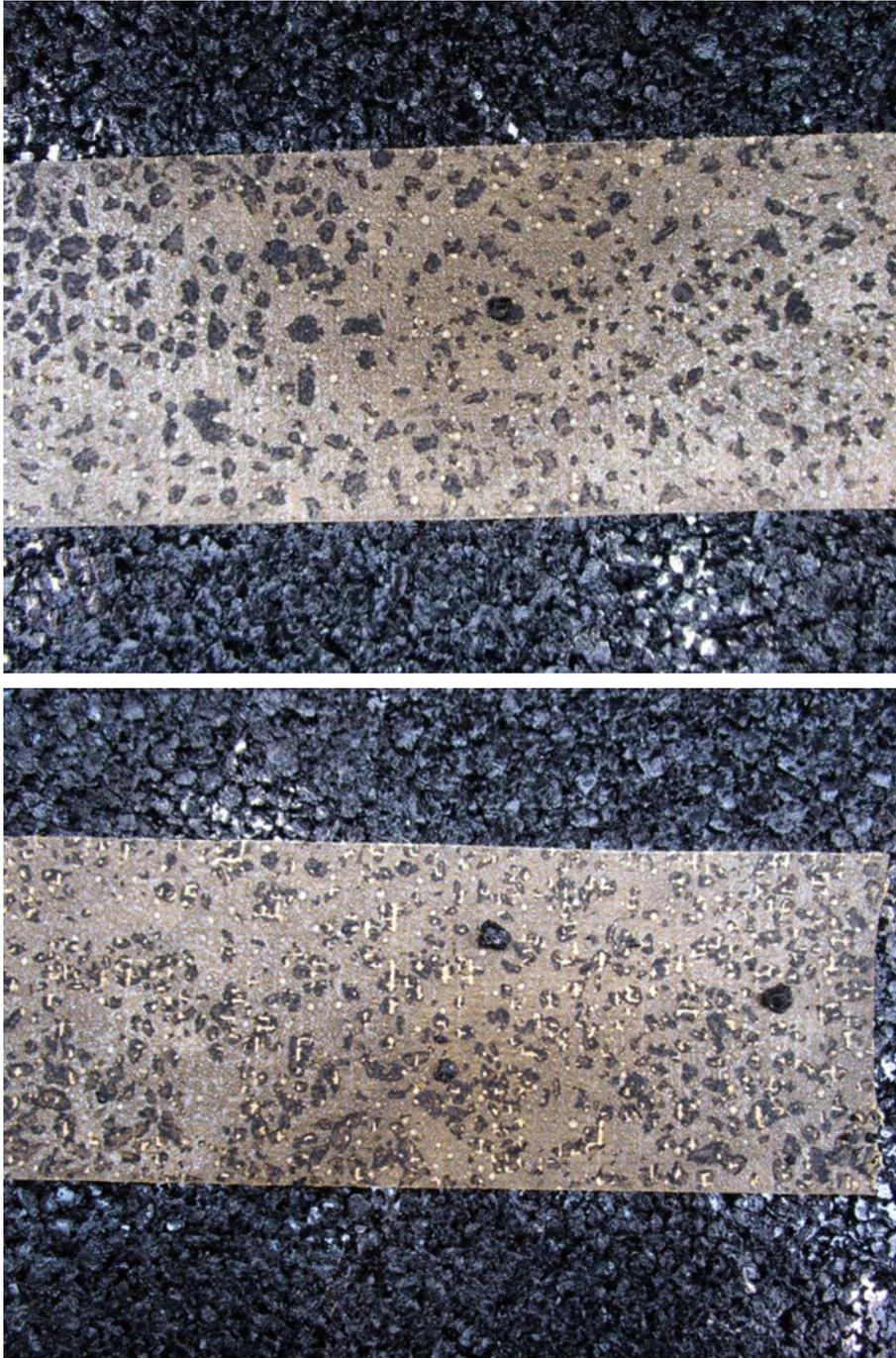


Abb.29 Unterseite der Markierung nach dem Abreißen: a) langsam, b) schnell

6.2.2 Stahlbänder

In einem weiteren Versuch wurden dünne Stahlbänder beschafft, und es wurde versucht, diese aufzukleben (siehe Abb. 30). Auch durch Aufrauen der Folie mit Schmirgelpapier 80, 100, 150 konnte keine gute Klebwirkung erzielt werden.

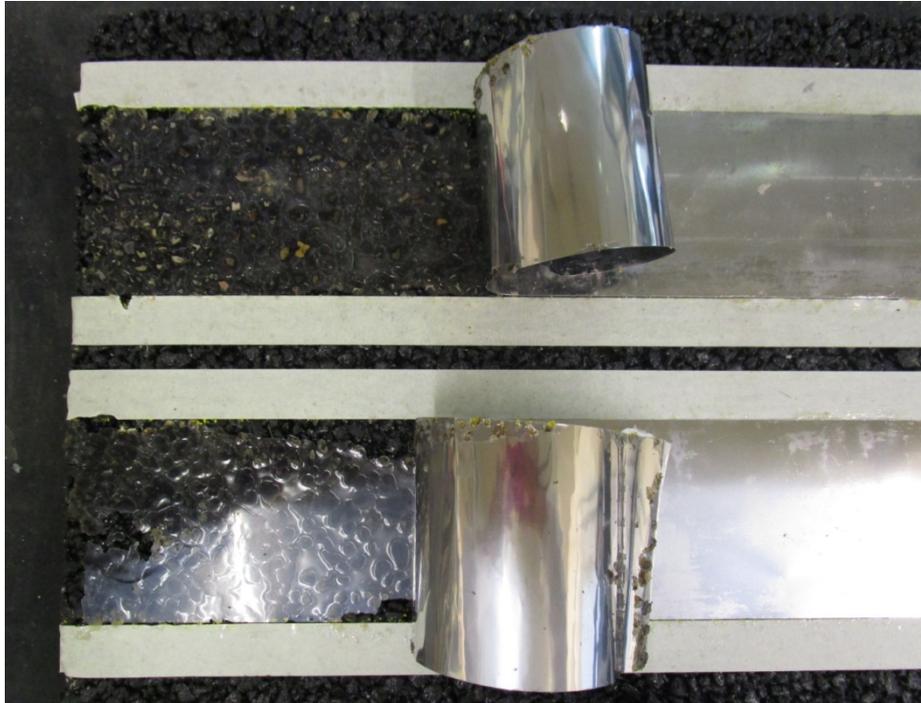


Abb.30 Edelstahlfolie 1.4016, Dicke: 0.15 mm, Kleber ist Araldit AW 106.

Auch Versuche mit anderen Klebstoffen und auf geschliffenen Oberflächen führten nicht zum gewünschten Erfolg.

6.2.3 Fazit

Insgesamt wurden neben den hier ausführlich dargestellten noch mehrere andere Produkte wie permanente Markierungsfolie (Stamark A-380 von 3M), CFK-Lamelle (in Epoxidharz eingebettete Kohlefasern) und BFK-Lamelle (in Epoxidharz eingebettete Basaltfasern) kritisch überprüft. Alle scheitern an den aufwändigen Klebebedingungen: Schleifen, Grundierung inkl. Wartezeit, mit Quarzsand bestreuen, ungenügender Anpressdruck, Dicke der Kleberschicht von ca. 2 mm und/oder Aushärtungszeit von mehreren Stunden (Technisches Merkblatt StoPox SK 41). Auch das Aufkleben von Streifen aus Polymerbitumendichtungsbahnen wurden erwogen, aber die zum Schweißen notwendige Wärmezufuhr hätte zu einer Verflüssigung des PBD Bitumens sowie des Asphalts und damit zur Verklebung der Körner in der Asphaltmatrix geführt, statt diese herauszulösen.

Das Schälzugverfahren erweist sich als nicht gut geeignet, da zum einen die Klebeflächen doch relativ gross sind und zum anderen das Klebeverfahren in mehreren zeitintensive und geräteabhängige Schritten erfolgen muss, was in situ vor allem unter Verkehr als nicht praktikabel erscheint.

6.3 Wasserstrahlverfahren (Wasserjet)

6.3.1 Wasserdruckverfahren Runddüse

In einem ersten Versuch, der in situ an Belägen auf dem Gelände des CCDR durchgeführt wurde, wurde ein Flächenreiniger (Kärcher FRI 50 Me) mit einem Maximaldruck von 500 bar und mit einer Runddüse, wie in Abbildung 31 dargestellt, verwendet. Das Gerät hat den Vorteil, dass die herausgebrochenen Körner sich unter der Haube sammeln und sich deren Anzahl oder Menge somit gut ermitteln lässt.

Bei diesem Versuch ergaben sich praktisch keine Kornausbrüche.



Abb.31 Kärcher Hochdruckgerät (500bar) und Runddüse auf in situ Belag

Das gleiche Gerät wurde dann an zwei der im Rahmen des Forschungsprojekts hergestellten Platten AC MR 8 und SDA 4-16 ausgetestet. Auch bei diesem Versuch ergaben sich, wie in Abbildung 32 ersichtlich, praktisch keine Kornausbrüche.



Abb.32 Kärcher Hochdruckgerät (500 bar) und Runddüse auf SDA 4-16 und AC MR 8 Platten

6.3.2 Wasserdruckverfahren Flachdüse

In einem zweiten Versuch, ebenfalls in situ an Belägen auf dem Gelände des CCDR, wurde eine Hochdruckpistole mit einem Maximaldruck von 500 bar und mit einer Flachdüse, wie in Abbildung 33 dargestellt, verwendet. Hierbei zeigte sich, dass die Flachdüse sich als wirksamer als die Runddüse erwies.

Aus diesem Grund wurde das Gerät mit Flachdüse auch zur Erzeugung von Kornausbrüchen auf den für das Projekt hergestellten Platten verwendet. Abbildung 34 zeigt das Ergebnis auf einer SDA 4 (links) und einer AC MR 8 Platte (rechts).



Abb.33 Kärcher Hochdruckpistole (500 bar) und mit einer Flachdüse

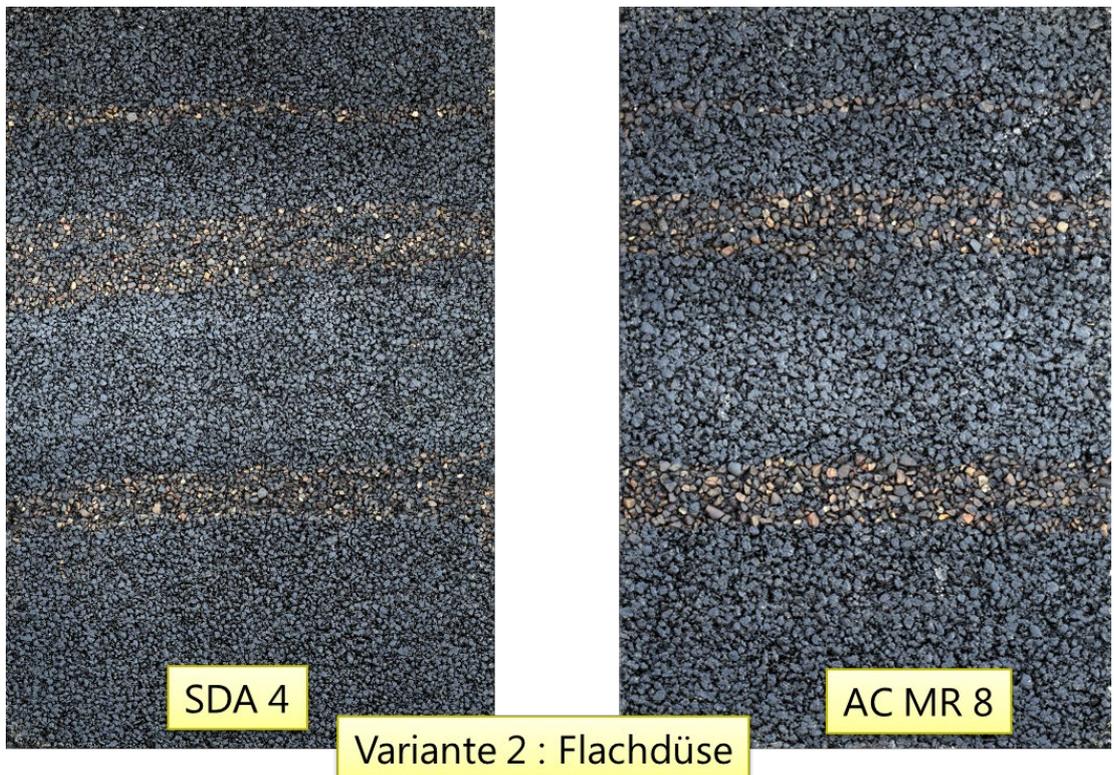


Abb.34 Kärcher Hochdruckpistole (500 bar) und mit einer Flachdüse auf SDA 4-16 (links) und AC MR 8 Platten (rechts)

Die in Abbildung 35 dargestellte mit Hilfe von Fotogrammetrie durchgeführte Auswertung zeigt Unterschiede zwischen den beiden Belagssorten, wobei bei der Platte mit SDA 4 Mischgut die Tiefe des Abriebs höher ist als bei der Platte mit AC MR 8 Mischgut. Allerdings ist auch die benutzte Flachdüse nicht wirklich stark genug, um einen wesentlichen Kornausbruch hervorzurufen.

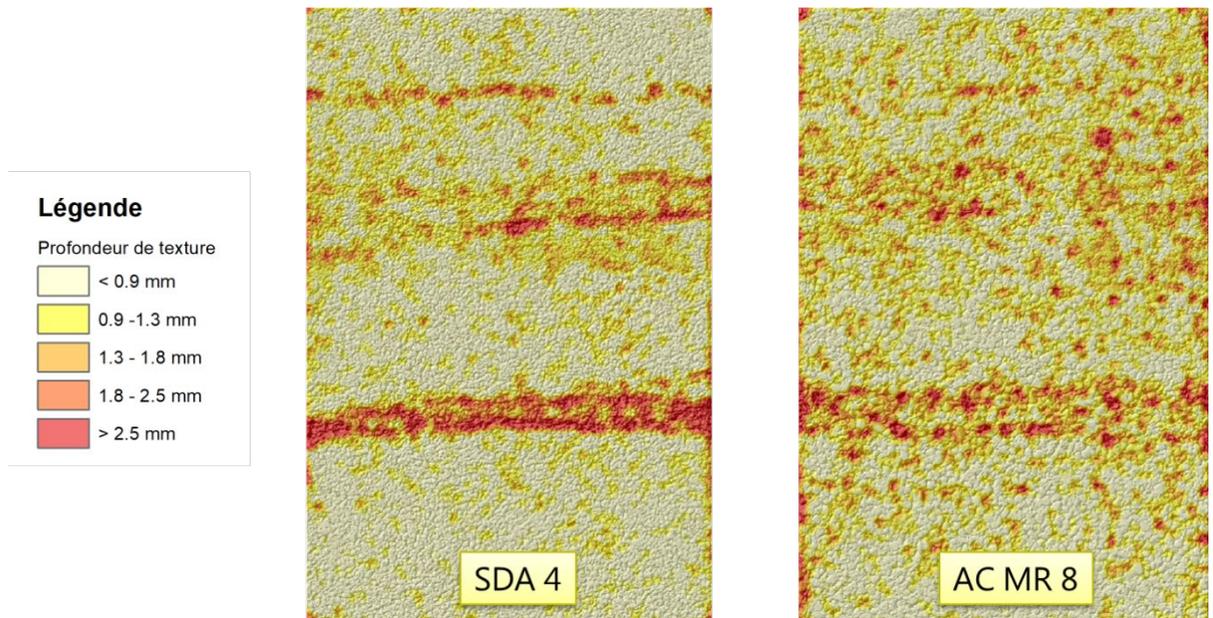


Abb.35 Auswertung Fotogrammetrie nach Kärcher Hochdruckpistole mit Flachdüse auf SDA 4-16 und AC MR 8 Platten

6.3.3 Fazit

Die Arbeit bis zu 500 bar unterliegt ausser dem Tragen von Schutzbrillen und Handschuhen keinen speziellen Sicherheitsmassnahmen. Beim Einsatz von höherem Überdruck bis 3000 bar wäre das Tragen professioneller Wasserstrahl-Schutzbekleidung unverzichtbar, was einem Strassenbaulabor nicht zumutbar ist.

Fazit: Das Wasserstrahlverfahren benötigt grundsätzlich höhere Drücke, d.h. das Gerät mit einem Maximaldruck von 500bar ist nicht ausreichend. Zur Bedienung von Geräten mit höherer Leistung wird eine Schutzausrüstung benötigt, zudem ist das Mieten solcher Geräte nicht kostengünstig.

6.4 Haftzugversuch

6.4.1 Versuchsdurchführung mit Gerät Proceq DY-216

Als weitere Methode, die ursprünglich nicht vorgesehen war, wurde der Haftzug zum Herausreissen von Körnern aus der Asphaltmatrix gewählt.

Hierzu wurde das in Abbildung 36 dargestellt Proceq DY-216 Gerät verwendet, wobei spezielle Stempel mit einem Durchmesser \varnothing 100 mm angefertigt und mit dem Kleber HBM X60, ein Zweikomponentenkleber, aufgeklebt wurden.

Die Prüfung erfolgte an für das Projekt im Labor hergestellten Platten, die mit Schraubzwingen auf einer Arbeitsplatte befestigt wurden.

Zur Durchführung des Haftzugversuchs wurde eine Vorlast von 50 N aufgebracht, anschliessenden wurde der Stempel mit einer Geschwindigkeit von 20 N/s abgezogen.



Abb.36 Haftzugvorrichtung mit Proceq DY-216 Gerät und aufgeklebtem Stempel

Die Plattenoberfläche wurde zur Entfernung des Bitumenfilms vor dem Versuch abgeschliffen. Abbildung 37 zeigt das zum Abschleifen benutzte Gerät und die Oberflächen der geprüften Platten nach dem Abschleifen.

Die Haftzugversuche wurden bei +10°C, +20°C und +30°C durchgeführt. Ausserdem wurden Versuche nach 48h Wasserlagerung bei 60°C und nach 14 Frost-Tau-Zyklen (-15°C +15°C, total 7 Tage) bei jeweils 20°C durchgeführt.

Es wurden pro Mischgutsorte mindestens 3 Haftzugversuche durchgeführt, wobei Werte bei denen es zu einem Bruch im Klebstoff kam, verworfen wurden.

Grundsätzlich zeigte sich, dass bei einer Abzugsgeschwindigkeit von 20 N/s die Prüfung bei maximal 30°C durchgeführt werden konnte, da das Mischgut der Asphaltplatten bei höheren Temperaturen so weich und plastisch wird, dass kein Kornausbruch mehr stattfindet.



Abb.37 Abgeschliffene Belagsoberflächen und Gerät zum Abschleifen des Bindemittelfilms

6.4.2 Ergebnisse Haftzugversuch an im Labor hergestellten Platten

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Haftzugprüfung an den im Labor hergestellten Prüfplatten dargestellt für alle Prüfbedingungen aufgelistet. Das Ergebnis wurde verworfen, wenn es nicht zu Kornausbrüchen, sondern zu einem Bruch in der Kleberschicht kam.

Tab. 8 Ergebnisse Haftzug an im Labor hergestellten Prüfplatten; H₂O steht für Wasserlagerung 60 °C / 48 Std; Frost steht für 14 Frost-Tau-Zyklen zwischen -15 °C und +15 °C. Zudem werden separat die Kornfraktionen 2/4 und 4/8 gewogen und gezählt.

Mischgut	Prüfbedingung	F [kN]	Masse [g]	Masse 2/4 [g]	Masse 4/8 [g]	Anzahl 2/4	Anzahl 4/8
SDA 4-16	10 °C	2.66	35.6	24.1	-	503	-
	20 °C	1.28	36.7	25.2	-	519	-
	30 °C	0.54	39.8	27.1	-	560	-
	20 °C - H ₂ O	1.65	27.9	19.9	-	414	-
	20 °C - Frost	1.52	37.5	25.9	-	530	-
SDA 8-16	10 °C	1.91	35.4	3.1	25.8	85	100
	20 °C	0.86	45.5	3.3	33.2	86	120
	30 °C	0.42	54.7	4.2	37.8	108	141
	20 °C - H ₂ O	1.25	22	2.1	16.7	55	64
	20 °C - Frost	0.99	32.2	4.0	21.4	110	98
AC MR 8	10 °C	3.62	20.3	2.8	11.4	86	48
	20 °C	1.75	-	-	-	-	-
	30 °C	0.98	33.3	3.8	21.1	108	83
	20 °C - H ₂ O*	2.56	16.5	2.2	9.3	60	39
	20 °C - Frost	2.49	36.3*	3.8*	22.8*	104*	98*

*nur Einzelwerte

Erste Versuche mit Frost-Tau-Zyklen und Wasserlagerung bei 60 °C zeigten, wie aus Abb. 40 hervorgeht, auch eine deutliche Auswirkung auf den Kornausbruch (Zunahme der Haftzugkraft und Abnahme der Masse der ausgebrochenen Körner). Die festgestellte Tendenz widerspricht dabei genau den Erwartungen und muss daher im Laufe des Projekts weiter untersucht werden.

Abbildungen 38 und 39 zeigen eine Auswertung von maximaler Zugkraft und Masse an ausgebrochenen Körnern für die verschiedenen Prüftemperaturen.

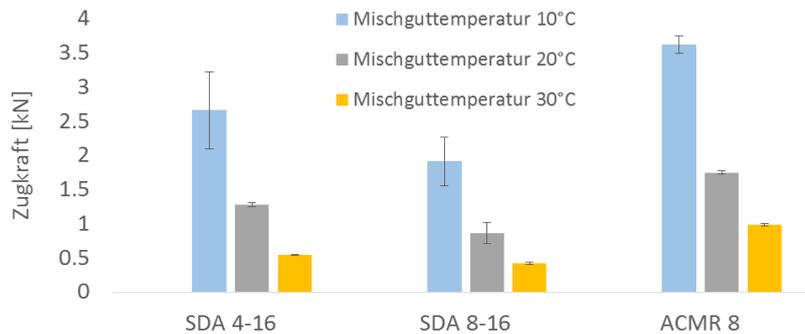


Abb.38 Ergebnisse der Haftzugprüfung: Zugkraft bei 10°C, 20°C und 30°C

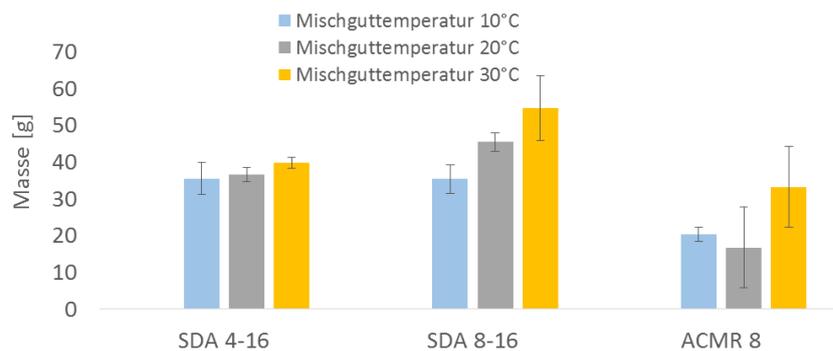


Abb.39 Ergebnisse der Haftzugprüfung: Masse der ausgebrochenen Körner bei 10°C, 20°C und 30°C

Wie aus den Diagrammen ersichtlich, sind sowohl Maximalkraft als auch Masse an ausgebrochenen Körnern geeignet, eine Unterscheidung zwischen den drei untersuchten Mischguttypen zu finden. Analog zu den im Darmstädter Scuffing Test gefundenen Ergebnissen, zeigt im Hinblick auf den Widerstand gegen Kornausbrüche der AC MR 8 das beste und der SDA 8-16 das schlechteste Verhalten; ein Ergebnis, das sich sowohl für die Maximalkraft als auch die Masse feststellen lässt.

Betrachtet man die für die untersuchten Prüftemperaturen ermittelten Werte, so sind die Unterschiede der Maximalkraft zwischen den Mischguttypen bei 10°C und 20°C am deutlichsten.

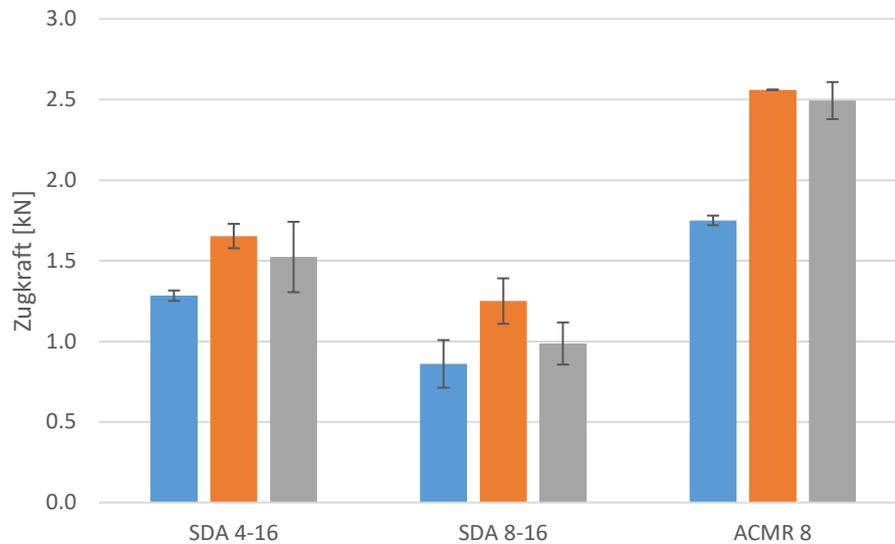


Abb.40 Ergebnisse der Haftzugprüfung: Zugkraft bei 20 °C, ohne Vorbehandlung (blau), nach 48 h Wasserlagerung bei 60 °C (orange), nach 14 Frost-Tau-Zyklen (grau).

6.4.3 Fazit

Der Haftzugversuch scheint eine sehr vielversprechende Methode zu sein, zumal erste Versuche zu mit dem Darmstädter Scuffing Test übereinstimmenden Ergebnissen (Ranking der Mischgutsorten) führen: AC MR 8 weniger Kornausbrüche als SDA 4-16 weniger Kornausbrüche als SDA 8-16.

Bei der Haftzugprüfung können sowohl die Maximalkraft als auch die Gesamtmasse der ausgebrochenen Körner als Kennwerte ermittelt werden, ausserdem können im Gegensatz zu den in der europäischen Norm vorgeschlagenen Prüfmethode Beläge sowohl im Labor als auch in situ untersucht werden.

6.5 Entscheid Prüfmethode

Nach Rücksprache mit der Begleitkommission wurde beschlossen:

1. Die Haftzugprüfung als Prüfmethode weiterzuverfolgen
2. Die Maximalkraft [kN] sollte dabei als Kennwert dienen
3. Die Prüftemperatur wurde auf 20°C festgelegt und
4. Die Oberfläche sollte vor der Prüfung grundsätzlich abgeschliffen werden.

In der zweiten Phase sollen sowohl unterschiedliche Haftzugeräte verglichen werden, als auch die Widerstandsfähigkeit von SDA Belägen gegen Kornausbrüche unter Berücksichtigung von Temperatur, Wasser und Frost näher untersucht werden.

In der Phase 3 sollen auch in situ Versuche durchgeführt werden, wobei ein Ringversuch unter Beteiligung verschiedener Labors (und Testgeräte) vorgesehen ist.

7 Phase 2 Validierung der Haftzugprüfung

7.1 Haftzugversuche an allen Belagssorten

In einem ersten Schritt wurden die hergestellten Platten aller Mischgutsorten mit Hilfe der Haftzugprüfung untersucht. Auch wenn die Prüftemperatur auf 20°C festgelegt wurde, wurden Prüfungen zusätzlich bei 10°C durchgeführt. Weiterhin wurde der Einfluss von Wasserlagerung und Frost-Tau-Zyklen in Betracht gezogen.

7.1.1 Versuchsdurchführung mit Empa Gerät

Als Prüfeinrichtung wurde eine in der Universalprüfmaschine der Empa installierte Abzugsvorrichtung gewählt, wobei alle Parameter denjenigen des Proceq DY-216 Gerätes entsprachen:

- Vorlast: 50 N
- Abzugsgeschwindigkeit 20 N/s
- Prüftemperaturen: +10°C und +20°C, wobei die Temperierung in der Klimakammer erfolgte

Die Platten der unterschiedlichen Belagsarten wurden jeweils halbiert, um sie in die Prüfkammer einbringen zu können, wobei wie in Abb. 41 ersichtlich, pro halber Platte je 6 Prüfstempel Ø 100 mm mit dem Zweikomponentenkleber X60 aufgeklebt werden konnten. Wie beschlossen wurde der Bindemittelfilm abgeschliffen.

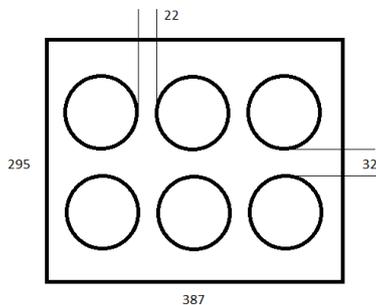


Abb.41 Schematische Darstellung der Prüfkörperverteilung (links), aufgeklebte Abzugstempel (rechts)

Um eine gute Zentrierung und ein gerades Abziehen der Prüfkörper zu erreichen wurden die Prüfstempel in einem Stahlring mit Schraubzwingen fixiert wie in Abb. 42 dargestellt. Abb. 43 zeigt den gesamten Prüfaufbau in der Klimakammer der Universalprüfmaschine.



Abb.42 Aufbau mit Stahlring und Schraubzwingen in der Universalprüfmaschine UVP



Abb.43 Prüfaufbau in der Universalprüfmaschine UVP

7.1.2 Ergebnisse Haftzugversuch bei 10°C und 20°C

Abb. 44 zeigt grafisch die Ergebnisse der Haftzugprüfung für alle Belagssorten in Form der ermittelten maximalen Zugkraft mit der jeweiligen Standardabweichung. Pro Platte einer Mischgutsorte wurden immer 12 Prüfkörper untersucht, wobei offensichtliche Ausreisser verworfen wurden.

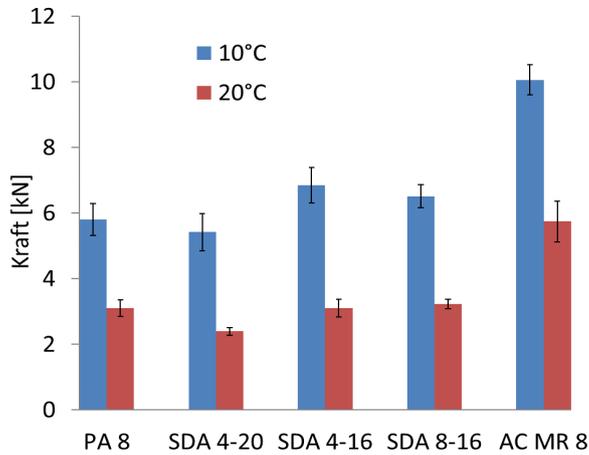


Abb.44 Ergebnisse der Haftzugprüfung für alle untersuchten Belagssorten: Zugkraft bei 10°C und 20°C

Die Haftzugprüfung führt damit zu folgendem Ranking zwischen den Belagssorten:

10°C: SDA 4-20 ~ PA 8 < SDA 8-16 ~ SDA 4-16 < AC MR 8

20°C: SDA 4-20 < PA 8 ~ SDA 8-16 ~ SDA 4-16 < AC MR 8

7.1.3 Ergebnisse Haftzugversuch nach Wasserlagerung

Zur Untersuchung des Einflusses von klimatischen Bedingungen auf die Bildung von Kornausbrüchen bzw. auf die Höhe der maximalen Haftzugkraft wurden die Platten aller Belagsarten einer 48 stündigen Wasserlagerung bei 60°C unterzogen. Die Haftzugprüfung selbst erfolgte in allen Fällen bei jeweils 20°C.

Abb. 45 zeigt grafisch die Ergebnisse der Haftzugprüfung für alle Belagssorten in Form der ermittelten maximalen Zugkraft mit der jeweiligen Standardabweichung (jeweils 12 Prüfkörper).

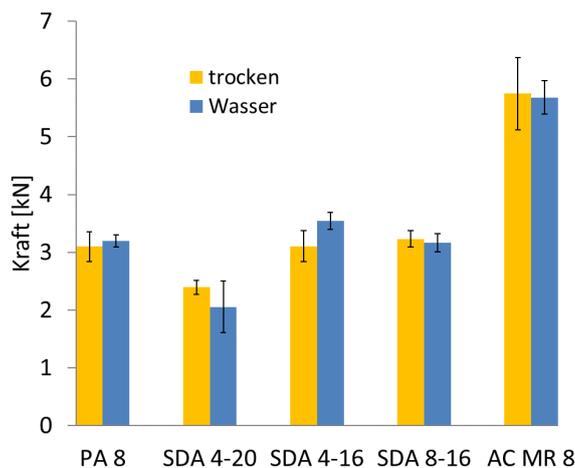


Abb.45 Ergebnisse der Haftzugprüfung für alle untersuchten Belagssorten: Zugkraft bei 20°C ohne Vorbehandlung und nach 48h Wasserlagerung bei 60°C

Die maximale Haftzugkraft wird durch die Wasserlagerung tendenziell nicht reduziert, und es ergibt sich das gleiche Ranking für alle Belagssorten wie ohne Wasserlagerung.

7.1.4 Ergebnis Haftzugversuch nach Frost-Tau-Zyklen

Zur Untersuchung des Einflusses von Frost auf die Bildung von Kornausbrüchen bzw. auf die Höhe der maximalen Haftzugkraft wurden 20 Frost-Tau Zyklen (-15 °C +15 °C, total 10 Tage) durchgeführt. Die Haftzugprüfung selbst erfolgte in allen Fällen bei jeweils 20°C.

Da sich die zu erwartenden Auswirkungen auf die Kornausbrüche bei der Belagssorte mit dem höchsten Hohlraumgehalt am deutlichsten zeigen sollte, wurde die Belagssorte SDA 4-20 für erste Untersuchungen ausgewählt. Die Haftzugprüfung wurde jeweils bei 10 °C und 20 °C durchgeführt.

Abb. 46 zeigt grafisch die Ergebnisse der Haftzugprüfung für die Belagssorte SDA 4-20 in Form der ermittelten maximalen Zugkraft mit der jeweiligen Standardabweichung (jeweils 12 Prüfkörper) nach 20 Frost-Tau-Zyklen, sowie nach 48 Stunden Wasserlagerung und ohne Vorbehandlung.

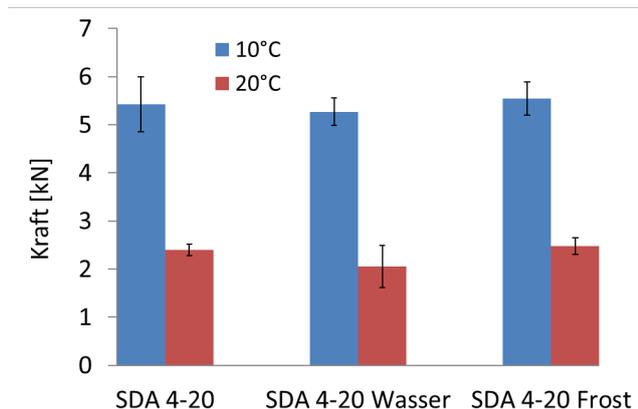


Abb.46 Ergebnisse der Haftzugprüfung für die Belagssorte SDA 4-20: Zugkraft bei 10 °C und 20 °C, ohne Vorbehandlung, nach 48h Wasserlagerung bei 60°C, nach 20 Frost-Tau-Zyklen

Untersuchungen der Belagssorte SDA 4-20 zeigen keinen Einfluss der Frost-Tau-Zyklen auf die Maximalkräfte, es wurden daher keine weiteren Belagssorten geprüft.

Die in Kapitel 6 beschriebene und in Abb.40 dargestellte Zunahme der Haftzugkraft durch Frost-Tau Zyklen oder Wasserlagerung, wie sie an dort an ungenügend verdichteten Prüfkörpern festgestellt wurde, lässt sich damit für ausreichend verdichtete Prüfkörpern nicht bestätigen.

7.2 Vergleich Proceq DY-216 Gerät mit Empa Methode

7.2.1 Durchführung der Prüfungen

Die Durchführung von Vergleichsuntersuchungen fand am 11. März 2019 an der Empa statt. An der Empa waren vorgängig Platten aller Belagssorten so vorbereitet (geschliffen) worden, dass pro Platte 3 Prüfstempel aufgeklebt und zur Bestimmung der Haftzugkraft genutzt werden konnten (vgl. auch Abb. 47). Im linken Teil von Abbildung 48 ist der gesamte Prüfaufbau zu sehen, im rechten Teil eine Detailansicht dargestellt. Abb. 49 zeigt exemplarisch die Platte der Belagssorte SDA 4-20 nach Prüfende.



Abb.47 Vorbereitete Prüfplatte SDA 8-16 mit 3 aufgeklebten Prüfstempeln

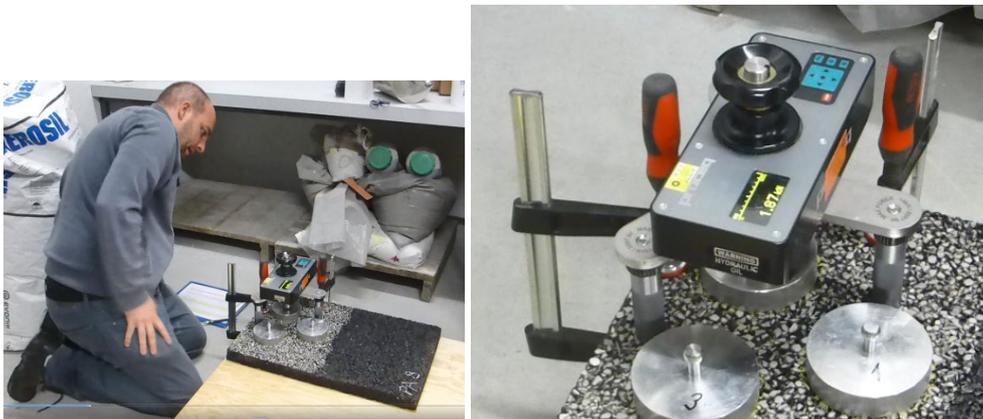


Abb.48 Links: Gesamter Prüfaufbau, rechts: Detailansicht

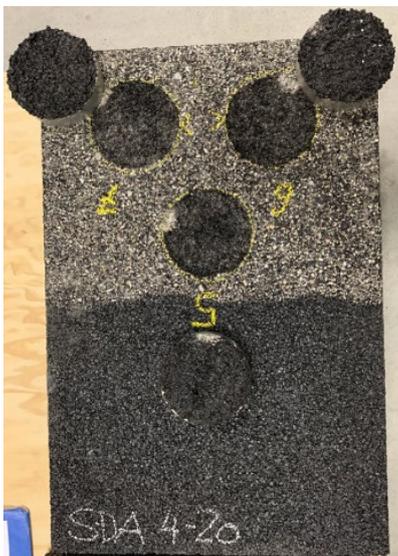


Abb.49 Platte der Belagssorte SDA 4-20 nach Prüfende

7.2.2 Ergebnisse der Prüfungen

Abbildung 50 zeigt den Vergleich der Haftzugkraft bei 20°C zwischen dem CCDR Gerät und der Empa Methode.

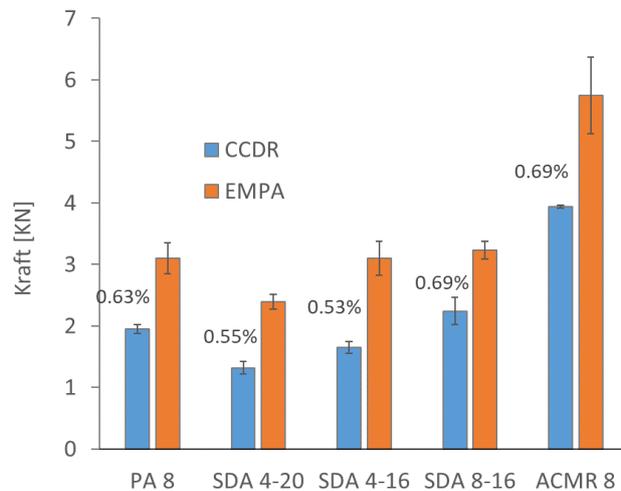


Abb.50 Vergleich der Haftzugkraft [kN] bei 20°C zwischen CCDR und Empa Methode; prozentuale Angabe des Unterschieds.

Die Auswertung zeigt, dass zwar eine ähnliche Tendenz im Ranking der Belagssorten besteht, dass aber die Höhe der Haftzugkraft sehr unterschiedlich ist. Bei einem Grösstkorn von 8 mm beträgt sie beim CCDR Gerät etwa 2/3 derjenigen der Empa Methode und bei einem Grösstkorn von 4 mm beim CCDR Gerät etwa die Hälfte der Empa Methode.

Die Unterschiede in der Höhe der Haftzugkraft erklären sich durch die definierte Einspannung und ausschliesslich senkrechte Zugbelastung beim Prüfaufbau in der Universalprüfmaschine dank dem Stahlring. Wie auch später bei den in situ Untersuchungen auf der Versuchstrecke festgestellt, kommt es bei den (in situ) Haftzuggeräten zu ungleichmässigem Abziehen.

7.3 Haftzugkraft in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit

7.3.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung des Einflusses der Zuggeschwindigkeit auf die Höchstkraft wurden Prüfserien auf SDA 4-16, SDA 8-16 und ACMR 8 Platten durchgeführt (Abb. 51). Die Prüftemperatur lag bei ca. 18 °C (Raumtemperatur).

Die Laboruntersuchung «Haftzugkraft in Abhängigkeit der Zuggeschwindigkeit» fand nach der 1. Messkampagne in Chavannes statt. Dort war festgestellt worden, dass die Wiederhol- und Reproduzierbarkeit sich für 50 oder 100 mm Stempel nicht unterscheiden. Darauf erfolgte der Entscheid, für die folgenden Untersuchungen die 50 mm Stempel zu benutzen.



Abb.51 Verteilung der 50 mm Stempel auf den SDA 4-16 und SDA 8-16 Platten.

7.3.2 Soll- und Ist-Geschwindigkeit des PROCEQ DY-216 Geräts

Laborversuche an Platten zeigen eine Diskrepanz zwischen Soll- und Ist-Geschwindigkeit. Diese Diskrepanz ergibt sich aus der Tatsache, dass der um den Prüfstempel befindliche Bereich der Platte ebenfalls etwas nach oben gezogen wird und das Prüfgerät somit die Geschwindigkeit nicht mehr richtig steuern kann. Sie ist daher umso höher, je höher die eingestellte Geschwindigkeit ist. Dieses Verhalten des Gerätes ist pro Belagssorte in der folgenden Abb. 52 dargestellt.

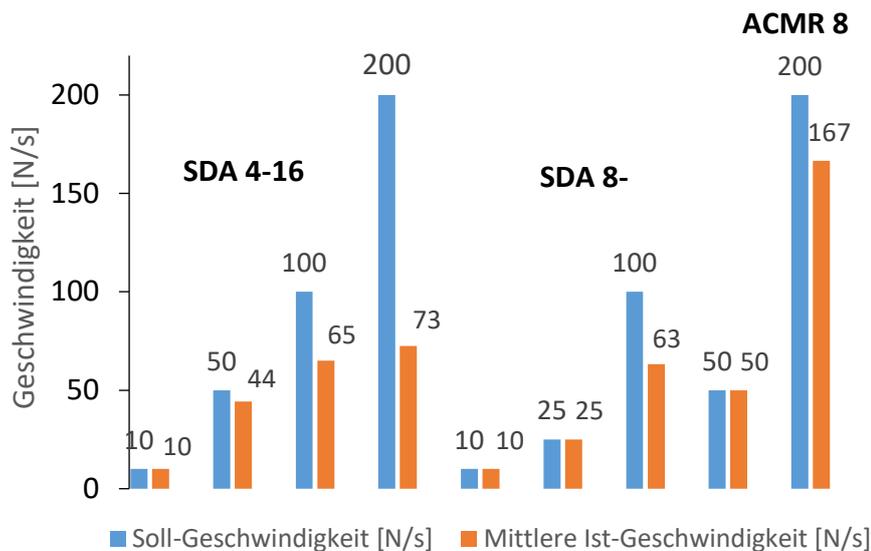


Abb.52 Soll- und mittlere Ist-Geschwindigkeit auf den SDA 4-16, SDA 8-16 und AC MR 8 Platten; Prüftemperatur ca. 18 °C.

Immer wenn die eingestellte Geschwindigkeit wie im Fall von 10 N/s eingehalten wird, ist die Kraftzunahme linear bis zur Maximalkraft und der Bruch ereignet sich schlagartig (vgl. Abb. 53 (b) und (d)). Wird die eingestellte Geschwindigkeit wie im Fall 100 N/s nicht eingehalten, ergibt sich eine eher zufällige Kraft-Zeit-Kurve (vgl. Abb.53 (a) und (c)).

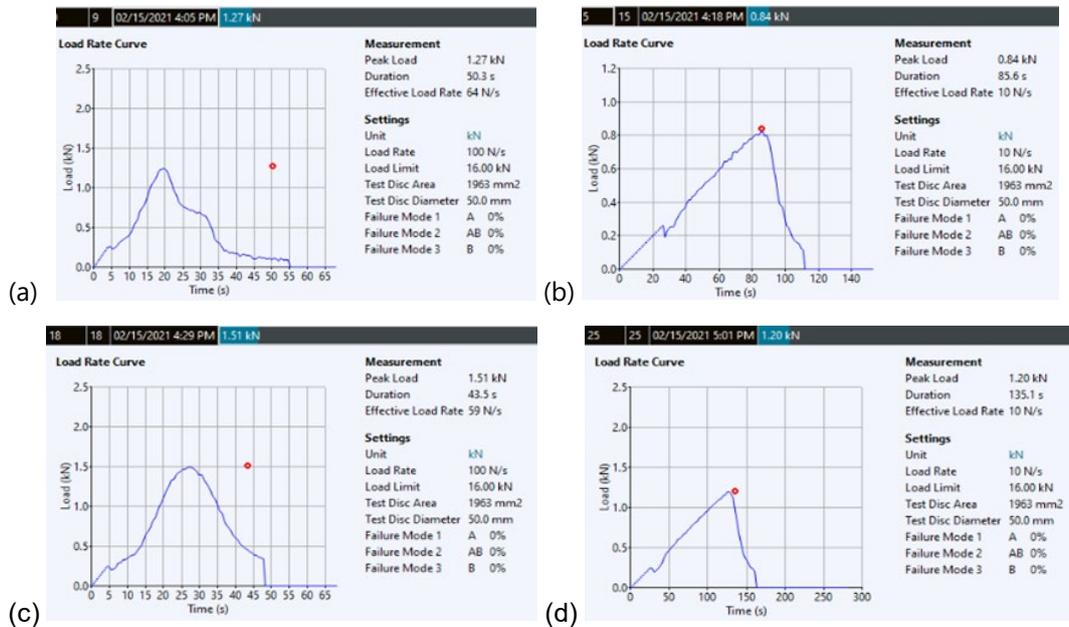


Abb.53 Haftzugversuche mit dem Proceq DY-216 Gerät; Kraft-Zeit-Diagramme; SDA 4-16 oben; SDA 8-16 unten; Zuggeschwindigkeit 100 N/s links; Zuggeschwindigkeit 10 N/s rechts.

7.3.3 Einfluss der Geschwindigkeit auf die Haftzugspannung

Bei einer überwiegenden Mehrheit von Werkstoffen hat die Belastungsgeschwindigkeit einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Asphalte sowie andere viskoelastische Werkstoffe sind diesem Einfluss besonders stark ausgesetzt. Zwischen 10 N/s und 50 N/s ist eine Zunahme der Haftzugspannung von ungefähr 40% zu beobachten und zwischen 10 und 25 N/s eine Zunahme von 16%.

In Abbildungen 54 bis 56 sind die Mittelwerte der Haftzugspannung in Abhängigkeit der gemessenen Ist-Geschwindigkeit für die jeweiligen Belagssorten dargestellt, wobei der Mittelwert aus 3 Prüfungen gebildet wurde.

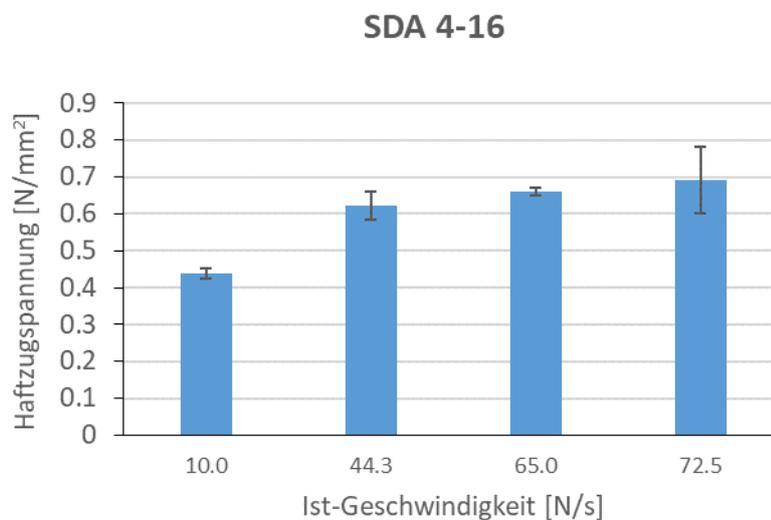


Abb.54 SDA 4-16; Haftzugspannung in Abhängigkeit der mittleren Ist-Geschwindigkeit; T=18 °C.

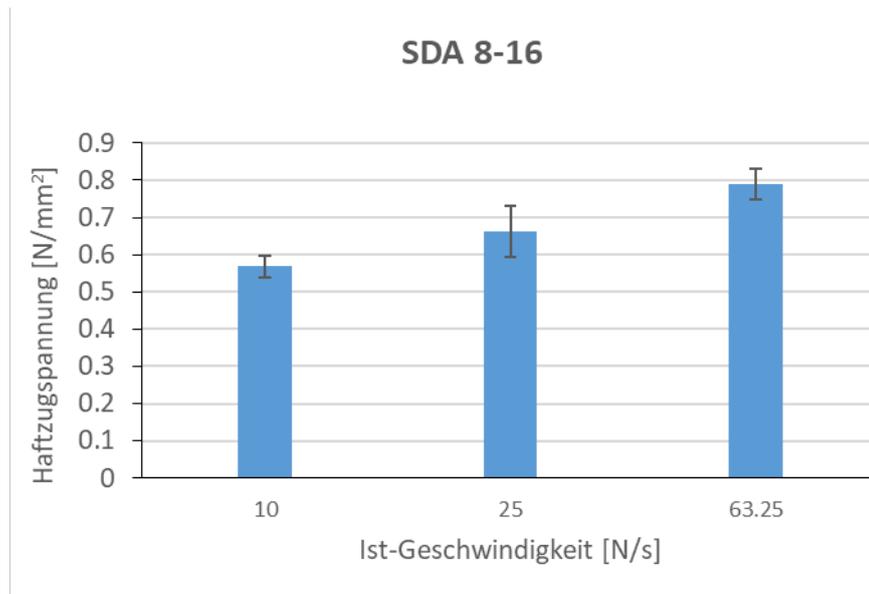


Abb.55 SDA 8-16; Haftzugspannung in Abhängigkeit der mittleren Ist-Geschwindigkeit; $T=18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

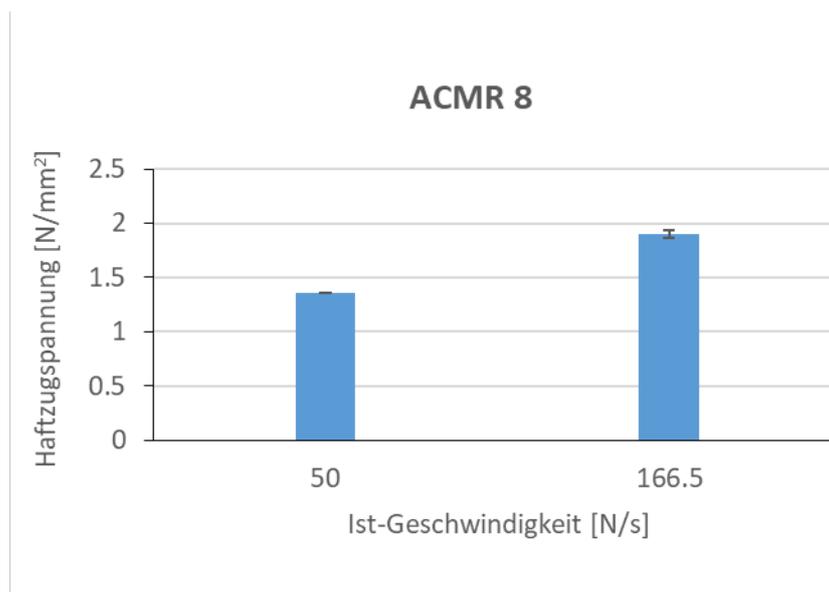


Abb.56 AC MR 8: Haftzugspannung in Abhängigkeit der mittleren Ist-Geschwindigkeit; $T=18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.4 Einfluss des Anbohrens auf die Haftzugspannung

Zur Untersuchung des Einflusses vom Anbohren auf die Haftzugspannung wurde eine Laborplatte AC MR 8 verwendet. Vor der Prüfung wurde die Platte mit einer Bohrkronen (\varnothing 50 mm) bis zu einer Tiefe von 10 mm angebohrt. Die Prüftemperatur betrug $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Ergebnisse sind in Tab. 9 zusammengefasst.

Tab. 9 Ergebnisse Haftzug an im Labor hergestellter AC MR 8 Prüfplatte;
Prüftemperatur 16 °C; Stempeldurchmesser 50 mm; Zuggeschwindigkeit 100 N/s ;
Prüfserien mit oder ohne Anbohrung.

Vorbereitung	Haftzugspannung [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]	Standardabweichung [N/mm ²]
Mit 10 mm Anbohrung	1.57	1.67	0.15 (9%)
	1.55		
	1.87		
	1.57		
	1.78		
Ohne Anbohrung	1.60	1.79	0.19 (11%)
	1.63		
	1.84		
	2.09		
	1.79		

Eine Vorbereitung der Prüfstelle mittels Anbohrung führt zu einer Absenkung der Haftzugkraft. Dieses Resultat entspricht den Erwartungen und gilt wahrscheinlich grundsätzlich, weil mit der Anbohrung das Herausreißen der am Rand befindlichen Gesteinskörner reduziert wird. Im untersuchten Fall liegt die relative Differenz der Mittelwerte bei 6.7 %. Diese Differenz kann je nach Mischgut anders ausfallen, da Hohlraumgehalt, Grösstkorn, Temperatur, Stempeldurchmesser, usw. den Effekt der Anbohrung beeinflussen.

Auch die absolute und relative Standardabweichung der Serie mit Anbohrung liegt etwas tiefer als bei der Serie ohne Anbohrung. Dies führt zum Schluss, dass die Anbohrung die Streuung der einzelnen Messwerte leicht reduziert. Obwohl die Streuung bei dieser Prüfmethode an für sich kein Problem darstellt, ist diese Beobachtung trotzdem in Bezug auf die Diskussion der Vor- und Nachteile einer Anbohrung grundsätzlich interessant.

8 Phase 3 Haftzugversuche in situ

8.1 Versuchsstrecke Chavannes-les-Forts (FR)

8.1.1 Allgemeines

Das Forschungsteam erhielt die Möglichkeit auf der in situ Teststrecke des Kantons Fribourg in Chavannes-les-Forts Haftzugprüfungen durchzuführen. Die 2018 von Weibel AG erbauten Versuchsfelder bestehen aus SDA Belagsarten mit unterschiedlichen Grösstkörner und Hohlraumgehalten. Dabei handelt es sich nicht nur um "Standardrezepturen", sondern es wurden zu Versuchszwecken auch nicht normgerechte Belagsarten wie zum Beispiel SDA 2-20, 4-5 oder 6-15 eingebaut. Abbildung 57 gibt einen schematischen Überblick.

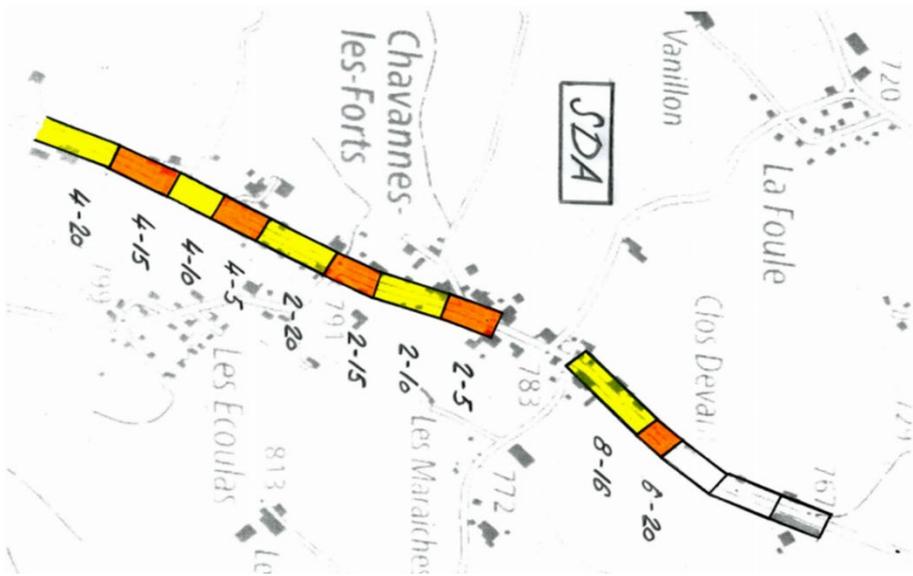


Abb.57 SDA Versuchsfelder auf der Versuchstrecke in Chavannes-les-Forts (FR)

8.1.2 Durchführung Vergleichsversuche

Um den genauen Verlauf und die Sicherheitsvorkehrungen des vorgesehenen Ringversuchs vorzubereiten fanden am 21. Oktober 2020 Vorversuche statt. In den Wochen danach konnte der eigentliche Ringversuch mit unterschiedlichen Labors und deren Prüfgeräten leider nicht in vollem Umfang realisiert werden, so dass letztendlich neben dem CCDR nur noch das Prüflabor Laboroute mit seinem Gerät beteiligt war.

Die Durchführung der Haftzugversuche fand dann am 10. November 2020 statt. Pro Versuchsfeld wurden von jeden Prüflabor jeweils 3 Prüfempel mit dem Kleber Technicoll 9412 aufgeklebt und mit einer Vorlast von 50 kN und einer Geschwindigkeit von 100 N/s abgezogen, was deutlich von der im Labor gewählten Abzugsgeschwindigkeit von 20 N/s abweicht. Auch wurde an Stelle der im Labor ermittelten Haftzugkraft [kN], die Haftzugspannung [N/mm²] als Kennwert verwendet, da das Gerät der Laboroute nur diese Werte anzeigen kann. Die Prüftemperatur variierte während der Haftzugprüfungen zwischen 14 °C und 20 °C. In die Auswertung wurden folgende Parameter mit einbezogen:

- Stempeldurchmesser
- Schleifmittel
- Prüfgeräte
- Belagstemperatur
- Hohlraumgehalt
- Schaden (Kornausbruch)

8.1.3 Vergleichsversuche mit Abzugstempeln von 50 mm und 100 mm

In einer ersten Prüfsrie zur Ermittlung des geeigneten Prüfstempeldurchmessers wurden Abzugsstempel mit Durchmessern von 50 mm und 100 mm miteinander verglichen (siehe auch Abbildung 58).

Dabei zeigte sich, dass es wie in Abb. 59 dargestellt bei Verwendung von Abzugsstempeln mit einem Durchmesser von 50 mm zu deutlich höheren Haftzugspannungen kommt. Als Ursache für die Abnahme der Zugfestigkeit wird ein in Abb. 60 sichtbarer ungleichmässiger Abriss des 100 mm Stempels verantwortlich gemacht. Aus diesem Grund wurde beschlossen, im Folgenden alle weiteren in situ Vergleichsuntersuchungen mit einem 50 mm Stempel durchzuführen.



Abb.58 Abzugsstempel der Durchmesser 50 mm und 100 mm

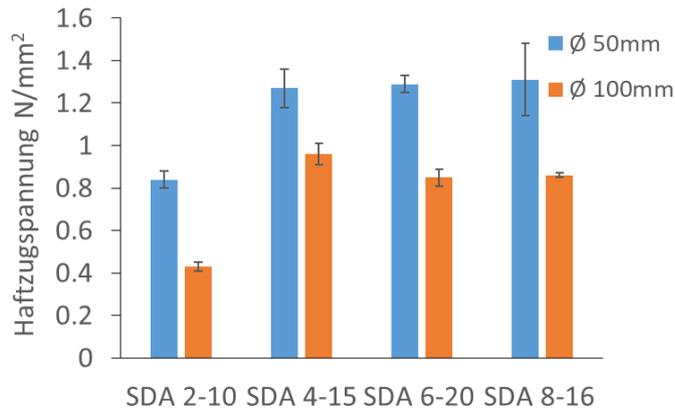


Abb.59 Haftzugspannung, Vergleich Stempel der Durchmesser 50 mm und 100 mm



Abb.60 Ungleichmässig (schief) abgezogener Stempel des Durchmessers 100 mm

8.1.4 Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Schleifverfahren

In einem weiteren Schritt wurde das Schleifverfahren näher analysiert. Der Grund dafür war die Annahme, ein zu massives Schleifen könnte zu Kornzertrümmerung und/oder Kornverschiebungen führen. Um dies auszuschliessen wurden zwei unterschiedliche Diamantschleifscheiben (CCDR grob und Laboroute fein) sowie ein Schleifpapier P40 in Betracht gezogen (vgl. Abb. 61).



Abb.61 Evaluation unterschiedlicher Schleifmethoden

Wie in Abb. 62 ersichtlich ergeben sich für alle untersuchten Schleifmethoden ähnliche Ergebnisse für die Haftzugspannung.

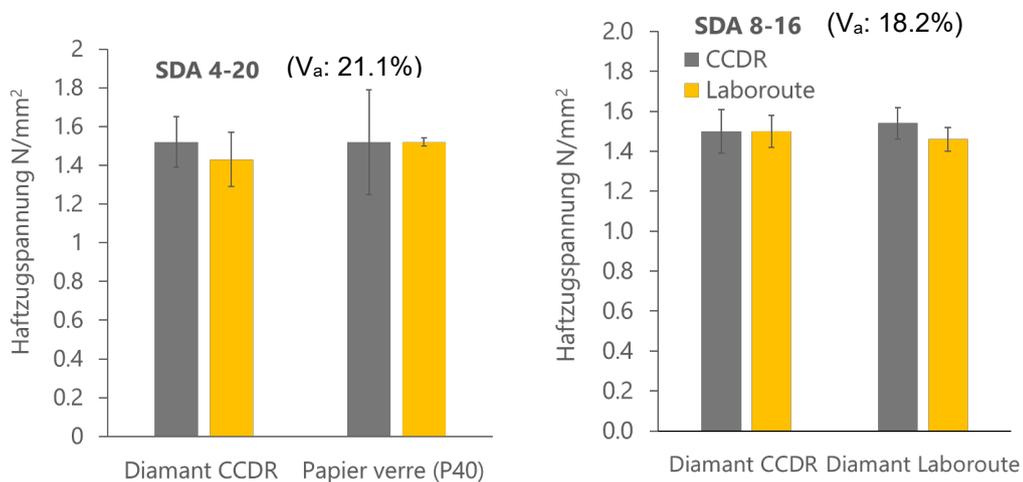


Abb.62 Vergleichsmessung der Haftzugspannung aufgrund unterschiedlicher Schleifmethoden; CCDR (grau); Laboroute (gelb).

8.1.5 Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Haftzuggeräten

In Abbildung 63 sind die beiden Haftzuggeräte zu sehen: Links das Gerät der Laboroute BFS F20D und rechts das CCDR Gerät Proceq DY-216.

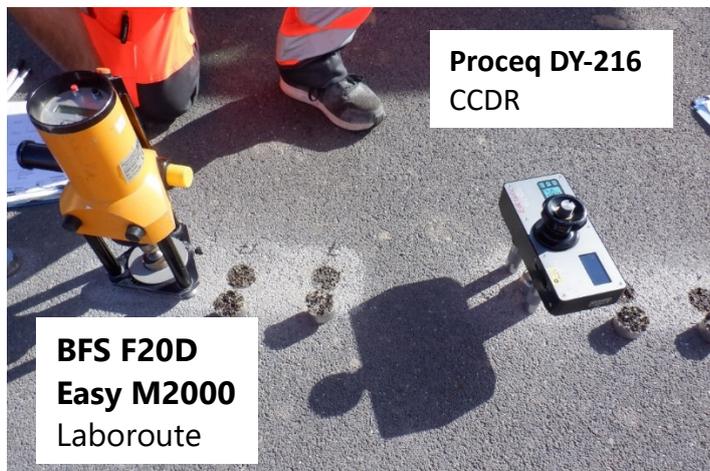


Abb.63 Haftzuggeräte, links: Laboroute, rechts: CCDR

Abbildung 64 zeigt die Auswertung der mit den beiden Geräten ermittelten Haftzugspannung für Belagsarten mit unterschiedlichem Grösstkorn und Hohlraumgehalt (SDA 4-5 mit V_a : 9%, SDA 4-20 mit V_a : 20% und SDA 8-16 mit V_a : 18%).

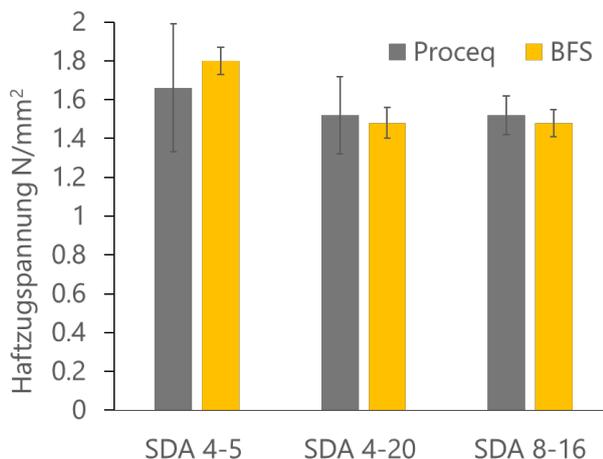


Abb.64 Haftzugspannung für unterschiedliche Belagssorten gemessen mit Proceq (CCDR) und BFS Gerät (Laboroute)

Die Auswertung der mit den beiden Geräten ermittelten Haftzugspannung für Belagsarten mit unterschiedlichem Grösstkorn und Hohlraumgehalt (SDA 4-5 mit V_a : 9%, SDA 4-20 mit V_a : 20% und SDA 8-16 mit V_a : 18%) ergibt für beide Geräte eine gute Übereinstimmung.

8.1.6 Vergleichsversuche bei unterschiedlichen Temperaturen

In Abbildung 65 ist die Haftzugspannung zweier Belagssorten gemessen bei Temperaturen von 14 °C, 16 °C und 20 °C dargestellt. Es zeigt sich, dass die Haftzugspannung mit nur geringer Erhöhung der Belagstemperatur (+ 2 °C bzw. + 4 °C) signifikant abnimmt.

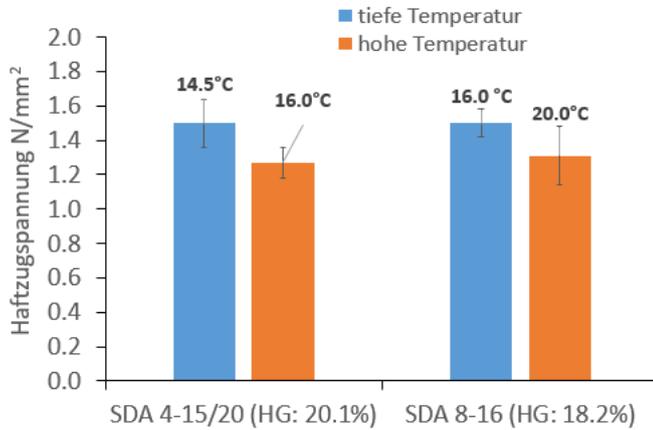


Abb.65 Haftzugspannung für unterschiedliche Belagssorten gemessen bei nur leicht unterschiedlichen Temperaturen

8.1.7 Vergleichsversuche bei unterschiedlichen Hohlraumgehalten

In Abbildung 66 ist die Haftzugspannung für zwei Belagssorten mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten (SDA 4-15 mit 8.8% Hohlraumgehalt und SDA 4-15 mit 20.1% Hohlraumgehalt) gemessen bei vergleichbarer Temperatur dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die Haftzugspannung vom Hohlraumgehalt abhängig ist und mit zunehmendem Hohlraumgehalt abnimmt.

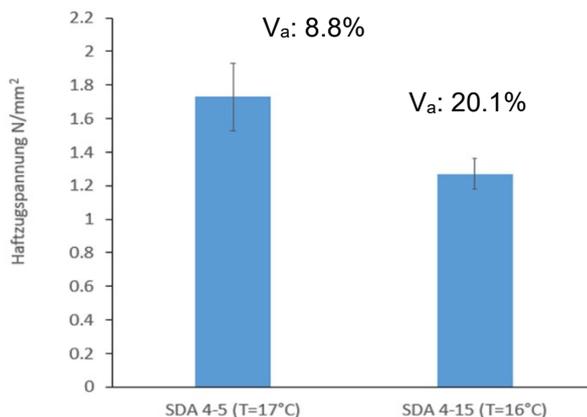


Abb.66 Haftzugspannung für Belagssorten mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten: SDA 4-5 mit V_a : 8.8% und SDA 4-15 mit V_a : 20.1%

8.1.8 Zusammenhang zwischen Haftzugspannung und Kornausbrüchen

Abbildung 67 zeigt die ermittelten Haftzugkräfte verschiedener Belagssorten. In Abbildungen 68 und 69 sind die Belagsoberflächen der entsprechenden Beläge zu sehen. Wie aus diesen Aufnahmen hervorgeht, gibt es im Fall von SDA 4-15, SDA 8-16 und SDA 6-20 mit Haftzugkräften um 7 kN keine Schäden in Form von Kornausbrüchen, während die Belagsoberfläche von SDA 2-10 deutliche Kornausbrüche aufweist. Dies zeigt, dass

die Höhe der Haftzugkraft - zumindest in diesem Fall - mit dem in situ Verhalten der Beläge übereinstimmt, was als Validierung des Verfahrens gelten kann.

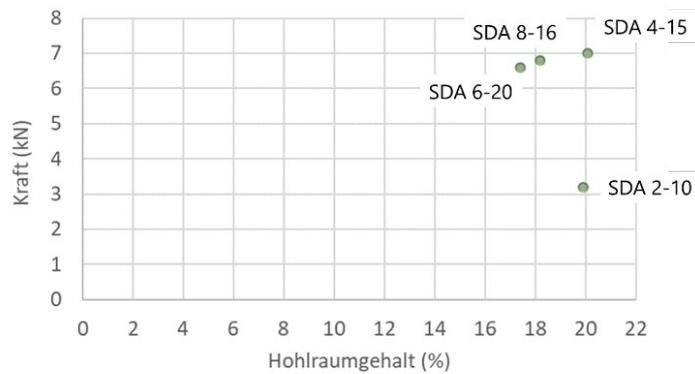


Abb.67 Haftzugspannungen verschiedener Belagsorten

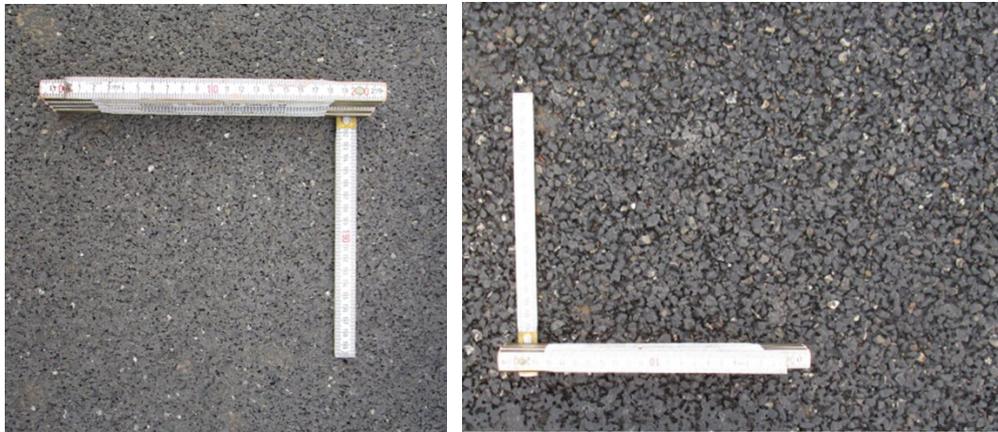


Abb.68 Belagsoberfläche SDA 4-15 (links) Belagsoberfläche SDA 8-16 (rechts)

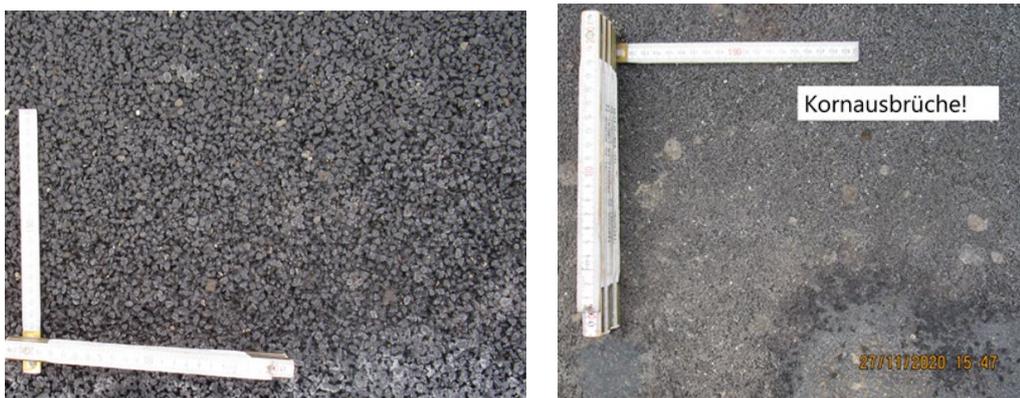


Abb.69 Belagsoberfläche SDA 6-20 (links) Belagsoberfläche SDA 2-10 (rechts)

8.2 Ausgewählte Versuchsstrecken im Kanton Freiburg

8.2.1 Allgemeines

Die Sektion Kantonsstrassenunterhalt des Tiefbauamtes betreut in seinem Kreis 2 mehrere lärmarme Strecken. Der Sektionschef stellte der Forschungsgemeinschaft 8 davon zur

Verfügung, um Haftzugprüfungen durchzuführen. Alle Strecken wurden zwischen 2015 und 2017 eingebaut. Einige davon hatten Anfang 2021 noch gute Lärmwerte, andere konnten die Minimalanforderung von -3 dBA nicht mehr gewährleisten. Von den 8 vorgeschlagenen Strecken wurden für die Versuchsdurchführung 6 ausgewählt. Diese sind in Tab. 10 beschrieben. In der Tabelle stehen die Produktbezeichnungen A und B für zwei unterschiedliche Firmenprodukte.

Tab. 10 Beschreibung der ausgewählten Versuchsstrecken; A und B sind SDA 4 konforme Unternehmensprodukte; durchschnittlicher täglicher Verkehr DTV für Personenwagen PW und Lastkraftwagen LKW.

Gemeinde	Achse Bezugspunkt	Produkt	Einbaujahr	DTV PW	DTV LKW	Gefälle [%]
Cottens-Neyruz	2000 PR2925-40	A	2015	8200	520	1.5
Grandsivaz	2100 PR1375+115	A	2017	10000	830	1.1
Siviriez	2010 PR425-80	A	2016	3600	460	2.5
Montbrelloz	2500 PR2275	B	2015	3500	220	2.9
Estavayer	2500 PR1950+13	B	2015	9200	490	7.0
Billens	2030 PR100-90	B	2015	2700	250	5.6

Die Messungen erfolgten am 2. und 3. Juni 2021. Neben der Forschungsstelle (CCDR mit dem Gerät PROCEQ DY-216) beteiligte sich wiederum Laboroute (Gerät BPS F20D EASY M2000) an den Messungen.

8.2.2 Methodologie

Aufgrund der Messungen auf 4 bis 6 Jahre alten SDA Strecken wurde versucht, einen Zusammenhang zwischen Anfälligkeit auf Kornausbruch und der vorhandenen Resthaftzugspannung nachzuweisen. Der Kornausbruch wurde durch Augenschein qualitativ bewertet und mittels Sandfleck indirekt gemessen. Dies erfolgte in den Radspuren, wo der aufgetretene Schaden am auffälligsten ist. Die Haftzugmessungen hingegen wurden zwischen den Radspuren, wo eine Beanspruchung im Wesentlichen durch Witterung und UV stattfindet, durchgeführt. Die Versuchsanordnung auf der Strasse ist in Abb. 70 illustriert.



Abb.70 Sandfleck in den Radspuren; 2 Serien Haftzug ausserhalb Radspur; 1 Dummy-Stempel zur Messung der genauen Oberflächentemperatur.

8.2.3 Ergebnisse

Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse von Kornausbruch, Sandfleck, Belagstemperatur und Haftzugspannung.

Tab. 11 Mittlere Texturtiefe MTT (Sandfleck), Belagstemperatur und Haftzugspannung

Gemeinde	Produkt	Kornausbruch Augenschein	MTT [mm]	Temperatur [°C]	Haftzug CCDR [N/mm ²]	Haftzug Laboroute [N/mm ²]	Mittelwert [N/mm ²]
Cottens-Neyruz	A	gering	0.7	19	0.96	0.94	0.95
Grandsivaz	A	mittel	0.8	45	0.26	0.35	0.31
Siviriez	A	hoch	1.4	22	0.69	0.73	0.71
Montbrelloz	B	gering	0.6	24	1.04	1.05	1.04
Estavayer	B	hoch	0.9	18	1.32	1.12	1.22
Billens	B	hoch	1.0	23	0.99	1.03	1.01

Die Messungen in Grandsivaz fanden an einem sonnigen Nachmittag statt und die Prüffläche wurde nicht beschattet, folglich stieg die Temperatur der Strassenoberfläche auf 45 °C. Die Haftzugspannung dieser Strecke ist dadurch leider unbrauchbar. Ansonsten lag die Temperatur bei allen Messungen zwischen 18 °C und 24 °C.

Im Fall des Produktes A scheint für die beiden in der Untersuchung berücksichtigten Strecken ein Zusammenhang feststellbar, d.h. im Fall von geringen Kornausbrüchen (Strecke Cottens-Neyruz) ist die Haftzugkraft höher als im Fall hoher Kornausbrüche (Strecke Siviriez). Ebenso besteht hier eine inverse Korrelation zwischen MTT und Haftzugspannung.

Im Fall des Produktes B gilt diese Aussage aber nicht. Obwohl alle 3 Strecken im gleichen Jahr eingebaut wurden, variieren die wichtigen Faktoren Verkehr und Gefälle stark. Die Haftzugkraft in Billens mit vielen Kornausbrüchen ist derjenigen von Montbrelloz mit wenigen Kornausbrüchen vergleichbar. Beide Strecken weisen eine ähnliche Verkehrsbelastung auf, sind jedoch unterschiedlich in Bezug auf das Gefälle, so dass die Strecke mit grösserem Gefälle auch mehr Kornausbrüche aufweist. In diesem Vergleich ist der Kornausbruchunterschied nicht auf die Alterung des Asphalts zurückzuführen, sondern auf die Strassengeometrie und daher im Haftzugversuch nicht nachweisbar. Auf der Strecke Estavayer, trotz hoher Kornausbrüche in den Radspuren, hohem Verkehrsaufkommen und grossem Gefälle ist die Haftzugkraft am höchsten. Auch hier ist die Höhe des Schadens nicht ausschliesslich auf die bleibenden mechanischen Eigenschaften des Mischgutes zurückzuführen. Ausserdem fand die Messung in Estavayer früh am Morgen statt, als die Temperaturen noch kühl waren.

Auch gibt es unabhängig von der Feststellung hoher oder geringer Kornausbrüche Unterschiede in der Höhe der Haftzugkraft zwischen den beiden Produkten A und B.

Die Messkampagne konnte insgesamt keinen eindeutig feststellbaren Zusammenhang zwischen in den Radspuren optisch festgestellten Kornausbrüchen und der im unbelasteten Bereich ermittelten Haftzugkraft belegen. Kornausbrüche scheinen stark von unterschiedlichen Faktoren wie Gefälle/Steigung und Verkehrsaufkommen abhängig zu sein, was die in den unbelasteten Bereichen durchgeführte Haftzugkraft naturgemäss nicht widerspiegeln kann. Einzig die Qualität der Asphaltmischung liesse sich hier aufgrund der Höhe der Haftzugfestigkeit charakterisieren, wobei fundierte Aussagen wegen des begrenzten Messumfangs schwierig sind.

Die durchgeführte Messkampagne hat die schon früher gefundene gute Reproduzierbarkeit der Prüfmethode zwischen zwei unterschiedlichen Prüfgeräten bestätigt.

9 Diskussion

9.1 Vergleich Haftzugwerte

9.1.1 Laborwerte Empa und CCDR

Abbildung 71 zeigt die von der Empa und dem CCDR ermittelten Haftzugkräfte der verschiedenen Belagssorten in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt des Belags im Vergleich. Im Diagramm sind die Regressionsgeraden eingezeichnet und das Bestimmtheitsmass R^2 angegeben. Wie bereits in Kapitel 7.2.2 beschrieben, sind die in der UVP der Empa bestimmten Haftzugkräfte höher als die mit dem Proceq Gerät ermittelten (die Versuchsanordnung in der UVP verhindert die Tendenz zur Wölbung der Platte).

In beiden Fällen wird der lineare Zusammenhang nur ersichtlich, wenn man die Haftzugkraft für AC MR 8 also einen Belag, der einen deutlich tieferen Hohlraumgehalt aufweist, mit einbezieht, ansonsten gibt es keinen linearen Zusammenhang zwischen Haftzugkraft und Hohlraumgehalt der untersuchten Belagssorten.

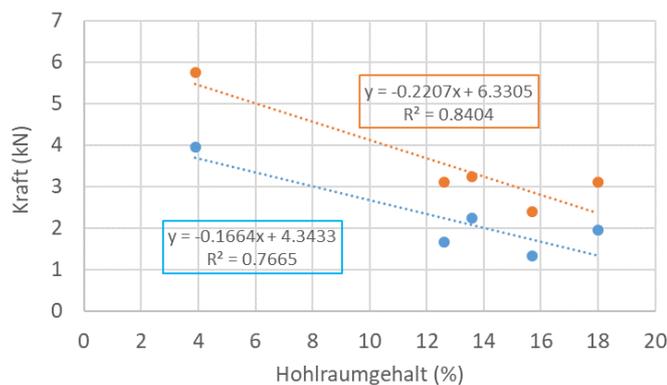


Abb.71 Vergleich der Haftzugkraft Empa (orange) und CCDR (blau) bei 20°C und einer Abzugsgeschwindigkeit von 20 N/s

Auf der Suche nach einer Abhängigkeit zwischen Haftzugwert und Hohlraumgehalt stellt sich auch die Frage, ob dieser nicht für Mischgüter mit unterschiedlichem maximalen Grösstkorn differenziert betrachtet werden müsste. Hat sich doch, wie in Kapitel 6.4.2 beschrieben, in Vorversuchen an den ungenügend verdichteten Belagsplatten mit annähernd gleichem Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt gezeigt, dass es Unterschiede zwischen Belägen mit 4mm und 8mm Grösstkorn zu geben scheint (vgl. auch Abb. 72), wobei es bei grösserem Maximal Korn zu geringeren Haftzugkräften und damit grösseren Kornausbrüchen kommt.

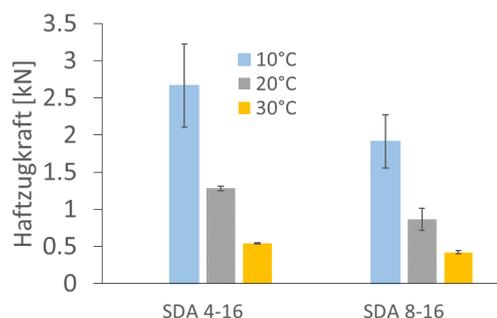


Abb.72 Vergleich der Haftzugkraft zwischen SDA 4-16 und SDA 8-16 für ungenügend verdichtete Belagsplatten (vgl. Abb. 39)

Aber die in Kapitel 7.2.2 an den ausreichend verdichteten Belagsplatten durchgeführten Auswertungen der Haftzugprüfungen des CCDR zeigen allerdings ein gerade umgekehrtes Verhältnis zwischen 4mm und 8mm Belägen und diejenige der Empa keine Unterschiede, was auch auf den etwas höheren Verdichtungsgrad des SDA 8-16 von 100.6% gegenüber 98.5% für den SDA 4-16 zurückzuführen sein könnte.

Auch wenn sich die Annahme eines Grösstkorneffekts anhand der Ergebnisse der Phase 2 überhaupt nicht bestätigt und auf Grund der geringen Anzahl der 4mm und 8mm Beläge eine solche Analyse auf der Teststrecke in Chavannes-les-Forts nicht möglich ist, wäre eine tiefer gehende Betrachtung sicher von Interesse.

9.1.2 Laborwerte Empa, CCDR und in situ Werte CCDR

In Abbildung 73 sind neben den im Labor mit CCDR Gerät und Empa Methode mit einer Geschwindigkeit von 20 N/m ermittelten Haftzugspannungen, die in situ auf der Versuchsstrecke ebenfalls mit einem 100 mm Stempel, aber bei einer Geschwindigkeit von 100 N/m ermittelten Haftzugspannung eingezeichnet. Die in situ ermittelten Spannungen liegen dabei wegen der schnelleren Belastung deutlich höher, obwohl die in situ untersuchten Beläge insgesamt hohe Hohlraumgehalte aufweisen.

Die Hohlraumgehalte dieser Beläge in situ liegen sehr nahe beieinander, so dass ein Zusammenhang zwischen Haftzugspannung und Hohlraumgehalt wenig Sinn macht, allerdings lässt sich aber, wie in Kapitel 8.1.8 aufgezeigt, eine Beziehung zu den in situ festgestellten Kornausbrüchen herstellen.

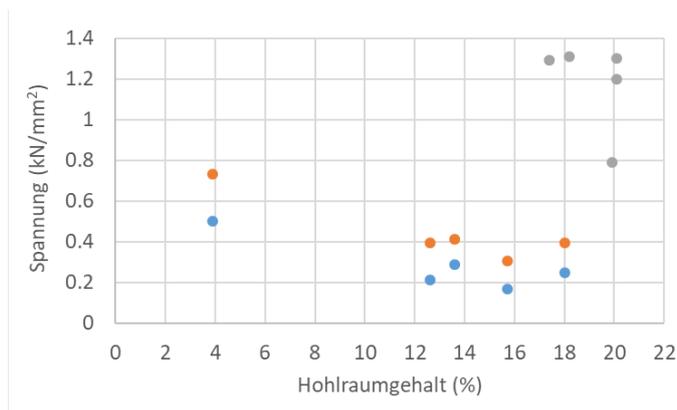


Abb.73 Vergleich der Haftzugspannungen mit dem 100 mm Stempel; Empa (orange) und CCDR (blau) bei 20°C und 20 N/s; in situ bei 17...20 °C und 100 N/s.

9.2 Aussagekraft Haftzugverfahren

9.2.1 Auswirkung des Abzugsstempeldurchmessers

Die Haftzug- oder Ausziehungskraft ist die notwendige Kraft, um einen durchgehenden Bruch durch die Matrix zu bewirken. Die Bruchlinie folgt den Schwachstellen des Mastix, in erster Linie durch die Hohlräume und dann entlang der Kontaktflächen zwischen angrenzenden Gesteinskörnern. Brüche im Gestein selbst sind sehr selten. Sind die Kontaktflächen klein oder ist die Mastix spröde, ergibt sich eine relativ niedrige Ausziehungskraft. Der Ablauf ist in den Abbildungen 74 und 75 dargestellt.



Abb.74 Ausgezogene Körner aus einer SDA 4-16 Platte; die Innenwand der Poren ist glänzend, die Kontaktflächen hingegen erscheinen matt.

Dazu kommt noch ein Randeffekt. Die Prüfung mit 100 mm und 50 mm Stempeln (wenn alle anderen Parameter konstant sind) hat zu ungleichen Haftzugspannungen geführt (siehe Abb. 54). Diese Beobachtung ist damit zu erklären, dass die Körner am Rand des Stempels auch seitlich abgerissen werden müssen. Dies benötigt eine zusätzliche Ausziehungskraft deren Anteil an der Gesamtkraft umso höher ist, je höher der Quotient aus Umfang und Fläche des Stempels.

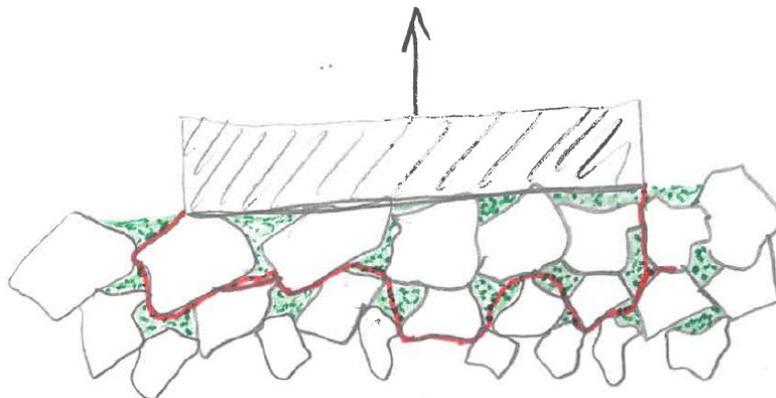


Abb.75 Schematische Darstellung des Bruchverlaufs unter dem Stempel; Hohlraum in grün; Bruchlinie in rot.

9.2.2 Auswirkung der Abzugsgeschwindigkeit

In Kapitel 7.3 wurde gezeigt, wie sich die Belastungsgeschwindigkeit auf die Haftzugspannung auswirkt. Diese Untersuchung fand auf Platten im Labor statt, und es stellte sich heraus, dass das Gerät Proceq DY-216 unter diesen Umständen nicht in der Lage war, Soll-Geschwindigkeiten von über 50 N/s einzuhalten (Abb. 52). Im Gegensatz dazu, konnte während den Messungen in Chavannes-les-Forts in situ die eingestellte Zuggeschwindigkeit von 100 N/s eingehalten werden.

Dieser Unterschied im Verhalten zwischen Labor und in situ ist, wie bereits in Abschnitt 7.3.2 erläutert, auf die Randbedingungen zurückzuführen. Der auf eine Platte geklebte

Abzugstempel zieht nicht nur die Körner, sondern den Prüfstempel umgebenden Bereich der Platte nach oben. Es bildet sich eine Wölbung, bevor die Körner ausgerissen werden. Die Entstehung der Wölbung führt dazu, dass das Gerät die Kraftsteuerung verfehlt.

Die Situation in situ ist grundsätzlich anders. Die obere Belagsschicht ist mit der unteren verbunden und könnte nur im Fall eines mangelnden Schichtenverbundes als Ganzes hochgezogen werden. In diesem System gleicht der Prüfkörper einer «unendlich dicken Schicht», die sich der Verformung entgegensetzt. Die Zugkraft wirkt also einzig auf die Körner an der Oberfläche und die Kraftzunahme erfolgt gemäss Einstellung.

Nach diesen Beobachtungen liegt die Annahme nahe, dass Versuche auf Laborplatten nach dem Versuchsaufbau der Empa (Abb. 42) durchgeführt werden sollten, das heisst, unter Verwendung eines Stahlrings, der dem Effekt der Wölbung entgegenwirkt.

Es bleibt aber zu erklären, wieso bei etwa gleicher Temperatur und Hohlraumgehalt die Haftzugspannungen für Geschwindigkeiten von 100 N/s in situ bzw. 20 N/s im Labor (Empa) bei 1.2 MPa bzw. 0.3 MPa, d.h. bei einem Verhältnis von 4:1 liegen (Abb. 73). Der Sprung ist gewaltig. Aufgrund der zwischen Empa mit Stahlring und CCDR ohne Stahlring gemachten Vergleichsuntersuchungen ergibt sich etwa eine Verdoppelung der Haftzugspannung, wenn keine Wölbung auftritt (Abb. 73). Eine zusätzliche Verdoppelung ist, wie in Kapitel 7.3.3 dargestellt, aufgrund der unterschiedlichen Ist-Geschwindigkeiten möglich. Insgesamt ergibt dies ungefähr eine Vervielfachung der Haftzugspannung, wobei berücksichtigt werden muss, dass es sich um Mischgut von unterschiedlichen Anlagen handelt. Diese allgemeine Beobachtung müsste allerdings sicher noch an einer grösseren Anzahl Geräte und unter ähnlichen Bedingungen im Labor und in situ verifiziert werden.

9.2.3 Auswirkung des Verdichtungsgrades

Abbildung 76 zeigt den Vergleich der Haftzugkraft ermittelt mit CCDR Gerät bei 20°C an ungenügend und gut verdichteten Belagsplatten. Wie aus der Abbildung hervorgeht, ist die Haftzugprüfung und damit die Höhe der Haftzugkraft ein guter Indikator für die Kornausbrucharfälligkeit, wie auch ein Vergleich der Auswertung mit dem Darmstädter Scuffing Device DSD in Abbildung 77 zeigt.

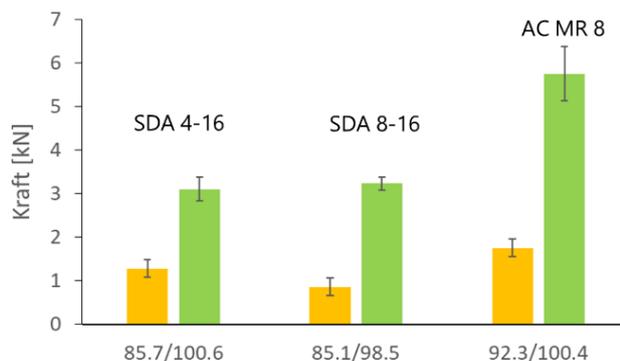


Abb.76 Vergleich der Haftzugkraft ermittelt an ungenügend (grün) und gut verdichteten (gelb) Belagsplatten mit CCDR Gerät bei 20°C.

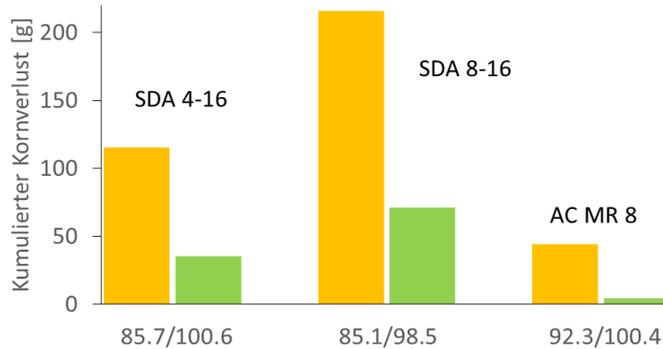


Abb.77 Kumulierter Kornverlust ermittelt an ungenügend (gelb) und gut verdichteten (grün) Belagsplatten mit DSD Gerät in Darmstadt bei 40 °C.

9.2.4 Auswirkung des Anbohrens

Das Anbohren der Prüffläche zeigte im Fall von AC MR 8 und bei einer Prüftemperatur von 16 °C einen geringen Effekt auf die Haftzugspannung. Letztere liegt im Schnitt etwas tiefer, wenn auf das Anbohren verzichtet wird. Dieser Effekt ist aber so klein, dass er kaum als signifikant einzustufen ist. Ausgedrückt in Zahlen ist die absolute Differenz (0.12 N/mm²) kleiner als die Standardabweichungen der beiden Serien (0.15 N/mm² und 0.19 N/mm²).

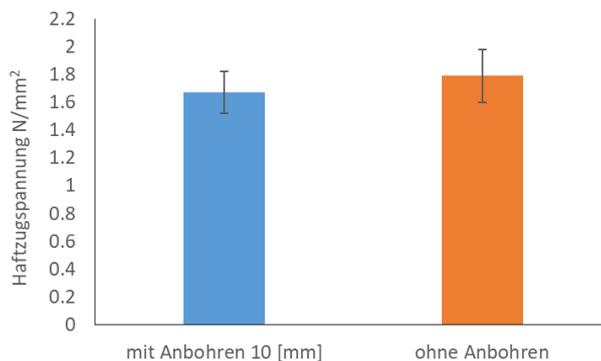


Abb.78 Haftzugspannung mit und ohne Anbohren einer AC MR 8 Laborplatte. Mittelwert und Standardabweichung je einer 5er Serie; Prüftemperatur 16 °C.

Wenn Anbohren Teil der Prüfmethode werden würde, müsste dies in situ - um die Oberfläche vor dem Kleben nicht zu nässen - im trocken Verfahren durchgeführt werden. Die Bohrtiefe müsste entsprechend möglichst gering bleiben.

9.3 Aussagekraft und Präzision des DSD

9.3.1 Präzision

Die in diesem Kapitel gemachten Aussagen beziehen sich zum einen auf einen Ringversuch [17], in dem die vier Methoden zur Messung des Widerstands gegen Oberflächenverschleiss [2] einer statistischen Analyse unterzogen wurden. Zum anderen werden die im Rahmen der Forschungsarbeit mit den DSD Geräten aus Darmstadt und Karlsruhe gemachten Erfahrungen und Messresultate berücksichtigt.

Im Rahmen des Ringversuchs wurden die DSD Geräte der TU Darmstadt und des BRRC in Brüssel verwendet. Die mittlere Standardabweichung über alle 9 Messserien betrug an beiden Orten 23 %.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens lag die Standardabweichung des Kornverlusts an der TU Darmstadt für die SDA Prüfkörper bei etwa 15 % und für die AC MR 8 Platte bei 64 %. Eine weitere von den Universitäten Darmstadt und Karlsruhe durchgeführte Messreihe an AC 16 WDL und AC 22 WDL ergab Standardabweichungen von ca. 43 % (Darmstadt) und ca. 19 % (Karlsruhe). Auch wenn es sich zugegebenermaßen um einen recht heterogenen Satz von Messungen und Materialien handelt, erhält man doch insgesamt den Eindruck, dass die DSD Methode nicht im Stande ist, gut wiederholbare Ergebnisse zu liefern.

Die Reproduzierbarkeit wurde ebenfalls untersucht (vgl. auch Abb. 15), indem Prüfkörper aus derselben Platte jeweils in Darmstadt und Karlsruhe geprüft wurden. Auch hier zeigten sich erhebliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Universitäten. Sieht man vom AC MR 8 mit sehr geringem Kornverlust ab, beträgt die mittlere relative Differenz der SDA und PA Prüfkörper 28 %. Hinzu kommt noch die Beobachtung, dass das Phänomen nicht stochastisch ist, sondern dass eines der Geräte systematisch höhere Kornverluste produziert.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass das DSD für eine Normprüfung unzureichend genau ist.

9.3.2 Aussagekraft

Nichtsdestotrotz zeigte sich im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit, dass die DSD Prüfung in der Lage ist, Unterschiede in der Mischgutzusammensetzung, insbesondere in Bezug auf den Hohlraumgehalt und/oder Verdichtungsgrad, zu erkennen. Ein Beispiel dafür zeigt Tabelle 12, die einen Vergleich der Messergebnisse von ungenügend verdichteten Prüfkörpern in Darmstadt und genügend verdichteten in Karlsruhe enthält. Die Unterschiede der Messergebnisse sind viel grösser als die festgestellte Abweichung zwischen den beiden Geräten, womit sich die DSD Prüfung als empfindlich hinsichtlich des Verdichtungsgrads erweist.

Tab. 12 DSD Kornverlust nach 10 Doppelschubzyklen

Mischgut	Verdichtungsgrad [%]	Kornverlust [g]		
		Darmstadt	Karlsruhe	
AC MR 8	92.3	44.0	100.4	3.8
SDA 4-16	85.8	115.5	100.6	22.1
SDA 8-16	85.1	215.7	98.5	39.1

Auch die Resultate in Abb. 13 zeigen wie der Kornverlust mit steigendem Hohlraumgehalt zunimmt: AC MR 8 mit 4 % Hohlraum hat einen Kornverlust von 4 g während SDA 8 und PA 8 mit bzw. 14 und 19 % Hohlraum ca. 40 g aufweisen. Auch die 4er Beläge folgen demselben Trend: SDA 4-16 mit 13 % Hohlraum und SDA 4-20 mit 19 % Hohlraum verlieren bzw. 22 g und 47 g Mineralstoffkörner. Die Übereinstimmung dieser beiden Einschätzungen war der Auslöser, DSD- und Haftzugsergebnisse zu vergleichen.

Die hier erbrachte Beurteilung wird in [17] jedoch nicht bestätigt. Die beiden DSD Geräte des Ringversuches schienen weitgehend nicht geeignet zur Erkennung von statistisch signifikanten Unterschieden zwischen Standard- und minderwertigen Asphaltmischungen.

9.3.3 Vergleich Haftzug/DSD

In Phase 1 wurden mit beiden Verfahren Messungen an den Mischgutsorten AC MR 8, SDA 4-16 und SDA 8-16 durchgeführt. Die inverse Korrelation zwischen DSD und maximale Haftzugkraft ist in Tab. 13 zusammengefasst. Die Datenpunkte folgen einer linearen Regression mit $R^2 = 0.98$ (Abb. 79), was darauf hindeutet, dass eine reale materialspezifische Eigenschaft gemessen wird.

Tab. 13 DSD Kornverlust versus Haftzugkraft bei 20 °C

Mischgut	Verdichtungsgrad [%]	Kornverlust [g]	Haftzugkraft [kN]
AC MR 8	92.3	44.0	1.75
SDA 4-16	85.8	115.5	1.28
SDA 8-16	85.1	215.7	0.86

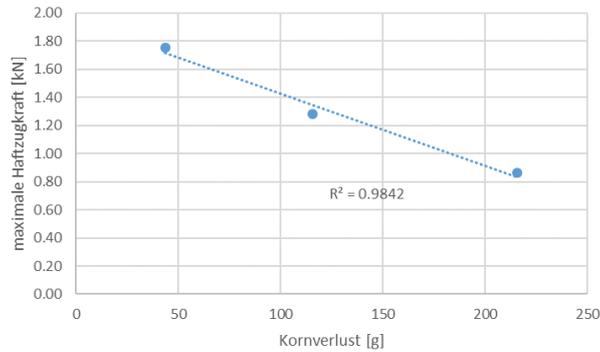


Abb. 79 Maximale Haftzugkraft versus Kornverlust im DSD für AC MR 8, SDA 4-16 und SDA 8-16 Laborplatten aus Phase 1; Haftzugtemperatur 20 °C.

In Phase 2 wurden mit beiden Verfahren Messungen an allen fünf Mischgutsorten durchgeführt. Die inverse Korrelation zwischen DSD und maximale Haftzugkraft ist in Tab. 14 zusammengefasst. Die Datenpunkte folgen, wie Abb. 80 zeigt, einer linearen Regression mit $R^2 = 0.82$.

Tab. 14 DSD Kornverlust versus Haftzugkraft bei 20 °C

Mischgut	Verdichtungsgrad [%]	Kornverlust [g]	Haftzugkraft [kN]
AC MR 8	100.4	3.8	5.70
SDA 4-16	100.6	22.1	3.10
SDA 8-16	98.5	39.1	3.23
SDA 4-20	95.9	47.4	2.39
PA 8	99.1	33.7	3.12

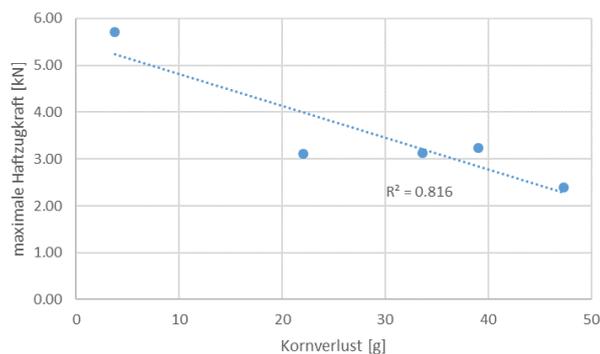


Abb. 80 Maximale Haftzugkraft versus Kornverlust im DSD für AC MR 8, SDA 4-16, SDA 8-16, SDA 4-20 und PA 8 Laborplatten aus Phase 2; Haftzugtemperatur 20 °C.

Auch hier folgen die Ergebnisse dem linearen Trend, wenn auch mit einem deutlich niedrigeren Bestimmtheitsmass. Die Annahme, dass beide Prüfmethoden identische Eigenschaften des Materials erfassen, lässt sich hier daher nicht mehr mit gleicher Überzeugung sagen. Dies könnte damit zu tun haben, dass die Werte der gut verdichteten

Mischgutprüfkörper von SDA 4-16, SDA 8-16 und PA 8 nahe beieinanderliegen und sich aufgrund der geringen Messgenauigkeit kaum unterscheiden.

10 Schlussfolgerungen

10.1 Ausgangslage und Auswahl der Prüfmethode

Das Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung des Widerstands gegenüber Kornausbrüchen semidichter Asphalte SDA. Der Auslöser der Forschung war die Feststellung des gehäuftten Auftretens von Kornausbrüchen bei solchen Asphalten und der Wunsch, die Anfälligkeit semidichter Asphalten für Kornausbrüche bestimmen und gegebenenfalls im Labor schon vorhersagen bzw. in situ ermitteln zu können. Weiterhin hatte sich gezeigt, dass die in der von der CEN herausgegebenen Technische Spezifikation 12697-50 aufgeführten Methoden zur Bestimmung von Kornausbrüchen einerseits komplizierte und teure Apparaturen erfordern und andererseits keine untereinander kompatiblen Ergebnisse liefern.

Ausgehend von dieser Ausgangslage wurden in einem ersten Schritt 4 praxisnahe Prüfmethoden: das Bürstenverfahren (analog Krautbesen zur Strassenreinigung), der Schälversuch (analog Schälzug bei Dichtungsbahnen), das Wasserhochdruckverfahren (Wasser-Jet analog Kärcher) und der Haftzugversuch (analog EN 1542) ausgewählt und auf ihre Durchführbarkeit und Aussagekraft hin überprüft, wobei sich die Haftzugprüfung als einzige als durchführbar und zielführend herausstellte.

10.2 Evaluation der Prüfmethode an Laborprüfkörpern

Als Asphaltmischgut wurden offenporiger Asphalt PA 8 sowie semidichte Asphalte SDA 4 und SDA 8 mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten ausgewählt. Zusätzlich wurde AC MR 8 mit zu erwarteten geringen Kornverlusten als Kontrollmischung in die Untersuchungen einbezogen. Alle Mischungen wurden in einer Mischanlage mit dem gleichen PmB 45/80-65 hergestellt. Die Untersuchung erfolgte an im Labor mit Hilfe der Verdichtungsapparatur des Spurrinntesters mit grossem Rad hergestellten Platten.

Erste Versuche mit einem handelsüblichen Haftzugerät bei 30°C, 20°C und 10°C an wenig verdichteten Laborplatten zeigten einerseits eine zu erwartende Temperaturabhängigkeit der Haftzugkraft, aber auch deutliche Unterschiede der Haftzugkraft im Hinblick auf den Hohlraumgehalt der untersuchten Mischgutsorten. Da die mit der Haftzugprüfung gefundenen Ergebnisse - insbesondere die Reihung der einzelnen Mischgutsorten - gut mit den Ergebnissen des als Vergleichsmethode ausgewählten Darmstädter Scuffing Device DSD übereinstimmten, wurde die Haftzugmethode als Versuchsmethode ausgewählt.

Entgegen der Erwartung bewirkten Frost-Tau Zyklen und Wasserlagerung der Prüfkörper bei erhöhter Temperatur (60°C) selbst an den wenig verdichteten Laborplatten keine Schädigung und blieben daher ohne negativen Einfluss auf die Haftzugkraft.

Die Untersuchung der ausreichend verdichteten Platten aller Mischgutsorten bei 10°C und 20°C einerseits mit dem handelsüblichen Gerät und andererseits in einer Laborprüfmaschine, wobei um eine gute Zentrierung und ein gerades Abziehen der Prüfkörper zu erreichen die Prüfstempel in einem Stahlring mit Schraubzwingen fixiert wurden, ergab zwar eine klare Temperaturabhängigkeit der Haftzugkraft, zeigte aber keine eindeutige Differenzierung der Haftzugkraft im Hinblick auf den Hohlraumgehalt der Mischgutsorten PA 8, SDA 8-16 und SDA 4-16. Des Weiteren ergab der Vergleich zwischen den verschiedenen Testverfahren, dass es wichtig ist, zu verhindern, dass sich die Platte während des Abzugs aufwölbt, wie es durch das Fixieren mit dem Stahlring erreicht wird. Wird diese Verformung nicht verhindert, verringert sich die maximale Haftzugfestigkeit deutlich (etwa 40% bei 20°C).

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die Prüfmethode nicht in der Lage war, die Anfälligkeit für Kornausbruch der untersuchten Laborplatten nach Mischgutsorte und Hohlraumgehalt zu klassifizieren. Mit Ausnahme des widerstandsfähigen und dichten AC

MR 8 und des hohlraumreichen SDA 4-20 konnte somit an gut verdichteten Platten kein Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und Haftzugfestigkeit gefunden werden. Allerdings zeigte die Haftzugfestigkeit eine deutliche Differenzierung zwischen ausreichend und ungenügend verdichteten Mischgutplatten (vgl. auch Kapitel 9.2.3).

Gründe für den fehlenden Zusammenhang zwischen Mischgutsorte, Hohlraumgehalt und Haftzugfestigkeit könnte die gute Mischgutqualität und die Verwendung des hochwertigen PMBs und eine damit verbundene geringe Neigung zu Kornausbrüchen sein.

Die DSD Messungen zeigen ähnliche Ergebnisse mit geringer Differenzierung in Bezug auf den Hohlraumgehalt (vgl. Kapitel 5.3.3) und mit deutlichen Unterschieden in Bezug auf den Verdichtungsgrad (vgl. Kapitel 9.2.3).

Die parallel in Darmstadt und Karlsruhe durchgeführten DSD Messungen offenbarten dagegen erhebliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden Universitäten, was dieses in der CEN/TS enthaltene Verfahren aus Sicht der Forschungsstelle zum jetzigen Zeitpunkt völlig unzureichend und nicht brauchbar erscheinen lässt.

10.3 Evaluation der Prüfmethode in situ

Die Evaluation der Prüfmethode in situ fand im Rahmen von 2 Messkampagnen statt, wobei jeweils Laboratorien mit unterschiedlichen handelsüblichen Haftzugvorrichtungen teilnahmen. Die erste Vor-Ort-Kampagne befand sich auf einem Strassenabschnitt, der aus mehreren im Jahr 2018 eingebauten Versuchsstrecken mit einer Vielzahl von SDA Mischgutsorten mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten bestand; darunter SDA 4 und 8, aber auch nicht standardisierten SDA 2 und 6. Die zweite Vor-Ort-Kampagne fand auf mehreren zwischen 2015 und 2017 eingebauten SDA 4 Abschnitten statt, wobei die Strecken optisch deutlich unterschiedlich viele Kornausbrüche (niedrig bis hoch) aufwiesen.

Das Ergebnis der in situ Messungen war unter dem Gesichtspunkt der Reproduzierbarkeit sehr zufriedenstellend. Wenn die wichtigsten Parameter (Oberflächenvorbereitung, Klebeverfahren, Asphalttemperatur und Haftzuggeschwindigkeit) vergleichbar sind, zeigt die ermittelte Haftzugfestigkeit eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Geräten. Die mittlere relative Differenz betrug weniger als 3 %, was für eine mittlere Haftzugfestigkeit von 1,00 N/mm² einem Messintervall von 0,97 ... 1,03 N/mm² entspricht.

Die grösste Herausforderung während der Messungen auf der Strasse ist die fast unmögliche Kontrolle der Belagstemperatur. Es wurde festgestellt (Abb. 65), dass schon drei, vier Grad Celsius die Haftzugspannung deutlich verändern. Darum müsste zwingend eine Korrektur des gemessenen Werts auf den Wert bei einer Bezugstemperatur eingeführt werden. Im Beispiel der Abb. 81 liegt diese Bezugstemperatur bei 15 °C und der gültige Messbereich wäre in diesem Fall 10 °C bis 20 °C.

Die Korrektur folgt der Gleichung $\Delta y = -0.318 \Delta x$. Die Steigung -0.318 wurde mit den Testergebnissen aus Abb. 44 berechnet. Wird die Haftzugmessung bei 12 °C durchgeführt, beträgt die Korrektur der Haftzugkraft -0.95 kN usw.

Die hier dargestellte Korrekturmassnahme ist nur ein Beispiel mit Daten, die nicht für diesen Zweck bestimmt waren. Die Art und Weise Messwerte zu korrigieren wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht eingehend untersucht. Dazu finden sich in der Literatur aber verschiedene Beispiele für normalisierten Versuchsmethoden, bei denen Korrekturfaktoren vorgegeben werden.

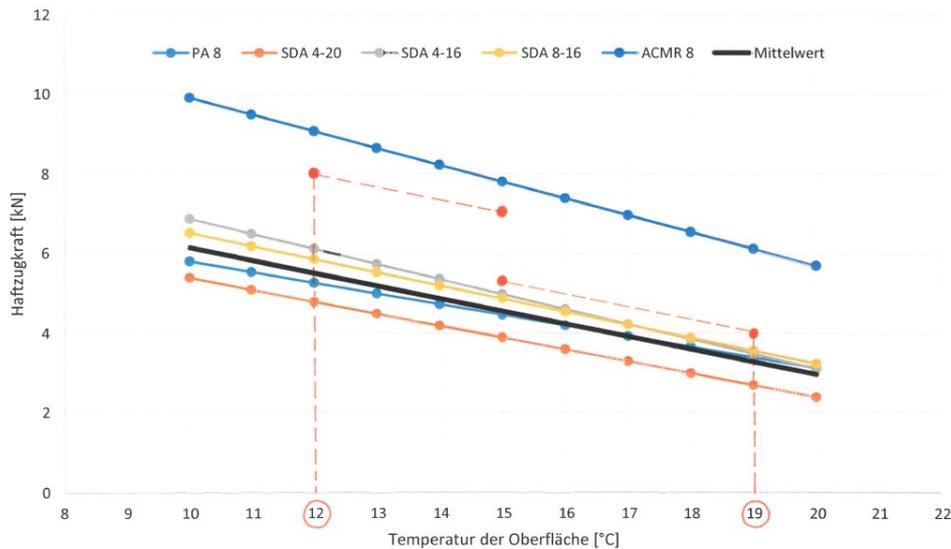


Abb.81 Beispiel für eine Temperaturkorrektur

Im Rahmen der 1. Messkampagne (Beläge aus derselben Mischgutanlage und eingebaut im selben Monat/Jahr) weisen die SDA 4, 6 und 8 Beläge ohne sichtlichen Kornausbruch eine Haftzugspannung von 1.3 bis 1.7 N/mm² auf. Nur beim SDA 2 waren deutlich Kornausbrüche feststellbar, was sich auf die Höhe der Haftzugspannung (0.8 N/mm²) auszuwirken schien.

In der 2. Messkampagne konnte kein Zusammenhang zwischen in den Radspuren optisch festgestellten Kornausbrüchen und der im unbelasteten Bereich ermittelten Haftzugkraft gefunden werden. Kornausbrüche auf den untersuchten Strecken scheinen stark von unterschiedlichen Faktoren wie Gefälle/Steigung und Verkehrsaufkommen beeinflusst zu werden, was die in den unbelasteten Bereichen durchgeführte Haftzugkraft naturgemäss nicht widerspiegeln kann. Einzig der Zeitpunkt ihres Einbaus und/oder der Einfluss der Art und Qualität der Asphaltmischung scheint durch die Haftzugprüfung nachweisbar (Produkt B weist grundsätzlich höhere Haftzugfestigkeit auf; wobei den Forschungsstellen keine detaillierten Informationen über die Unterschiede zwischen beiden Produkten vorlagen).

Auch zeigen sich im Vergleich der beiden Messkampagnen Unterschiede in der Höhe der Haftzugfestigkeit in Bezug auf das Alter der eingebauten Strecken: 6 jährige Beläge sind durch eine Haftzugspannung < 1.2 N/mm² und 2 jährige Beläge durch eine Haftzugspannung > 1.3 N/mm² gekennzeichnet (vgl. Anhang III). Diese Aussage kann getroffen werden, da die Asphalte in Chavannes-les-Forts (Messkampagne 1) und die Asphalte mit Produkte B (Messkampagne 2) aus der gleichen Mischanlage stammen.

10.4 Bewertung

Bewertend lassen sich folgende Feststellungen machen:

- Das Projekt hat keinen ausreichenden Grad an methodischer Entwicklung erreicht, um den Haftzugversuch als standardisierte Methode in der Schweiz anbieten zu können.
- Zwar bietet sich mit der vorgeschlagenen Haftzugprüfung eine Möglichkeit den Widerstand gegen Kornausbrüche sowohl im Labor als auch in situ zu untersuchen, doch sind weitere grossangelegte Untersuchungen nötig, um einen wirklichen Erfahrungshintergrund aufbauen und generelle, statistisch belegbare Aussagen machen und gegebenenfalls Anforderungswerte festlegen zu können.
- Das Forschungsprojekt hat aber insgesamt die generelle Problematik von Methoden zur Bestimmung des Kornausbruchverhaltens aufzeigen und insbesondere das im europäischen Bereich verwendete DSD Verfahren als nicht empfehlenswert und nicht normenwürdig herausstellen können.

11 Dank

Unser Dank geht an das Bundesamt für Strassen ASTRA für die Finanzierung des Projekts.

Ebenfalls bedanken möchten sich die beiden Forschungsstellen bei den Mitgliedern der Begleitkommission unter Leitung von Frau Sandra Dünner. Die aktiven und konstruktiven Beiträge der Begleitkommission haben das Projekt vorangebracht und auch immer wieder neue Impulse geben können.

Ein besonderer Dank gebührt Bernard Schmid und den Mitarbeitern der Laboroute, die durch ihre Teilnahme an in situ Versuchen, dem Projekt eine zusätzliche Aussagekraft verliehen haben.

Anhänge

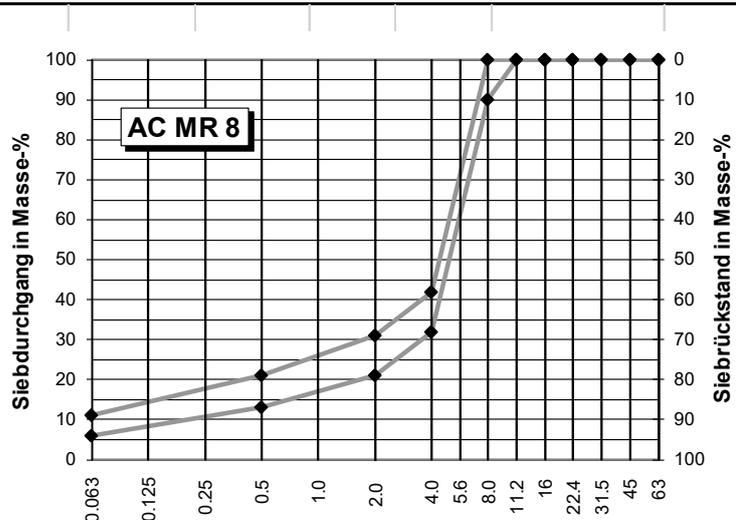
I	Mischgutuntersuchungen	93
I.1	AC MR 8.....	93
I.2	SDA 4-16.....	94
I.3	SDA 8-16.....	95
I.4	PA 8.....	96
I.5	SDA 4-20.....	97
II	Labor Haftzugergebnisse	99
II.1	Phase 1	99
II.2	Phase 2	101
II.2.1	Detaillierte Ergebnisse CCDR.....	101
II.2.2	Detaillierte Ergebnisse EMPA.....	103
II.2.3	Detaillierte Ergebnisse mit und ohne Anbohren.....	111
III	In situ Haftzugergebnisse	113
III.1	Chavannes-les-Forts (in situ Messkampagne 1)	113
III.1.1	Vorversuche	113
III.1.2	Vergleichsmessungen CCDR/Laborroute	114
III.2	Strecken Kanton Fribourg (in situ Messkampagne 2).....	115

I Mischgutuntersuchungen

I.1 AC MR 8

Auftrags-Nr.	5211.01343.100.01	Labormitarbeiter	ts	Sachbearbeiter	rc
Mischgut	Rauasphalt AC MR 8				
Probenbezeichnung	AC MR 8	Laborcode	A-1850		
Bindemittel	unbekannt	Zusätzliche Infos:			
Bemerkungen	NORMAL				

Siebkurve	
Prüfsieb	Siebdurchgang
[mm]	[Masse-%]
31.5	
22.4	
16.0	
11.2	
8.0	
5.6	
4.0	
2.8	
2.0	
1.4	
1.0	
0.500	
0.250	
0.125	
0.063	



Kennwerte	Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%
	Rohdichte (gemäss Auftraggeber)	2.447 Mg/m ³
	Raumdicke SSD	2.342 Mg/m ³
	Hohlraumgehalt	4.3 Vol-%

	Hohlraumgehalt bindemittelfrei VMA	Vol-%
	Hohlraumfüllungsgrad VFB	%
	Marshall Stabilität, korrigiert	12 kN
	Marshall Fliesen	4 mm
	Marshall Quotient	3 kN/mm

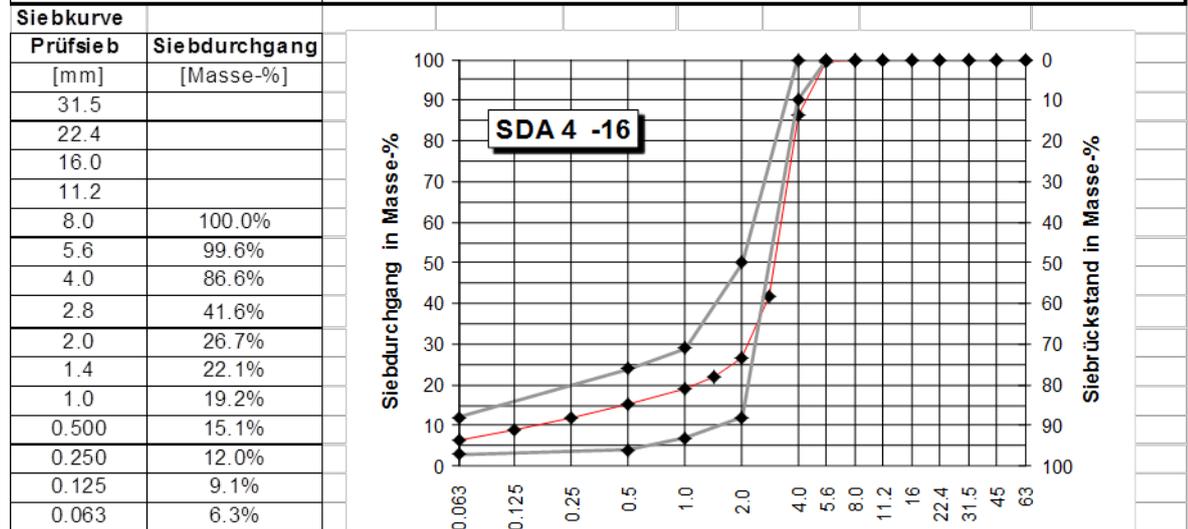
Abb. 1 Mischgutkennwerte AC MR 8

Bindemittel gealtert oder rückgewonnen	Einheit	massgebender Wert	Sollwert	Anforderung erfüllt
Penetration	mm ⁻¹	40	keine	
Penetration % des urspr. Wertes	%		min. 60%	
Erweichungspunkt	°C	68.8	keine	

Abb. 2 Kennwerte rückgewonnenes Bindemittel PmB 45/80-65 (CH-E) aus AC MR 8

I.2 SDA 4-16

Mischgut	Semidichtetes Mischgut SDA 4 -16		
Probenbezeichnung	SDA 4-16	Laborcode	A-1554
Bindemittel	PmB 45/80-65 (CH-E) Zusätzliche Infos:		
Bemerkungen			



Kennwerte			
Lösliche Bindemittelanteile		6.2	Masse-%
Rohdichte (bestimmt)		2.444	Mg/m ³
Raumdichte berechnet		2.139	Mg/m ³
Hohlraumgehalt		12.5	Vol-%
Hohlraumgehalt bindemittelfrei VMA		25.4	Vol-%
Hohlraumfüllungsgrad VFB		50.8	%
Marshall Stabilität, korrigiert		10.4	kN
Marshall Fließen		3	mm
Marshall Quotient		3.46667	kN/mm
Wasserempfindlichkeit ITSR			%
Module de richesse		4.1	

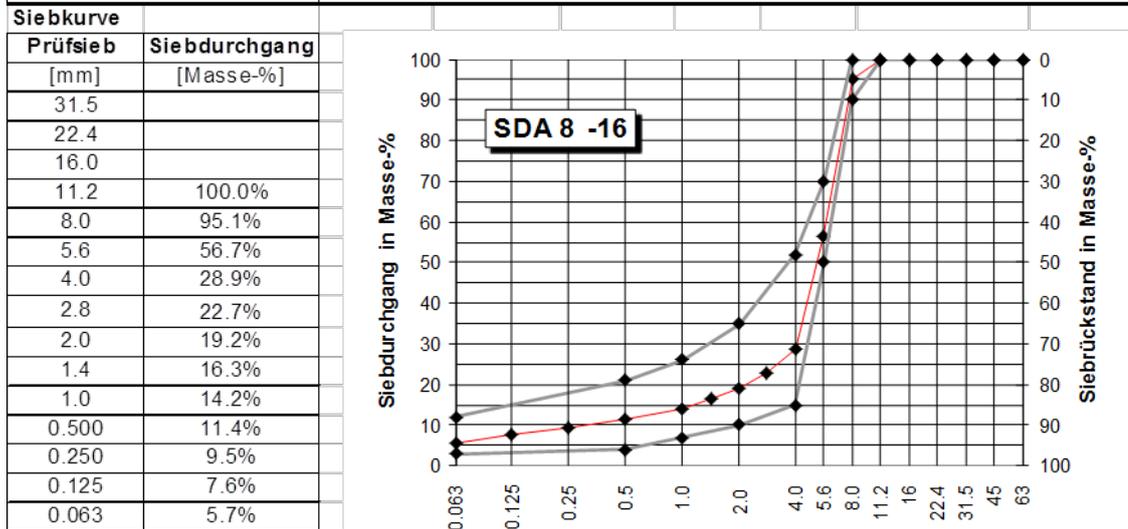
Abb. 3 Mischgutkennwerte SDA 4-16

Bindemittel gealtert oder rückgewonnen	Einheit	massgebender Wert	Sollwert
Penetration	mm ⁻¹	39	keine
Penetration % des urspr. Wertes	%		min. 60%
Erweichungspunkt	°C	72.6	keine

Abb. 4 Kennwerte rückgewonnenes Bindemittel PmB 45/80-65 (CH-E) aus SDA 4-16

I.3 SDA 8-16

Mischgut	Semidichtes Mischgut SDA 8 -16		
Probenbezeichnung	SDA 8-16	Laborcode	A-1555
Bindemittel	PmB 45/80-65 (CH-E) Zusätzliche Infos:		
Bemerkungen			



Kennwerte			
Lösliche Bindemittelanteile		5.6	Masse-%
Rohdichte (bestimmt)		2.471	Mg/m ³
Raumdichte berechnet		2.134	Mg/m ³
Hohlraumgehalt		13.6	Vol-%
Hohlraumgehalt bindemittelfrei VMA			Vol-%
Hohlraumfüllungsgrad VFB			%
Marshall Stabilität, korrigiert		7.3	kN
Marshall Fliesen		2.5	mm
Marshall Quotient		2.92	kN/mm

Abb. 5 Mischgutkennwerte SDA 8-16

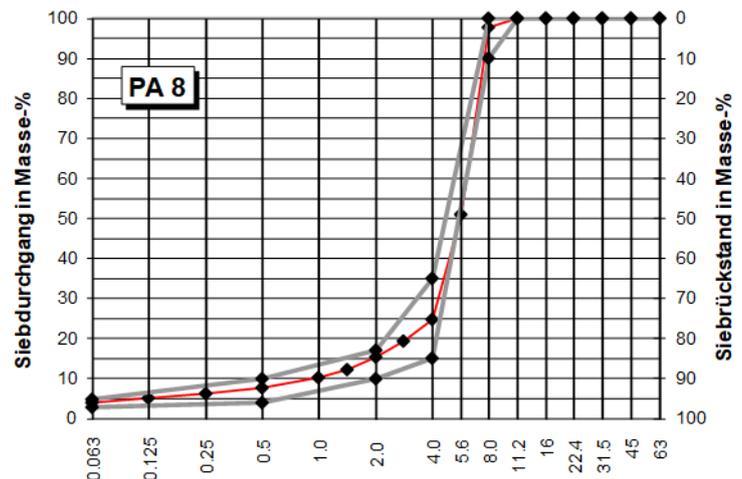
Bindemittel gealtert oder rückgewonnen	Einheit	massgebender Wert	Sollwert
Penetration	mm ⁻¹	45	keine
Penetration % des urspr. Wertes	%		min. 60%
Erweichungspunkt	°C	60.2	keine

Abb. 6 Kennwerte rückgewonnenes Bindemittel PmB 45/80-65 (CH-E) aus SDA 8-16

I.4 PA 8

Auftrags-Nr.	5211.01343.100.01	Labormitarbeiter	ts	Sachbearbeiter	rc
Mischgut	Offenporiger Asphalt Deckschicht PA 8				
Probenbezeichnung	PA 8	Laborcode	A-1777		
Bindemittel	PmB 45/80-65 (CH-E) Zusätzliche Infos:				
Bemerkungen					

Siebkurve	
Prüfsieb [mm]	Siebdurchgang [Masse-%]
31.5	
22.4	
16.0	
11.2	100.0%
8.0	97.8%
5.6	51.1%
4.0	24.7%
2.8	19.4%
2.0	15.4%
1.4	12.2%
1.0	10.2%
0.500	7.8%
0.250	6.4%
0.125	5.1%
0.063	3.9%



Kennwerte		
Lösliche Bindemittelanteile		5.7 Masse-%
Rohdichte (bestimmt)		2.479 Mg/m ³
Raumdichte berechnet		2.033 Mg/m ³
Hohraumgehalt		18.0 Vol-%
Hohraumgehalt bindemittelfrei VMA		29.3 Vol-%
Hohraumfüllungsgrad VFB		38.5 %
Marshall Stabilität, korrigiert		7 kN
Marshall Fließen		2.5 mm
Marshall Quotient		2.8 kN/mm

Abb. 7 Mischgutkennwerte PA 8

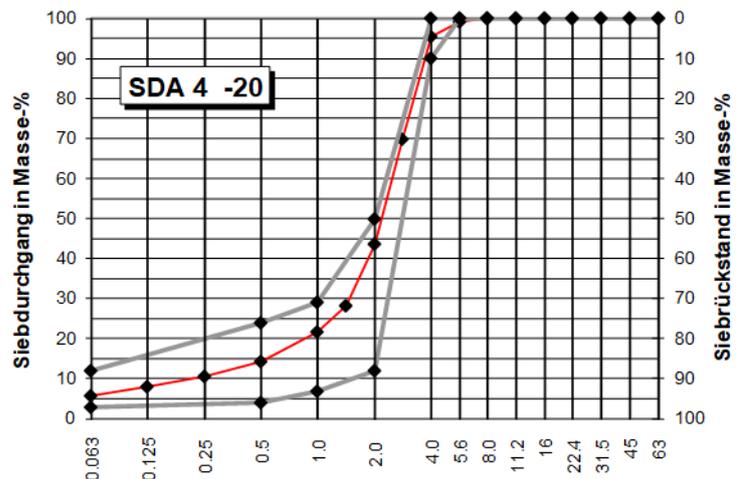
Bindemittel gealtert oder rückgewonnen	Einheit	massgebender Wert	Sollwert
Penetration	mm ⁻¹	40	keine
Penetration % des urspr. Wertes	%		min. 60%
Erweichungspunkt	°C	61.6	keine
Erweichungspunkt Zunahme	°C		max. 8
Ring + Kugel Abnahme	°C		max. 5
Elastische Rückstellung	%	78	min. 60%

Abb. 8 Kennwerte rückgewonnenes Bindemittel PmB 45/80-65 (CH-E) aus PA 8

I.5 SDA 4-20

Auftrags-Nr.	5211.01343.100.01	Labormitarbeiter	ts	Sachbearbeiter	rc
Mischgut	Semidichtetes Mischgut SDA 4 -20				
Probenbezeichnung	SDA 4-20	Laborcode	A-1778		
Bindemittel	PmB 45/80-65 (CH-E) Zusätzliche Infos:				
Bemerkungen					

Siebkurve	
Prüfsieb	Siebdurchgang
[mm]	[Masse-%]
31.5	
22.4	
16.0	
11.2	
8.0	100.0%
5.6	99.3%
4.0	95.5%
2.8	69.8%
2.0	43.6%
1.4	28.4%
1.0	21.6%
0.500	14.2%
0.250	10.6%
0.125	8.1%
0.063	5.8%



Kennwerte		
Lösliche Bindemittelanteile		5.9 Masse-%
Rohdichte (bestimmt)		2.465 Mg/m ³
Raumdicke berechnet		2.077 Mg/m ³
Hohlraumgehalt		15.7 Vol-%
Hohlraumgehalt bindemittelfrei VMA		27.6 Vol-%
Hohlraumfüllungsgrad VFB		42.9 %
Marshall Stabilität, korrigiert		8.2 kN
Marshall Fließen		2.2 mm
Marshall Quotient		3.72727 kN/mm

Abb. 9 Mischgutkennwerte SDA 4-20

Bindemittel gealtert oder rückgewonnen	Einheit	massgebender Wert	Sollwert
Penetration	mm ⁻¹	44	keine
Penetration % des urspr. Wertes	%		min. 60%
Erweichungspunkt	°C	54.0	keine
Erweichungspunkt Zunahme	°C		max. 8
Ring + Kugel Abnahme	°C		max. 5
Elastische Rückstellung	%	48	min. 60%

Abb. 10 Kennwerte rückgewonnenes Bindemittel PmB 45/80-65 (CH-E) aus SDA 4-20

II Labor Haftzugergebnisse

II.1 Phase 1

Septembre-Novembre 2018: essais de laboratoire sur plaques d'enrobés SDA 4-16, SDA 8-16 et ACMR 8. Étude de l'influence des conditions ambiantes. Pastille diamètre 100 mm sur surface poncée ; appareil de traction directe Proceq DY-216.

Enrobé	N°	Conditions d'essai [°C]	F arrach. [KN]	M enrobé [g]	M 2/4 [g]	M 4/8 [g]	Nbr grains 2/4	Nbr grains 4/8
SDA 4-16	1	10 °C	2.26	32.6	21.7	-	441	-
	2	10 °C	2.53	-	-	-	-	-
	3	10 °C	3.05	38.7	26.4	-	564	-
	4	20 °C	1.27	38	25.4	-	553	-
	5	20 °C	1.32	32.5	22.1	-	442	-
	6	20 °C	1.26	39.5	28.1	-	562	-
	7	30 °C	0.55	41.4	28.2	-	589	-
	8	30 °C	0.53	39.4	27	-	552	-
	9	30 °C	0.53	38.5	26	-	540	-
	16	20 °C - Eau	1.74	24.3	18.2	-	358	-
	17	20 °C - Eau	1.62	-	-	-	-	-
	18	20 °C - Eau	1.6	31.4	21.6	-	470	-
	19	20 °C - Gel	1.48	35.4	25.5	-	515	-
	20	20 °C - Gel	1.76	37.8	25.6	-	551	-
21	20 °C - Gel	1.33	39.3	26.6	-	523	-	
SDA 8-16	22	10 °C	1.58	38.9	3	28.6	74	109
	23	10 °C	1.86	36.3	3.4	26.3	98	102
	24	10 °C	2.3	31.1	3	22.4	83	88
	25	20 °C	0.69	44.1	2.8	31.9	69	111
	26	20 °C	0.93	48.8	3.6	35.9	104	132
	27	20 °C	0.96	43.7	3.5	31.8	85	116

	28	30 °C	0.44	64.7	4.5	45.5	119	167
	29	30 °C	0.41	51.6	4	35.6	99	129
	30	30 °C	0.41	47.8	4.2	32.4	106	126
	37	20 °C - Eau	1.1	27.9	1.6	22.2	47	80
	38	20 °C - Eau	1.38	15.4	2.3	11.3	63	48
	39	20 °C - Eau	1.27	22.8	2.5	16.5	54	63
	40	20 °C - Gel	0.84	32	3	22	74	95
	41	20 °C - Gel	1.03	-	-	-	-	-
	42	20 °C - Gel	1.09	32.4	4.9	20.7	145	101
ACMR 8	43	10 °C	3.6	-	-	-	-	-
	44	10 °C	3.51	21.7	2.8	11.7	90	51
	45	10 °C	3.76	18.9	2.7	11	82	45
	46	20 °C	1.75	17.1	1.5	11	47	43
	47	20 °C	1.72	12.7	1.3	8.1	38	35
	48	20 °C	1.78	20.7	2.5	12.9	60	56
	49	30 °C	1	29.9	3.4	18.7	85	75
	50	30 °C	0.98	24.4	3.3	15.3	95	62
	51	30 °C	0.96	45.5	4.8	29.3	143	111
	58	20 °C - Eau	2.44	-	-	-	-	-
	59	20 °C - Eau	2.17	-	-	-	-	-
	60	20 °C - Eau	2.56	16.5	2.2	9.3	60	39
	61	20 °C - Gel	2.49	36.3	3.8	22.8	104	98
	62	20 °C - Gel	2.61	-	-	-	-	-
63	20 °C - Gel	2.38	-	-	-	-	-	

II.2 Phase 2

II.2.1 Detaillierte Ergebnisse CCDR

Mars 2020: essais de laboratoire sur plaques d'enrobés PA 8, SDA 4-20, SDA 4-16, SDA 8-16 et ACMR 8. Étude comparative avec le dispositif EMPA. Pastille diamètre 100 mm sur surface poncée ; appareil de traction directe Proceq DY-216 ; $T_{\text{essai}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Enrobé	N°	M pastille [g]	M colle [g]	M totale [g]	M enrobé [g]	M enrobé moy. [g]	F arrach. [KN]	F arrach. moy. [KN]
PA 8	1	531.2	7.7	628.5	89.6	92.2	1.89	1.95
	2	531.0	7.7	610.2	71.5		2.03	
	3	531.0	7.7	654.2	115.5		1.94	
SDA 4-20	5	527.4	7.7	608.7	73.6	55.6	1.26	1.32
	6	531.0	7.7	586.1	47.4		1.26	
	7	531.1	7.7	584.7	45.9		1.44	
SDA 4-16	8	531.5	7.7	586.1	46.9	49.5	1.72	1.65
	9	527.7	7.7	584.7	49.3		1.70	
	10	531.0	7.7	591.1	52.4		1.54	
SDA 8-16	12	531.2	7.7	671.7	132.8	114.9	2.02	2.24
	13	531.1	7.7	676.4	137.6		2.23	
	14	531.0	7.7	613.0	74.3		2.46	
ACMR 8	15	527.5	7.7	572.8	37.6	71.9	3.93	3.94
	16	531.1	7.7	662.6	123.8		3.96	
	17	531.3	7.7	593.4	54.4		3.92	

Février 2021: essais de laboratoire sur plaques SDA 4-16, SDA 8-16 et ACMR 8. Étude de l'effet de la vitesse de montée en charge sur la résistance maximale à la traction. Pastille diamètre 50 mm sur surface poncée ; appareil de traction directe Proceq DY-216 ; $T_{\text{essai}} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Enrobé	Temp. enrobé [°C]	N°	Vitesse programmée [N/s]	Vitesse réelle [N/s]	Vitesse réelle moy. [N/s]	Force arrach. [KN]	Contrainte [N/mm ²]	Contr. moyenne [N/mm ²]	Ecart Type
SDA 4-16	18,5	11	10	10	10,0	0,84	0,43	0,44	0,01
		12		10		0,88	0,45		
		1	50	39	44,3	1,14	0,58	0,62	0,04
		2		45		1,26	0,64		
		3		49		1,31	0,67		
		4		44		1,18	0,60		
		5	100	64	65,0	1,27	0,65	0,66	0,01
		6		59		1,32	0,67		
		7		69		1,30	0,66		
		8		68		1,29	0,66		
9	200	80	72,5	1,48	0,75	0,69	0,09		
10		65		1,23	0,63				
SDA 8-16	18,5	21	10	10	10,0	1,20	0,61	0,57	0,03
		22		10		1,06	0,54		
		23		10		1,11	0,57		
		24		10		1,09	0,56		
		13	25	25	25,0	1,19	0,61	0,66	0,07
		14		25		1,22	0,62		
		15		25		1,31	0,67		
		16		25		1,49	0,76		
		17	100	65	63,3	1,49	0,76	0,79	0,04
		18		59		1,51	0,77		
19	64	1,54		0,78					
20	65	1,67		0,85					
ACMR 8	17	27	50	50	50,0	2,66	1,35	1,35	0,00
		28		50		2,66	1,35		
		25	200	145	166,5	3,69	1,88	1,90	0,03
		26		188		3,78	1,93		

Haftzug SDA 4-16

			Gewichte in Gramm						
			Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
SDA 4-16	I / A	10°C	1	3738.5	3660	9.8	68.7		8.12100
			2	3703.8	3657	9.8	37.0		6.73020
			3	3736.4	3662	9.8	64.6		6.70110
			4	3670.5	3660	9.8	0.7		7.41270
			5	3708.1	3640	9.8	58.3		6.22610
			6	3732.5	3660	9.8	62.7		6.61510
	I / B	10°C	7	3729.5	3655	9.8	64.7		7.10140
			8	3712.9	3658	9.8	45.1		6.13690
			9	3729.4	3656	9.8	63.6		6.51950
			10	3736.0	3661	9.8	65.2		7.10620
			11	3739.7	3660	9.8	69.9		6.68480
			12	3722.7	3661	9.8	51.9		6.93130
								6.85719	
			Gewichte in Gramm						
			Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
SDA 4-16	III / A	20°C	1	3736.5	3660	9.8	66.7		3.52390
			2	3729.4	3660	9.8	59.6		3.07320
			3	3731.4	3657	9.8	64.6		3.02790
			4	3735.2	3662	9.8	63.4		3.37480
			5	3712.8	3640	9.8	63.0		3.41370
			6	3719.8	3655	9.8	55.0		3.30020
	III / B	20°C	7	3720.1	3662	9.8	48.3		3.02980
			8	3727.1	3661	9.8	56.3	komische Kurve	
			9	3714.6	3658	9.8	46.8		2.87390
			10	3731.2	3660	9.8	61.4		3.00040
			11	3720.0	3655	9.8	55.2		2.86270
			12	3704.3	3656	9.8	38.5		2.67130
								3.10471	

Haftzug SDA 8-16

			Gewichte in Gramm						
			Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
SDA 8-16	I / A	20°C	1	3738.4	3661	9.8	67.6		3.12440
			2	3747.5	3660	9.8	77.7		3.07100
			3	3741.9	3660	9.8	72.1		3.33520
			4	3744.5	3658	9.8	76.7		3.03040
			5	3733.6	3662	9.8	61.8		3.13420
			6	3741.8	3662	9.8	70.0		3.11470
	I / B	20°C	7	3752.2	3661	9.8	81.4		3.46980
			8	3745.5	3660	9.8	75.7		3.34340
			9	3739.0	3662	9.8	67.2		3.39360
			10	3744.0	3661	9.8	73.2	Probleme mit Steuerung	
			11	3733.0	3662	9.8	61.2		3.26870
			12	3747.6	3662	9.8	75.8		3.26070
								3.23146	
			Gewichte in Gramm						
			Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
SDA 8-16	III / A	10°C	1	3730.6	3661	9.8	59.8		6.12740
			2	3742.4	3657	9.8	75.6		6.68180
			3	3745.9	3661	9.8	75.1		7.16000
			4	3737.3	3662	9.8	65.5		6.64280
			5	3739.9	3662	9.8	68.1		6.76940
			6	3740.4	3660	9.8	70.6		6.46780
	III / B	10°C	7	3731.1	3660	9.8	61.3		6.45970
			8	3727.8	3658	9.8	60.0		6.71910
			9	3735.4	3663	9.8	62.6		5.85830
			10	3731.4	3660	9.8	61.6		6.26030
			11	3728.2	3660	9.8	58.4		6.51160
			12	3710.3	3656	9.8	44.5	Datenverlust	
								6.51438	

Haftzug SDA 4-20

			Gewichte in Gramm							
			Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]		
SDA 4-20	I / B	10°C	7	3724.1	3662	9.8	52.3		5.88860	
			8	3713.5	3662	9.8	41.7		5.55630	
			9	3728.6	3662	9.8	56.8		5.63250	
			10	3723.5	3662	9.8	51.7		5.88210	
			11	3715.0	3661	9.8	44.2		5.34380	
			12	3725.4	3662	9.8	53.6		5.91940	
									5.70378	
			10°C	7	3738.4	3662	9.8	66.6	komische Kurve	
				8	3723.5	3662	9.8	51.7		5.21760
				9	3723.1	3662	9.8	51.3		5.40560
				10	3725.7	3662	9.8	53.9		5.65200
				11	3721.1	3661	9.8	50.3		5.24840
12				3722.1	3662	9.8	50.3	Achtung	3.87830	
								5.08038		
			Gewichte in Gramm							
			Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]		
SDA 4-20	III / A	20°C	1	3701.3	3640	9.8	51.5		2.60990	
			2	3713.8	3660	9.8	44.0	Kurve?	2.24520	
			3	3709.0	3656	9.8	43.2	komisch		
			4	3722.5	3659	9.8	53.7		2.57750	
			5	3705.9	3656	9.8	40.1		2.33270	
			6	3712.8	3658	9.8	45.0		2.45590	
									2.44424	
		III / B	20°C	7	3707.0	3658	9.8	39.2		2.35210
				8	3705.5	3656	9.8	39.7		2.38450
				9	3718.2	3660	9.8	48.4		2.28240
				10	3710.6	3657	9.8	43.8	komische Kurve	
				11	3708.3	3656	9.8	42.5		2.36020
12				3708.9	3660	9.8	39.1		2.34580	
								2.34500		

Haftzug PA 8

			Gewichte in Gramm						
			Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
PA8	I / A	10°C	1	3719.0	3657	9.8	52.2		5.28280
			2	3723.6	3655	9.8	58.8		5.42230
			3	3715.2	3662	9.8	43.4		5.43200
			4	3728.4	3662	9.8	56.6		5.74810
			5	3706.4	3661	9.8	35.6		5.89230
			6	3714.6	3657	9.8	47.8		5.89550
							49.1		5.61217
	I / B	20°C	7	3734.4	3660	9.8	64.6		3.16110
			8	3726.2	3660	9.8	56.4		2.87580
			9	3724.5	3657	9.8	57.7		2.89530
			10	3724.6	3663	9.8	51.8		2.95200
			11	3727.8	3658	9.8	60.0		2.88060
12			3723.1	3660	9.8	53.3		2.69260	
						57.3		2.90957	
			Gewichte in Gramm						
			Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
PA8	III / A	10°C	1	3734.9	3660	9.8	65.1		6.382099
			2	3724.1	3657	9.8	57.3		4.8012
			3	3733.1	3662	9.8	61.3		6.33020
			4	3733.4	3660	9.8	63.6		6.20210
			5	3725.6	3655	9.8	60.8		6.08700
			6	3738.8	3657	9.8	72.0		6.17130
									5.99565
	III / B	20°C	7	3729.6	3661	9.8	58.8		3.130199
			8	3719.7	3656	9.8	53.9		3.4091
			9	3730.0	3660	9.8	60.2		3.24050
			10	3728.3	3660	9.8	58.5		3.44640
			11	3732.2	3660	9.8	62.4		3.37830
12			3743.5	3660	9.8	73.7	Datenverlust		
								3.32090	

Haftzug AC MR 8 Wasserlagerung

				Gewichte in Gramm				Bemerkungen	Kraft [kN]
				Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn		
A-1939	AC MR8 Wasser	IV / A	20°C	3710.2	3660	9.8	40.4		5.83100
				3705.7	3657	9.8	38.9		5.83750
				3712.9	3660	9.8	43.1	Datenverlust	
				3702.5	3662	9.8	30.7		5.12100
				3715.7	3662	9.8	43.9		6.14060
				3721.4	3661	9.8	50.6		6.06930
		IV / B	20°C	3717.2	3662	9.8	45.4		5.74020
	3688.1			3657	9.8	21.3		5.39660	
	3720.1			3662	9.8	48.3		6.04330	
	3704.5			3665	9.8	29.7		5.29930	
	3709.1			3659	9.8	40.3		5.33820	
3709.3	3655			9.8	44.5		5.65920		
								5.67965	

Haftzug SDA 4-16 Wasserlagerung

				Gewichte in Gramm				Bemerkungen	Kraft [kN]	
				Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn			
A-1936	SDA 4-16 Wasser	II / A	20°C	1	3714.9	3660	9.8	45.1		3.23550
				2	3724.6	3659	9.8	55.8		3.29220
				3	3727.8	3662	9.8	56.0		3.78820
				4	3715.1	3662	9.8	43.3		3.36350
				5	3707.9	3657	9.8	41.1	Datenverlust	
				6	3691.8	3640	9.8	42.0		3.60340
		II / B	20°C	7	3736.1	3657	9.8	69.3		3.55660
	8			3718.7	3656	9.8	52.9		3.58090	
	9			3734.1	3662	9.8	62.3		3.65220	
	10			3728.6	3660	9.8	58.8		3.87110	
	11			3733.1	3663	9.8	60.3		3.43340	
12	3722.1			3661	9.8	51.3		3.60520		
								3.54384		

Haftzug SDA 8-16 Wasserlagerung

				Gewichte in Gramm						
				Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
A-1937	SDA 8-16 Wasser	I / A	20°C	1	3714.2	3662	9.8	42.4		3.08640
				2	3700.3	3640	9.8	50.5		2.83850
				3	3704.7	3656	9.8	38.9		2.99240
				4	3733.8	3658	9.8	66.0		3.20150
				5	3734.0	3657	9.8	67.2		3.20960
				6	3757.1	3661	9.8	86.3	?Peak	
		I / B	20°C	7	3724.9	3656	9.8	59.1		3.19180
				8	3741.8	3662	9.8	70.0		3.24840
				9	3739.9	3662	9.8	68.1		3.07020
				10	3736.6	3657	9.8	69.8		3.38460
				11	3746.5	3660	9.8	76.7	?	
				12	3746.2	3660	9.8	76.4		3.46900
									3.16924	

Haftzug PA Wasserlagerung

				Gewichte in Gramm						
				Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
A-1939	AC MR8 Wasser	IV / A	20°C		3710.2	3660	9.8	40.4		5.83100
					3705.7	3657	9.8	38.9		5.83750
					3712.9	3660	9.8	43.1	Datenverlust	
					3702.5	3662	9.8	30.7		5.12100
					3715.7	3662	9.8	43.9		6.14060
					3721.4	3661	9.8	50.6		6.06930
		IV / B	20°C		3717.2	3662	9.8	45.4		5.74020
					3688.1	3657	9.8	21.3		5.39660
					3720.1	3662	9.8	48.3		6.04330
					3704.5	3665	9.8	29.7		5.29930
					3709.1	3659	9.8	40.3		5.33820
					3709.3	3655	9.8	44.5		5.65920
									5.67965	

Haftzug SDA 4-20 Wasserlagerung

				Gewichte in Gramm							
				Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]		
A-1929	SDA 4-20 Wasser	I / A	20°C	1	3709.8	3662	9.8	38.0		2.54590	
				2	3705.3	3658	9.8	37.5		2.15020	
				3	3685.4	3660	9.8	15.6		1.81450	
				4	3699.6	3656	9.8	33.8		1.28750	
				5	3702.7	3662	9.8	30.9		2.26850	
				6	3698.4	3662	9.8	26.6		2.26360	
										2.05503	
		SDA 4-20 Wasser	I / B	10°C	7	3712.8	3665	9.8	38.0		5.45140
					8	3718.7	3662	9.8	46.9		5.04620
					9	3711.5	3658	9.8	43.7		5.26990
					10	3707.8	3660	9.8	38.0		4.84030
					11	3723.9	3660	9.8	54.1		5.62490
12					3710.8	3661	9.8	40.0		5.39140	
									5.27068		

SDA 4-20 Frost-Tau-Zyklen

				Gewichte in Gramm						
				Prüfstempel mit Korn	Prüfstempel	Kleberauftrag Mittel	Korn	Bemerkungen	Kraft [kN]	
SDA 4-20 Frost	II / A	10°C	1	3708.3	3657	9.8	41.5		4.91640	
			2	3708.5	3656	9.8	42.7		5.44980	
			3	3683.8	3640	9.8	34.0		5.56320	
			4	3714.9	3662	9.8	43.1		5.91830	
			5	3714.8	3660	9.8	45.0		5.69130	
			6	3713.7	3662	9.8	41.9		5.74970	
										5.54812
		II / B	20°C	7	3702.4	3660	9.8	32.6		2.61230
				8	3700.1	3656	9.8	34.3		2.56050
				9	3710.4	3660	9.8	40.6		2.39670
				10	3707.9	3663	9.8	35.1	Achtung	
				11	3707.2	3657	9.8	40.4		2.20860
12				3712.4	3662	9.8	40.6		2.62370	
									2.48036	

II.2.3 Detaillierte Ergebnisse mit und ohne Anbohren

Essais d'arrachement: pastilles diam. 50 mm, sur surface poncée, 5 pastilles pré-forées (10 mm), 5 pastilles sans pré-forage, montée en charge 100 N/s, température de la plaque au moment de l'essai 16 °C.

Type enrobé : plaque fournie par EMPA, AC MR 8 PmB 45/80-65.

Enrobé	Température enrobé	Préparation essai	N°	Montée en charge [N/s]	Force arrachement t [kN]	Contrainte arrachement t [N/mm ²]	Ecart type	Moyenne arrachement t [N/mm ²]	Rupture / Observations
ACMR8 PmB 45/80-65	16 °C (étuve)	Pré-forage 10 [mm]	1	100	3,09	1,57	0,15	1,67	50% bitume - 50% granulats
			2	98	3,04	1,55			90% bitume - 10% granulats
			3	99	3,68	1,87			70% bitume - 30% granulats
			4	100	3,09	1,57			90% bitume - 10% granulats
			5	101	3,50	1,78			80% bitume - 20% granulats
		Sans pré-forage	6	100	3,15	1,60	0,19	1,79	40% bitume - 60% granulats
			7	99	3,21	1,63			60% bitume - 40% granulats
			8	99	3,62	1,84			70% bitume - 30% granulats
			9	100	4,10	2,09			80% bitume - 20% granulats
			10	100	3,52	1,79			80% bitume - 20% granulats
Moyenne sans pré-forage 7.2% plus élevée que moyenne avec pré-forage									

III In situ Haftzugergebnisse

III.1 Chavannes-les-Forts (in situ Messkampagne 1)

III.1.1 Vorversuche

Série de mesures préliminaires le 21.10.2020; appareil Proceq DY-216 ; précharge manuelle 50-100 N ; vitesse de montée en charge 100 N/s.

Couche roulement	Teneur vide géom [%]	Temp. s/pastille [°C]	Temp. s/route [°C]	N°	Diam. Pastille [mm]	F arrach. [kN]	Contrainte [N/mm ²]	Ecart-type	Contrainte moyenne [N/mm ²]	
SDA 4-15 (Ch23)	20.1	16.0	15.9	1	50	2.39	1.22	0.09	1.27	
				2		2.41	1.23			
				3		2.69	1.37			
				4	100	7.10	0.90	0.05		0.96
				5		7.82	1.00			
				6		7.64	0.97			
SDA 2-10 (Ch13)	19.9	17.5	17.0	7	50	1.56	0.79	0.04	0.84	
				8		1.68	0.86			
				9		1.71	0.87			
				10	100	3.34	0.43	0.02		0.43
				11		3.22	0.41			
				12		3.50	0.45			
SDA 8-16 (Ch9)	18.2	20.0	20.0	13	50	2.87	1.46	0.17	1.31	
				14		2.21	1.13			
				15		2.61	1.33			
				16	100	6.66	0.85	0.01		0.86
				17		6.80	0.87			
				18		6.85	0.87			
SDA 6-20 (Ch7)	17.4	20.0	20.5	19	50	2.41	1.23	0.07	1.29	
				20		2.54	1.29			
				21		2.67	1.36			
				22	100	6.85	0.87	0.04		0.85
				23		6.28	0.80			
				24		6.80	0.87			

III.1.2 Vergleichsmessungen CCDR/Laboroute

Séries de mesures avec des pastilles diamètre 50 mm; différentes méthodes de ponçage; différents appareils d'essai; vitesse de montée en charge 100 N/s.

Couche roulement	Teneur vide géom [%]	Temp. s\pastille [°C]	Temp. s/route [°C]	N° (Laboroute)	Labo	Type ponçage (disque)	F arrach. [KN]	Contrainte [N/mm ²]	Ecart-type contr.	Contrainte moyenne [N/mm ²]
SDA 4-20 (Ch25)	20.1	18.0	14.5	1	CCDR	diamant CCDR	2.94	1.50	0.13	1.52
				2			3.27	1.67		
				3			2.75	1.40		
				4 (7)	Laboroute	diamant CCDR	-	1.309	0.14	1.43
				5 (17)			-	1.417		
				6 (37)			-	1.578		
				7	CCDR	papier verre	3.47	1.77	0.27	1.52
				8			2.41	1.23		
				9			3.06	1.56		
				10 (14)	Laboroute	papier verre	-	1.260*	0.02	1.52
				11 (18)			-	1.503		
				12 (9)			-	1.533		
SDA 4-5 (Ch20)	8.8	19.0	17.0	13	CCDR	diamant CCDR	2.93	1.49	0.33	1.66
				14			2.83	1.44		
				15			3.99	2.03		
				16 (16)	Laboroute	diamant CCDR	-	1.834	0.07	1.80
				17 (27)			-	1.853		
				18 (48)			-	1.724		
SDA 8-16 (Ch9)	18.2	19.0	16.0	19	CCDR	diamant CCDR	2.80	1.43	0.11	1.50
				20			3.19	1.62		
				21			2.84	1.45		
				22	CCDR	diamant laboroute	2.92	1.49	0.08	1.54
				23			2.96	1.51		
				24			3.22	1.64		
				25	Laboroute	diamant laboroute	-	1.497	0.06	1.46
				26			-	1.397		
				27			-	1.488		
				28	Laboroute	diamant CCDR	-	1.414	0.08	1.50
				29			-	1.577		
				30			-	1.513		

* La pastille 10 (14) n'a pas été prise en compte car la surface d'arrachement était incomplète (env. 80%).

III.2 Strecken Kanton Fribourg (in situ Messkampagne 2)

Les tronçons se situent dans le canton de Fribourg et ont été choisis par les autorités cantonales en raison de leur dégradation.

Séries de mesures avec des pastilles diamètre 50 mm; ponçage disque diamant; différents appareils d'essai (CCDR et Laboroute); vitesse de montée en charge 100 N/s. Mesure de la rugosité selon SN EN 13036-1.

Données routières						Résultats de l'auscultation						
Communes	Axe PR voie	Type d'enrobé	Pose	Trafic journalier moyen VL (2015)	Trafic journalier moyen PL (2015)	Déclivité	Estimation visuelle de la perte de gravillons	PMT (tache de sable) [mm]	Température chaussee (sous pastille)	Contrainte arrachement Laboroute [N/mm ²]	Contrainte arrachement CCDR [N/mm ²]	Contrainte arrachement moyenne [N/mm ²]
1. Grandsvivaz	2100 PR1375-115 voie-	Sapaphone 4	2017	10'000	830	1.1% en descente	Moyen	0,81	45°C	0,35	0,26	0,31
2. Siviriez	2010 PR425-80 voie+	Sapaphone 4	2016	3'600	460	2.5% en montée	Important	1,35	22°C	0,73	0,69	0,71
3. Cottens - Neyruz	2000 PR2925-40 voie+	Sapaphone 4	2015	8'200	520	1.5% en descente	Faible	0,73	19°C	0,94	0,96	0,95
4. Billens	2030 PR100-90 voie-	Famsiphonogrip	2015	2'700	250	5.6% en descente	Important	1,02	23°C	1,03	0,99	1,01
5. Montbrelloz	2500 PR2275 voie-	Famsiphonogrip	2015	3'500	220	2.9% en descente	Faible	0,64	24°C	1,05	1,04	1,04
6. Estavayer	2500 PR1950H-130 voie-	Famsiphonogrip	2015	9'200	490	7.0% en montée	Important	0,86	18°C	1,12	1,32	1,22

Glossar

Begriff	Bedeutung
CDDR	Centre de compétences du domaine routier
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
BRRC	Belgian Road Research Center
DSD	Darmstadt Scuffing Device
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
MR	Macrorugueux
PA	Offenporiger Asphalt
SDA	Semidichter Asphalt nach VSS 40 436
SN	Schweizer Norm (SN)
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Literaturverzeichnis

Normen

- [1] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2019), « **Semidichtes Mischgut und Deckschichten - Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung** », VSS 40 436.
- [2] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2017), « **Asphalt - Prüfverfahren - Teil 50: Widerstand gegen Oberflächenverschleiss** », SNR CEN/TS 12697-50.
- [3] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2019), « **Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreissversuch** », Norm SIA 162.421 2. Ausgabe mit NA zu EN 1542.

Dokumentation

- [4] Canton de Genève, Office cantonal de l'environnement (2018), « **Lutte contre le bruit routier: 83% du réseau cantonal à assainir bénéficie déjà d'un revêtement phonoabsorbant** », *Conférence de presse du 26 mars 2018*.
- [5] C. Angst, F. Beltzung und M. Hugener (2010), « **Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN** », Bundesamt für Strassen ASTRA, *Forschungsprojekt VSS 2005/505, Bericht VSS Nr. 1289*.
- [6] M. Rodriguez, P. Rycken et A. Dumont (2008), « **Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/002, Rapport VSS N° 635*.
- [7] V. Root (2008), « **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Widerstandes von Asphaltdeckschichten gegen Schubbeanspruchung an der Oberfläche** », Technische Universität Darmstadt, *Dissertation*.
- [8] A. Schacht, D. Wang und B. Steinauer (2011), « **Investigation of the granule loss of poroelastic road surfaces using the Aachener-Raveling-Tester (ARTe)** », Proceedings of the 24th World Road Congress.
- [9] M. Jacobs, R. van den Beernt and M. Frunt (2015), « **Determination of the scuffing resistance of porous asphalt using annex A of TS 12697-50** », Proceedings of Bituminous Mixtures and Pavements VI.
- [10] J. de Visscher and A. Vanelstraete (2015), « **New Performance Test for Resistance to Raveling by Traffic: Laboratory and Field experience in Belgium** », Proceedings of 8th Rilem Symposium on Testing and Characterization of Sustainable Bituminous Materials.
- [11] S. Hamlat, F. Hammoum, P. Hicher and J. Terrier (2007), « **Evaluation en laboratoire de la résistance aux efforts tangentiels des revêtements routiers** », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n° 267.
- [12] S. Magnus et al (2004), « **Rotating Surface Abrasion Test, een method om de bestandheid tegen rafeling en wringende krachten te meten** », CROW Wegbouwkundige Werkdagen.
- [13] M. Hugener (2010), « **Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages** », Bundesamt für Strassen ASTRA, *Forschungsprojekt VSS 1999/131, Bericht VSS Nr. 1302*.
- [14] BAFU (2020), « **Liste der besten leisen Beläge innerorts in der Schweiz** », <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/laerm/fachinformationen/massnahmen-gegen-laerm/massnahmen-gegen-strassenlaerm/laermarme-strassenbelaege.html>
- [15] J. Perret, J-P. Bolli und T. Arn (2017), « **Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts: Synthesebericht** », Bundesamt für Strassen ASTRA, *Forschungsprojekt ASTRA 2010/004, Bericht ASTRA Nr. 1620*.
- [16] C. Angst et al (2012), « **Investigation Machine for Pavement Acoustic Testing the Durability of low noise road surfaces** », Proceedings of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress.
- [17] J.C. Nicholls et al (2019), « **Development of a Raveling Test for Asphalt** », Proceedings of the 7th International Conference *Bituminous Mixtures and Pavements*.

Projektabschluss

Formular 3 ARAMIS SBT als PDF (Das Formular einscannen, dann das PDF öffnen und dann mit dem Schnappschuss-Werkzeug (Fotoapparat) die Seiten markieren und dann hier einfügen).



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 11. Oktober 2021

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2015/312
Projekttitel: Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung des Widerstands gegenüber Kornausbrüchen semidichter Asphalte
Enddatum: 30. Oktober 2021

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Das Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung einer Prüfmethode zur Bestimmung des Widerstands gegenüber Kornausbrüchen semidichter Asphalte SDA. Der Auslöser der Forschung war die Feststellung des gehäuftem Auftretens von Kornausbrüchen bei solchen Asphalten und der Wunsch, die Anfälligkeit semidichter Asphalten für Kornausbrüche bestimmen und gegebenenfalls im Labor schon vorher sagen bzw. in situ ermitteln zu können. Weiterhin hatte sich gezeigt, dass die in der von der CEN herausgegebenen Technische Spezifikation 12697-50 aufgeführten Methoden zur Bestimmung von Kornausbrüchen einerseits komplizierte und teure Apparaturen erfordern und andererseits keine untereinander kompatiblen Ergebnisse liefern.

Ausgehend von dieser Ausgangslage wurden in einem ersten Schritt 4 praxisnahe Prüfmethoden: das Bürsterverfahren (analog Krautbesen zur Strassenreinigung), der Schälversuch (analog Schälzug bei Dichtungsbahnen), das Wasserhochdruckverfahren (Wasser-Jet analog Kärcher) und der Haftzugversuch (analog EN 1542) ausgewählt und auf ihre Durchführbarkeit und Aussagekraft hin überprüft, wobei sich die Haftzugprüfung als einzige als durchführbar und zielführend herausstellte. Als Asphaltmischgut für die Laboruntersuchungen wurden offenerporiger Asphalt PA 8 sowie semidichte Asphalte SDA 4 und SDA 8 mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten ausgewählt. Zusätzlich wurde AC MR 8 mit zu erwartenden geringen Kornverlusten als Kontrollmischgut in die Untersuchungen einbezogen. Alle Mischungen wurden in einer Mischanlage mit dem gleichen PmB 45/60-65 hergestellt. Erste Laborversuche mit einem handelsüblichen Haftzuggerät bei 30°C, 20°C und 10°C an wenig verdichteten Laborplatten zeigten einerseits eine zu erwartende Temperaturabhängigkeit der Haftzugkraft, aber auch deutliche Unterschiede der Haftzugkraft im Hinblick auf den Hohlraumgehalt der untersuchten Mischgutsorten. Darüber hinaus stimmten die mit der Haftzugprüfung gefundenen Ergebnisse - insbesondere die Reihung der einzelnen Mischgutsorten - mit den Ergebnissen des als Vergleichsmethode ausgewählten Darmstädter Scuffing Device DSD gut überein.

Entgegen der Erwartung bewirkten Frost-Tau Zyklen und Wasserlagerung der Prüfkörper bei erhöhter Temperatur (60°C) selbst an ungenügend verdichteten Laborplatten keine Schädigung und blieben daher ohne negativen Einfluss auf die Haftzugkraft. Die Untersuchung der ausreichend verdichteten Platten aller Mischgutsorten bei 10°C und 20°C einerseits mit dem handelsüblichen Gerät und andererseits in einer Laborprüfmaschine, wobei um eine gute Zentrierung und ein gerades Abziehen der Prüfkörper zu erreichen die Prüfmaschine in einem Stahlring mit Schraubzwingen fixiert wurden, ergab zwar eine klare Temperaturabhängigkeit der Haftzugkraft, zeigte aber keine eindeutige Differenzierung der Haftzugkraft im Hinblick auf den Hohlraumgehalt der Mischgutsorten PA 8, SDA 8-16 und SDA 4-16. Des Weiteren ergab der Vergleich zwischen verschiedenen Testgeräten und -aufbauten, dass es wichtig ist, zu verhindern, dass sich die Platte während des Abzugs aufwölbt. Wird diese Verformung nicht verhindert, verringert sich die maximale Haftzugfestigkeit deutlich (etwa 40% bei 20°C). Eine spezielle Massnahme gegen die Wölbung ist nicht erforderlich, wenn die Prüfung in situ durchgeführt wird.

Letztlich musste festgestellt werden, dass die Prüfmethode im Labor nicht in der Lage war, die Anfälligkeit für Kornausbruch der untersuchten Platten nach Mischgutsorte und Hohlraumgehalt zu klassifizieren. Mit Ausnahme des widerstandsfähigen und dichten AC MR 8 und des hohlraumreichen SDA 4-20 konnte somit an gut verdichteten Platten kein Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und Haftzugfestigkeit gefunden werden. Allerdings zeigte die Haftzugfestigkeit eine deutliche Differenzierung zwischen ausreichend und ungenügend verdichteten Mischgutplatten. Gründe für den fehlenden Zusammenhang zwischen Mischgutsorte, Hohlraumgehalt und Haftzugfestigkeit könnte die gute Mischgutqualität und die Verwendung des hochwertigen PmBs und eine damit verbundene geringe Neigung zu Kornausbrüchen sein.

Dem gegenüber zeigten Messkampagnen auf mehreren eingebauten SDA Strecken Zusammenhänge zwischen Haftzugfestigkeit, Alterung und Kornausbruch. Ausserdem erwies sich die in situ Prüfmethode als sehr zufriedenstellend in Bezug auf die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Messung des Widerstands gegen Kornausbruch prinzipiell nicht für gut verdichtete Laborplatten mit hochwertigen SDA Belägen eignet. Dabei konnte im Projekt nicht untersucht werden, ob u.U. minderwertige Mischung erkannt werden. Auf eingebauten Deckbelägen lassen sich nach einer gewissen verkehrs- und/oder witterbedingte Alterung dagegen deutliche Qualitätsunterschiede erkennen.

Die parallel in Darmstadt und Karlsruhe durchgeführten DSD Messungen offenbarten erhebliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Universitäten, was dieses in der CEN/TS enthaltene Verfahren aus Sicht der Forschungsstelle zum jetzigen Zeitpunkt völlig unzureichend und nicht brauchbar erscheinen lässt.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Im Hinblick auf die Zielerreichung lassen sich folgende Feststellungen machen:

- Das Projekt hat keinen ausreichenden Grad an methodischer Entwicklung erreicht, um den Haftzugversuch als standardisierte Methode in der Schweiz kurzfristig anbieten zu können.
- Zwar bietet sich mit der vorgeschlagenen Haftzugprüfung eine Möglichkeit den Widerstand gegen Kornausbrüche sowohl im Labor als auch in situ zu untersuchen, doch sind weitere grossangelegte Untersuchungen nötig, um einen wirklichen Erfahrungshintergrund aufbauen und generelle, statistisch belegbare Aussagen machen und gegebenenfalls Anforderungswerte festlegen zu können.
- Das Forschungsprojekt hat aber insgesamt die generelle Problematik von Methoden zur Bestimmung des Kornausbruchverhaltens aufzeigen und insbesondere das im europäischen Bereich verwendete DSD Verfahren als nicht empfehlenswert und nicht normenwürdig herausstellen können.

Folgerungen und Empfehlungen:

Auch wenn im vorliegenden Projekt kein ausreichender Grad an methodischer Entwicklung erreicht werden konnte, um den Haftzugversuch als standardisierte Methode in der Schweiz anzubieten, erfüllt die Haftzugmethode die angestrebten Ziele: Vermeidung des Prinzips der Reifensimulation, Anwendbarkeit in situ und einfache Bedienung. Ausserdem hat sich gezeigt, dass verschiedene Haftzugvorrichtungen präzise Werte liefern und sowohl hinsichtlich Wiederholbarkeit als auch Reproduzierbarkeit gut übereinstimmen. Im Gegensatz zu allen in der CEN/TS 12697-50 enthaltenen Laborprüfverfahren, erlaubt die im Forschungsprojekt vorgeschlagene Haftzugprüfung die Untersuchung im Labor und auf der Strasse. An der in situ Messkampagne hat sich gezeigt, dass die SDA-Korngrösse (4, 6 oder 8 mm) die Haftzugfestigkeit nicht beeinflusst. Dies ist eine Beobachtung, die es verdient, genauer untersucht zu werden. Wenn sie sich bestätigt, bedeutet dies, dass die Frage des Kornausbruchs bei der Entscheidung zwischen SDA 4, 6 oder 8 keine Rolle spielt. In diesem Zusammenhang müssten auch die auf eingebauten Deckbelägen nach einer gewissen verkehrs- und/oder wetterbedingte Alterung erkennbaren Qualitätsunterschiede in einem grösseren Rahmen ausgewertet und analysiert werden. Ein ähnliches Prüfverfahren wie die Haftzugprüfung wird in der EN 12697-51 beschrieben und ist für die Messung der Oberflächenscherfestigkeit für Start- und Landebahnen sowie von Rollwegen auf Flugplätzen vorgesehen. Der Hauptunterschied in dieser Norm ist, dass die Kraft, die auf die Metallplatte ausgeübt wird, eine Torsionskraft ist. Das hier vorgestellte neue Haftzugverfahren zur Messung der Anfälligkeit gegen Kornausbrüche könnte ebenfalls Gegenstand einer Norm sein. Zahlreiche Parameter, die die Haftzugfestigkeit beeinflussen, wurden im Rahmen dieser Arbeit bereits identifiziert und bewertet. Allerdings müssten, um die für eine Norm notwendige Aussagekraft und Klarheit zu erreichen, noch einige offene technischen Fragen beantwortet werden, insbesondere die der Temperaturkorrektur. Letztendlich sollten, um die Ergebnisse beurteilen zu können, Mindestanforderungen festgelegt werden.

Publikationen:

Neben der Veröffentlichung des Forschungsberichts sind einerseits Publikationen in "Strasse und Verkehr" sowie in europäischen Zeitschrift geplant, hier insbesondere um auf die Fehlende Übereinstimmung bei der in der europäischen Norm beschriebene Methode mit dem Darmstädter Scuffing Device DSD aufmerksam zu machen.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Raab

Vorname: Christiane

Amt, Firma, Institut: Empa, Dübendorf

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Resultate der Forschungsarbeit entsprechen im wesentlichen der Zielsetzung des Auftrages. Während der Forschungsarbeit wurden gewisse Prüfungen angepasst, damit die Aussagekraft der Methoden erhöht werden konnten, doch hat das Projekt schlussendlich keinen ausreichenden Grad an methodischer Entwicklung erreicht, um den Haftzugversuch als standardisierte Methode in der Schweiz anbieten zu können.

Umsetzung:

Der Bericht ist klar strukturiert und hält sich an die Zielvorgaben des Auftrags. Änderungen wurden mit der Begleitkommission diskutiert und Vorgehensweisen zusammen abgesprochen.

weitergehender Forschungsbedarf:

zur Zeit kein weiterer Forschungsbedarf vorhanden

Einfluss auf Normenwerk:

Im Rahmen der Mitarbeit bei der CEN TC 227 WG 1 TG2 konnte Einfluss auf die Veröffentlichung der CEN/TS 12697-50:2018 genommen werden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Dünner

Vorname: Sandra

Amt, Firma, Institut: Walo Bertschinger Central AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: