



Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heiss- mischgut: EP2: Mehrfach- recycling von Strassenbelägen

**Research package of the recycling of reclaimed asphalt in
hot mixes:**

EP2: Repeated recycling of road pavements

**Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumi-
neux de démolition des routes dans des enrobés à chaud:**

EP2: Recyclage répété de revêtements routiers

**Empa Dübendorf Strassenbau/Abdichtungen
Dr. Martin Hugener
Dr. Atsushi Kawakami**

**Forschungsprojekt VSS 2005/453 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes 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)



Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heiss- mischgut: EP2: Mehrfach- recycling von Strassenbelägen

**Research package of the recycling of reclaimed asphalt in
hot mixes:**

EP2: Repeated recycling of road pavements

**Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumi-
neux de démolition des routes dans des enrobés à chaud:**

EP2: Recyclage répété de revêtements routiers

**Empa Dübendorf Strassenbau/Abdichtungen
Dr. Martin Hugener
Dr. Atsushi Kawakami**

**Forschungsprojekt VSS 2005/453 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Dr. Martin Hugener, Empa, 8600 Dübendorf

Projektteam

Dr. Martin Hugener, Projektleiter, Empa Dübendorf

Dr. Atsushi Kawakami, Public Works Research Institute (PWRI), Japan

Roland Takacs, Empa Dübendorf

Christian Meierhofer, Empa Dübendorf

Simon Küntzel, Empa Dübendorf

Prof. Dr. M. N. Partl, Empa Dübendorf

Dr. Aybike Ongel, Bahcesehir University, Besiktas/ Istanbul, Turkey

Lidia Derossi, Università degli studi di Padova, Italien

Federführende Fachkommission VSS

Fachkommission 3: Baustoffe

Gesamtprojekt (EP1, EP2, EP3, EP4, EP5)

Projektleiter

Dr. M. Caprez, ETH Zürich

Begleitkommission

Präsident

Alex Nellen, Implenia Schweiz AG, Bern

Mitglieder

Thomas Arn, Lombardi SA, Minusio

Hans-Peter Beyeler, Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen

Tony Bühler, Implenia Suisse SA, Satigny

Markus Grieder, Tiefbauamt Basel-Landschaft, Liestal

Martin Horat, Tiefbauamt Stadt Zürich, Zürich

Daniel Kästli, Kästli AG, Ostermundigen

Dr. Andrea Bieder, Zürich

Begleitkommission EP2

Präsident

Hans-Peter Beyeler, Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen

Mitglieder

Thomas Arn, Lombardi SA, Minusio

Tony Bühler, Implenia Suisse SA, Satigny

Markus Grieder, Tiefbauamt Basel-Landschaft, Liestal

Martin Horat, Tiefbauamt Stadt Zürich, Zürich

Daniel Kästli, Kästli AG, Ostermundigen

Alex Nellen, Implenia Schweiz AG, Bern

Dr. Andrea Bieder, Zürich

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Zielsetzung	13
1.1 Ausgangslage.....	13
1.2 Stand der Forschung.....	13
1.3 Auftrag und Forschungsziele	14
2 Vorgehen und Methodik	15
2.1 Vorgehensweise.....	16
2.2 Beurteilung der Veränderung der Mineralstoffe	16
2.3 Beurteilung der Veränderung des Bindemittels	18
2.3.1 Herstellung von künstlich gealtertem RAP.....	19
2.3.2 Prüfserien	19
2.3.3 Simulation der RAP-Alterung	20
2.3.4 Vorversuch zur RAP-Herstellung	20
2.3.5 Berechnung des Zugabebindemittels	22
2.4 Übersicht über die verwendeten Prüfmethode.....	24
2.4.1 Zusätzliche Prüfungen am Mischgut	24
2.4.2 Zusätzliche Prüfungen am Bindemittel	25
2.4.3 Zusätzliche Prüfungen an den Mineralstoffen.....	25
2.5 Kurzbeschreibung der Prüfmethode	25
2.5.1 Modulbestimmung mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR)	25
2.5.2 Fourier-Transform Infrarot-Spektroskopie (FTIR)	27
2.5.3 Wasserempfindlichkeit	27
2.5.4 Steifigkeitsmodul bei 10, 20 und 30°C	28
2.5.5 Druckschwellversuch bei 50°C	29
2.5.6 Spurbildungstest bei 50°C.....	29
2.5.7 Spaltzug-Schwellversuch bei 20°C (Ermüdung)	30
2.5.8 Indirekter Zugversuch bei -10°C	31
2.6 Mischgutherstellung	31
2.6.1 Berechnen der Mischgutarezepturen	31
2.6.2 Herstellung mit Labormischer	31
2.7 Roter Faden	32
2.7.1 Ausgangsmaterialien.....	33
2.7.2 Charakterisierung der Gesteinskörnungen	33
2.7.3 Vergleich der beteiligten Labors.....	34
2.7.4 Vergleich zwischen Aufbereitungsanlage und Labor	36
3 Resultate und Diskussion	39
3.1 Mehrfachrecycling: Einfluss auf die Mineralstoffe.....	39
3.1.1 Objekt Wimmis BE	39
3.1.2 Untersuchung von Mischgut und Fräsmaterial	41
3.1.3 Einfluss auf die Korngrößenverteilung.....	42
3.1.4 Einfluss auf die Kornrundung	44
3.1.5 Einfluss auf die Mischguteigenschaften	45
3.2 Mehrfachrecycling: Einfluss auf das Bindemittel.....	46
3.2.1 Vorversuche in der Alterungsbox.....	46
3.2.2 Alterungsprotokoll für die RAP-Herstellung	48
3.2.3 Charakterisierung der Bitumen und Verjüngungsmittel	49
3.2.4 Prüfserie Mx-40 mit 40% RAP	49
3.2.5 Prüfserie Mx-100 mit 100% RAP	60

3.2.6	Prüfserie Mx-PmB mit Polymerbitumenzusatz	66
3.3	Schlussdiskussion.....	71
3.3.1	Einfluss auf die Mineralstoffeigenschaften	71
3.3.2	Einfluss auf die Bindemittleigenschaften	72
4	Schlussfolgerungen	73
	Glossar	75
	Literaturverzeichnis.....	77
	Projektabschluss	81
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	85

Zusammenfassung

Im Einzelprojekt EP-2 des Recyclingpaketes zum Heissrecycling von Ausbauasphalt (RAP) wurde untersucht, wie sich das wiederholte Recycling auf die Eigenschaften der Mineralstoffe, des Bindemittels und des Mischgutes auswirkt. Die Veränderungen der Mineralstoffe durch Fräsen und Brechen des alten Strassenbelages wurde möglichst praxisnah durchgeführt. Hierzu stand ein Testfeld mit einem zweischichtigen Belag, bestehend aus einer Tragschicht AC T 22 H und einer Deckschicht AC 11 N, sowie das für den Einbau verwendete Mischgut zur Verfügung. Der Belag wurde schichtweise mit einer grossen Strassenfräse im Kaltverfahren gefräst und nachträglich gebrochen. Aufgrund der kurzen Liegedauer war das RAP aber nur geringfügig gealtert. Die Untersuchungen ergaben, dass insbesondere die groben Mineralstofffraktionen reduziert wurden und sich der Anteil der mittleren Fraktion bis zum Sand erhöhte. Das produzierte RAP der Tragschicht entsprach der Korngrössenverteilung eines AC T 16, und das RAP der Deckschicht jener eines AC 8. Füller wurde praktisch keiner gebildet oder wurde durch das Waschwasser beim Fräsvorgang weggespült. Der Anteil an runden und teilweise runden Körnern wurde durch das Fräsen/Brechen reduziert. Aus dem RAP der Deckschicht wurde im Labor ein zum AC 11 N möglichst identischer Belag mit einem Recyclinganteil von 60% nachgebildet. Da die Ausgangsstoffe (Mineralstoffe, Bitumen), die für die Deckschicht verwendet wurden, nicht vorhanden waren, wurde das Material, das für das Recyclingpaket zur Verfügung gestellt wurde, verwendet. Der nachgebildete Belag war etwas dichter trotz tieferem Bindemittelgehalt, ergab aber bezüglich Neigung zur Spurrinnenbildung, Marshall-Stabilität und Tieftemperatureigenschaften ähnliche Resultate. Einzig die Wasserempfindlichkeit war deutlich reduziert, was unter Umständen auf die anderen Mineralstoffe zurückzuführen ist. Leider konnte für die Mineralstoffschädigung nur ein Recyclingzyklus untersucht werden, da es keine Möglichkeit gab, das RAP unter den gewünschten Bedingungen nochmals einzubauen und zu fräsen.

Für die Untersuchung der Veränderung des Bindemittels durch das mehrfache Recycling wurde als Ausgangsmischgut der AC 11 S gemäss Rezept des roten Fadens des Forschungspaketes verwendet, jedoch ohne Ausbauasphalt. Das Referenzmischgut wurde im Labor künstlich während 4 Tagen bei 100°C gealtert, sodass ein RAP mit einer Penetration von 30 [0.1 mm] erhalten wurde. Dieses künstlich hergestellte RAP wurde mit einem Anteil von 40% für ein neues Mischgut verwendet, dessen Bindemittelleigenschaften und volumetrischen Kennwerte möglichst dem Referenzmischgut entsprechen sollten. Dieses Mischgut wurde danach wiederum künstlich gealtert bis schliesslich drei Recyclingzyklen durchgeführt worden waren. Die meisten Bindemittel- und Mischguteigenschaften blieben praktisch konstant, bei der Wasserempfindlichkeit wurde aber eine deutliche Abnahme des ITSR-Kennwertes festgestellt. Die Analyse mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) zeigte, dass im RAP die potentiellen funktionellen Gruppen praktisch vollständig oxidiert waren und so keine Informationen zum Alterungsgrad des RAP geben konnten.

Da in zunehmendem Masse höhere Recyclinganteile verwendet werden, um die massiven Überschüsse an RAP abzubauen, wurde auch der Einfluss eines Verjüngungsmittels auf das wiederholte Recycling untersucht. Dazu wurde das künstlich hergestellte RAP ohne Zugabe von Bitumen oder Mineralstoffen nur mit Verjüngungsmittel versetzt, was einem Recyclinganteil von 100% entspricht. Es zeigte sich, dass bei gleicher Zugabemenge an Verjüngungsmittel sich das Bindemittel im Mischgut bei jedem Recyclingschritt stärker verhärtete. Trotzdem zeigte das Mischgut aber gute Eigenschaften, insbesondere bezüglich Wasserempfindlichkeit, Ermüdungsverhalten und plastischer Verformung (Druckschwellversuch). Daraus muss geschlossen werden, dass für die Beurteilung von Recyclingbelägen nicht nur die Bindemittelkennwerte Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel verwendet werden können, sondern auch die Mischguteigenschaften berücksichtigt werden sollten. Allerdings sollten auch die Resultate des vorgesehenen Validierungsprojektes VP6, wo Recyclingbeläge mit Verjüngungsmittel eingebaut und geprüft werden, berücksichtigt werden.

Durch das Mehrfachrecycling verändern sich die Mineralstoff-, Bindemittel- und Mischguteigenschaften in unterschiedlichem Masse. Bis 40% Recyclinganteil sind die beobachteten Einflüsse in der Regel jedoch gering, da das zugegebene Neumaterial das Verhalten dominiert. Bei höheren Recyclinganteilen, insbesondere wenn Verjüngungsmittel zugegeben werden muss, wird das Verhalten nach mehreren Recyclingschritten komplex und schwer vorhersagbar. In diesem Punkt ist sicherlich noch Forschungsbedarf vorhanden, um dauerhafte Strassenbeläge auch mit mehrfach rezykliertem RAP in hohen Anteilen zu erhalten.

Résumé

Le projet EP2 du paquet de recherche sur le recyclage à chaud des granulats bitumineux récupérés (RAP) était consacré à l'étude des effets du recyclage répété sur les propriétés des granulats, du liant et de l'enrobé. Les modifications des granulats provoquées par le fraisage et le concassage de l'ancien revêtement ont été simulées de manière aussi conforme que possible à la pratique. Pour cela on disposait d'une planche d'essai comportant un revêtement bicouche formé d'une couche de base AC T 22 H et d'une couche de surface AC 11 N ainsi que des enrobés utilisés pour sa réalisation. Le revêtement a été fraisé à froid par couche à l'aide d'une grande fraise routière et a été ensuite concassé. Du fait de l'âge peu élevé du revêtement, le RAP n'avait subi qu'un faible vieillissement. Les examens ont montré qu'en particulier les fractions grossières du granulat avaient diminué et que la fraction moyenne jusqu'au sable avait augmenté. La granulométrie du RAP produit à partir de la couche de base correspondait à celle d'un AC T 16 et celle du RAP de la couche de surface à celle d'un AC 8. Pratiquement aucun filler ne s'était formé ou celui-ci avait été emporté par l'eau de rinçage lors du fraisage. Le pourcentage de grains ronds ou partiellement ronds avait été diminué par le fraisage/concassage. A partir du RAP de la couche de surface on a confectionné en laboratoire un enrobé aussi semblable que possible à l'AC 11 N avec un pourcentage de granulat récupéré de 60%. Comme on ne disposait plus des matériaux de base (granulat, bitume) utilisé pour la couche de surface, on a utilisé les matériaux mis à disposition dans le paquet de recherche sur le recyclage. Bien que présentant une teneur en liant plus basse, le revêtement ainsi reproduit était légèrement plus compact mais présentait des résultats semblables à l'original pour ce qui est de la tendance à l'orniérage, la stabilité Marshall et ses propriétés à basse température. Seule sa sensibilité à l'eau était nettement diminuée ce qui pourrait éventuellement être dû aux granulats différents. Pour l'étude du vieillissement du granulat on n'a malheureusement pu effectuer qu'un cycle de recyclage, cela parce qu'il n'a pas été possible de procéder à une nouvelle pose et à un nouveau fraisage du revêtement avec RAP dans les conditions voulues.

Pour l'étude de la modification du liant provoquée par un recyclage répété, on a utilisé un enrobé AC 11 S confectionné selon la recette du fil rouge du paquet de recherche mais sans bitume recyclé. Cet enrobé de référence a été vieilli durant 4 jours à 100°C en laboratoire pour obtenir un RAP présentant une pénétration de 30 [0.1 mm]. Ce RAP a été utilisé à raison de 40% pour produire un nouvel enrobé avec des propriétés du liant et des caractéristiques volumétriques aussi proches que possible de celles de l'enrobé de référence. Ces opérations ont été répétées jusqu'à ce que l'on ait réalisé trois cycles de recyclage. La majorité des propriétés du liant et du granulat sont demeurées pratiquement inchangées alors que pour la sensibilité à l'eau on a constaté une nette diminution de la valeur ITSR. L'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) a montré que dans le RAP les groupes fonctionnels potentiels étaient pratiquement totalement oxydés et qu'ils ne pouvaient ainsi pas fournir d'information sur le degré de vieillissement du RAP.

Comme on utilise dans une mesure accrue des pourcentages élevés de matériaux recyclés afin de faire diminuer les excédents massifs de RAP, on a aussi étudié l'influence de l'apport d'un régénérant sur le recyclage répété. Pour cela on a ajouté au RAP produit artificiellement uniquement un régénérant, sans aucune adjonction de bitume ni de granulats neufs, ce qui correspond à un taux de recyclage de 100 %. Il est apparu que, avec des adjonctions toujours égales de régénérant, le liant se durcissait toujours plus fortement à chaque recyclage. Malgré cela, l'enrobé présentait de bonnes caractéristiques, en particulier pour ce qui est de la sensibilité à l'eau, du comportement à la fatigue et de la déformation plastique (essai de compression cyclique). Il faut donc en conclure que l'évaluation des revêtements recyclés ne devrait pas seulement se baser sur les caractéristiques du liant que sont la pénétration et le point de ramollissement bille et anneau mais qu'elle devrait aussi reposer sur les caractéristiques de l'enrobé. Toutefois il faudra aussi tenir compte dans cela des résultats du projet de validation VP6 prévu sur la pose et l'étude de revêtements recyclés avec adjonction de régénérant.

Le recyclage répété provoque des modifications variables des caractéristiques du granulat, du liant et de l'enrobé. Jusqu'à une teneur en matériau recyclé de 40 %, les influences observées sont en règle générale faibles car le nouveau matériau ajouté domine dans ce comportement. Avec des pourcentages de matériaux recyclés plus élevés, et plus particulièrement lorsqu'il est nécessaire d'ajouter un régénérant, le comportement après plusieurs cycles de recyclage devient complexe et difficilement prévisible. Sur ce point il existe certainement un besoin de recherche pour pouvoir aussi disposer de revêtements routiers durables avec des teneurs élevées en RAP multirecyclé.

Summary

The project EP-2 of the research package on the recycling of reclaimed asphalt in hot mixes (reclaimed asphalt pavement, RAP) investigated what effect repeated recycling has on the properties of the mineral aggregates, the binder and the mixture. The changes to the mineral aggregates caused by milling and breaking the old pavement were carried out in a way that was as close as possible to the practices actually used. For this, a test field with a two-layer pavement consisting of an AC T 22 H base course and an AC 11 N surface course was available and the mixture used for construction. Each layer of the pavement was cold milled separately with a large road milling machine and subsequently broken. However, due to the short period of time in situ, the RAP was only slightly aged. The investigation revealed that in particular the coarse mineral aggregate fractions were reduced and the proportion of the intermediate fraction down to sand increased. The resulting RAP from the base course had an aggregate size distribution of an AC T 16, and the RAP from the surface course had that of an AC 8. Practically no filler was formed, or it was washed away by the washing water during the milling process. The proportion of round and partially round aggregate was reduced by milling/breaking. The RAP from the surface course was used in the lab to simulate a pavement that was as identical as possible to the original AC 11 N with a recycled content of 60%. Because the raw materials (mineral aggregates, bitumen) used for the surface course were not present, the material that was provided for the recycling research package was used. The laboratory-prepared pavement was slightly denser despite the smaller binder content, but demonstrated similar results with regard to its rutting tendency, Marshall stability and low temperature properties. Only the water sensitivity was significantly reduced, possibly due to the different mineral aggregates. Unfortunately, it was only possible to investigate one recycling cycle in terms of the mineral aggregate damage because there was no way to install and mill the RAP again under the desired conditions.

To investigate the change to the binder caused by multiple recycling steps, the starting AC 11 S mixture was used according to the standard recipe used in the research package, but without recycled asphalt. The reference mixture was aged artificially in the laboratory for 4 days at 100°C in order to obtain a RAP with a penetration of 30 [0.1 mm]. This artificially produced RAP was used in a proportion of 40% to produce a new mixture with binder properties and volumetric characteristics that matched the reference mixture as closely as possible. This mixture was then in turn artificially aged until finally three recycling cycles had been carried out. Most of the binder and mixture properties remained virtually constant, but with regard to water sensitivity, a significant decrease in the ITSr value was detected. Analysis by means of Fourier transform infra-red spectroscopy (FTIR) showed that, the potential functional groups in the RAP were almost completely oxidised and so could not provide information on the degree of ageing of the RAP.

As higher recycled contents are increasingly being used to reduce the massive surpluses of RAP, the influence of a rejuvenating agent on the repeated recycling was investigated. Rejuvenating agent was added to the artificially produced RAP, with no addition of bitumen or mineral aggregates, corresponding to a recycling rate of 100%. It was found that, for the same amount of rejuvenating agent added, the binder in the mixture hardened more during each recycling stage. Despite this, the mixture demonstrated good properties, particularly with regard to water sensitivity, fatigue behaviour and plastic deformation (cyclic compression test). It must be concluded from this that, in the assessment of recycled pavements, the binder characteristics of penetration and ball and ring softening point can't be used alone, but the mixture properties should also be taken into account. However, the results of the proposed validation project VP6, in which recycled pavements are laid with rejuvenating agent and tested, should also be taken into account.

Multiple recycling leads to changes in the mineral aggregate, binder and mixture properties to varying degrees. However, up to a recycled content of 40%, the effects observed are usually small because the new material added dominates the behaviour. At

higher recycled contents, particularly when rejuvenating agents have to be added, the behaviour after several recycling stages becomes complex and difficult to predict. More research is needed on this point in order to obtain durable road pavements also containing large proportions of multiple-recycled RAP.

1 Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Mit steigender Sensibilisierung für Nachhaltigkeits- und Umweltthemen hat die Frage des Recyclings von Strassenausbruch erheblich an Aktualität und Bedeutung gewonnen. Diesem Umstand wird im UVEK Schwerpunkt R „Baustoffmanagement: Recycling, neue Baustoffe“ Rechnung getragen und ist Ausgangspunkt des Forschungspaketes „Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut“.

Gegen Recycling von Ausbauasphalt wird häufig die Argumentation vorgebracht, dass beim Recycling von Strassenbelägen die Entsorgung nur zeitlich verschoben, nicht aber gelöst werde, da es nicht klar sei, wie oft ein Ausbauasphalt ohne empfindlichen Schaden zu nehmen, wiederverwendet werden könne (Stichworte: Adhäsion, Verhärtung, obere Grenze für Gesamtbindemittelgehalt, Schädigung der Gesteinskörnungen etc.). Mit der langjährigen Erfahrung in der Verwendung von Ausbauasphalt und dem Erreichen der Grenzen der Lebensdauer von Belagsschichten mit Ausbauasphalt gewinnt somit auch die Frage des Mehrfachrecyclings an Bedeutung. Die langjährige Verwendung von Ausbauasphalt führt zu einer stetigen Zunahme des Recyclinganteils in den Belagsschichten mit immer älterem Recyclingasphaltgranulat (RAP). Die Untersuchung des Einflusses dieser alten Materialien auf die mechanischen Eigenschaften von neuen Strassenbelägen ist Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojektes.

1.2 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung zur allgemeinen Recyclingthematik wurde im Initialprojekt des Forschungspaketes aufgeführt [1]. Diese Zusammenstellung zeigt deutlich, dass schon viel Arbeit im Recyclingbereich durchgeführt wurde. Allerdings wird in diesen Arbeiten in der Regel nur eine spezifische Fragenstellung behandelt. Mit der Durchführung des vorliegenden Forschungspaketes wird das Thema Heissrecycling im Rahmen dieses Forschungspaketes in einer koordinierten Aktion auf verschiedene Fragestellungen hin bearbeitet [2-5].

Das Thema "Mehrfaches Recycling von Strassenbelägen" des Einzelprojektes EP-2 wurde in der Literatur bisher vernachlässigt. Eine Datenbankrecherche in ITRD (International Transport Research Documentation) ergab Treffer für das wiederholte Recycling von Betongranulat [6-8], jedoch nicht für Asphaltbeläge. Eine umfassendere Literaturrecherche im Internet und wissenschaftlichen Datenbanken führte zu zwei kürzlich abgeschlossene Studien, die dieses Thema behandelten [9, 10] und die im Folgenden kurz diskutiert werden.

Die Vernachlässigung dieses Themas ist auf unterschiedliche Gründe zurückzuführen. Einerseits lag in der Vergangenheit der Recyclinganteil in der Regel unterhalb von 30%, wodurch hauptsächlich die neuen Mineralstoffe und das neue Bitumen die Eigenschaften des Belages bestimmten. Erst in den letzten 10 Jahren wurde, unter anderem durch die höheren Deponiepreise, das Recycling mit höherem Anteil interessant. Andererseits dauert es im Durchschnitt 10 - 20 Jahre bis ein Strassenbelag saniert werden muss, wodurch der grösste Teil des RAP erst einmal rezykliert wurde. Der Rest geht in der grossen Menge unter und hat deshalb nur einen kleinen Einfluss auf das Verhalten. Dies auch deshalb, weil in der Praxis keine Unterscheidung zwischen Material, das einmal oder mehrmals rezykliert wurde, gemacht wird. Aber mit der zunehmenden Erhöhung des Recyclinganteiles, was in Zukunft auch aufgrund des politischen Drucks sicherlich erfolgen wird, gewinnt der Aspekt des wiederholten Recyclings an Bedeutung.

Die Doktorarbeit [5] von U. Heneash der Universität Nottingham hat dieses Thema in einer ähnlicher Weise untersucht, wie dies in der vorliegenden Forschungsarbeit durchgeführt wurde. Ein dichter Asphalt mit Grösstkorn 10 mm wurde im Labor aus

Mineralstoffen und nicht modifiziertem Bitumen hergestellt, danach gealtert und ein Teil davon unter Beimengung von frischen Ausgangsstoffen möglichst identisch nachgebildet. Es wurden drei Recyclingzyklen durchgeführt und danach die jeweiligen Mischungen mit der Ausgangsmischung verglichen. Im Unterschied zur vorliegenden Untersuchung wurde der Einfluss der Bitumen- und Mineralstoffschädigung nicht separat betrachtet, sondern die im Labor hergestellten Prüfkörper wurden auch in einem kleinen Backenbrecher gebrochen, um die Mineralstoffschädigung zu simulieren. Dieser Schritt ist aber vermutlich nicht sehr praxisnah. Die Herstellung des RAP aus dem gebrochenen Mischgut erfolgte in einem Trockenschrank während 65 h bei 125°C. Die Bindemittleigenschaften der Ausgangs- und Recyclingmischungen, sowie die mechanischen Eigenschaften der daraus hergestellten Prüfkörper wurden untersucht und miteinander verglichen. Es wurde festgestellt, dass die meisten Eigenschaften sich nicht oder nur in geringem Masse veränderten. Bei der Ermüdungsbeständigkeit, die wie in dieser Arbeit mit dem Spaltzugschwellversuch an zylindrischen Prüfkörpern durchgeführt wurde, konnte für die rezyklierten Mischungen nur eine leicht niedrigere Performance festgestellt werden. Bei der Wasserempfindlichkeit hingegen wurde sogar ein leicht besseres Verhalten beobachtet. Zudem wurde festgestellt, dass die RAP-Temperatur und die Art der Zumischung des RAP einen grossen Einfluss auf die Qualität der Recyclingmischung hatten.

Die zweite Studie aus Japan [6] ist weniger umfangreich und untersuchte nur zwei Recyclingzyklen mit einer Zugabe von 70% Recyclingmaterial und dem Einsatz von Verjüngungsmittel. Interessant ist die Herstellung des RAP, das durch künstliche Alterung des Mischgutes in einem Ofen bei 60°C mit reinem Sauerstoff erfolgte. Nach jeweils 24 h wurde das Material gemischt bis die vorgegebene Alterungszeit von 5 Tagen erreicht wurde. Bei gleichen Bindemittleigenschaften wurde ein besseres Verhalten bezüglich Spurbildungsempfindlichkeit und Kornausbruch festgestellt.

1.3 Auftrag und Forschungsziele

Das Einzelprojekt EP2 "Mehrfaches Recycling von Strassenbelägen" hat zum Ziel, die Veränderung des Materials nach mehreren Recycling-Zyklen zu beschreiben und zu bewerten. Dies umfasst insbesondere die zwei Hauptkomponenten Bindemittel und Mineralstoffe:

- Beurteilung der Veränderung der Mineralstoffe nach mehrmaligen Mischen, Einbau und Fräsen
- Beurteilung der Veränderung des Bindemittels nach mehrmaligem Recycling
- Beurteilung der Veränderung des Belages durch die veränderten Mineralstoffe und Bindemittel
- Einfluss der Bindemittelsorte

2 Vorgehen und Methodik

Bei jeder Erneuerung eines alten Strassenbelages wird dieser entweder vollständig entfernt oder in Schichten abgefräst. In der Regel erfolgt dies durch eine Strassenfräsmaschine im Kaltverfahren, insbesondere wenn nur eine oder zwei Schichten erneuert werden müssen. Bei dünneren Belägen (Trottoir, untergeordnete Asphaltstrassen) erfolgt der Ausbruch meist in Form von Schollen durch einen Bagger. Unabhängig davon wird der Ausbausphalt vor der Verwendung in der Regel in einer Brechanlage gebrochen. Die Aufteilung in mehrere Grössenfraktionen durch Sieben wird erst in wenigen Mischanlagen praktiziert.

Bei jedem Recyclingzyklus werden die darin enthaltenen Baustoffe beansprucht: Beim Ausfräsen des Strassenbelages oder beim Brechen von Asphalttschollen werden die grösseren Splittbestandteile teilweise gebrochen oder zertrümmert. Das Bindemittel wird durch die mehrmalige thermische Belastung durch Mischen und Heisseinbau zusätzlich zur Alterung im Gebrauch weiter verhärtet. Wie die folgende Tabelle zeigt, spielen die kumulierten Schadeffekte aber erst ab einem Recyclinganteil von etwa 40 % eine Rolle, da darunter der Anteil von mehr als zweimal rezykliertem Material unter 16% liegt und daher die Mischguteigenschaften kaum massgeblich beeinflussen (Tab. 1).

Tab. 1. Gehalt an ursprünglichem RAP nach mehreren Recyclingzyklen unter der Annahme, dass immer der gleiche Recyclinganteil verwendet wurde

Recycling-Anteil	Anteil des ursprünglichen Asphalts des Neubelages [Masse-%]			
	nach 1.Recycling	nach 2.Recycling	nach 3.Recycling	nach 4.Recycling
20%	20%	4%	1%	0.2%
40%	40%	16%	6%	3%
50%	50%	25%	13%	6%
60%	60%	36%	22%	13%
80%	80%	64%	51%	41%
90%	90%	81%	73%	66%

Wiederholtes Recycling mit 60%

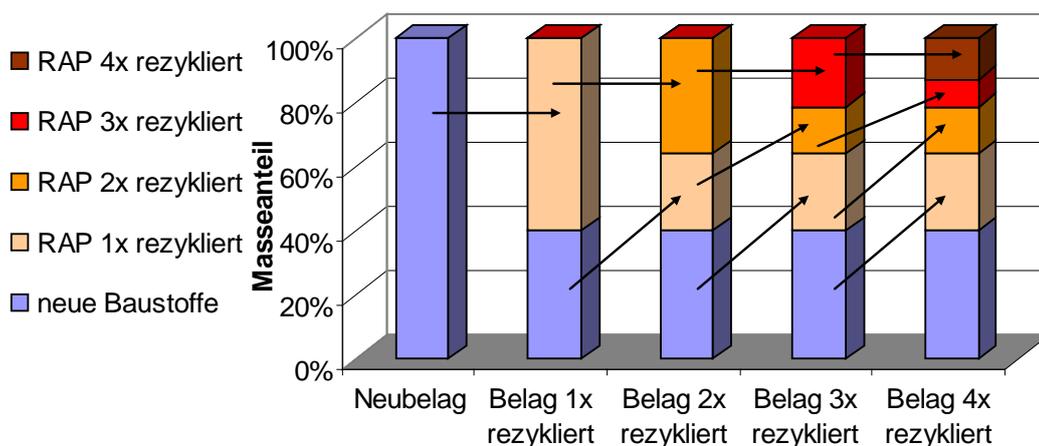


Abb. 1 Belagszusammensetzung nach wiederholtem Recycling mit einem Recyclinganteil von 60%

Wird beispielsweise ein Belag zum zweiten Mal mit einem Recyclinganteil von 40% rezykliert, besteht der neue Belag aus 60% neuen Baustoffen und 40% RAP, wobei von den 40% RAP 24% ein erstes Mal und nur 16 % ein zweites Mal rezykliert wurde. Dieser kleine Anteil dürfte keinen grossen Einfluss auf das Verhalten des Belages haben.

Wenn jedoch ein Recycling-Anteil von 60% verwendet wird, steigt der Anteil an Mineralstoffen, die ein zweites Mal rezykliert wurde, schon auf 36% (Abb. 3). Vermutlich wird sich dieses Material vor allem in den feineren Fraktionen ansammeln. Bei noch höheren Recyclinganteilen steigt dieser Anteil nochmals an.

Bei sehr hohen Recyclinganteilen um 90%, wird in jedem Schritt nur noch 10% Neumaterial zugefügt. Dies führt dazu, dass nach vier Recyclingzyklen immer noch 66% des Materials aus dem ursprünglichen Neubelag stammen. Dieses wurde in dieser Zeit aber 5 Mal gemischt und eingebaut und wurde während vier Gebrauchsperioden dem Klima ausgesetzt. Obwohl ein solcher Belag in naher Zukunft nicht anzutreffen sein wird, ist es doch wichtig zu wissen, wo die Grenzen des mehrfachen Recyclings liegen und welchen Einfluss sie auf das Kurz- und Langzeitverhalten von Strassenbelägen haben.

2.1 Vorgehensweise

Die Simulation des wiederholten Recyclings ist nicht trivial. Aufgrund der limitierten Projektdauer muss der Vorgang des wiederholten Recyclings im Labor simuliert werden, da Strassenbeläge mehrere Jahre, respektive Jahrzehnte im Einsatz bleiben. Dies bedeutet, dass insbesondere die Bindemittelalterung künstlich beschleunigt werden muss. Zudem hat sich bei der Planung gezeigt, dass die Schädigung, respektive Veränderung der Mineralstoffe und Bindemittel getrennt betrachtet werden muss. Für die Bindemittelalterung werden kleinere Mengen von etwa 150 kg benötigt. Mit dieser Menge lassen sich aber nur relativ kleine Belagsproben herstellen, die nicht unter realistischen Bedingungen geätzt werden können. Die Begleitkommission hat sich aber dafür ausgesprochen, dass wenn möglich praxisnahe Verfahren für das Fräsen angewendet werden sollten. Dies bedeutet, dass eine grosse Strassenfräse für die Simulation der Mineralstoffschädigung eingesetzt werden soll. Hierzu ist ein existierender Strassenbelag oder ein Testfeld von mindestens 10 m Länge erforderlich.

2.2 Beurteilung der Veränderung der Mineralstoffe

Ein Grossteil des Ausbauasphaltes wird durch Fräsen des Altbelages mit einer grossen Strassenfräse im Kaltverfahren erhalten. Deshalb sollte die Veränderung der Mineralstoffe bei diesem Vorgang untersucht werden. Dies lässt sich im Labor aber nicht praxisgerecht simulieren, da zum Abfräsen Prüfkörper von mehreren Quadratmeter benötigt werden, da sonst Randeefekte und Laboreinflüsse zu gross sind. Mit dem grössten Verdichtungsgerät der Empa, dem südafrikanischen Grossverdichter, lassen sich jedoch nur Prüfkörper von etwa 0.9 x 1.8 m mit bis zu 10 cm Dicke herstellen. Diese könnten mit einer kleinen Trottoirfräse geätzt werden.

In einer Sitzung der Begleitkommission wurde zu Recht eingewendet, dass das Fräsen solcher Prüfkörper mit den gegebenen Abmessungen nur mit einer kleinen Fräsmaschine möglich ist. Dies ist aber nicht praxisgerecht, da beim Fräsen von Strassenbelägen grössere Fräsen zum Einsatz kommen, die mit grösseren Dornen bestückt sind. Dementsprechend ist das produzierte Fräsmaterial nicht mit jenem einer kleinen Fräse vergleichbar, insbesondere was die Körnung des Asphaltgranulates betrifft.

Deshalb hatte die Begleitkommission empfohlen, ein geeignetes Objekt zu suchen, wo für das Fräsen eine grosse Strassenfräsmaschine eingesetzt werden kann. Allerdings stellte sich heraus, dass durch zusätzliche Randbedingungen trotz externer Hilfe kein geeignetes Objekt zu finden war. Denn für den Vergleich der Gesteinskörnung vor und nach dem Fräsen wurde nicht geschädigtes Material, idealerweise Proben des eingebauten Mischgutes, als Referenz benötigt. Ein bestehender Strassenbelag war deshalb ungünstig, da in der Regel nicht genügend Ausgangsmaterial vorhanden war.

Deshalb wurde versucht, ein Objekt zu finden, das bald gebaut wurde und wo genügend Mischgut für die Untersuchungen entnommen werden konnte. Verständlicherweise gab es aber keinen Bauherren, der gewillt war einen Teil des frisch erstellten Strassenbelages gleich nach dem Einbau wieder zu fräsen. Auch die Erstellung eines zusätzlichen Teststückes war nicht möglich.

Glücklicherweise war im Zusammenhang der Validierung des mobilen Verkehrslastsimulators MLS10 der Empa ein spezielles Testfeld gebaut worden, das nach dem Testen nicht mehr benötigt wurde und abgebrochen werden sollte [11]. Der zweischichtige Belag bestehend aus einer Tragschicht AC T 22 H und einer Deckschicht AC 11 N war geeignet als Objekt für die Untersuchung der Mineralstoffschädigung. Insbesondere waren zu Forschungszwecken genügend Mischgutproben entnommen worden, an denen die Eigenschaften der ungeschädigten Mineralstoffe geprüft werden konnte. Ein Streifen in der Mitte war durch die Prüfungen des MLS10 und Bohrkernentnahmen geschädigt, konnte aber beim Fräsen ausgespart werden.

Allerdings war es nicht möglich, dass erhaltene Fräsmaterial wieder einzubauen für einen weiteren Recyclingzyklus. Deshalb konnte die Mineralstoffschädigung nur nach einem Recyclingzyklus beurteilt werden (Abb. 2). Der Belag des Testfeldes wurde schichtenweise gefräst und das erhaltene RAP nachfolgend nochmals gebrochen. Daran wurde die Korngrößenverteilung und der Anteil gebrochener/runder Gesteinskörner untersucht. Im Labor wurde zudem ein Mischgut mit 60% des erhaltenen RAP und 40% neuen Mineralstoffen hergestellt. Sowohl aus dem Originalmischgut, das für den Einbau verwendet wurde, als auch dem im Labor hergestellten Mischgut wurden Prüfkörper für die Untersuchung der Belageigenschaften hergestellt. Dies war der Plan für die Untersuchung der Auswirkung der Mineralstoffschädigung durch den Ausbau mittels Fräsen und Brechen.

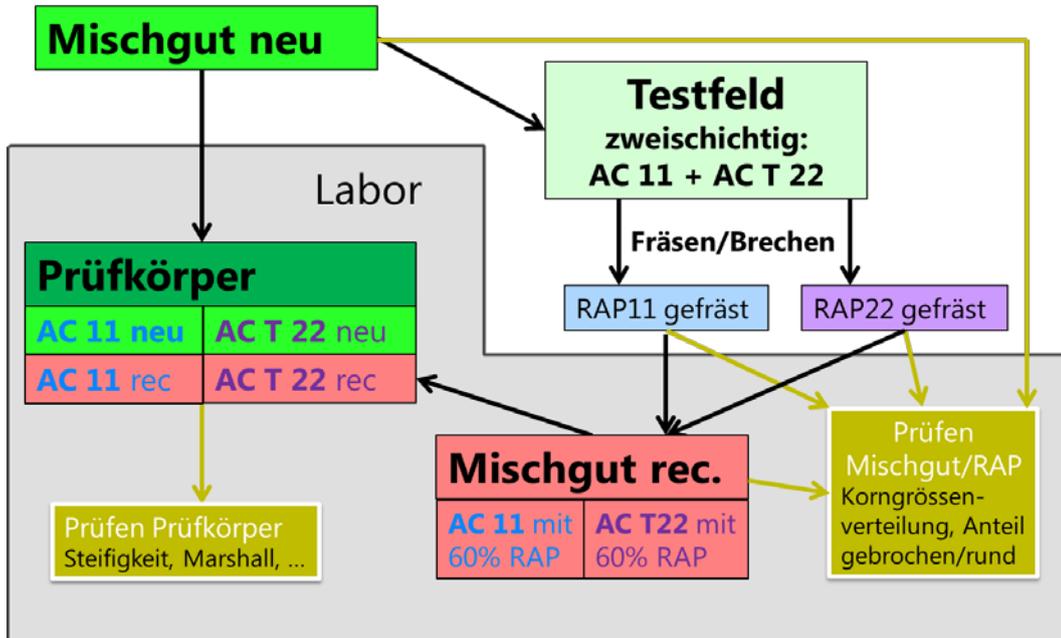


Abb. 2: Schematische Darstellung zur Untersuchung der Mineralstoffschädigung

2.3 Beurteilung der Veränderung des Bindemittels

Wie im schon erläutert, wurde der Einfluss der Bindemittelschädigung getrennt von der Mineralstoffschädigung untersucht. Als Basis diente das Referenzmischgut des roten Fadens, jedoch ohne Recyclingmaterial. Dieses wurde auch für die beiden Einzelprojekte EP1 und EP4 benötigt und wurde nach dem gleichen Rezept hergestellt [2, 4]. Dieses Referenzmischgut wurde als Mx-0 bezeichnet und war Ausgangsmischung für alle Untersuchungen im Zusammenhang mit der Bindemittelschädigung. Das Mischgut wurde mit der vorher optimierten Alterungsmethode im Ofen gealtert, wodurch das künstlich hergestellte RAP erhalten wird (Abb. 3). Das RAP aus der Referenzmischung wurde als RAP-0 bezeichnet. Die Bindemittelleigenschaften wurden an den rückgewonnenen Bindemitteln von Mischgut und RAP bestimmt.

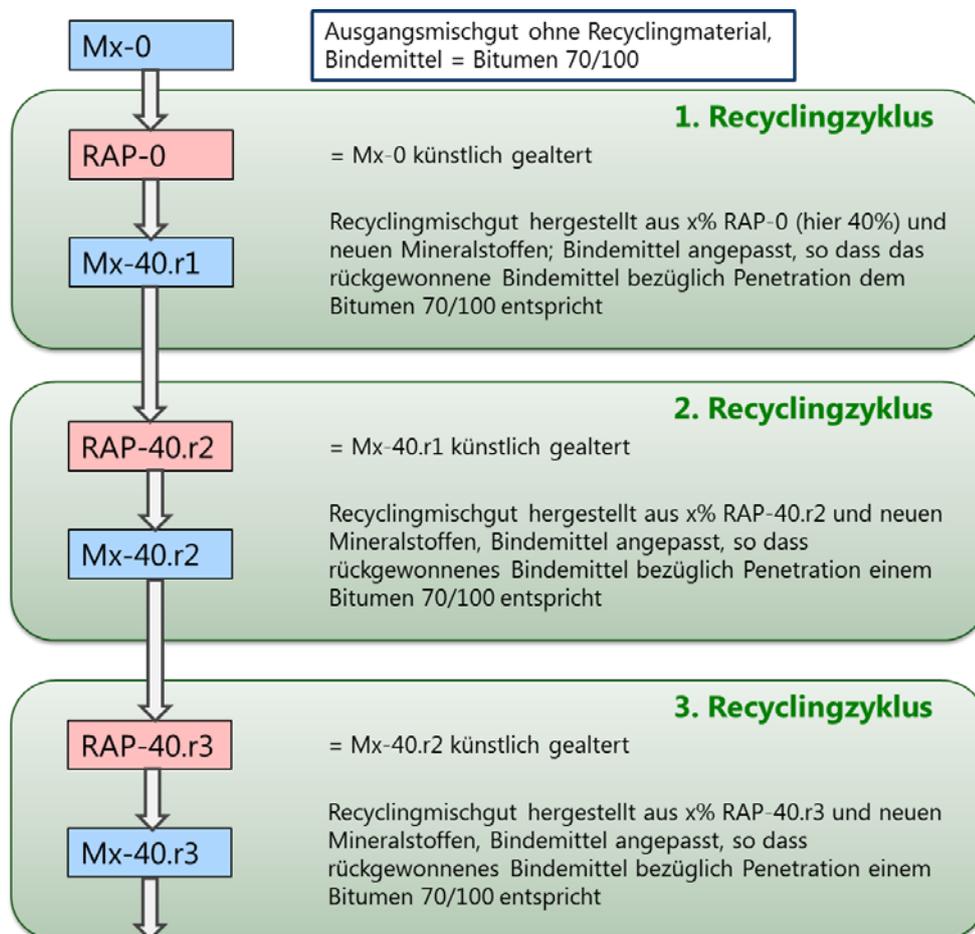


Abb. 3 Ablaufschema beim wiederholten Recycling zur Beurteilung der Bindemittelschädigung, dargestellt am Beispiel der Mischserie Mx-40 mit 40% RAP-Zugabe

Die weiteren Schritte unterschieden sich je nach Mischserie. Bei der Serie Mx-40 wurde mit 40% RAP-0 und identischen Mineralstoffen das neue Mischgut Mx-40.r1 hergestellt. Das Bindemittel im Mischgut wurde so eingestellt, dass die gleiche Penetration und der gleiche Bindemittelgehalt erhalten wurden. Die Berechnung ist im Kapitel 2.3.5 im Detail beschrieben. Dadurch können die Mischguteigenschaften von Mx-0 und Mx-40.r1 verglichen werden. Da die Mineralstoffe identisch sind und die Bindemittelhärtung ebenfalls so eingestellt wurde, dass die Penetration der Mischung Mx-0 entspricht, sollte eine Änderung der Mischguteigenschaften hauptsächlich durch eine Bindemittelschädigung hervorgerufen werden. Dieser Zyklus kann theoretisch unendlich oft wiederholt werden, wodurch sich die Bindemittelschädigungen mit der Zeit akkumulieren sollten.

Für die Beurteilung der Bindemittelalterung wurden die Bindemittel extrahiert und einerseits rheologisch mit dem Dynamic Shear Rheometer und andererseits spektroskopisch mittels FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) untersucht. Das gealterte Mischgut wurde mit den für den roten Faden festgelegte Prüfungen untersucht [1], sowie weiteren performance orientierten Versuchsmethoden (Kapitel 2.4).

2.3.1 Herstellung von künstlich gealtertem RAP

Die künstliche Alterung von Mischgut für die Herstellung von RAP ist schwierig und nicht normiert. Dies ist aber aufgrund der verschiedenen Klimaregionen und Belageigenschaften auch kaum möglich. Beispielsweise ist bekannt, dass ein hohlraumreicher Belag schneller altert als ein dichter Belag mit dem gleichem Bindemittel. Ebenso kann die Alterung des Bindemittels in einem kalten, nassen Klima kaum mit einer Alterung in einem heissen trockenen Klima verglichen werden. Für die Simulation im Labor sind die Methoden, die eine Beschleunigung der Alterung herbeiführen können, beschränkt. Meist wird dies durch eine Erhöhung der Temperatur herbeigeführt, da die chemischen Reaktionen, die eine Alterung des Bindemittels bewirken, bei höheren Temperaturen schneller ablaufen. Allerdings kann die Temperatur nicht beliebig erhöht werden, da der Reaktionsmechanismus der Bindemitteloxidation sich mit der Temperatur ändern kann und so zu einer anderen Alterungsart führt als bei tiefen Temperaturen.

Eine weitere Beschleunigung der Alterung kann durch Erhöhung der Sauerstoffkonzentration erreicht werden. Dies kann einerseits durch eine Erhöhung des Druckes und andererseits durch die Erhöhung des Sauerstoffanteils in der Luft herbeigeführt werden. Im Extremfall wird die Alterung in reiner Sauerstoffatmosphäre durchgeführt [10].

Oft wird für die Alterung von Mischgut gemäss AASHTO R30 durchgeführt [12]. Diese besteht aus einer Ofenalterung des losen Mischgutes für 4 h bei 135°C gefolgt von einer weiteren Ofenalterung der verdichteten Prüfkörper für 5 Tage bei 85°C. Diese Methode ist aber für die Herstellung grösserer Mengen an RAP ungeeignet, da die hergestellten Prüfkörper für die RAP-Herstellung wieder gebrochen werden müssen, was oft nicht erwünscht ist und einen grossen Aufwand beinhaltet. Deshalb wurde im Rahmen der Arbeiten der RILEM Arbeitsgruppe TC-ATB-TG5 ein Protokoll für die Herstellung von RAP vorgeschlagen [13]. Gemäss diesem Vorschlag erfolgt die Alterung nur an losem Mischgut im Ofen, zuerst 4 Stunden bei 135°C (Simulation der Kurzzeitalterung) und danach 9 Tage bei 85°C. Diese Alterung ist gegenüber der AASHTO-Methode deutlich stärker, was aber notwendig ist um RAP mit vergleichbaren Penetrationswerten wie in der Praxis zu erhalten. In einem Vorversuch wurde untersucht, ob mit dem Referenzmischgut Mx-0 und dem verwendeten Bitumen 70/100 die gewünschten RAP-Eigenschaften erhalten werden konnten. Dazu wurde das Mischgut Mx-0 bei verschiedenen Temperaturen unter verschiedenen Bedingungen gealtert. Insbesondere sollte auch geklärt werden, inwiefern andere Parameter wie Sauerstoffgehalt und Feuchtigkeit die Alterung beeinflussen.

2.3.2 Prüfserien

Als erstes war geplant, eine Recyclingserie gemäss rotem Faden, das heisst mit einem Recyclinganteil von 40% zu erstellen. In Abweichung zum roten Faden wurde jedoch nicht RAP der BERAG verwendet, sondern im Labor hergestelltes Material, da das Bindemittel im RAP nicht mit dem zugegeben Bitumen übereinstimmt und so einen zusätzlichen Parameter hinzufügen würde. Da gleich gilt für die Mineralstoffe, die im RAP nicht eindeutig definiert sind. Deshalb wird von der Referenzmischung Mx-0 ohne RAP ausgegangen, das wiederholt im Labor gealtert und rezykliert wird (Flussdiagramm *Abb. 3*).

Ein Teil des Mischgutes wird jeweils für Prüfungen verwendet, während der andere Teil zur Herstellung des künstlichen RAP's benötigt wird. Eine Probe des RAP wurde jeweils extrahiert und das rückgewonnene Bindemittel geprüft. Aus 40% RAP und 60% neuen

Mineralstoffen + Bitumen wurde wieder ein neues Mischgut produziert. Die Viskosität des Zugabebitumens wurde berechnet und dann aus dem Bitumen 70/100 und dem Bitumen 160/220 des roten Fadens zusammengemischt. Bei der Mischgutherstellung ist stark darauf zu achten, dass die Mischungen bezüglich Bindemittleigenschaften, Bindemittelgehalt und volumetrischen Eigenschaften möglichst identisch sind, damit der Effekt des Bindemittels nicht von abweichenden Mischguteigenschaften überdeckt wird.

2.3.3 Simulation der RAP-Alterung

Wird das Material eines Strassenbelages mehrfach rezykliert, ist dieses über mehrere Jahre dem Wetter ausgesetzt, wodurch vor allem beim Bindemittel eine Alterung in Form einer Verhärtung auftritt. Dies muss im Labor möglichst realistisch simuliert werden.

Die heute verwendeten Methoden für die Alterung am Mischgut sind nicht so genau definiert wie beim Bindemittel. In der Regel wird das Material auf einem Blech im Ofen bei gegebener Temperatur und Zeit gealtert. Dabei ist auch die Umwälzung im Ofen eine wichtige Grösse, da je nach geöffneter Klappe mehr oder weniger frische Luft neu einströmt und so den Sauerstoffgehalt im Ofen verändern kann.

Die Alterung kann durch verschiedene Parameter wie Temperatur, Druck, Sauerstoffgehalt und Zusatzstoffe beeinflusst werden. Bei grösseren Probemengen ist die Variation des Druckes nur mit aufwändigen Einrichtungen zu erreichen, weshalb in der Regel allein der Temperaturfaktor eingesetzt wird. Es sollte aber untersucht werden, ob eine Variation des Sauerstoffgehaltes der Luft einen Einfluss auf die Alterung des RAPs hat. Durch die Messung und Regelung des Luftsauerstoffgehaltes im Ofen soll die Alterung von Mischgut zudem besser reproduzierbar werden.

2.3.4 Vorversuch zur RAP-Herstellung

In Vorversuchen wurden die genauen Bedingungen für die künstliche Herstellung von RAP aus dem Mischgut Mx-0 bestimmt [50]. Für das RAP wurde ein ähnlicher Penetrationswert wie bei jenen der BERAG AG angestrebt, das heisst ein Wert um 30 [0.1 mm]. Ausserdem sollte der Frage nachgegangen werden, welche Faktoren abgesehen von Temperatur und Lagerdauer die Alterung beeinflussen können. In diesem Zusammenhang wurden die folgenden Parameter variiert:

- Temperatur (85, 100, 115°C)
- Sauerstoffgehalt (Luft trocken, Stickstoff, Flussrate)
- Luftfeuchtigkeit (Luft trocken x Luft wasserdampfgesättigt)
- Ofenvariante (Alterungsbox, Umluft-Trockenschrank)
- Tiefe der Alterung (obere und untere Schicht)

Tab. 2 Alterungsbedingungen im Vorversuch

Temperatur [°C]	Flussrate [l/min]	Schichtdicke [cm]	Alterungs- dauer [Tage]	Alterungsbedingungen
100	0.45	35	5	trockene Luft
85	0.45	35	8	trockene Luft
115	0.45	35	3	trockene Luft
100	4.5	35	5	trockene Luft
100	0.45	35	5	trockener Stickstoff
100	0.45	35	5	wassergesättigte Luft
100	offen	35	5	Standardalterung im Trockenschrank (ohne Box)
100	offen	80	5	

Für die Untersuchung wurde das Referenzmischgut Mx-0, (AC11 S des roten Fadens) ohne RAP verwendet. Die Alterung wurde in einer speziellen luftdichten Alterungsbox mit einem Volumen von etwa 10 Litern (Abb. 4) durchgeführt, die in einen temperierten Trockenschrank gestellt wurde (Abb. 6). In den Deckel wurden drei abgedichtete Öffnungen angebracht, je eine für die Zu- und Ableitung der Luft resp. Gases und ein weiterer für die Temperaturmessung. Die Luft wurde aus einer Druckflasche über eine durch den Ofen geheizte Kupferschlange in die Alterungsbox geführt. In der heissen Kupferschlange wurde die Luft der Druckflasche ausreichend erwärmt, damit die Mischgutprobe nicht durch die kühle Luft abgekühlt wurde. Die Flussrate wurde über einen Durchflussmesser eingestellt.



Abb. 4 Alterungsbox mit Mischgut Mx-0 gefüllt

Beim Versuch mit feuchter Luft wurde die Luft durch eine Fritte im Wasser, wodurch feine Bläschen gebildet wurden, gepumpt. Die Luft war danach bei Raumtemperatur mit Wasser gesättigt, was mit einem Feuchtigkeitssensor verifiziert wurde. Dies entspricht bei 100°C etwa einer relativen Feuchtigkeit von 4%.

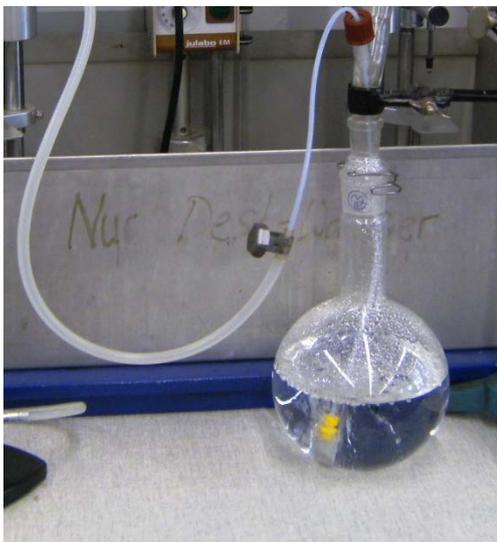


Abb. 5 Herstellung von wassergesättigter Luft

Eine Mischgutprobe von 6 kg wurde während 30 min im Ofen vorgewärmt und danach in einer 35 cm dicken Schicht in die Alterungsbox gefüllt. Vor der Alterung wurde eine Nullprobe entnommen. Danach wurden periodisch Proben von ca. 500 g Mischgut möglichst schnell entnommen und mit Toluol kalt extrahiert. Am rückgewonnenen Bindemittel wurden der komplexe Modul G^* mittels DSR und der Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt und die zeitliche Änderung graphisch aufgezeichnet.

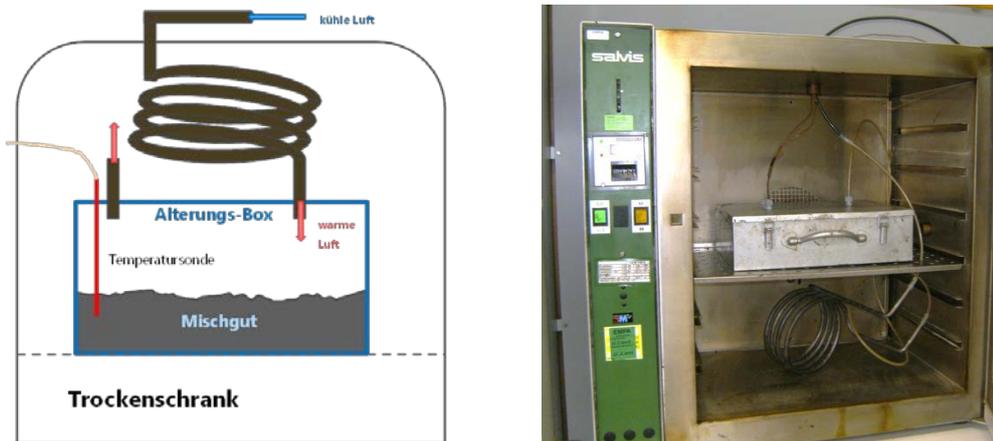


Abb. 6 Schematischer Versuchsaufbau (links) und die Alterungsbox mit Zuleitungen und Kupferschlange im Trockenschrank (rechts)

2.3.5 Berechnung des Zugabebindemittels

Ziel bei der Mischgutherstellung war, dass das Mischgut nach der Herstellung im Labor die gleiche Korngrößenverteilung und das rückgewonnene Bindemittel die gleichen Eigenschaften aufweist, unabhängig vom Anteil an zugegebenem RAP. Denn für den Vergleich der mechanischen Eigenschaften der Mischungen mit unterschiedlichem Recyclinganteil sollten diese in den anderen Eigenschaften möglichst ähnlich sein. Um bezüglich der Bindemittelleigenschaften möglichst die gleichen Werte zu erhalten, muss nach Bestimmung der Penetrationswerte des rückgewonnenen Bindemittels aus dem RAP die Menge und die Penetration des neuen Zugabebindemittels berechnet werden.

Für die Berechnung der Zielpenetration wurde die Standardformel (1) für das Mischen von Bitumen verwendet, die auf Penetrationswerten basiert [14]. Für nicht modifizierte Bindemittel kann auch eine Formel basierend auf dem Erweichungspunkt Ring und Kugel oder der Viskosität verwendet werden, da diese Werte bei einfachen Bitumen korrelieren. Zudem wird bei der Verwendung von RAP angenommen, dass sich das verhärtete Bindemittel des RAP vollständig mit dem Zugabebindemittel vermischt.

$$\log(P_M) = a \cdot \log(P_R) + b \cdot \log(P_B) \quad (1)$$

a, b [Masse-%]	Massenanteile des Bindemittels
P_M [0.1 mm]	Penetrationswert des vermischten Bindemittels im Mischgut
P_R [0.1 mm]	Penetrationswert des Bindemittels im RAP
P_B [0.1 mm]	Penetrationswert des Zugabebindemittels

Da das Bindemittel bei der Mischgutherstellung im Mischer und der nachfolgenden

Abkühlphase verhärtet, was oft als Kurzzeitalterung bezeichnet wird, wurde ein Alterungsfaktor f eingeführt, um dies zu berücksichtigen. Der Alterungsfaktor entspricht ungeführt der in der Norm definierten „Verbleibenden Penetration“ [27].

$$P_{g=} = f \cdot P_u \quad (2)$$

P_g [0.1 mm] Penetrationswert gealtert
 P_u [0.1 mm] Penetrationswert ungealtert

Durch Kombination von (1) und (2) ergibt sich für das gealterte Mischgut:

$$\log(P_{Mg}) = a \cdot \log(f_R \cdot P_R) + b \cdot \log(f_B \cdot P_B) \quad (3)$$

P_{Mg} [0.1 mm] Penetrationswert des Bindemittels im „gealterten“ Mischgut nach der Herstellung
 f_R [%] Alterungsfaktor des Bindemittels im RAP
 f_B [%] Alterungsfaktor des Bindemittels im RAP

Vereinfachend wird angenommen, dass die beiden Alterungsfaktoren unabhängig voneinander sind. Dies bedeutet, dass es keine Rolle spielt, ob zwei Bindemittel separat gealtert und danach vermischt werden oder ob die beiden Bindemittel zuerst vermischt und danach gemeinsam gealtert werden. Ob dies in allen Fällen zutrifft, ist allerdings nicht gesichert.

Durch Umformung von (4) wird der Penetrationswert des Zugabebindemittels erhalten:

$$\log(P_B) = \frac{\log(P_{Mg}) - a \cdot \log(f_R \cdot P_R) - \log(f_B)}{b} \quad (4)$$

Die Formel (3) kann auch auf weitere Bindemittel erweitert werden, was notwendig wird, wenn mehr als eine Bindemittelsorte für die Einstellung des Zielbitumens verwendet werden. Bei der Verwendung von Verjüngungsmitteln wurde die notwendige Zugabe analog berechnet, wobei die theoretische Penetration des Verjüngungsmittels durch Konzentrationsreihen berechnet wurde. Die Bezeichnung Penetrationswert ist allerdings irreführend, da dieser mit der Prüfmethode EN 1426 für Flüssigkeiten nicht bestimmt werden kann. Vielmehr ist dieser als Viskositätswert zu sehen, der aber bei nicht modifizierten Bitumen in einen virtuellen Penetrationswert umgerechnet werden kann.

$$\log(P_{Mg}) = a \cdot \log(f_R \cdot P_R) + b \cdot \log(f_B \cdot P_B) + c \cdot \log(f_V \cdot P_V) \quad (5)$$

c [Masse-%]: Masseanteil des Verjüngungsmittels bezüglich des Mischgutes
 P_V [0.1 mm]: virtueller Penetrationswert des Verjüngungsmittels
 f_V [%] Alterungsfaktor des Verjüngungsmittels

$$C = \frac{\log(P_{Mg}) - a \cdot \log(f_R \cdot P_R) - b \cdot \log(f_B \cdot P_B)}{\log(f_V \cdot P_V)} \quad (6)$$

2.4 Übersicht über die verwendeten Prüfmethode

Die folgenden Prüfmethode wurden durch den roten Faden vorgegeben, um sicherzustellen, dass die Resultate der verschiedenen Einzelprojekte miteinander verglichen werden können.

Tab. 3 Liste der vorgegebenen Prüfmethode

Prüfmethode	Normen	
Mischgutprüfungen		
Löslicher Bindemittelanteil	SN 670 401a	EN 12697-1 [15]
Korngrössenverteilung für Heissasphalt	SN 670 402a	EN 12697-2 [16]
Rohdichte Mischgut	SN 670 405a	EN 12697-5] [17]
Raumdichte	SN 670 406a	EN 12697-6 [18]
Hohlraumgehalt	SN 670 406a	EN 12697-6 [19]
Marshall-Stabilität und -Fließen	SN 670 430a	EN 12697-30 [20, 21]
Wasserempfindlichkeit	SN 670 412	EN 12697-12 [22]
Modulbestimmung mit Methode IT-CY	SN 670 426	EN 12697-26 [23]
Prüfungen am rückgewonnenen Bindemittel		
Rückgewinnung des Bindemittels aus der Extraktionslösung	SN 670 403a	EN 12697-3 [24]
Penetration	SN 670 511a	EN 1426 [25]
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN 670 512a	EN 1427 [26]
Penetrationsindex PI	SN 670 205	EN 12591 [27]

In Ergänzung zu den definierten Prüfmethode des roten Fadens wurden für die Mischgut-, Bindemittel- und Mineralstoffeigenschaften zusätzliche Prüfungen festgelegt, um bestimmte wichtige Eigenschaften zu bestimmen.

2.4.1 Zusätzliche Prüfungen am Mischgut

Kälteverhalten

Für das Verhalten bei tiefen Temperaturen wurde die Bestimmung des indirekten Zugversuchs bei -10°C durchgeführt [28]

Wärmeverhalten

Der Widerstand gegen Spurbildung wurde durch die dynamische Prüfung Druckschwellversuch bei 50°C [29] und in Einzelfällen durch den Spurbildungstest (Variante mit grossem Rad) bei 50°C [30] bestimmt.

Ermüdungsverhalten

Die Ermüdung eines Strassenbelages spielt sich im mittleren Temperaturbereich von etwa 10 bis 25°C ab. Als Prüfmethode wurde der Spaltzug-Schwellversuch bei 20°C durchgeführt [31].

2.4.2 Zusätzliche Prüfungen am Bindemittel

Rheologisches Verhalten

Für das rheologische Verhalten wurde in einigen Fällen der komplexe Modul mittels DSR bestimmt [32].

Alterungsverhalten

Für die Bestimmung der chemischen Alterung wurden Infrarotspektren mittels Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) gemessen [33].

2.4.3 Zusätzliche Prüfungen an den Mineralstoffen

Anteil gebrochen/rund

Der Anteil an gebrochenen, teilweise gebrochenen, teilweise runden und runden Gesteinskörnern wurde mittels EN 933-5 bestimmt [34].

Kantigkeit

Im Projektantrag war vorgesehen, die Kantigkeit durch die Bestimmung des Fließkoeffizienten zu bestimmen [35], da Untersuchungen des LAVOC gezeigt haben, dass dies eine wichtige Eigenschaft ist, insbesondere bezüglich der Neigung zur Spurrinnenbildung [44]. Es hat sich aber gezeigt, dass für diese Prüfung zu grosse Mengen an Mineralstoffen benötigt werden, zudem hat eine neue Studie [36] gezeigt, dass der Fließkoeffizient stark von der Korngrößenverteilung abhängt. Aus diesen Gründen wurde auf die Bestimmung dieser Eigenschaft verzichtet.

Einige der weniger bekannten Prüfmethoden werden im Folgenden kurz beschrieben.

2.5 Kurzbeschreibung der Prüfmethoden

2.5.1 Modulbestimmung mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR)

In der Regel wird für die Modulbestimmung an Bindemitteln mittels DSR ein Platte-Platte-Messsystem verwendet mit Platten von 8 mm (tiefe Temperaturen) und 25 mm Durchmesser (hohe Temperaturen) mit einem Plattenabstand zwischen 1 und 2 mm. Da die Temperatur einen grossen Einfluss auf die rheologischen Eigenschaften von Bitumen hat, erfolgt die Messung in einem temperierten Medium wie Wasser oder Luft mit einer Temperaturgenauigkeit von $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Je nach Bindemittelsorte wird die Bindemittelprobe mit unterschiedlichen Dehnungsamplituden (Auslenkungen) in der Größenordnung von 1% auf Torsion beansprucht.

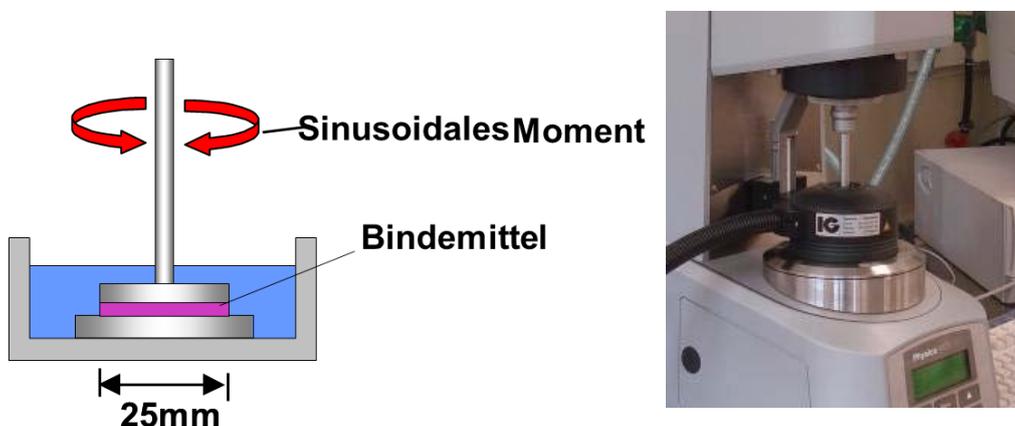


Abb. 7 Prinzip der Bestimmung rheologischer Kennwerte mittels Platte-Platte-System (links) mittels DSR (rechts)

Mit dem DSR lassen sich für Bindemittel wichtige viskoelastische Kenngrössen, z.B. der komplexe Schubmodul G^* und der Phasenwinkel δ , sowie die abgeleiteten Grössen Speichermodul G' und Verlustmodul G'' bestimmen.

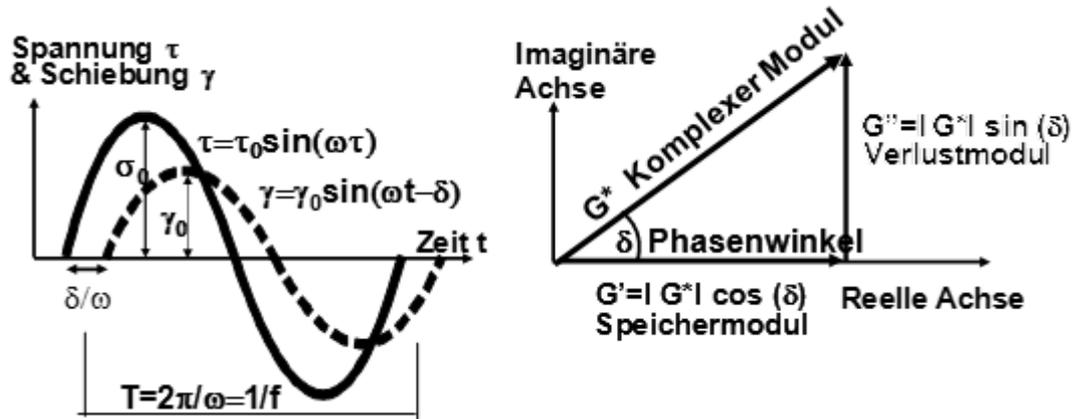


Abb. 8 Viskoelastische Kenngrössen bei oszillierender Beanspruchung

Speichermodul (elastischer Modulanteil)

$$G' = G^* \cdot \cos(\delta) \quad [\text{N/mm}^2]$$

Verlustmodul (viskoser Modulanteil)

$$G'' = G^* \cdot \sin(\delta) \quad [\text{N/mm}^2]$$

Komplexer Modul (absoluter Modul):

$$G^* = |\tau| / |\gamma| = \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

Phasenwinkel

$$\delta = \arctan(G''/G')$$

Schwingungsviskosität

$$\eta' = G''/\omega, \text{ mit der Kreisfrequenz } \omega$$

Nach dem Prinzip der Zeit-Temperatur-Superposition lassen sich für thermorheologisch einfache Materialien sogenannte Masterkurven berechnen, da das Verhalten des Bindemittels bei hohen Temperaturen und hohen Frequenzen ähnlich ist wie bei tiefen Temperaturen und tiefen Frequenzen. So lassen sich die Bindemittleigenschaften über ein grosses Frequenzspektrum beschreiben.

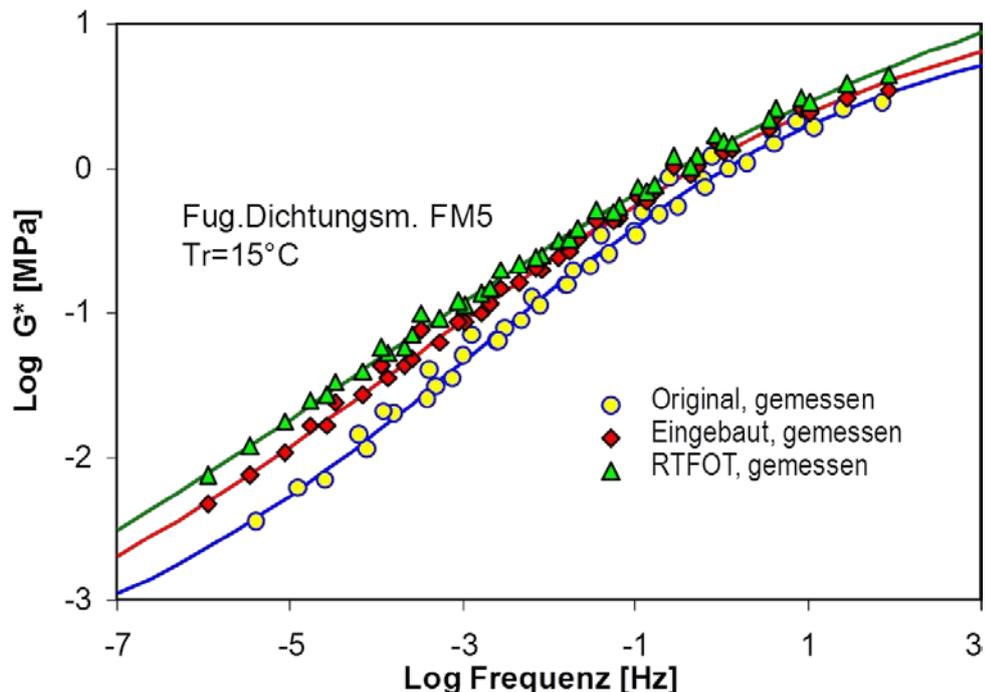


Abb. 9 Beispiel einer Masterkurve

2.5.2 Fourier-Transform Infrarot-Spektroskopie (FTIR)

Die Infrarotspektroskopie basiert auf einem physikalisches Analyseverfahren, das mit infraroter Strahlung im Bereich von 2.5 bis 25 μm arbeitet. Historisch bedingt wird als Einheit in der Regel die Wellenzahl in cm^{-1} verwendet, also in einem Bereich von 4000 – 400 cm^{-1} . Durch das infrarote Licht werden die einzelnen Atome in einem Molekül zu Schwingungen angeregt. In alten Geräten wurde die Probe mit monochromatischem Licht geschannt, indem der gewünschte Frequenzbereich abgefahren wurde und die Absorption als Funktion der Wellenlänge gemessen wurde. Bei der Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie wird die Probe hingegen gleichzeitig mit verschiedenen Frequenzen bestrahlt und das Spektrum danach rechnerisch durch eine Fouriertransformation erhalten. Dies reduziert die Messzeit beträchtlich und ergibt zudem ein besseres Signal/Rausch-Verhältnis.

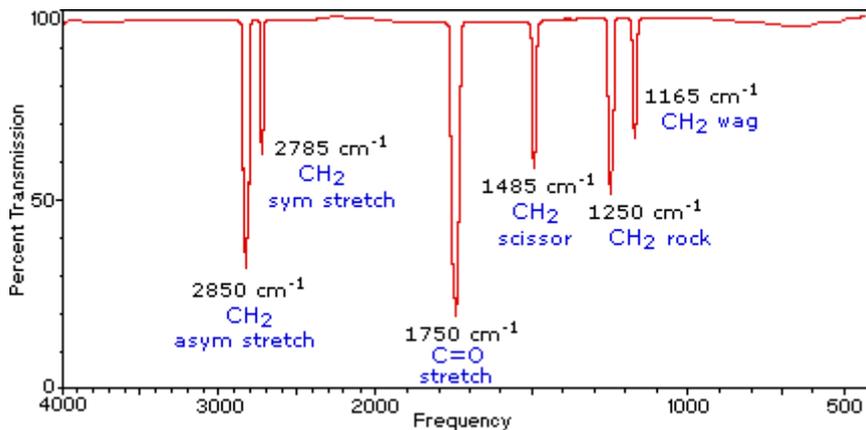


Abb. 10 Infrarotspektrum von Formaldehyd ($\text{CH}_2=\text{O}$) als Beispiel eines sehr einfachen symmetrischen Moleküls mit nur wenigen Schwingungsarten [37]

Für typische Atomkompositionen, in der Chemie als funktionale Gruppen bezeichnet, gibt es abhängig von den chemischen Elementen charakteristische Schwingungsmuster mit festen Frequenzbändern. Carbonyl-Gruppen ($\text{C}=\text{O}$) absorbieren um 1700 cm^{-1} , C-H-Streckschwingungen sind oberhalb 2800 cm^{-1} zu finden, während andere C-H-Schwingungsarten (rock, wag scissor) zwischen 700 und 1500 cm^{-1} auftreten. Durch die Vielzahl an Schwingungsarten und Atomkombinationen tritt eine starke Überlappung der einzelnen Schwingungen auf, was in entsprechend unscharfen Spektren resultiert. Dennoch liefern Infrarotspektren bei einfachen Molekülen wichtige Informationen und sind für chemische Substanzen charakteristisch wie menschliche Fingerabdrücke. Bei Stoffgemischen wie Bitumen wird es jedoch zu komplex und es können nur noch sehr charakteristische Schwingungen, die nur von wenig anderen Schwingungsarten überdeckt sind, gewisse Informationen liefern. Bei Bitumen, einem Gemisch zahlreicher Kohlenwasserstoffverbindungen, lassen sich hierzu die Streckschwingung der C=O-Doppelbindung bei 1700 cm^{-1} und die S-O-Streckschwingung bei 1050 cm^{-1} nutzen, um den Oxidierungsgrad abzuschätzen (Abb. 38) [47-49]. Allerdings sind in der Regel nur relative Vergleiche desselben Bindemittels sinnvoll, ein Vergleich unterschiedlicher Bitumen kann irreführende Resultate ergeben.

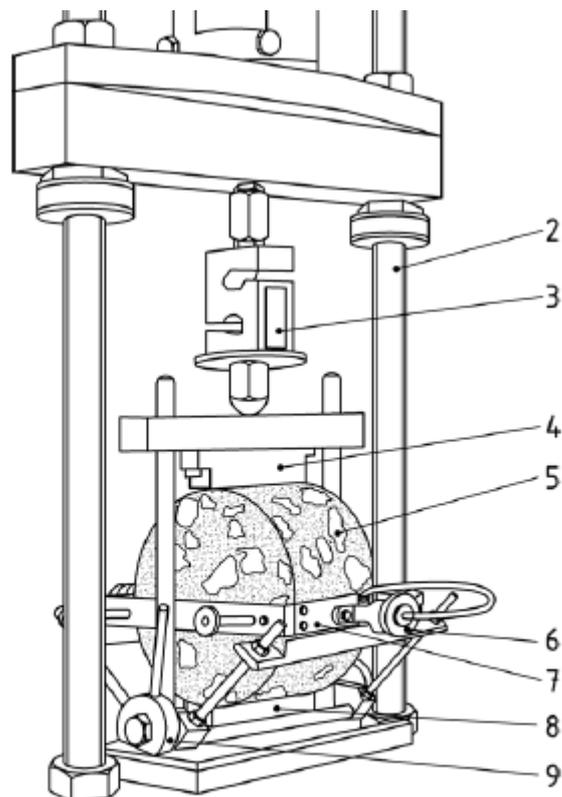
2.5.3 Wasserempfindlichkeit

Mit der Prüfung „Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern“ nach den Normen SN 670 412-NA und EN 12697-12 [22] wird der Einfluss der Wassersättigung und der Lagerung von Marshall-Prüfkörpern bei 40°C auf die indirekte Zugfestigkeit gemessen. Die indirekten Zugfestigkeiten der Prüfkörper mit und ohne Wasserlagerungen werden nach den Normen SN 670 423-NA und EN 12697-23 bei 22°C bestimmt [28]. Die Wasserempfindlichkeit ITSr ist das Verhältnis der indirekten

Zugfestigkeit der Prüfkörper mit Wasserlagerung zu derjenigen der Prüfkörper ohne Wasserlagerung. Mit dieser Prüfung wird vor allem der Einfluss von Wasser auf die Eigenschaften der Mineralstoffe bewertet. In der Reihe der Normen SN 640 431 [46] sind für die verschiedenen Mischgutsorten ITSr-Werte von mindestens 70% gefordert.

2.5.4 Steifigkeitsmodul bei 10, 20 und 30°C

Für die Bestimmung des Steifigkeitsmoduls sind verschiedene Methoden in der EN 12697-26 normiert [23]. Aufgrund der einfachen Durchführung wurde die Variante IT-CY ausgewählt. Sie verwendet zylindrische Prüfkörper von 100 oder 150 mm Durchmesser, die zyklisch mit Impulsen von 0.25 s Länge, gefolgt von Lastpausen von 2.75 s, belastet werden. Da die Prüfung den Prüfkörper nicht beschädigen sollte, sind die Belastungen klein und kurz. Der Mittelwert aus 5 Zyklen wird für die Berechnung des Steifigkeitsmoduls verwendet.



Legende

1	Pneumatisches Laststellglied	6	LVDT-Einstellelement
2	Belastungsrahmen aus Stahl	7	LVDT-Einbaurahmen
3	Kraftmessdose	8	Unterer Druckstreifen
4	Oberer Druckstreifen	9	LVDT-Justiervorrichtung
5	Probekörper		

Abb. 11 Prüfeinrichtung für den indirekten Zugversuch IT-CY gemäss EN 12697-26

Im Forschungsprojekt wurden Marshall-Prüfkörper verwendet und bei 3 Temperaturen 10, 20 und 30°C geprüft. Der Temperaturbereich ist eingeschränkt, da bei höheren Temperaturen der Prüfkörper zu weich ist und plastische permanente Deformationen auftreten. Bei tiefen Temperaturen hingegen wird der Prüfkörper zu hart und die für die geforderte horizontale Verformung von 0.05 ‰ bis 0.10 ‰ notwendigen Kräfte zu hoch. In diesem Forschungsprojekt wurden kleine Abweichungen von der Prüfmethode angewendet, die primär die Verwendung von Original-Marshallprüfkörpern von 60 mm Höhe beinhaltet. Gemäss deutscher Anleitung sind die Prüfkörper von 100 mm Durchmesser auf eine Höhe von 40 cm zu schneiden. Da jedoch primär die verschiedenen Mischungen untereinander verglichen werden, ist die grössere Dicke vor

allem für die grobkörnigeren Mischgutsorten idealer, weil für alle Mischgutsorten Marshall-Prüfkörper verwendet wurden.

2.5.5 Druckschwellversuch bei 50°C

Beim einaxialen Druckschwellversuch [29] wird ein planparallel geschliffener Prüfkörper mit einem zylindrischen Stempel einer Druck-Schwell-Belastung unterzogen. Der haversineförmigen, relativ kurzzeitigen Belastung (Oberlast von 0,35 MPa) von 0.2 Sekunden folgt eine deutlich längere Lastpause von 1.5 Sekunden, in welcher nur die Schwell-Belastung (Unterlast von 0.025 MPa) aufgebracht wird. Standardmässig wird die Prüfung bei einer Temperatur von 50°C durchgeführt.

Der Druckschwellversuch wurde durchgeführt nach der Technischen Prüfvorschrift für Asphalt, TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1, „Einaxialer Druckschwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme“, Ausgabe 2010 [29].

Beim Druckschwellversuch wird in der Verformungskurve die Steigung der Kurve im Wendepunkt als Hauptkriterium zur Beurteilung der Verformbarkeit ermittelt (Abb. 12). Die Prüfung wird spätestens nach 10 000 Lastzyklen beendet, sofern nicht bereits vorher der Wendepunkt erreicht wird. Je steiler die Kurve verläuft, desto höher ist die Verformung und desto schneller versagt der Prüfkörper [38].

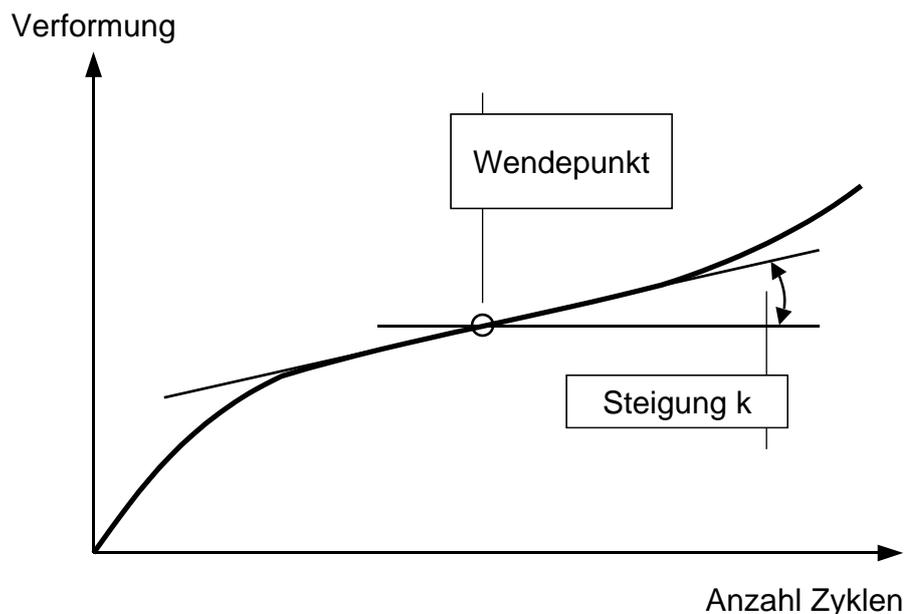


Abb. 12 Bestimmung der Steigung im Wendepunkt einer typischen Verformungskurve im Druckschwellversuch

2.5.6 Spurbildungstest bei 50°C

Für die Beurteilung der permanenten Verformung bei hohen Temperaturen wurde das Mischgut im Teil Mineralstoffschädigung mittels Spurrinnenprüfungen gemäss EN 12697-22 geprüft [30]. Diese können als Ergänzung zu den Druckschwellversuchen angesehen werden, da sie bei der gleichen Temperatur von 50°C geprüft werden. Für den Deckbelag AC 11 S wurden Prüfkörper von 5 cm Dicke verwendet und bei der Tragschicht war die Dicke 10 cm. Für die Spurbildungsprüfung werden jeweils parallel zwei Prüfkörper im Spurrinentester bei 50°C geprüft. Nach einer Nullmessung werden die relativen Spurbildungstiefen, das heisst die absolute Spurrinentiefe in Prozent der Prüfkörperdicke, zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen und graphisch dargestellt.

Massgebend ist der Mittelwert der Spurrinntentiefe nach 10000 Zyklen beim Deckbelag und nach 30000 Zyklen bei der Tragschicht. Aufgrund des hohen Materialbedarfs für die beiden Prüfkörper, konnten für die Beurteilung der Bindemittelschädigung keine Spurrinnenprüfungen durchgeführt werden. Zur Beurteilung der permanenten Verformung wurden dort nur Druckschwellversuche durchgeführt.

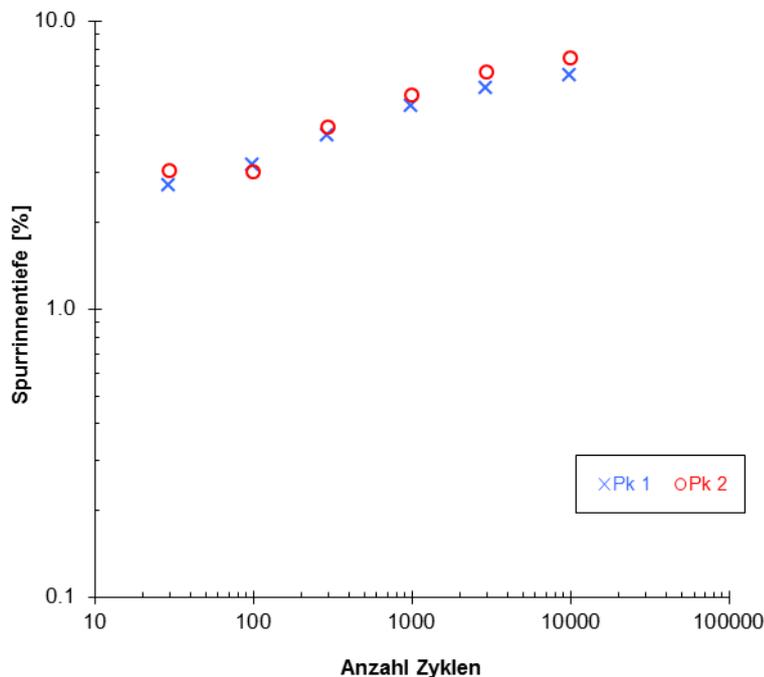


Abb. 13 Resultate des Spurrinntentest an einem Deckbelag AC 11 S

2.5.7 Spaltzug-Schwellversuch bei 20°C (Ermüdung)

Die Ermüdungsprüfung simuliert die wiederholte Belastung des Verkehrs, die mit der Zeit durch die zahlreichen kleinen Belastungen der Fahrzeuge zu einem Versagen führen. Die Bestimmung der Ermüdungsempfindlichkeit von Belagsschichten kann mit unterschiedlichen Prüfmethoden durchgeführt werden. Einige davon sind in der europäischen Prüfnorm 12697-24 [39] beschrieben, darunter die Zweipunktbiegung an trapezförmigen Prüfkörpern, Zwei-, Drei- und Vierpunktbiegung an prismatischen Prüfkörpern und die indirekte Zugprüfung an zylindrischen Prüfkörpern. Jede dieser Prüfungen hat ihre Vor- und Nachteile, die beispielsweise in [40, 41] diskutiert wurden. Die erhaltenen Resultate können in der Regel nicht direkt verglichen werden, da die Ermüdung im Gegensatz zum Steifigkeitsmodul keine physikalische Eigenschaft des Materials darstellt. Durch die unterschiedlichen Formen der Prüfkörper und Belastungen ergeben sich unterschiedliche Arten des Versagens. Die Ermüdungsprüfungen sind sehr anspruchsvoll, insbesondere an die Prüfeinrichtung, da sehr kleine Belastungen mit hoher Präzision aufgebracht und die resultierend Verformung gemessen werden müssen. Insbesondere die Vierpunktbiegung ist durch die vielen erforderlichen Lager, die auch bei höchster Qualität ein gewisses Spiel aufweisen, oft mit Fehlern behaftet.

Für dieses Projekt wurde der Spaltzugschwellversuch anstelle der ursprünglich vorgeschlagenen Vierpunktbiegung gewählt, da dieser Versuch inzwischen durch einen Ringversuch mit Deutschland validiert werden konnte [42]. Er ist inzwischen als Variante der indirekten Zugprüfung der EN 12697-24:2012 [39] europäisch zugelassen, mit dem Unterschied, dass für die Belastung eine kontinuierliche Sinusfunktion verwendet wird, anstelle eines Haversine-Impulses mit einer Ruhephase. Zudem bietet er bezüglich Probenherstellung und -vorbereitung verschiedene Vorteile, da zylindrische Prüfkörper verwendet werden können. Es hat sich gezeigt, dass durch die Einfachheit der Prüfeinrichtung gut reproduzierbare Resultate erhalten werden können. Da es sich nicht um eine Biegeprüfung handelt, sondern um eine indirekte Zugbelastung ohne

Druckbelastung, sind die erhaltenen Resultate nicht direkt mit jenen der Biegeprüfung zu vergleichen. Allerdings liefern auch die klassischen Biegeprüfungen keine Versagensgrenzen, die direkt für die Dimensionierung übernommen werden können. Die Resultate müssen immer mit Felddaten kalibriert werden, woraus ein Shift-Faktor für die jeweilige Prüfung berechnet werden kann, der die Resultate aus den Feldversuchen mit den Laborversuchen korreliert.

In der Regel werden mehrere Prüfkörper bei verschiedenen Laststufen geprüft. Dabei muss ein Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit gemacht werden. Deshalb werden oft drei unterschiedliche Laststufen mit 3-4 Prüfkörpern durchgeführt. Dabei wird die kleinste Belastung so gewählt, dass der Prüfkörper nach etwa einer Million Zyklen versagt und bei der grössten Belastungsamplitude mindestens 1000 Zyklen durchhält. Auch die Auswertung ist nicht einheitlich geregelt, wobei 50%-Verlust des Anfangsmoduls oft als Versagensgrenze gewählt werden. Allerdings ändert das Steifigkeitsmodul am Anfang sehr stark, was einen entsprechend grossen Einfluss auf die Versagensgrenze hat. Ein anderer Ansatz wird in der deutschen Anleitung gewählt, wo das Maximum der Energy-Ratio (ER) als Produkt von Zyklenzahl und Steifigkeitsmodul verwendet wird. Dies hat den Vorteil dass die Kurve am Anfang genau definiert ist, da sie durch den Nullpunkt verläuft. Durch eine Polynomfunktion 4. Grades kann diese Kurve in der Regel sehr gut angenähert werden und das Maximum entsprechend gut bestimmt werden. Die Prüfmethode ist sehr detailliert in der deutschen Arbeitsanleitung beschrieben [31].

2.5.8 Indirekter Zugversuch bei -10°C

In der Europäischen Norm gab es bis vor kurzem keine Methode, um die Tieftemperatureigenschaften zu prüfen. Im Jahr 2012 wurde die EN 12697-46 eingeführt, die fünf Prüfvarianten enthält [43]. In Deutschland wurde ein Verfahren für die Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften entwickelt, das aber sehr aufwändig ist. Drei Prüfmethoden der EN 12697-46 müssen dazu durchgeführt werden, die teilweise die Verwendung von hochpräzisen Spindelmaschinen voraussetzen. Da die Empa nur mit hydraulischen Universalprüfmaschinen ausgerüstet ist, konnten die verlangten drei Prüfungen nicht durchgeführt werden. Ausserdem waren für die Tieftemperaturprüfungen nicht so grosse finanzielle Mittel reserviert worden, weil davon ausgegangen wurde, dass eine Prüfmethode für die Kälteeigenschaften ausreichend ist. Daher wurde die Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften nach Rücksprache mit der Begleitkommission mittels indirektem Zugversuch [28], der auch für die Wasserempfindlichkeit verwendet wird, bei einer Temperatur von -10°C durchgeführt.

2.6 Mischgutherstellung

2.6.1 Berechnen der Mischgutarezepturen

Für die Bestimmung der Bindemittelschädigung wurde das Mischgut AC 11 S des roten Fadens, aber ohne RAP als Referenz verwendet. Die anderen Mischgutsorten wurden so rezeptiert, dass die Mineralstoffzusammensetzung, Bindemittelgehalt und Bindemittelhärte gleich blieben. Für die Berechnung der Anteile der verschiedenen Fraktionen an Splitt, Sand und RAP wurde ein EXCEL-Programm erstellt. Dieses berechnete auch den Anteil und den Penetrationswert des Zugabebindemittels unter der Annahme, dass sich das Zugabebindemittel vollständig mit dem Bindemittel des RAP vermischt. Um die berechnete Viskosität des Bindemittels (Penetrationswert) genau einstellen zu können, wurden zwei Bitumen unterschiedlicher Härte eingesetzt.

2.6.2 Herstellung mit Labormischer

Wie in der Ausschreibung zum Auftrag festgelegt, wurden die einzelnen Mischgutsorten im Labor hergestellt. Der eingesetzte Labormischer der Empa hatte eine Kapazität bis 150 kg Mischgut. Für diesen Forschungsauftrag wurden in der Regel Mischungen von 75 bis 150 kg nach folgendem, für die einzelnen Ausgangsmaterialien gestaffeltem

Vorgehen hergestellt. Die Mineralstoffe wurden über Nacht auf die Zieltemperatur aufgeheizt. Weil das RAP teilweise nass war, wurde dieses nach dem Herunterteilen auf Chargen von 30 kg über mehrere Tage offen bei Raumtemperatur oder 2 Tag im Ofen bei 30°C getrocknet. Vor dem Mischen wurde das RAP innerhalb von 3 Stunden auf eine Temperatur von 130±5°C erwärmt. Das Bitumen, in Gebinden von jeweils 5 kg entnommen, wurde während 5.5 Stunden auf eine Temperatur von 130°C erwärmt. Bei der Verwendung von Verjüngungsmittel wurde dieses kalt in das heisse Bitumen gegeben und danach gut umgerührt. Der Mischer wurde auf die Mischtemperatur erwärmt, anschliessend mit den heissen Mineralstoffen beschickt, danach das RAP und schliesslich das Bindemittel zugegeben. Die anschliessende Mischzeit betrug 3 Minuten. Der ganze Mischprozess von der Zugabe der Mineralstoffe bis zum Ausleeren des Mischgutes dauerte 10 - 15 Minuten. Das Mischgut wurde darauf für das Homogenisieren umgeschichtet und danach auf verschiedene Kartonschachteln verteilt. Das abgekühlte Mischgut wurde bis zur Herstellung der Prüfkörper gelagert und für die Herstellung der Marshallprüfkörper im Ofen ein zweites Mal erwärmt, da Mischungen von 75 bis 150 kg zu gross waren, um daraus sofort Prüfkörper herzustellen und alle Prüfungen durchzuführen. Das zweite Aufwärmen für die Prüfkörperherstellung entspricht aber einer ähnlichen Wärmebelastung wie die nach der Herstellung des Mischgutes zusätzliche Lagerzeit von 50 Minuten bei 135°C, wie dies durch das LAVOC im EP-5 praktiziert wurde [5].

Alle Herstellungen der einzelnen Mischgut-Sorten im Labor der Empa simulieren das Recycling durch Warmzugabe, wie sie in einer Aufbereitungsanlage mit herkömmlicher Recycling-/Paralleltrommel durchgeführt werden. Die Mischprozeduren im Labor und in der Mischanlage unterscheiden sich aber in verschiedenen Punkten. In der Mischanlage werden Zwangsmischer mit hoher Energie verwendet, die Mischzeiten von weniger als einer Minute ermöglichen. Auch die Erwärmung der Komponenten ist unterschiedlich. Das Bindemittel wird heiss gelagert und muss nicht speziell erwärmt werden. Mineralstoffe und RAP werden separat in rotierenden Trommeln erwärmt und teilweise heiss gelagert. Diese Prozesse können im Labor nicht genau simuliert werden, wodurch Abweichungen in den Mischguteigenschaften zwischen Labormischung und Anlagemischung auftreten können.

Die Ausgangsmaterialien wurden in der Aufbereitungsanlage BERAG AG entnommen. Die Entnahme der Mineralstoffe erfolgte nach der Trocknung und Reklassierung in die Fraktionen 0/2, 2/4, 4/8, 8/11, 11/16, 16/22 und Rückgewinnungsfüller. Die in der Aufbereitungsanlage entnommenen Mineralstoffe und alle RAP-Materialien wurden an der EMPA systematisch in gleichmässige, möglichst homogene Teilproben von ca. 20 kg heruntergeteilt.

2.7 Roter Faden

Der Projektleitung war es ein grosses Anliegen, die Resultate der einzelnen Projekte des Forschungspaketes vergleichen zu können. Um dies sicherzustellen, wurde einerseits das Ausgangsmaterial, das für die meisten Laborversuche verwendet wurde, von der BERAG Belagslieferwerk Rubigen AG aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Zweitens wurde ein identisches Mischgut der BERAG AG von allen beteiligten Forschungsstellen untersucht und auch im Labor hergestellt. Damit sollten Abweichungen in den Verfahren aber auch durch Personal und Prüfgeräte erkannt und korrigiert werden.

2.7.1 Ausgangsmaterialien

Tab. 4 Bezeichnung der Ausgangsmaterialien der BERAG AG

Code	Beschreibung
Min1	Füller BERAG
Min2	Mineralstoffe BERAG Fraktion 0/2
Min3	Mineralstoffe BERAG Fraktion 2/4
Min4	Mineralstoffe BERAG Fraktion 4/8
Min5	Mineralstoffe BERAG Fraktion 8/11
Min6	Mineralstoffe BERAG Fraktion 11/16
Min7	Mineralstoffe BERAG Fraktion 16/22
Bit1	Bitumen 160/220
Bit2	Bitumen 70/100
RAP1	Recycling-Asphalt-Granulat RAP A 0/11 (nur für roten Faden verwendet)
RAP2	Recycling-Asphalt-Granulat RAP A 11/22 (in EP2 nicht verwendet)

2.7.2 Charakterisierung der Gesteinskörnungen

Der Füller und die Mineralstoffe weisen folgende Korngrößenverteilungen auf.

Tab. 5 Korngrößenverteilung der Mineralstoffe

Code	Min1	Min2	Min3	Min4	Min5	Min6	Min7
Fraktion	Füller	0/2	2/4	4/8	8/11	11/16	16/22
Prüfsieb [mm]	Siebdurchgang [Masse-%]						
22.4							100
16.0					100	97	18
11.2				100	85	18	2
8.0				90	10	3	1
5.6			100	32	2	2	1
4.0		100	90	3	2	1	1
2.0		90	4	0.7	1.4	0.8	0.5
1.0		63	1	0.6	1.1	0.8	0.5
0.5		41	1	0.6	1.0	0.7	0.5
0.25	100	19	1	0.6	0.8	0.7	0.5
0.125	98	9	1	0.6	0.7	0.7	0.5
0.063	80	8	1	0.5	0.6	0.6	0.5

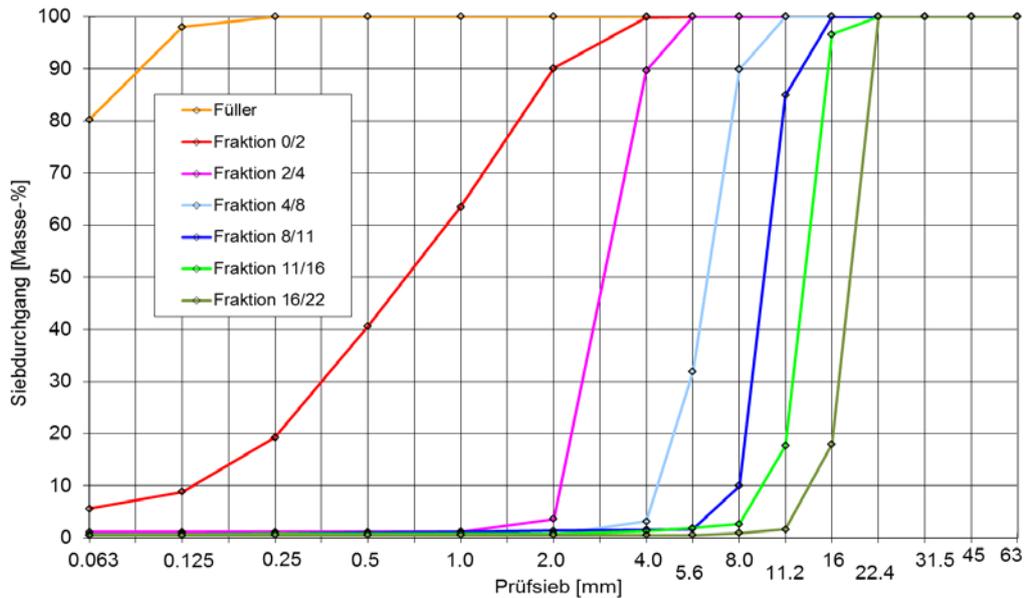


Abb. 14 Mineralstoffe, graphische Darstellung der Korngrössenverteilungen

Im Labormischer werden gegenüber im Mischer einer Aufbereitungsanlage nur kleine Chargen hergestellt. Total 7 Proben RAP2, die für Labormischungen vorgesehen waren, wurden untersucht, eine bei der Eingangskontrolle durch die Empa, 6 zusätzliche zu einem späteren Zeitpunkt durch die Tecnotest AG anlässlich der Herstellung der Mischgut im Labor.

Diese Kontrollen an RAP2 haben aufgezeigt, dass die Streuungen in der Zusammensetzung gross sind, obwohl das RAP mittels Probeteilern sorgfältig auf 30 kg Chargen heruntergeteilt wurde. Insbesondere trifft dies in der Korngrössenverteilung und im Bindemittelgehalt zu, deutlich weniger jedoch in den Bindemittelleigenschaften. Es ist anzunehmen, dass die Streuungen in den RAP1- und RAP2-Anteilen eine wesentliche Ursache für die grosse Anzahl an Fehlmischungen beim Herstellen der Labormischungen gewesen sein dürften.

2.7.3 Vergleich der beteiligten Labors

Zum Start des Forschungspakets „Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut“ wurde ein als roter Faden bezeichnetes Mischgut AC 11 S mit 40% RAP1 in der BERAG, Belagslieferwerk Rubigen AG aufbereitet. Je eine Mischgutprobe wurde von den mit den Einzelprojekten betrauten prüfenden Labors untersucht - Empa Dübendorf, Tecnotest AG Rüslikon sowie LAVOC Lausanne - und die Ergebnisse verglichen (Tab. 6-8).

Bei den Mischgut-Eigenschaften und der Wasserempfindlichkeit resultierten in allen drei Labor sehr gute Übereinstimmungen. Die Anforderungen der Normen an die zulässigen Standardabweichung σ_R der Vergleichbarkeiten sind mit zwei Ausnahmen erfüllt.

Die eine Ausnahme betrifft die Penetration der Bindemittel mit σ_R von 2 gegenüber der maximal zulässigen Standardabweichung σ_R von 1.5. Dazu ist aber zu bemerken, dass alle in den letzten Jahren durchgeführten Ringanalysen an rückgewonnenem Bindemittel ebenfalls deutlich grössere Standardabweichungen σ_R ergaben und dass folglich die Grenzen der Normanforderung zu eng sind.

Die zweite Ausnahme betrifft einzelne Siebdurchgänge der Mineralstoffe. In der Norm EN 12697-2 ist für alle Durchgänge keine Anforderung sondern lediglich eine geschätzte Standardabweichung σ_R von 0.6 angegeben. In den Durchgängen bei den Prüfsieben 4.0 bis 8.0 mm resultierten etwas grössere Standardabweichung σ_R von 1.0 bis 2.2. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Standardabweichung σ_R kaum über den

gesamten Bereich konstant ist, da bei den grösseren Siebweiten die absoluten Durchgänge auch wesentlich grösser sind, als bei den kleinen.

Tab. 6 AC 11 S der BERAG mit 40% RAP1 (Mischung roter Faden): Mischgut-Eigenschaften

Mischgut geprüft bei Mischgut hergestellt bei		Empa BERAG	Tecnot BERAG	LAVOC BERAG	Mittel BERAG	Stabw. σ _R	Norm σ _R
Bindemittelgehalt	Masse-%	6.10	5.98	5.87	5.98	0.09	0.15
Penetration	0.1 mm	51	47	52	50	2	1.5
Erweichungspunkt RuK	°C	51.6	53.8	52.2	52.5	0.9	1.75
Penetrationsindex	-	-0.8	-0.4	-0.6	-0.6	0.2	-
Raumdichte	kg/m ³	2381	2381	2387	2383	2.8	8.2
Rohdichte-Mischgut	kg/m ³	2443	2443	2467	2451	11.3	15
Hohlraumgehalt	Vol.-%	2.5	2.5	3.2	2.7	0.3	0.8
Hohlraumgehalt VMA	Vol.-%	16.6	16.3	16.8	16.6	0.2	-
Hohlraumfüllungsgrad	%	84.8	84.8	80.9	83.5	1.8	-
Marshall Stabilität	kN	9.7	11.5	9.0	10.1	1.1	-
Marshall Fliesen	mm	2.9	3.2	3.5	3.2	0.2	-
Siebdurchgang	Masse-%						
Prüfsieb [mm]							
16.0		100.0	100.0	100.0	100.0		
11.2		99.5	98.2	98.7	98.8	0.5	0.6*
8.0		85.5	82.9	80.1	82.8	2.2	0.6*
5.6		67.8	66.9	64.2	66.3	1.5	0.6*
4.0		55.8	55.1	53.5	54.8	1.0	0.6*
2.0		35.9	34.9	34.8	35.2	0.5	0.6*
1.0		24.4	23.7	-	24.0	0.4	0.6*
0.5		18.6	17.6	17.8	18.0	0.4	0.6*
0.25		14.2	13.2	13.4	13.6	0.4	0.6*
0.125		10.9	10.0	10.1	10.3	0.4	0.6*
0.063		8.4	8.2	7.8	8.1	0.2	0.6*
Wasserempfindlichkeit							
ITSR	%	97	106	95	99	5	-
ITS trocken	kPa	960	873	1051	961	73	-
IST nass	kPa	928	929	1002	953	35	-

* Angabe der Norm EN 12697-2 als geschätzter Wert

Tab. 7 AC 11 S der BERAG mit 40% RAP1 (Mischung roter Faden): Spurbildungstest

Labor Mischgut hergestellt bei		Empa BERAG	LAVOC BERAG
Prüfkörper-Dicke	mm	100*	50
Raumdichte	kg/m ³	2367	2346
Hohlraumgehalt	Vol.-%	3.1	4.3
Relative Spurrinnentiefe	%		
nach 30 Zyklen		3.1	1.7
nach 100 Zyklen		4.1	2.4
nach 300 Zyklen		5.2	3.4
nach 1000 Zyklen		6.2	5.0
nach 3000 Zyklen		9.2	7.1
nach 10000 Zyklen		11.4	10.3
nach 30000 Zyklen		**	**

* Prüfkörperhöhe 100 mm anstelle von 50 mm, da irrtümlicherweise von einem AC B 11 ausgegangen wurde.

** Prüfung abgebrochen, da ≥ 10%

Der direkte Vergleich der Ergebnisse des Spurbildungstests ist insofern nicht möglich, weil bei unterschiedlichen Prüfkörperhöhen geprüft wurde. Die Empa hat die Prüfkörperhöhe mit 100 mm anstelle von 50 mm gewählt, da irrtümlicherweise von einem AC B 11 ausgegangen wurde. In der Folge resultierten deutlich höhere Hohlraumgehalte bei den 100 mm dicken Prüfkörpern.

2.7.4 Vergleich zwischen Aufbereitungsanlage und Labor

Das Mischgut des roten Fadens AC 11 S mit 40% RAP1 aus der Aufbereitungsanlage konnte mit der gleichen Rezeptur im Labormischer mit den zwei Mischungen Mx02 und Mx03 sehr gut nachgebildet werden. Im Bindemittelgehalt und in der Korngrößenverteilung der Mineralstoffe wurden sehr gute Übereinstimmungen erreicht. Da die Hohlraumgehalte-Marshall mit 2.4 und 2.5 praktisch gleich sind, resultierten auch sehr ähnliche Mischguteigenschaften.

Tab. 8 AC 11 S der beteiligten Laboratorien mit 40% RAP1 (Mischung roter Faden): Mischgut-Eigenschaften

Mischgut hergestellt		Labor Empa	Labor Empa	Labor Mittel	Anlage BERAG	Differenz
Mischgut geprüft durch		Mx02 Empa	Mx03 Empa	Empa	Empa	
Bindemittelgehalt	Masse-%	6.00	5.90	5.95	6.10	-0.15
Penetration	0.1 mm	61	57	59	51	+8
Erweichungspunkt RuK	°C	50.4	51.0	50.7	51.6	-0.9
Penetrationsindex	-	-0.6	-0.6	-0.6	-0.8	+0.2
Raumdichte	kg/m ³	2385	2394	2390	2381	+9
Rohdichte-Mischgut	kg/m ³	2450	-	2450	2443	+7
Hohlraumgehalt	Vol.-%	2.7	2.0	2.4	2.5	-0.1
Hohlraumfüllungsgrad	%	83.9	87.3	85.6	84.8	+0.8
Marshall Stabilität	kN	9.6	-	9.6	9.7	-0.1
Marshall Fließen	mm	3.1	-	3.1	2.9	+0.2
Siebdurchgang	Masse-%					
Prüfsieb [mm]						
16.0		100.0	100.0	100.0	100.0	0
11.2		99.4	99.4	99.4	99.5	-0.1
8.0		87.6	86.8	87.2	85.5	+1.7
5.6		67.2	67.4	67.3	67.8	-0.5
4.0		56.0	55.9	55.9	55.8	+0.1
2.0		35.6	35.6	35.6	35.9	-0.3
1.0		26.7	27.2	26.9	24.4	+2.5
0.5		19.9	20.8	20.4	18.6	+1.8
0.25		13.7	14.8	14.2	14.2	0
0.125		10.1	11.5	10.8	10.9	-0.1
0.063		7.5	8.6	8.1	8.4	-0.3
Relative Spurrinntiefe	%					
nach 1000 Zyklen		12.8	13.9	13.4	6.2	7.2
nach 3000 Zyklen		19.2	-	19.2	9.2	10.0
nach 10000 Zyklen					11.4	-

Ein klarer Unterschied wurde hingegen bei den Eigenschaften des rückgewonnenen Bindemittels gemessen. Das Bindemittel des Anlagemischgutes ist deutlich stärker verhärtet ist als jenes der im Labor hergestellten Mischungen.

In der Folge führte der Spurbildungstest zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen. Beim Mischgut aus dem Labormischer mit dem weicheren Bitumen resultierten etwa doppelt so grosse Spurrinntiefen, wie beim härteren Mischgut aus der Aufbereitungsanlage. Da irrtümlich die Spurbildungsteste an 100 mm dicken anstelle den normgerechten 50 mm dicken Prüfkörpern durchgeführt wurden, können die Ergebnisse nicht mit der Normanforderung von maximal 10% nach 10'000 Überrollungen bewertet werden.

3 Resultate und Diskussion

3.1 Mehrfachrecycling: Einfluss auf die Mineralstoffe

3.1.1 Objekt Wimmis BE

Einbau des Versuchsobjektes

Auf dem Werkareal der Firma Walo Bertschinger AG in Wimmis BE wurde für das ASTRA-Projekt „Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10“ [11] über einem 35 cm dicken Kieskoffer ein zweischichtiger Belag bestehend aus einer 65 cm dicken Tragschicht AC T 22 H und einer Deckschicht AC 11 N mit einer Dicke von 35 mm eingebaut. Da dieser Belag keine Verwendung mehr hatte und genügend Mischgutproben reserviert wurden, eignete sich dieser Belag für die Untersuchung der Mineralstoffschädigung durch das Fräsen. Allerdings war ein neuer Einbau unter Verwendung Fräsmaterials nicht möglich, womit das Kriterium der Mineralstoffschädigung nicht durch mehrmaliges Recycling untersucht werden konnte.

Fräsen des Belages in Wimmis

Der Belag auf dem Werkareal in Wimmis wurde am 15.11.11 von 13.00 bis 15.00 durch die Firma REPROAD gefräst (**Abb. 15**). Es wurde eine grosse Strassenfräse vom Typ Wirtgen W130 F verwendet (**Abb. 17, Abb. 18**). Der Vorschub betrug 50-60% des maximalen Vorschubs von 32 m/min bei einer Fräsbreite von 130 cm. Zur Staubbekämpfung wurden ca. 400 l Wasser pro Schicht eingesetzt.

Der zweischichtige Belag wurde in 3 Durchgängen gefräst, damit das Material der Deck- und Tragschicht möglichst rein erhalten wurde (**Abb. 19**). Der zweite Fräsvorgang beinhaltete eine Zwischenschicht von etwa 2.5 cm Dicke zwischen Deck- und Tragschicht, die nicht verwendet wurde. Bei der Tragschicht wurden trotz vorsichtigem Fräsen geringe Mengen des Koffers mitgefräst (Abb. 20). Der Belag wurde in drei Streifen gefräst, wobei der mittlere Streifen, in dem die Tests mit der MLS 10 durchgeführt wurden und wo verschiedene Proben entnommen wurden, nur am nicht geschädigten Anfang und Ende gefräst wurde (Abb. 16). Das Fräsen des Belages erfolgte von unten nach oben mit konstanter Anordnung der Fräsdornen. Die Fräsdornen waren praktisch neuwertig.

1. Fräsdurchgang: Deckschicht AC 11 N: 2.5 – 3.5 cm, Bezeichnung des gefrästen Ausbausphaltes **RAP3u** (Abb. 21)
2. Fräsdurchgang: Zwischenschicht aus Deckschicht und Tragschicht, ca. 2.5 cm dick wurde nicht verwendet
3. Fräsdurchgang: Tragschicht AC T 22 H ca. 4 - 4.5 cm dick, Bezeichnung des gefrästen Ausbausphaltes **RAP4u** (Abb. 22)

Beide Fräsmaterialien wurden durch die Firma Kästli AG in einem Brecher nochmals gebrochen und davon ein Teil an die Empa geliefert. Die RAP-Materialien nach dem Brechen wurden mit **RAP3** respektive mit **RAP4** bezeichnet.



Abb. 15 Versuchsfeld vor dem Fräsen



Abb. 16 Geschädigter Mittelbereich des Testfeldes mit entnommenen Proben



Abb. 17 Wirtgen Kaltfräse W 130 F



Abb. 18 Rückseite der Fräse mit Fräsdornen



Abb. 19 Fräsen der Deckschicht



Abb. 20 Fräsen der Tragschicht mit Stellen wo der Koffer angefräst wurde



Abb. 21 Fräsmaterial RAP3u aus Deckschicht AC 11 N



Abb. 22 Fräsmaterial RAP4u aus Tragschicht AC T 22 H

3.1.2 Untersuchung von Mischgut und Fräsmaterial

Rückstellproben des Mischgutes vom Einbau, sowie RAP-Fräsmaterial von beiden Mischguttypen wurden untersucht bezüglich Korngrößenverteilung und Anteil gebrochenen/runden Körnern. Die Kantigkeit, die in der Schweiz mittels Fließkoeffizient bestimmt wird, konnte aufgrund der grossen Menge an benötigtem Probenmaterial nicht durchgeführt werden. Ursprünglich war vorgesehen, den Einfluss des Fräsens und des darauf folgenden Brechens separat zu beurteilen. Es zeigte sich jedoch, dass die für die Beurteilung des Fräsens entnommene Probe nicht repräsentativ war, da eine Homogenisierung des gesamten Fräsmaterials nicht möglich war. Aus diesem Grund wurde nur die Mineralstoffschädigung nach Fräsen und Brechen untersucht. Die Fräsmaterialien sind auch nach dem Brechen noch recht inhomogen, weshalb sie für die weiteren Untersuchungen heruntergeteilt wurden. Zudem waren die RAP-Materialien durch die Restfeuchtigkeit teilweise verklebt.

Tab. 9 Untersuchte Materialien der Teststrecke in Wimmis

Belagstyp	Bezeichnung	Beschreibung
Deckschicht AC 11 N	Mx-wim3	Mischgut-Rückstellprobe
Tragschicht AC T 22 H	Mx-wim4	Mischgut-Rückstellprobe
Deckschicht AC 11 N	RAP3	Asphaltgranulat nach dem Fräsen und Brechen
Tragschicht AC T 22 H	RAP4	Asphaltgranulat nach dem Fräsen und Brechen

Tab. 10 Bindemittleigenschaften des rückgewonnenen Bindemittels

Material	Penetration [0.1 mm]	Erweichungspunkt [°C]
Mx-wim3	54	52.2
RAP3	56	52
Mx-wim4	82	48.6
RAP4	60	51.6

Die rückgewonnenen Bindemittel sowohl des Mischgutes als auch des Fräsmaterials sind sehr weich und zeigen für das Fräsgut eine wehr geringe Alterung. Das RAP 3 zeigt sogar weichere Eigenschaften die Rückstellprobe des Ausgangsmischgutes. Allgemein kann gesagt werden, dass das Bindemittel der beiden Schichten sehr weich ist.

3.1.3 Einfluss auf die Korngrößenverteilung

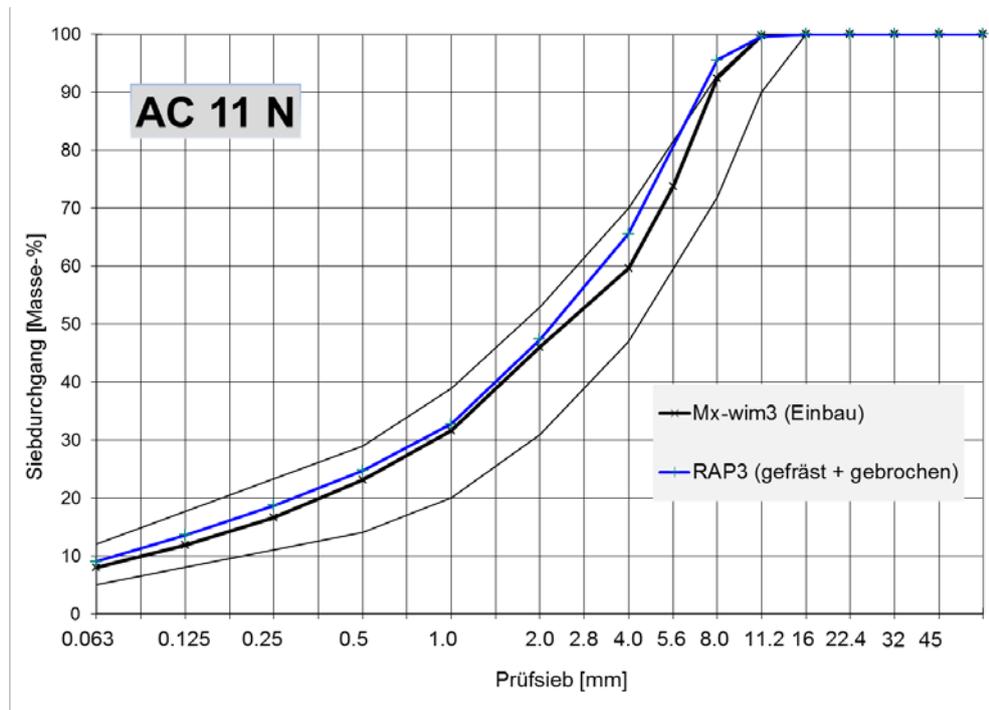


Abb. 23 Korngrößenverteilung des AC 11 N vor und nach dem Fräsen/Brechen

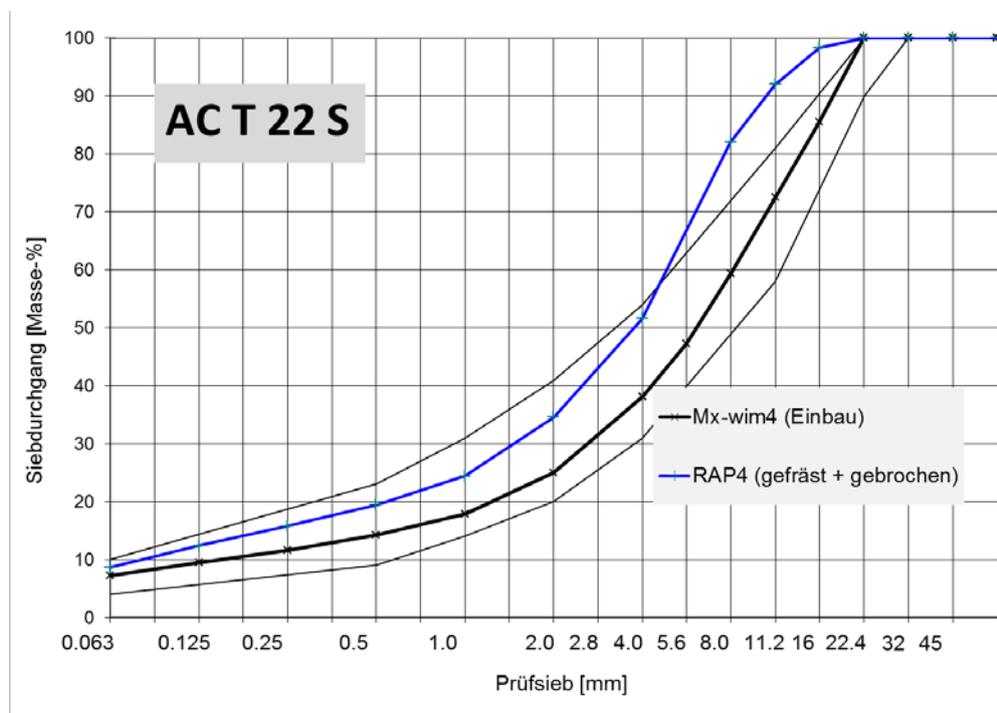


Abb. 24 Korngrößenverteilung des AC T 22 H vor und nach dem Fräsen/Brechen

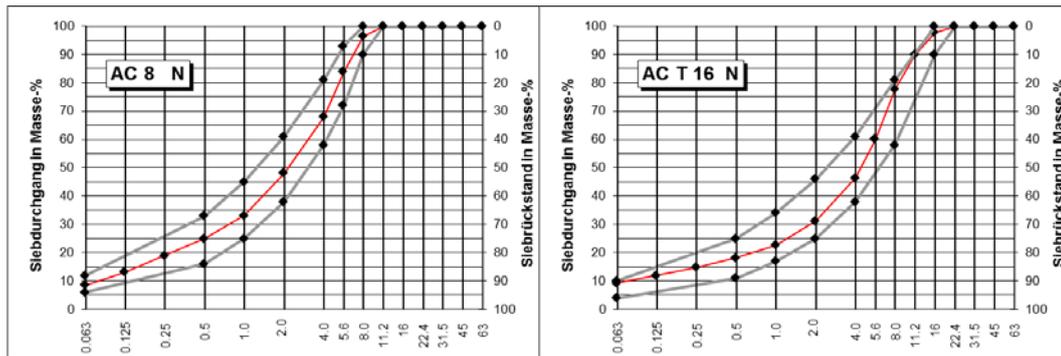


Abb. 25 Fräsgut AC 11 N hat nach dem Fräsen und Brechen die Korngrössenverteilung eines AC 8

Abb. 26 Fräsgut AC 22 hat nach dem Fräsen und Brechen die Korngrössenverteilung eines AC 16

Durch das Fräsen und Brechen werden primär die grossen Mineralstoffe zerkleinert. Dies führt dazu, dass bezüglich der Korngrössenverteilung ein gefräster AC 11 N einem AC 8 und ein gefräster AC 22 T einem AC 16 T entspricht.

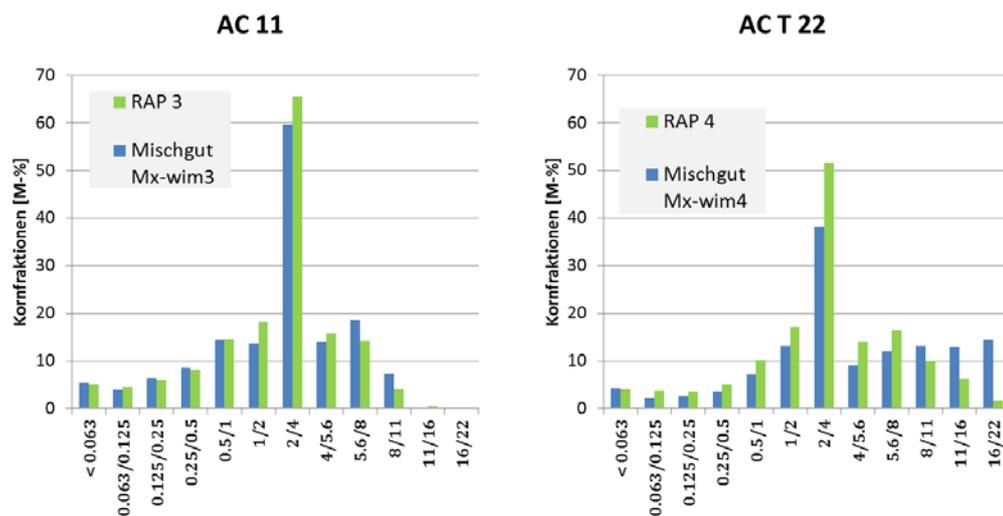


Abb. 27 Unterschiede der einzelnen Kornfraktionen im RAP-Material im Vergleich zum Ausgangsmischgut

Durch das Fräsen und Brechen verändern sich die Kornfraktionen nicht gleich. Die grösste Abnahme wurde bei den groben Körnungen beobachtet, beim AC T 22 H betrug beispielsweise der Anteil der Kornfraktion 16/22 im RAP4 nur noch 2 Masse-% gegenüber der ursprünglichen 15 M-%. Bei der Fraktion 11/16 war der Unterschied geringer, unter anderem auch weil ein Teil der Körner der Fraktion 11/16 neu aus gebrochenen Körnern der Fraktion 16/22 gebildet wurde, die den Abbau teilweise kompensierten. Die grösste Zunahme wurde bei der Sandfraktion 2/4 beobachtet, während die feineren Fraktionen nahezu unverändert blieben. Insbesondere wurde durch das Fräsen/Brechen kein Füller erzeugt oder er wurde durch das Wasser beim Fräsen weggespült. Dies bedeutet für den Einsatz von RAP, dass vor allem die Zugabe von groben Kornfraktionen notwendig ist, Sand jedoch genügend vorhanden ist. Dies jedoch nur unter der Voraussetzung, dass das RAP genügend erhitzt wird, damit die feinen Gesteinsfraktionen für den Mastix der neuen Mischung zur Verfügung stehen und nicht inerte Agglomerationen von Feinmaterial (black rock) bilden.

3.1.4 Einfluss auf die Kornrundung

Die Kornrundung verändert sich bei den grössten Kornfraktionen nicht, da diese ja durch das Fräsen/Brechen nicht massiv geschädigt wurden, da sie sonst in eine andere niedrigere Kornfraktion gekommen wären. Beim AC 11 N ist die Veränderung gering, da schon der überwiegende Anteil gebrochen ist (Abb. 28). Der AC T 22 H enthält einen höheren Anteil an runden Mineralstoffen, vermutlich durch die Beimischung von Recyclingmaterial. Deshalb erhöht sich hier der Anteil an vollständig gebrochenen/gebrochenen Körnern um durchschnittlich 10%, unabhängig von der Korngrösse. Dies deutet darauf hin, dass auch die mittleren Korngrössen durch Brechen von grösseren Körnern entstehen müssen, was durch die Überlagerung der Zu- und Abnahme in der Korngrössenverteilung nicht ersichtlich war.

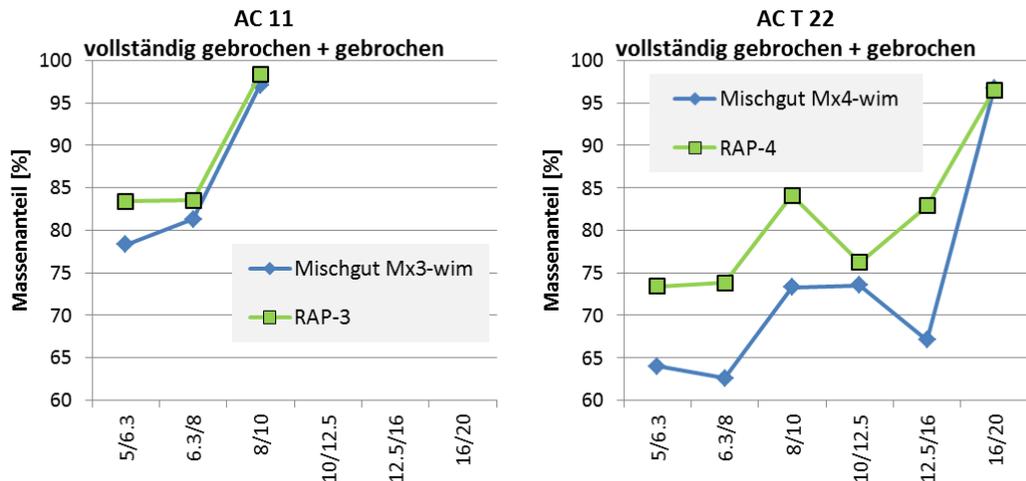


Abb. 28 Anteil vollständig gebrochen und gebrochen vor und nach dem Fräsen/Brechen

Der Anteil der vollständig gerundeten Körner nimmt, mit Ausnahme der grössten Kornfraktion, deutlich ab, beim AC T 22 H wird der Anteil praktisch halbiert (Abb. 29). Wiederum ist kein Zusammenhang mit der Korngrösse ersichtlich. Allerdings können mit dieser Prüfung die feinen Fraktionen nicht untersucht werden.

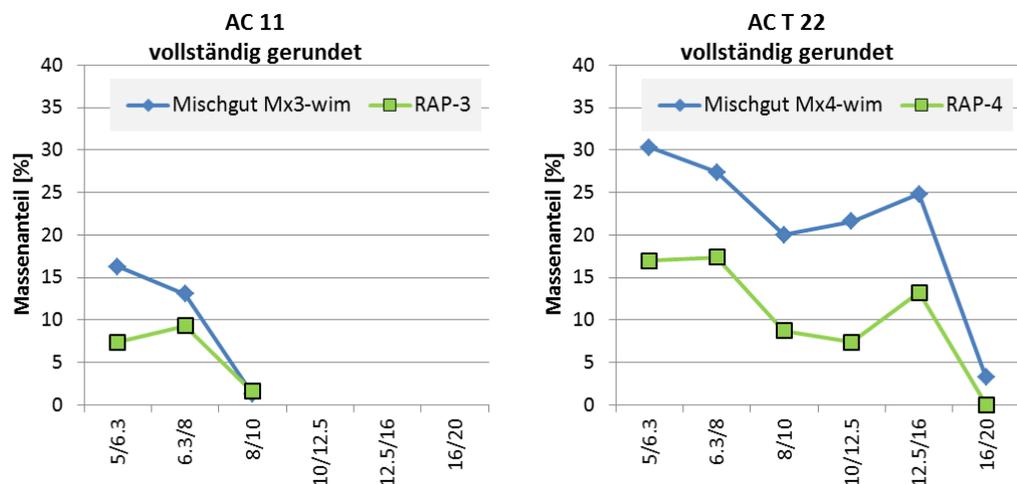


Abb. 29 Anteil vollständig gerundet vor und nach dem Fräsen/Brechen

Diese Resultate zeigen, dass durch das Fräsen/Brechen Körner gebrochen werden und so der Anteil der runden und teilweise gerundeten Körner reduziert wird. Aus Sicht dieser Eigenschaft verbessert sich demzufolge die Qualität der Mineralstoffkörnung durch das Fräsen. Dies dürfte sich insbesondere bei der Verwendung von Ausbausphalt aus älteren Recyclingbelägen mit hohem Rundkornanteil positiv auswirken. Welcher Anteil auf das Fräsen und welcher auf den nachfolgende Brechvorgang zurückzuführen ist, konnte nicht eruiert werden, da die Probe, die nicht durch den Brecher aufbereitet wurde, nicht repräsentativ war.

Allerdings wurde die Qualität der neu gebrochenen Körner, respektive der Aspekt der Scharfkantigkeit nicht untersucht, der aber gemäss Untersuchungen des LAVOC [44] einen starken Einfluss auf die Belageigenschaften haben kann. Allgemein ist der Anteil Rundkorn im RAP ein Handicap für dessen Anwendung in qualitativ hochstehenden Schichten, insbesondere in Deckschichten.

Eine mögliche Mineralstoffschädigung durch den Fräsvorgang könnte auch in der Bildung von Rissen im Mineralstoff auftreten. Visuell konnte dies aber nicht beobachtet werden und ein Nachweis mittels Los Angeles Test, wo Körner mit Rissen leichter gebrochen werden sollten, wurde aufgrund der beschränkten Materialmenge nicht durchgeführt.

3.1.5 Einfluss auf die Mischguteigenschaften

Für die Deckschicht AC 11 N wurde basierend auf den Eigenschaften des Mischgutes des Einbaus in Wimmis ein Rezept für das im Labor herzustellende Mischgut erstellt, das bezüglich der Korngrössenverteilung, Bindemittelgehalt und -eigenschaften möglichst ähnlich war. Damit der Effekt der Mineralstoffe möglichst gross ist, wurde der Recyclinganteil mit 60% relativ hoch gewählt. Dieser hohe Anteil war aber nur möglich, weil das Recyclingmaterial durch die kurze Liegedauer nicht stark gealtert war und somit recht weich war. Das Zugabebindemittel wurde gemäss Formel (5) berechnet.

Die für die Mischgutherstellung verwendeten Ausgangsstoffe standen nicht mehr zur Verfügung, weshalb die von der BERAG für das Recyclingprojekt gelieferten Mineralstoffe und Bindemittel verwendet wurden. Wie aus Tab. 11 ersichtlich ist, sind die Korngrössenverteilungen sehr ähnlich. Das im Labor hergestellte Mischgut ist etwas feiner, die Bindemittelleigenschaften sind praktisch identisch.

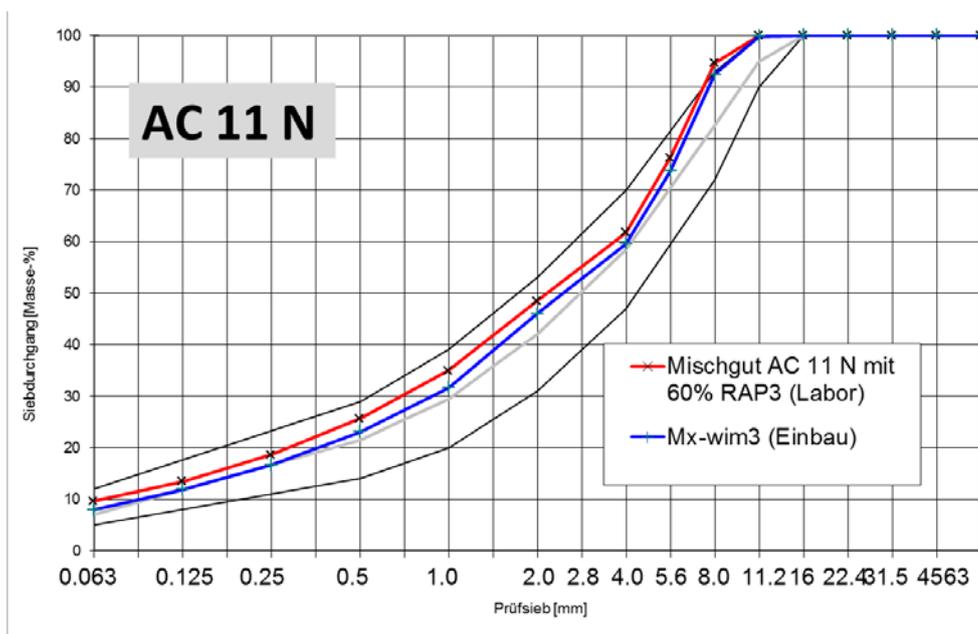


Abb. 30 Vergleich der Korngrössenverteilung der beiden Mischgutproben AC 11 N

Tab. 11 AC 11 N: Mischgutkennwerte, Resultate von Spurrinnenprüfung und Wasserempfindlichkeit

Prüfmethode	Einheit	AC 11 N Mx-wim3	AC 11 N mit 60% RAP3
Lösliche Bindemittelanteile	Masse-%	5.6	5.0
Rohdichte	kg/m ³	2523	2481
Raumdichte SSD	kg/m ³	2412	2426
Hohlraumgehalt	Vol-%	4.4	2.2
Hohlraumgehalt bindemittelfrei VMA	Vol-%	17.5	14.0
Hohlraumfüllungsgrad FVB	%	74.8	84.3
Marshall Stabilität, korrigiert	kN	12	14.6
Marshall Fliesen	mm	2.8	2.9
Module de richesse		3.6	3.0
Rückgew. Bindemittel			
Penetration	0.1 mm	52	48
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	53.8	54.6
Wasserempfindlichkeit			
ITS trocken	kN	1271	1648
ITSR		90%	76%
Spurrinnenprüfung			
Spurrinntiefe nach 10000 Zyklen	%	5.9	5.4
Tieftemperatureigenschaften			
ITS bei -10°C	MPa	6.0	6.2

Das im Labor nachgebildete Mischgut mit 60% RAP3 zeigt nicht die gleichen Mischguteigenschaften wie das ursprüngliche Mischgut. Der Hohlraumgehalt Marshall liegt bei der Labormischung mit 2.2% deutlich tiefer als beim Originalmischgut. Dies deutet auf eine leichtere Verdichtbarkeit des Mischgutes mit RAP3 hin. Ein Grund könnte der Rundkornanteil sein, obwohl dies im Einzelprojekt EP1 bei ähnlich hohen Recyclinganteilen nicht beobachtet wurde. Zudem lag der Bindemittelanteil etwas tiefer als beim Ausgangsmischgut Mx-wim3. Trotzdem wurde eine höhere Marshall-Stabilität bei gleichem Fliezwert erhalten. Die Spurrinntiefe ist nicht sehr unterschiedlich, hingegen ist die Wasserempfindlichkeit bei der Labormischung mit RAP mit 76% (ITSR) deutlich tiefer als beim eingebauten Mischgut Mx-wim3 (90%). Dies ist für einen AC 11 N mit nur 2.2% Hohlraumgehalt erstaunlich und lag bei anderen Recyclingmischungen des EP1 nie so tief. Die Tieftemperatureigenschaften sind praktisch identisch, aber mit einem Wert von 6 MPa und mehr, verglichen mit den anderen in diesem Projekt hergestellten Mischungen, sehr hoch.

Es stellt sich die Frage, inwieweit die unterschiedlichen Resultate durch die Verwendung der Mineralstoffe der BERAG AG beeinflusst werden. Gemäss Untersuchungen des LAVOC [5] weisen diese Mineralstoffe keine hohe Qualität auf, insbesondere bezüglich Kantigkeit der Mineralstoffe. Aufgrund der unbekanntenen nicht beeinflussbaren Einflüsse wurde auf die geplante Mischgutrekonstruktion der Tragschicht AC T 22 H im Labor verzichtet.

3.2 Mehrfachrecycling: Einfluss auf das Bindemittel

3.2.1 Vorversuche in der Alterungsbox

Für die Vorversuche in der abgedichteten Alterungsbox konnte unter kontrollierten Bedingungen der Einfluss verschiedener Parameter auf die Alterung untersucht werden

[50]. Um Verunreinigungen in der Laborluft auszuschliessen, wurde trockene Pressluft aus einer Druckflasche verwendet. Die Alterung wurde mittels Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie komplexem Modul mittels DSR bestimmt. Da DSR und Erweichungspunkt Ring und Kugel ähnliche Resultate lieferten, sind im folgenden nur die Resulte des Erweichungspunktes aufgeführt.

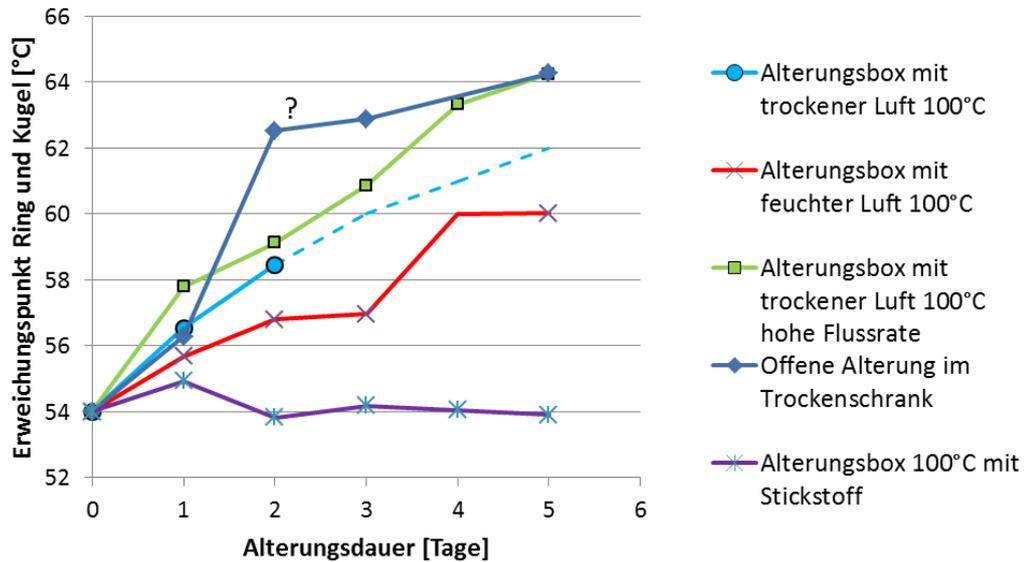


Abb. 31 Unterschiedliche Einflussparameter auf die Alterung bei 100°C

Die Abb. 31 zeigt, welche Einflussfaktoren auf die Alterung von Mischgut bei 100°C wirken. Eine Erhöhung der Flussrate um einen Faktor 10 ergibt eine leicht stärkere Verhärtung bezüglich Erweichungspunkt Ring und Kugel von etwa einem Grad. Interessanterweise ist auch die offene Alterung im Trockenschrank stärker als in der geschlossenen Alterungsbox bei niedriger Flussrate. Dies zeigt, dass bei der Alterung im Ofen noch weitere Parameter berücksichtigt werden müssen. Ob alleine die vermutlich höhere Luftzirkulation dafür verantwortlich gemacht werden kann ist nicht klar.

Beispielsweise hat auch die relative Luftfeuchtigkeit einen Einfluss, indem sie die Alterung abschwächt. Unter Stickstoffatmosphäre konnte innerhalb der Messgenauigkeit überhaupt keine Alterung gemessen werden. Dies zeigt, dass Sauerstoff der hauptsächliche Parameter für die Alterung sein muss. Es ist aber durchaus denkbar, dass noch weitere Parameter auf die Alterung des Bindemittels im Mischgut einwirken können. Insbesondere könnten Luftverunreinigungen wie Ozon oder Stickoxide die Alterung katalysieren. Die Beantwortung dieser Frage bedarf aber einer umfassenderen Untersuchung, die nicht im Rahmen dieses Projektes durchgeführt werden konnte.

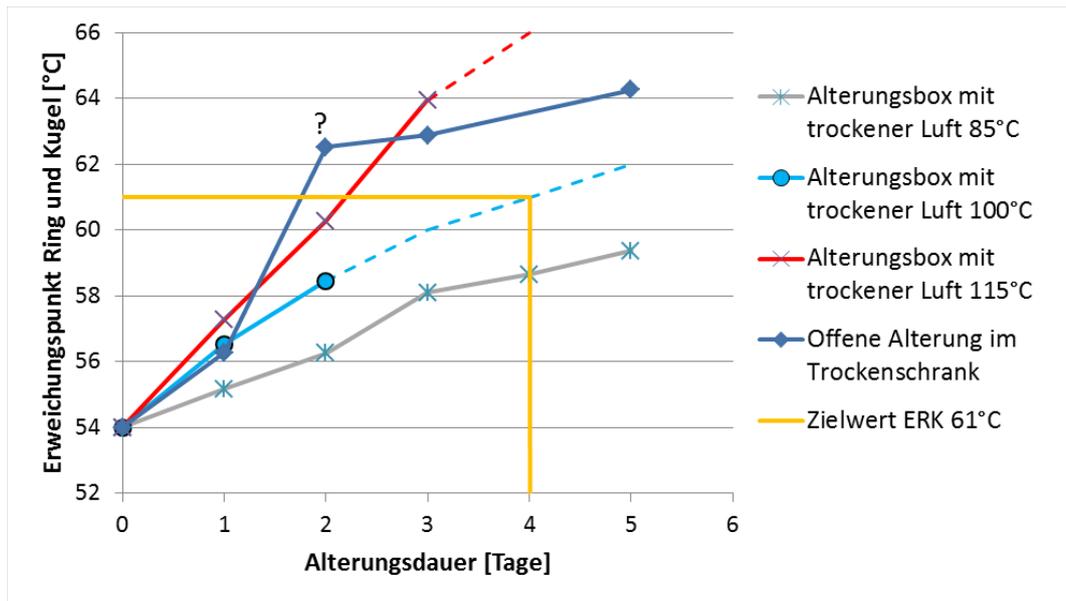


Abb. 32 Einfluss der Temperatur auf die Alterung

Für die Herstellung von grösseren Mengen an künstlichem RAP kommt praktisch nur ein grosser Trockenschrank in Frage. Die einzigen Parameter die dort verändert werden können, sind Temperatur und Alterungsdauer. Den Einfluss der Temperatur auf die Bindemittelverhärtung zeigt *Abb. 32*. Die offene Alterung ist deutlich stärker als die Alterung in der Alterungsbox. Der Wert nach zwei Tage scheint aber ein Ausreisser zu sein, eventuell wurde eine Probe verwechselt. Die gestrichelten Linien zeigen den erwarteten weiteren Verlauf der Alterung an, wo keine Messdaten vorhanden sind. Für den Zielwert von 61°C, wie er für das im roten Faden verwendete RAP1 der BERAG gemessen wurde, wäre demnach eine Alterung von 2 Tagen bei 115°C oder 4 Tagen bei 100°C im geschlossenen Alterungsbox notwendig. Allerdings ist bei der offenen Alterung im Trockenschrank eine stärkere Alterung zu erwarten, die einen 2-3°C höheren Erweichungspunkt ergibt. Da bekannt ist, dass Temperaturen über 100°C zu einer anderen Alterung führen, wurde eine Temperatur von 85°C angestrebt. Unter der Annahme, dass die Differenz zwischen offener und geschlossener Alterung ebenfalls etwa 2-3°C beträgt, wurde eine erster Versuch zur RAP-Herstellung im grossen Ofen bei 85°C mit einer Alterungsdauer von 3 Tagen durchgeführt. Die gemessene Alterung war aber mit einem Erweichungspunkt Ring und Kugel von 57°C deutlich zu tief. Er liegt sogar unter dem gemessenen Wert der Alterungsbox nach 3 Tagen (58°C). Daraus lässt sich schliessen, dass die Alterungsbedingungen im grossen Ofen nicht mit dem kleinen Trockenschrank zu vergleichen sind. Es wurde deshalb die Temperaturkurve bei 100°C als Referenz gewählt, gemäss dieser nach vier Tagen ein Wert von 61°C erreicht werden müsste. Der zweite Versuch ergab einen Wert von 60.2, der als akzeptabel beurteilt wurde.

3.2.2 Alterungsprotokoll für die RAP-Herstellung

Basierend auf den Resultaten der Vorversuche wurden die folgenden Parameter für die künstliche RAP-Herstellung im Labor mittels grossen Ofens definiert:

- Temperatur 100 ±5 °C
- Zeitdauer 96 ±2 h
- Schichtdicke 6 ±2 cm

Für die RAP-Herstellung wurde das frisch hergestellte Mischgut auf Bleche verteilt und im Ofen sofort nach der Herstellung bei den definierten Parametern gealtert. Nach Ablauf der Alterungszeit wurde das RAP in Kartonschachteln gelagert. In den meisten Fällen wurde eine Probe des RAP extrahiert, um am rückgewonnenen Bindemittel die

charakteristischen Werte zu bestimmen. Das RAP wurde bis zur weiteren Verwendung für neue Mischungen bei Raumtemperatur gelagert.

3.2.3 Charakterisierung der Bitumen und Verjüngungsmittel

Verschiedene, zunehmend weiche Bitumen bis hin zu Verjüngungsmittel waren erforderlich um die Mischgutsorten mit hohen Recycling-Anteilen in der jeweils angestrebten resultierenden Bindemittelsorte herstellen zu können.

Bitumen

Folgende drei Bitumen fanden Verwendung.

Tab. 12 Bitumen

Code		Bit1	Bit2	PmB
Bitumensorte [27, 51]		Bitumen 160/220	Bitumen 70/100	PmB 90/150-60 (CH-E)
Penetration	0.1 mm	184	76	135
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	39.8	46.8	52.8
Penetrationsindex	-	-0.5	-1.0	-

Verjüngungsmittel

Verjüngungsmittel werden in der Schweiz bisher selten verwendet, dementsprechend sind sie nicht normiert und die Auswahl der angebotenen Produkte ist (noch) klein. Durch die alterungsbedingte Verhärtung des Bindemittels im Strassenbelag verändert sich die chemische Zusammensetzung des Bitumens. Insbesondere entsteht eine Verarmung der Maltenphase, die durch die Beigabe des Verjüngungsmittels wieder korrigiert werden soll [45].

Das Verjüngungsmittel V1 ist eine niederviskose Flüssigkeit mit nicht genau bekannter Zusammensetzung. Es enthält unter anderem Bitumen, sowie vegetabile (z.B. Leinöl, Rapsöl) und erdölstämmige niederviskose Öle. Für das eingesetzte Verjüngungsmittel V1 wurden mit dem „weichsten“ Bitumen 160/220 je Mischungen mit 2%, 4% und 6% hergestellt und geprüft (vgl. [2]).

3.2.4 Prüfserie Mx-40 mit 40% RAP

Das Ausgangsmischgut Mx-0 wurde schon im Einzelprojekt EP1 [2] benötigt und wurde nach dem gleichen Rezept hergestellt mit Mineralstoffen und Bitumen 70/100 (Bit2) des Recyclingprojektes, ohne Zugabe von Recyclingmaterial. Die Korngrößenverteilung entspricht der Referenzmischung mit 40% RAP des roten Fadens, das RAP wurde jedoch künstlich hergestellt.

Die Prüfserie Mx-40 umfasste drei Recyclingschritte (Abb. 3), was einem viermaligen Belageinbau entspricht. Ein Recyclingschritt beinhaltete jedes Mal eine Alterung des Mischgutes zur Herstellung des künstlichen RAP, das danach verwendet wurde, um mit einem Anteil von 40% ein möglichst identisches Mischgut wie Mx-0 herzustellen. Das Referenzmischgut Mx-0 wurde nur mit Bitumen 70/100 hergestellt, während für die Mischgutvarianten der weiteren Recyclingschritte eine Mischung aus den Bitumen 70/100 und 160/220 verwendet wurde, deren Anteile gemäss Formel (5) berechnet wurden (Tab. 13). Die Kennwerte der rückgewonnen Bindemittel sind in Tab. 14 aufgeführt.

Tab. 13 Mischgutrezepte der Serie Mx-40 (in Masse-%)

Komponente	Mx-0	Mx-40.r1	Mx-40.r2	Mx-40.r3
Min1, Füller	7.4%	4.6%	4.6%	4.6%
Min2, Fraktion 0/2	26%	16%	16%	16%
Min3, Fraktion 2/4	20%	11%	11%	11%
Min4, Fraktion 4/8	29%	17%	17%	17%
Min5, Fraktion 8/11	12%	7%	7%	7%
RAP-0		40%		
RAP-40.r2			40%	
RAP-40.r3				40%
Bit2 Bitumen 70/100	6.1%	1.3%	1.3%	1.3%
Bit1 Bitumen 160/220		2.6%	2.6%	2.6%

Tab. 14 Kennwerte des rückgewonnenen Bindemittels für Mischgut und künstlich hergestelltes RAP

Mischgut	Penetration [0.1 mm]	ERK [°C]
Ausgangsmischgut (0% RAP) Mx-0	42	55.7
RAP-0	30	60.2
Mischgut 40% (1. Wied.) Mx-40.r1	50	53.2
RAP-40.r1	33	61
Mischgut 40% (2. Wied.) Mx-40.r2	n.b.	n.b.
RAP-40.r2	33	60
Mischgut 40% (3. Wied.) Mx-40.r3	50	53

n.b. nicht bestimmt

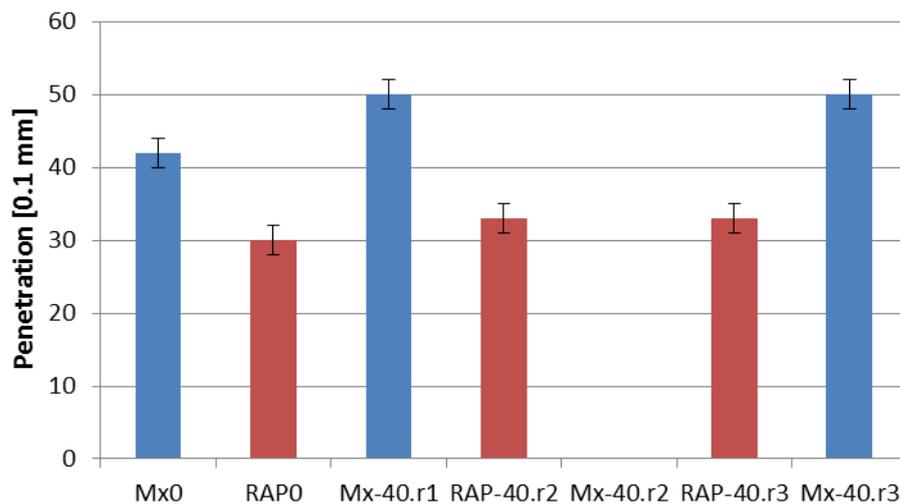


Abb. 33 Penetrationswerte des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutvarianten Mx-40 und zugehörigem RAP

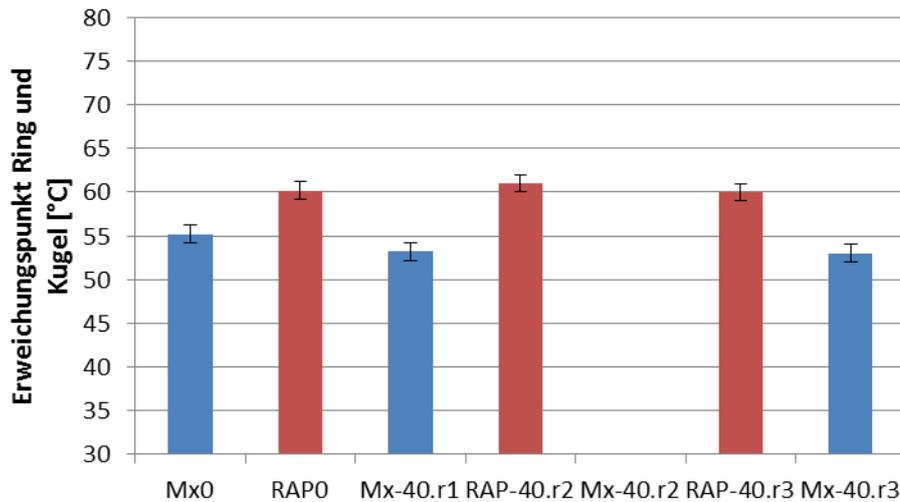


Abb. 34 Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutvarianten Mx-40 und zugehörigem RAP

Das Bindemittel im Ausgangsmischgut Mx-0 ist etwas härter als jenes der weiteren Recyclingmischungen. Die Bindemittelkennwerte stimmen aber bezüglich Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel im RAP in den rezyklierten Mischungen alle sehr gut überein.

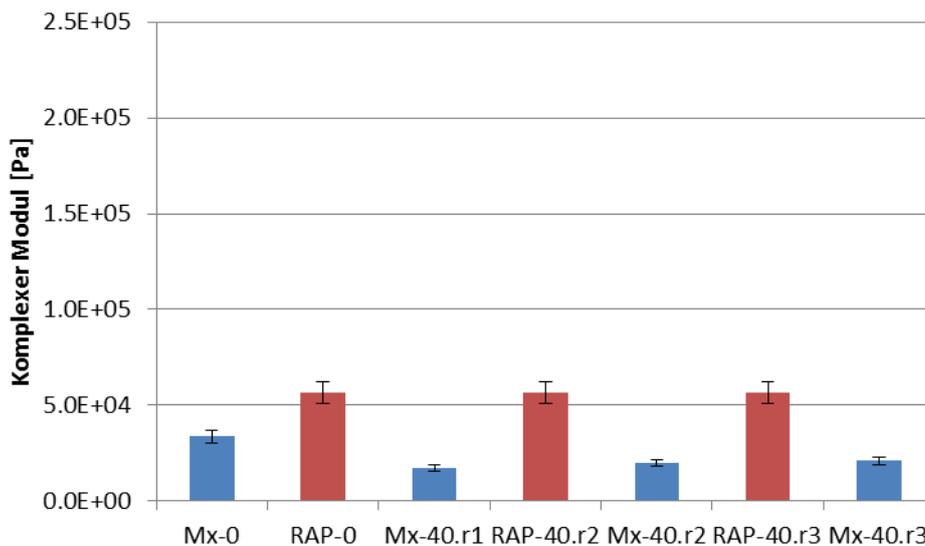


Abb. 35 Modulwerte bei 50°C des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutvarianten Mx-40 und zugehörigem RAP

Die Werte des komplexen Moduls (DSR) stimmen gut mit den Resultaten des Erweichungspunktes Ring und Kugel überein. Die Modulwerte der Recyclingmischungen zeigen aber einen steten leichten Anstieg vom Mx-40.r1 zu Mx-40.r3. Die Unterschiede sind aber klein und liegen nur knapp über der Messunsicherheit. Es ist deshalb nicht mit Sicherheit festzustellen, ob diese Abweichungen durch das wiederholte Recycling oder durch Abweichungen der Zusammensetzung hervorgerufen wurden.

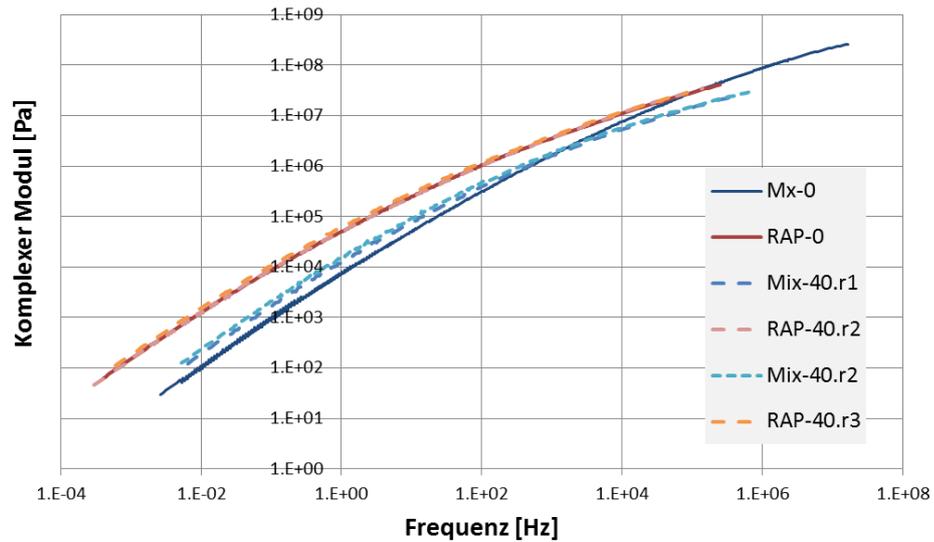


Abb. 36 DSR-Masterkurve des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutvarianten Mx-40 und zugehörigem RAP

Die Masterkurven aller RAP-Varianten liegen übereinander, ein Indiz für eine korrekte Berechnung des Bindemittels. Die Masterkurve für das Ausgangsbindemittel liegt im Vergleich zu den Mischungen Mx-40.r1 und Mx-40.r2, die übereinander liegen, bei tiefen Frequenzen tiefer, bei hohen Frequenzen jedoch höher. Dies könnte daran liegen, dass in den Recyclingmischungen neben dem Bindemittel Bit2 auch Bit1 (Bitumen 160/220) verwendet wurde, das andere rheologische Eigenschaften aufweist. Wie Abb. 37 zeigt, beträgt der Anteil an Bit2 in den rezyklierten Mischungen nur noch 20%, 40% ist Bit1 und weitere 40% stammen aus dem RAP. Daraus lässt sich das unterschiedliche Verhalten von Mx-0 erklären. Weiter zeigt sich, dass ein Einfluss der mehrfach gealterten Bindemittel sich nicht nachweisen lässt. Eigentlich wäre deshalb auch ein Unterschied in den Masterkurven zwischen RAP-0 und den RAP-40.r1/.r2 zu erwarten. Scheinbar hat die Alterung aber diesen Unterschied aufgehoben.

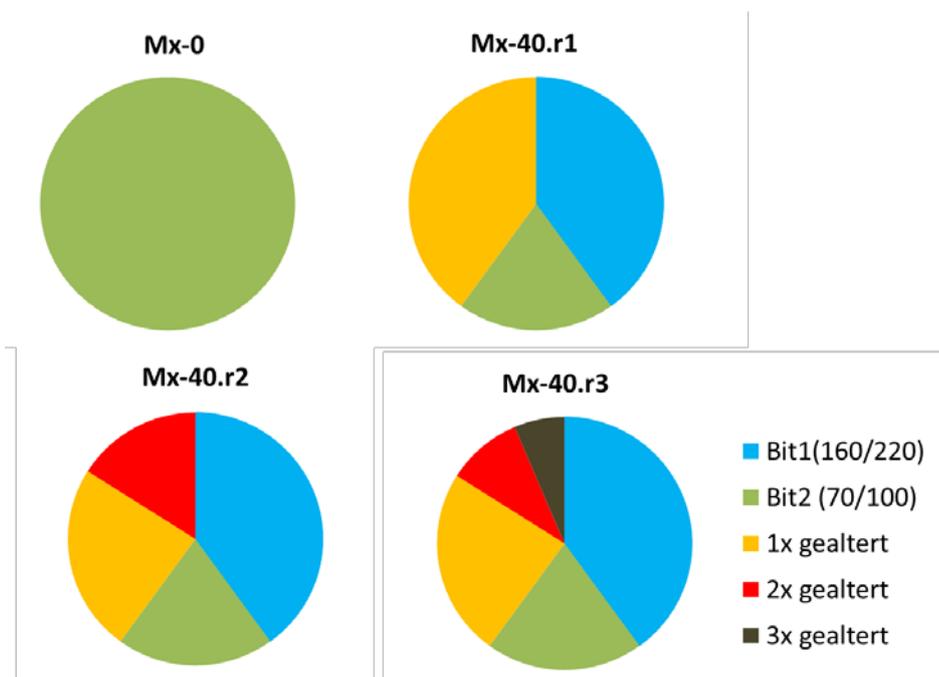


Abb. 37 Bindemittelzusammensetzung der Mischungen der Serie Mx-40

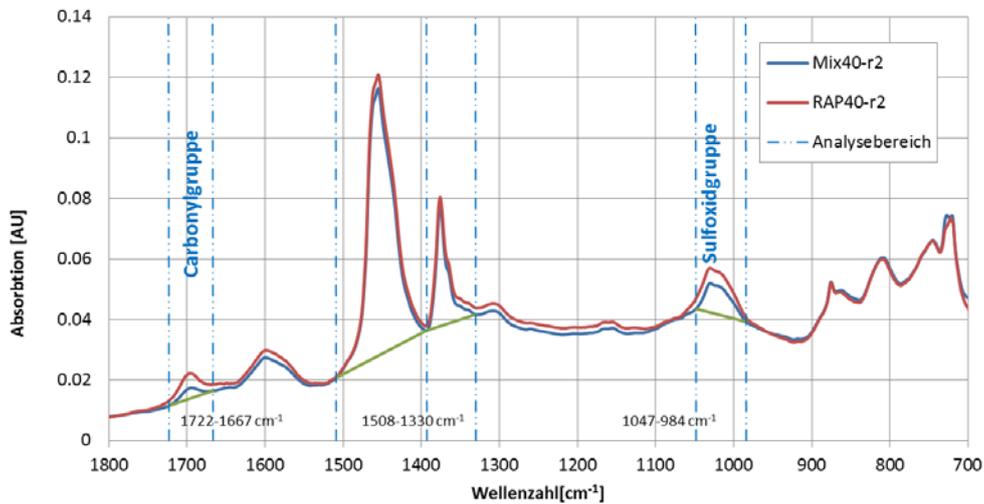


Abb. 38 Überlagerte FTIR-Spektren des rückgewonnenen Bindemittels am Beispiel von Mx-40.r2 und RAP-40.r2

Die überlagerten FTIR-Spektren am Beispiel von Mix-40.r2 und dem entsprechenden RAP-40.r2 zeigen eine gute Übereinstimmung der Peaks. Bezüglich der Peakfläche ist bei der Carbonylgruppe bei 1700 cm^{-1} und der Sulfoxidgruppe bei 1030 cm^{-1} ein deutlicher Unterschied sichtbar. Der für die interne Kalibration verwendete Bereich zwischen 1350 und 1500 cm^{-1} zeigt hingegen nur minimale Differenzen. Im mittleren Bereich ist eine moderate Drift der Basislinie zu beobachten, was aber die Analyse nicht massgebend beeinflusst.

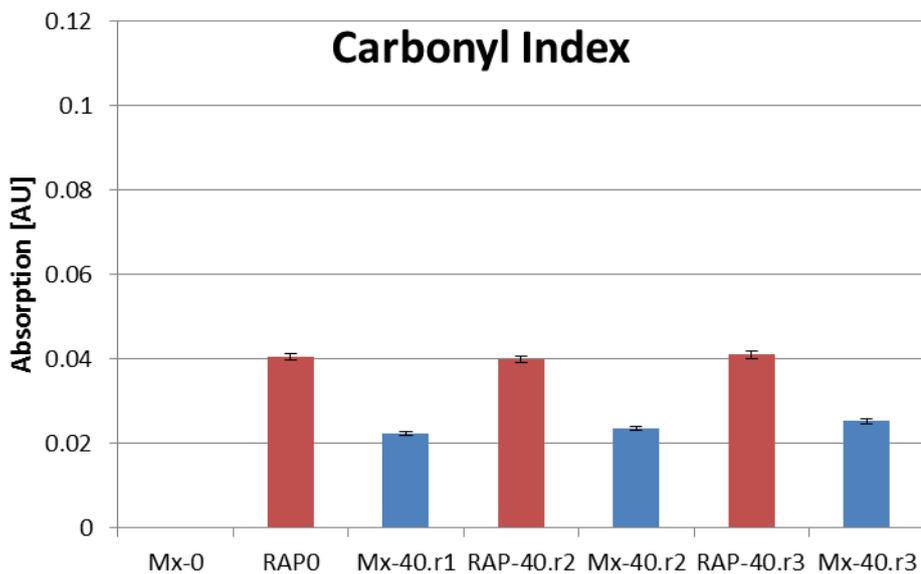


Abb. 39 Carbonyl-Index (FTIR) der Mischgutvarianten Mx-40 und zugehörigem RAP

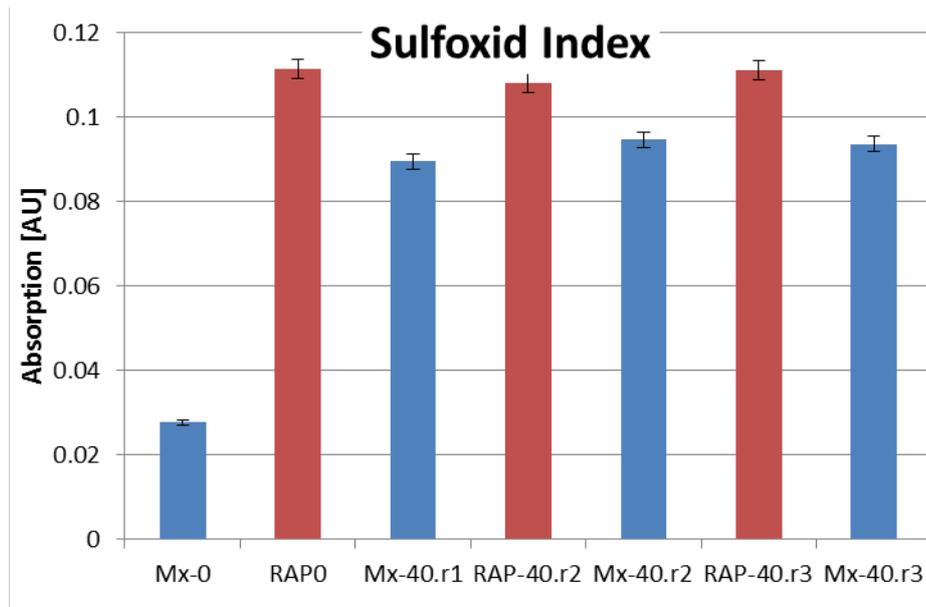


Abb. 40 Sulfoxid-Index (FTIR) der Mischgutvarianten Mx-40 und zugehörigem RAP

Die Resultate der FTIR-Untersuchungen am rückgewonnenen Bindemittels des Mischgutes und des RAP der Serie Mx-40 überraschen, da nur kleine Unterschiede festgestellt werden können zwischen einmal rezyklieren und zwei- oder dreimal rezyklieren. Dies ist vor allem beim Sulfoxid-Index zu beobachten und prinzipiell auch beim Carbonyl-Index, wo noch eine schwache konstante Zunahme, die knapp über der Messunsicherheit liegt, feststellbar war. Diese leichte Zunahme wurde auch schon beim komplexen Modul bei 50°C beobachtet.

Carbonyl-Index und Sulfoxid-Index des Bindemittels im künstlichen RAP ändern sich kaum mehr, was bedeutet, dass die Alterung, soweit sie mittels FTIR angezeigt wird, im RAP nicht mehr weiter fortschreitet. Dies ist nur so zu erklären, dass alle oxidierbaren funktionalen Gruppen durch die Mischgutherstellung und die anschliessende künstliche Alterung zu Carbonylgruppen, respektive zu Sulfoxiden oxidiert wurden. Dabei wurde auch berücksichtigt, dass jedes Mal frisches Bitumen, mit einem Carbonyl- oder Sulfoxidindex von 0, zugegeben wurde.

Die Oxidation zur Sulfoxidgruppe findet zum Grossteil schon bei der Mischgutherstellung statt. Denn wenn bei der Herstellung nur eine geringe Oxidation stattfände, würde beispielsweise beim Mischgut Mx-40.r1 ein Sulfoxid-Index erwartet, der etwa 40% des Wertes von RAP-40.r1 entspricht, also 0.044 AU, da ja 40% von diesem RAP eingesetzt wurde. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, wieviel Prozent des Bitumens bei der Mischgutherstellung und wieviel bei der anschliessenden künstlichen Alterung im Ofen oxidiert werden (Formel 7). Gemessen wurde jedoch ein Wert von 0.09, fast doppelt so hoch wie zu erwarten wäre, wenn die Alterung beim Mischgut vernachlässigbar wäre. Beim Carbonyl-Index ist der Beitrag durch die Mischgutherstellung geringer, da anstelle der erwarteten 0.016, zwischen 0.22 und 0.24 gemessen wurden.

$$I = I_{max} \cdot c_{neu} \cdot K_{Mx} + I_{max} \cdot c_{rec} \quad (7)$$

I []	gemessener IR-Index (Sulfoxid oder Carbonyl-Index)
I_{max} []	maximal möglicher Index (alle Gruppen sind oxidiert)
c_{neu} [Masse-%]	Anteil an neuem Bitumen
c_{rec} [Masse-%]	Anteil an Bitumen des RAP
K_{Mx} [%]	Anteil der Alterung der durch die Mischgutherstellung verursacht wird

Aus den FTIR-Indices lässt sich der Alterungsanteil K_{Mx} bei der Mischgutherstellung, sowohl für die Sulfoxidgruppe als auch für die Carbonylgruppe, berechnen:

$$K_{Mx} = \frac{I - I_{max} \cdot c_{rec}}{I_{max} \cdot c_{neu}} \quad (8)$$

Beim Sulfoxid-Index ist die Alterung durch die Mischgutherstellung mit $K_{Mx}=70\%$ dominant, während beim Carbonyl-Index dieser Prozess mit $K_{Mx} = 20\%$ gegenüber der Alterung im Ofen bedeutend kleiner ist.

Daraus geht hervor, dass die beiden funktionalen Gruppen unterschiedlich schnell mit Sauerstoff reagieren und der Carbonyl-Index deshalb besser geeignet ist für die Beurteilung des Bindemittels im RAP, da die Alterung der Carbonyl-Gruppe nur gering von der Mischgutherstellung verfälscht wird und vor allem die Alterung im Gebrauchszustand anzeigt. Dies beruht jedoch auf der Annahme, dass der Einfluss der Mischgutherstellung inkl. Einbau bezüglich FTIR im Labor und in der Mischanlage vergleichbar ist.

Einfluss auf die Mischguteigenschaften

Ein Teil des Mischgutes wurde für die Herstellung von Prüfkörpern abgezweigt, der Rest wurde im Ofen künstlich gealtert zu RAP. Dieses wurde danach mit Neumaterial vermischt und ergab das Mischgut des folgenden Recyclingzyklus (Tab. 13).

Tab. 15 Mischgutkennwerte nach wiederholtem Recycling

Mischgut		Mx-0 ¹	Mx-40.r1	Mx-40.r2	Mx-40.r3
Bindemittelanteil	M-%	5.8	5.4	5.9	6
Hohlraumgehalt Marshall	%	2.6	4.5	2.5	2.2
Marshall Stabilität	kN	11.2	10.1	10.6	10
Marshall Fliessen	mm	3.3	2.5	3.2	3.5
Wasserempfindlichkeit ITS trocken	kN	1383	1017	824	923
Wasserempfindlichkeit ITSR	%	85	87	75	71

Das Mischgut Mx-40.r1 weist einen zu geringen Bindemittelanteil auf, was sich direkt auf den Hohlraumgehalt auswirkt, der rund 2% höher ist als bei den anderen Mischungen. Auf die Marshallstabilität hat dies jedoch keinen massgebenden Einfluss, alle Werte sind innerhalb der Messunsicherheit identisch. Das Fliessen nimmt hingegen über die Recyclingzyklen kontinuierlich leicht zu, die Änderungen sind jedoch klein.

¹ Die Werte der Mischung Mx-0 stammen von der Empa und unterscheiden sich geringfügig von den Resultaten der Tecnotest AG, die im Bericht des EP-1 aufgeführt sind, wie dies auch schon im roten Faden beobachtet wurde [2]. Sie lassen sich aber besser mit den anderen Resultaten dieses Projektes vergleichen, da diese alle an der Empa geprüft wurden.

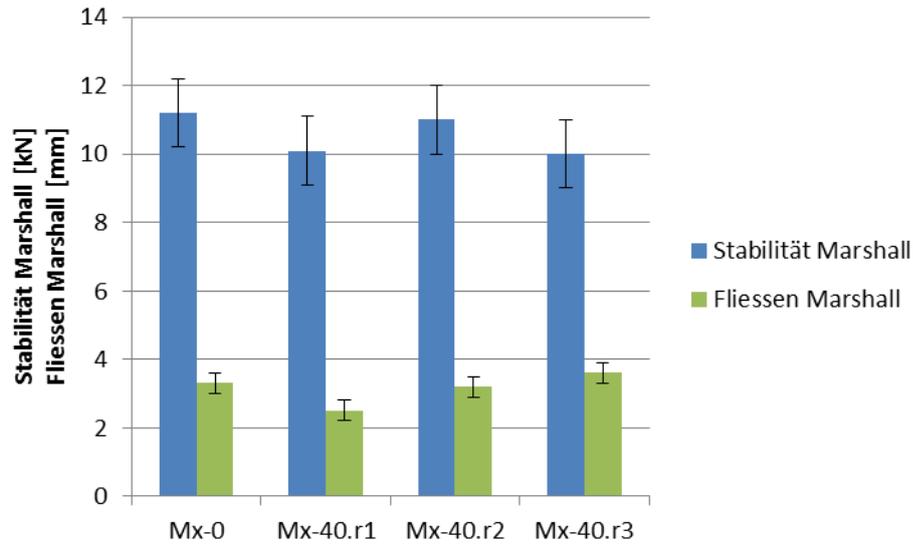


Abb. 41 Marshallkennwerte der Serie Mx-40

Die Stabilität Marshall ist innerhalb der Messunsicherheit gleich, während der Fließwert mit den Recyclingschritten ansteigt.

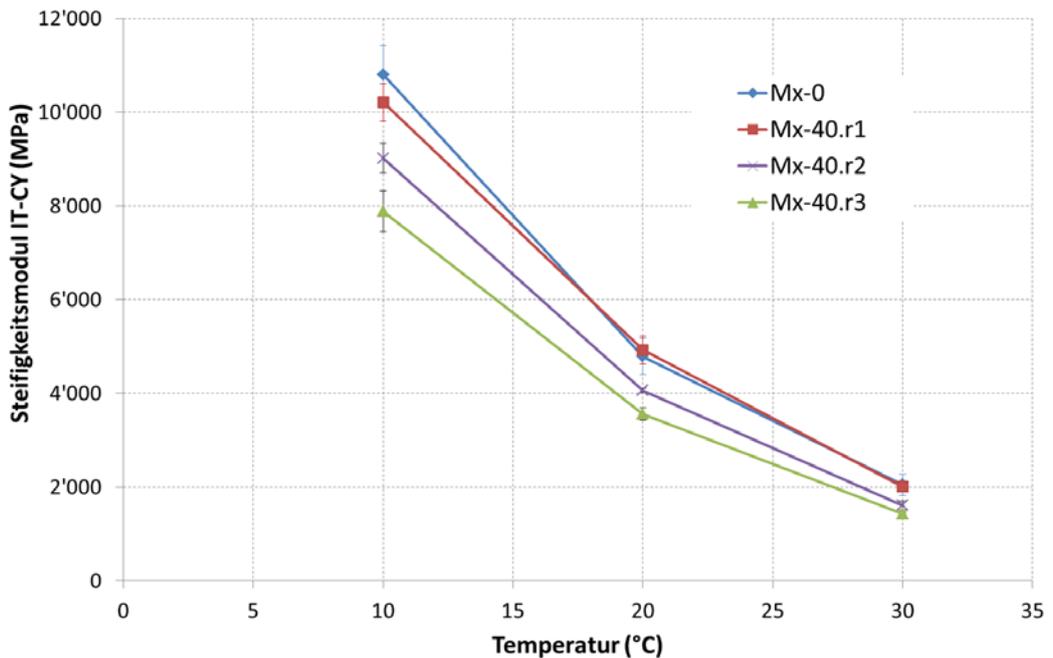


Abb. 42 Steifigkeitsmodul der Serie Mx-40 bei unterschiedlichen Temperaturen

Im Gegensatz zu den Marshall-Resultaten ergibt sich beim Steifigkeitsmodul ein eindeutiger Trend: Der Steifigkeitsmodul sinkt mit zunehmender Recyclingzahl bei allen Temperaturen. Nach dem ersten Recyclingschritt ist der Unterschied noch relativ gering, ist aber nach zwei und drei Recyclingschritten deutlich grösser. Der geringe Unterschied nach dem ersten Recyclingschritt könnte auf die Abweichungen in der Mischgutzusammensetzung von Mx-40.r2 zurückgeführt werden, der geringere Bindemittelgehalt macht die Mischung etwas steifer

Die beobachtete Verringerung der Modulwerte beim Mischgut ist überraschend, da beim Bindemittel sogar ein leichter Anstieg der Modulwerte zu beobachten war. Es stellt sich

deshalb die Frage, ob die Unterschiede durch Abweichungen in der Mischgutzusammensetzung zu suchen sind. Die Unterschiede zwischen Modulwerten der Prüfkörper und Penetrationswerten des Bindemittels könnten aber auch darauf hinweisen, dass die die Vermischung des neuen Zugabebindemittels mit dem im RAP verhärteten Bindemittel nicht vollständig ist. Dadurch wird die Viskosität des Zugabebindemittels zu tief berechnet, was eine zunehmende Verringerung des Steifigkeitsmoduls ergeben müsste. Interessant ist, dass die Abnahme vor allem nach dem zweiten und dritten Recyclingschritt auftritt. Aus diesem Grunde konnte dieses Phänomen beim Einzelprojekt EP-1 nicht beobachtet werden.

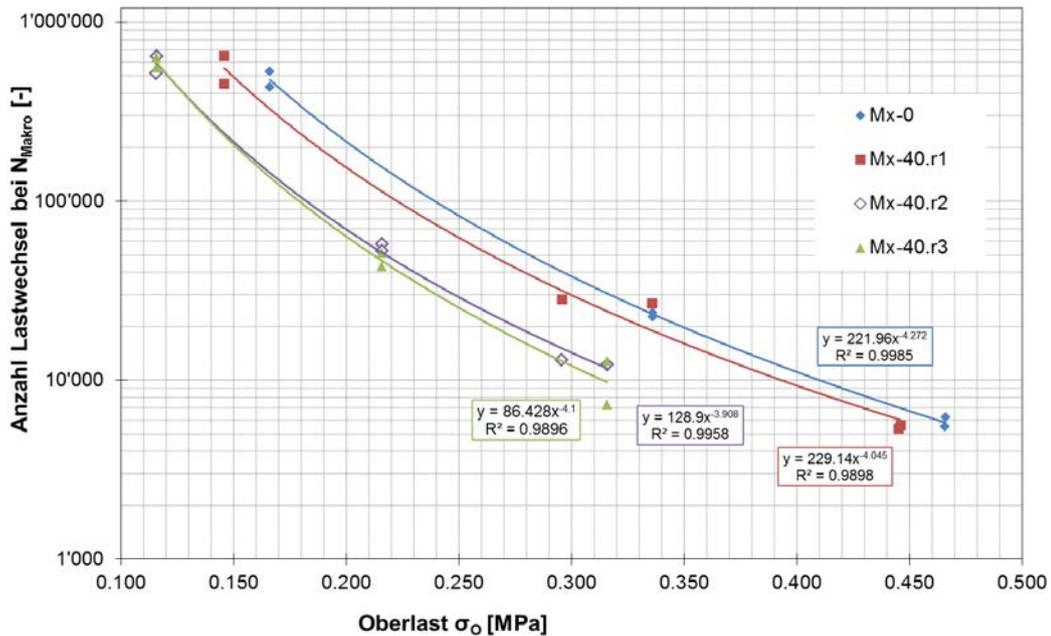


Abb. 43 Ermüdungsverhalten der Serie Mx-40

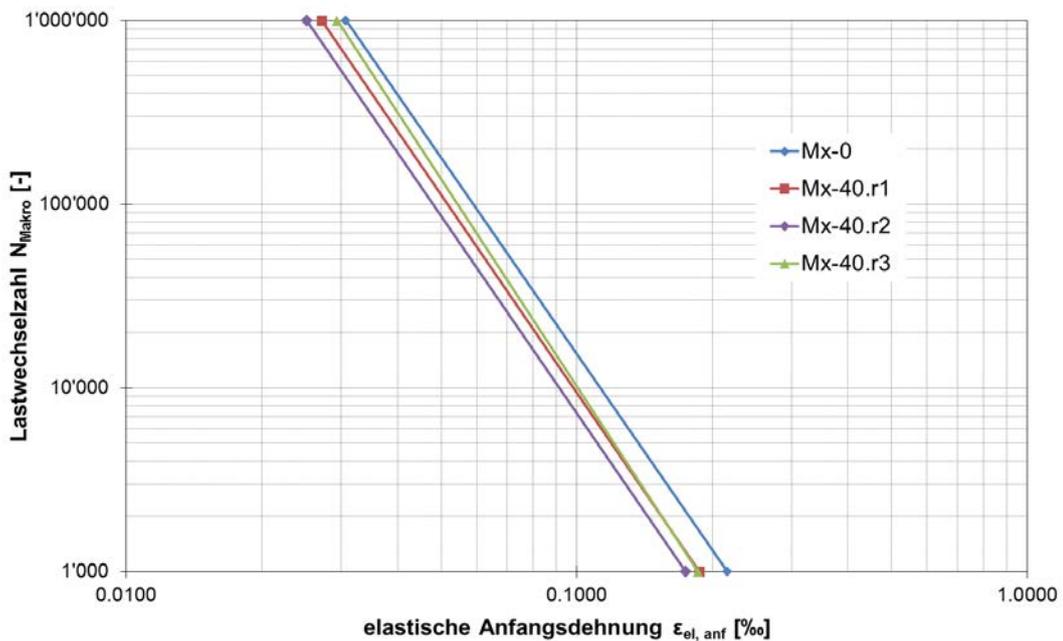


Abb. 44 Ermüdungsverhalten der Serie Mx-40

Die Ermüdungskennwerte ϵ_6 nach einer Million Zyklen nehmen mit Ausnahme der Mischung Mx-40.r3 kontinuierlich ab. Bei der Ermüdung ist aber im Gegensatz zum

Modul schon nach dem ersten Recyclingzyklus eine Abnahme der Ermüdungsbeständigkeit zu beobachten. Die Mischung Mx-40.r3 stimmt nicht ins Bild und zeigt wieder ein besseres Ermüdungsverhalten als die anderen Recyclingmischungen.

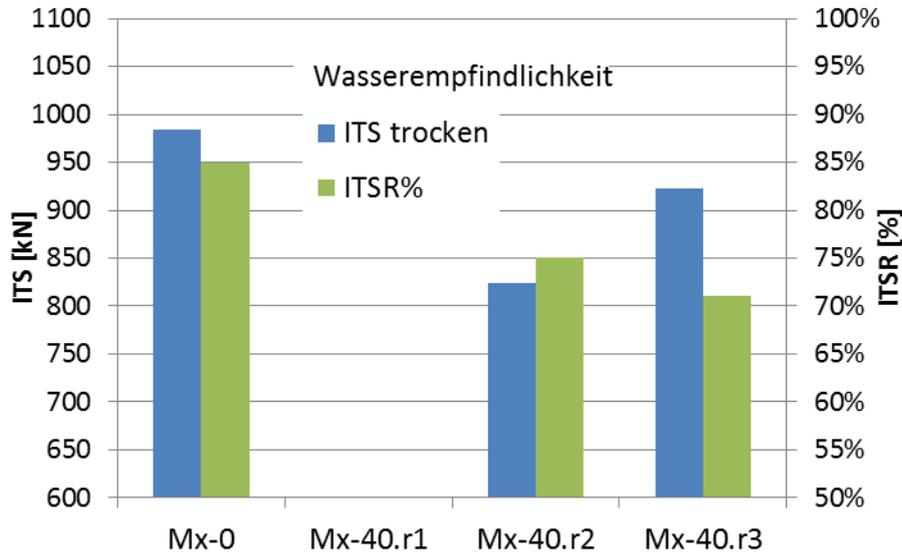


Abb. 45 Wasserempfindlichkeit der Serie Mx-40 nach mehrmaligem Recycling

Der Kennwert ITSr für die Wasserempfindlichkeit hingegen zeigt eine markante Reduktion von 85% beim Ausgangsmischgut Mx-0 ohne Recycling auf 71% bei der Mischung Mx-40.r3, das die schweizerischen Anforderungen an einen AC 11 somit nur knapp erfüllt [46]. Die ist ähnlich wie bei der im Labor rekonstruierten Mischung AC 11 N Mx-wim3 der Mineralstoffschädigung, wo ebenfalls eine starke Abnahme beobachtet wurde. Wie schon bei anderen Prüfungen stimmen die Resultate der Mischung Mx-40.r2 nicht ganz mit den Erwartungen überein.

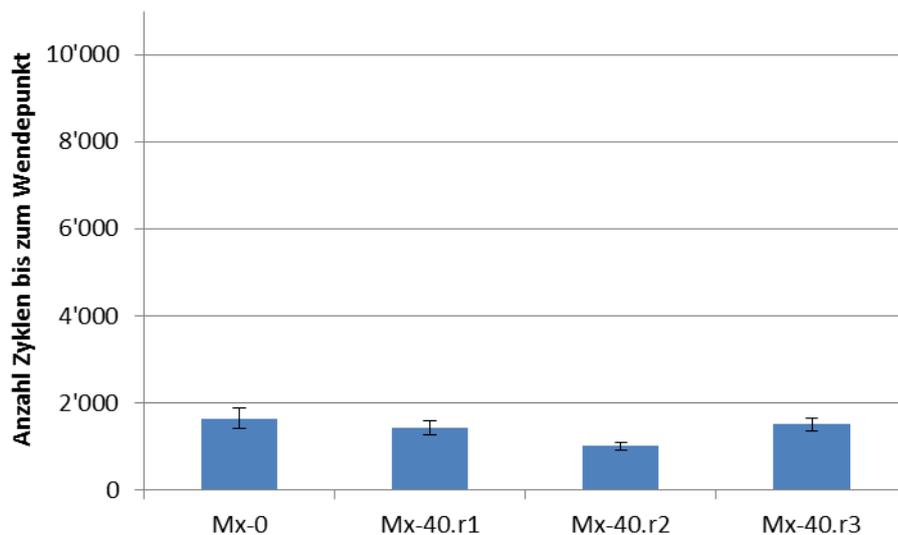


Abb. 46 Verformungseigenschaften (Druckschwellversuch) der Serie Mx-40: Anzahl Zyklen bis zum Wendepunkt

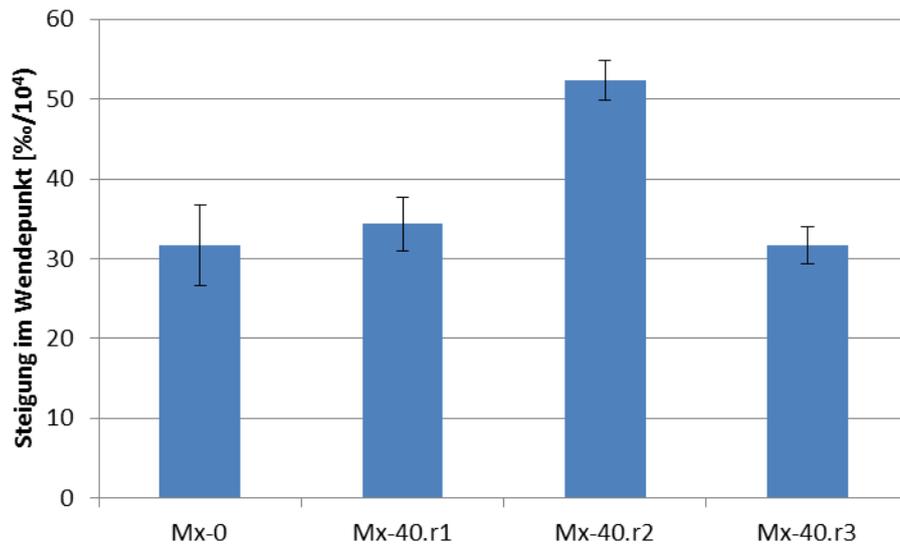


Abb. 47 Verformungseigenschaften (Druckschwellversuch) der Serie Mx-40: Steigung im Wendepunkt

Die Verformungseigenschaften des Mischgutes AC 11 S sind schlecht, wie dies schon in der Untersuchung des Mischgutes im roten Faden festgestellt wurde. Durch das wiederholte Recycling bleibt dies bestehen, es tritt demzufolge aber auch keine Verhärtung ein. Wiederum beim Mischgut Mx-40.r2 ist ein Unterschied festzustellen. Insbesondere die Steigung im Wendepunkt ist deutlich grösser als bei den anderen drei Mischungen, was ein schnelleres Versagen anzeigt. Diese Resultate stehen im Einklang mit jenen der Ermüdungsprüfung, wo diese Mischung auch den kleinsten Wert für ϵ_6 ergab. Interessanterweise liegen aber die Modulwerte der Mischung Mx-40.r3 noch tiefer als bei Mx-40.r2, weshalb bei der Mischung Mx-40.r3 die grösste Steigung im Druckschwellversuch zu erwarten wären.

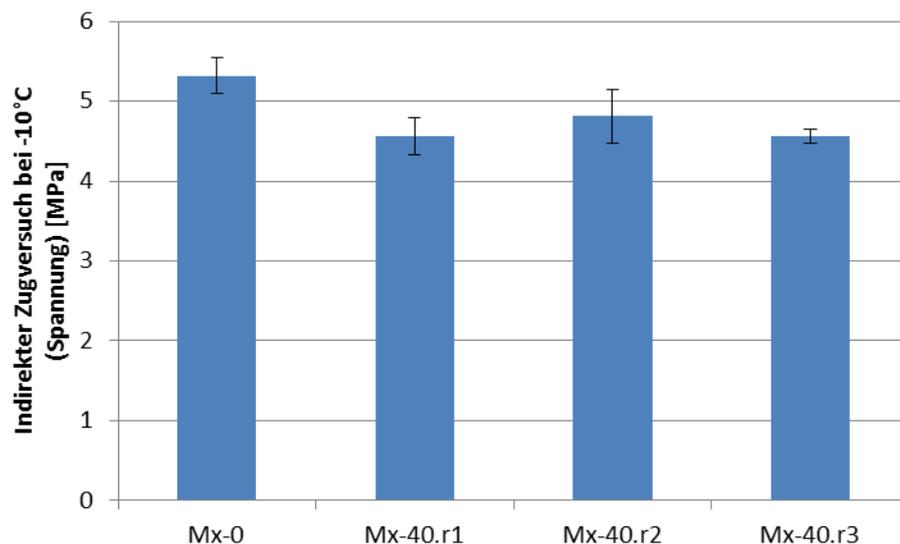


Abb. 48 Kälteeigenschaften der Serie Mx-40

Die gemessenen Spannungen im Kälteversuch bei -10°C liegen bei den Recyclingmischungen alle etwas tiefer als bei der Referenzmischung Mx-0.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Bindemittleigenschaften nach dem ersten Recycling sehr ähnlich sind. Bei den Resultaten der FTIR- und

Modulprüfungen ist eine leichte Verhärtung im Bindemittel der Recyclingmischungen festzustellen. Dies bedeutet, dass die Berechnung des Zugabebindemittels mit Hilfe der Penetrationswerte (nach Formel 5) gut funktioniert. Hingegen deuten die Modulwerte daraufhin, dass die Vermischung von neuem und RAP-Bindemittel nicht vollständig ist. Während mit der klassischen Prüfung Marshallstabilität, abgesehen von der Referenzmischung Mx-0, keine Unterschiede festgestellt werden konnten, zeigten die Resultate der anderen Prüfungen keinen eindeutigen Trend. In einigen Prüfungen zeigte die Mischung Mx-40.r2 die deutlich niedrigste Performance, namentlich im Druckschwellversuch, aber auch in der Ermüdung und Steifigkeit mittels indirekten Zugversuchs. Die Mischung nach dem dritten Recycling Mx-40.r3 hingegen zeigt wieder ähnliche Ergebnisse wie die Mischung Mx-40.r1 nach dem ersten Recycling, obwohl die volumetrische Zusammensetzung von Mx-40.r2 und Mx-40.r3 praktisch identisch sind. Im Allgemeinen sind die Unterschiede aber klein und liegen teilweise innerhalb der Messunsicherheit. Allerdings kann in einigen Prüfungen ein Hinweis für einen möglichen negativen Einfluss durch das Mehrfachrecycling erkannt werden.

3.2.5 Prüferie Mx-100 mit 100% RAP

Je höher der Recyclinganteil, desto höher ist der Einfluss des alten RAP-Bindemittels in der neuen Mischung. Im Einzelprojekt EP1 wurde gezeigt, dass ab etwa 60% RAP-Anteil der Zusatz eines Verjüngungsmittels notwendig ist. Da die Kenntnisse bezüglich Verjüngungsmittel in der Schweiz gering sind, wurde beschlossen, eine Prüferie mit 100% Recycling durchzuführen, wo reines Verjüngungsmittel hinzugefügt wird, um den Einfluss des Verjüngungsmittels separat studieren zu können.

Tab. 16 Kennwerte des rückgewonnen Bindemittels für Mischgut und künstlich hergestelltes RAP

Mischgut	Penetration [0.1 mm]	ERK [°C]	PI
Ausgangsmischgut (0% RAP) Mx-100.0	42	55.7	-0.28
RAP-100.r0	30	60.6	0.05
Mischgut (1. Wied.) Mx-100.r1	42	57.3	0.06
RAP-100.r1	28	65.0	0.64
Mischgut (2. Wied.) Mx-100.r2	33	64.2	0.84
RAP-100.r2	21	74.0	1.48

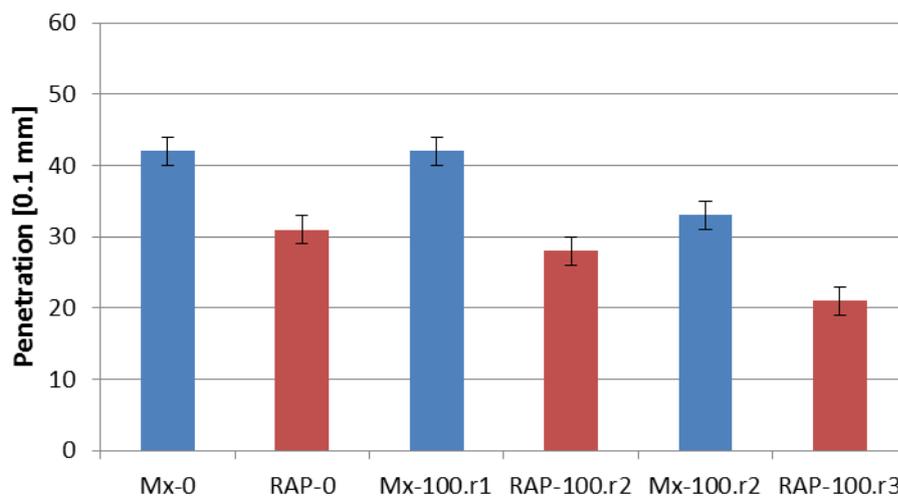


Abb. 49 Penetrationswerte des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutserie Mx-100 und zugehörigem RAP

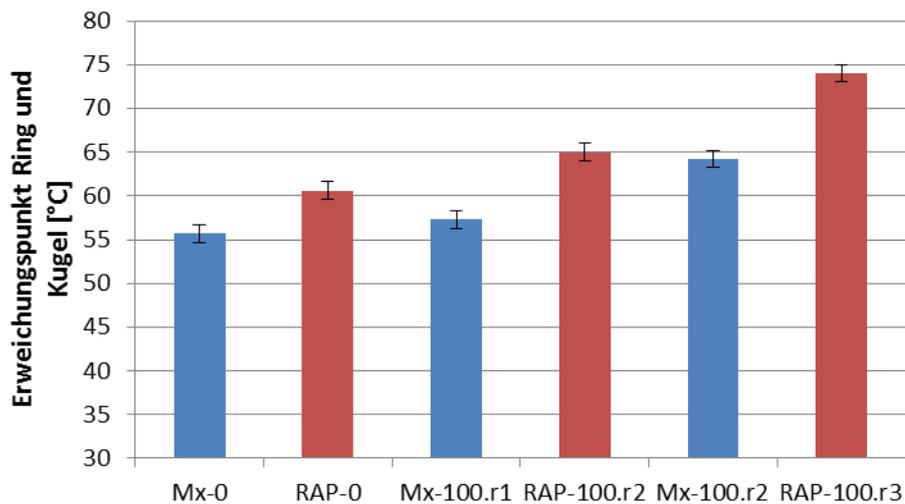


Abb. 50 Erweichungspunkte Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutserie Mx-100 und zugehörigem RAP

Wie aus den beiden Diagrammen hervorgeht, sind Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnen Bindemittels nach dem ersten Recycling ähnlich wie bei der Referenzmischung Mx-100.0. Die Alterung des Mischgutes Mx-100.r1 war jedoch stärker als bei der Referenzmischung und ergab ein RAP-100.r1 mit deutlich härterem Bindemittel.

Zudem erwies sich das Verjüngungsmittel im zweiten Recycling-Zyklus weniger effektiv: Trotz der praktisch gleichen Zugabemenge von 0.28% resp. 4.8% Verjüngungsmittel bezüglich des Bindemittels, resultierte nur eine minime Erweichung des gealterten Bindemittels (ERK -1°C , Penetration $+5^{\circ}\text{C}$). Nach dem zweiten Recycling war die Verhärtung der Mischung Mx-100.r2 durch die Ofenalterung nochmals stärker als bei Mx-100.r1 und ergab einen Penetrationswert von 21 [0.1 mm] und einen Erweichungspunkt von 74°C . Die Alterung der Bindemittel, die Verjüngungsmittel enthielten, war deutlich stärker als beim reinen Referenzbitumen. Vermutlich genügt die vereinfachte Formel 6 für die Berechnung der Zugabemenge nicht mehr und muss modifiziert werden. Die Veränderung im Alterungsverhalten zeigt sich auch im Penetrationsindex, der mit zunehmenden Recyclingzyklen immer stärker ansteigt. Dies bedeutet, dass das Bindemittel im RAP bei gleichen Bedingungen bei mehrmaligem Recycling stärker verhärtet. Worauf dies genau zurückzuführen ist, konnte im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht untersucht werden. Erstens verändert sich das Verhältnis von Bitumen zum Verjüngungsmittel und zweitens ist nicht bekannt, wie sich das Verjüngungsmittel selbst verändert und wie es das Alterungsverhalten des Bindemittels als Gesamtsystem verändert.

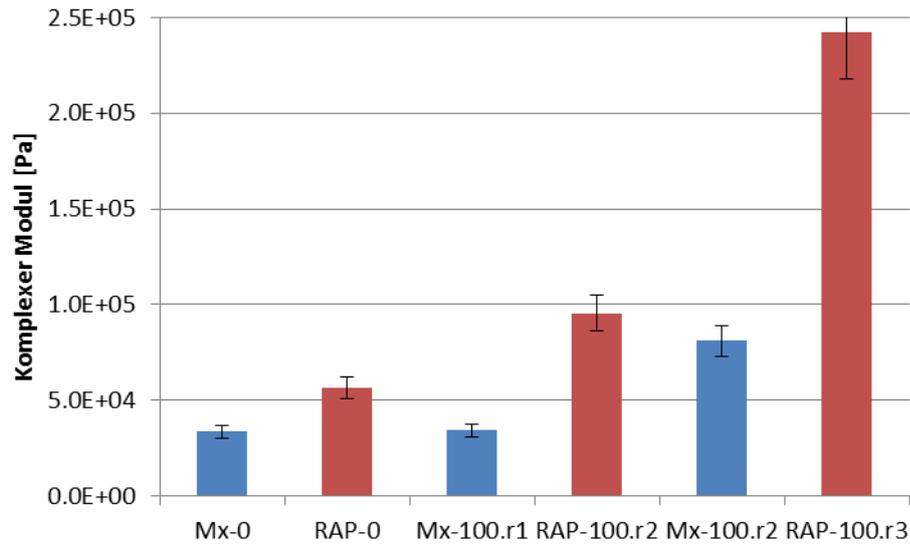


Abb. 51 Komplexer Modul des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutserie Mx-100 und zugehörigem RAP

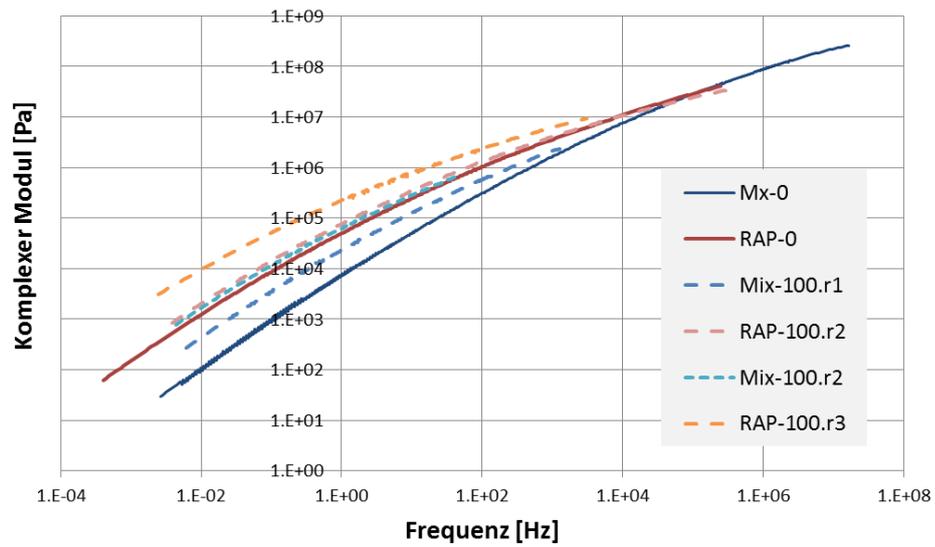


Abb. 52 DSR-Masterkurve des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutvarianten Mx-100 und zugehörigem RAP

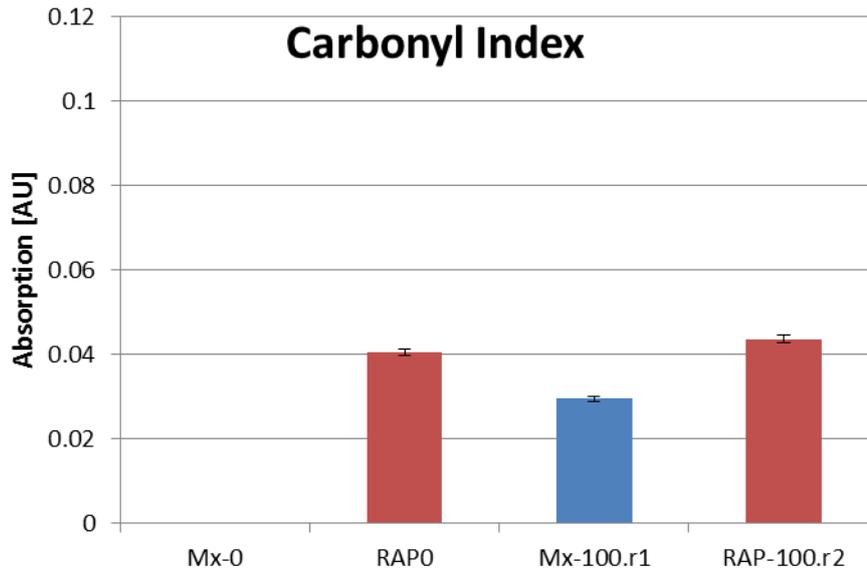


Abb. 53 Carbonyl-Index (FTIR) des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutvarianten Mx-100 und zugehörigem RAP

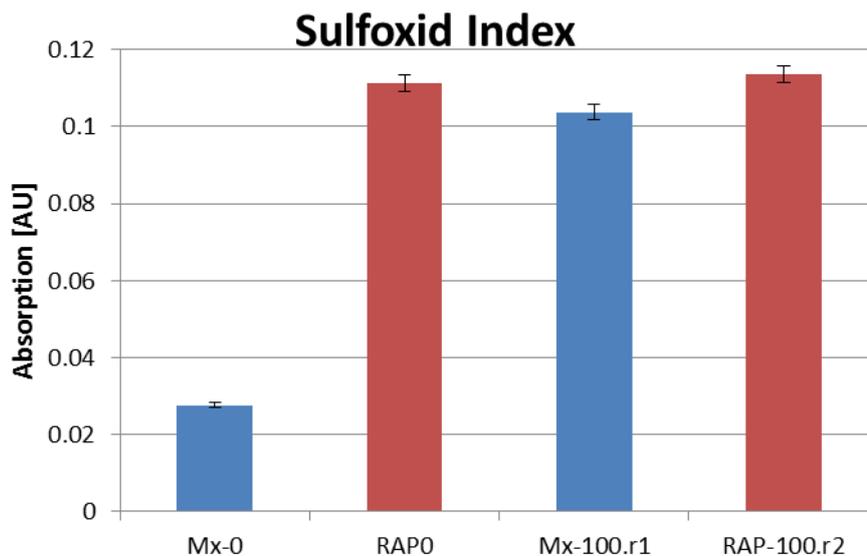


Abb. 54 Sulfoxid-Index (FTIR) des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutvarianten Mx-100 und zugehörigem RAP

Die Resultate der FTIR-Resultate der Serie Mx-100 sind vergleichbar mit jenen der Serie Mx-40. Die Indices von Mx-100.r1, sowohl der Carbonylgruppe als auch der Sulfoxidgruppe, sind jedoch grösser als bei der Serie Mx-40. Eigentlich sollten die Werte für RAP0, Mx-100.r1 und RAP-100.r2 praktisch gleich sein, da 100% RAP ohne Bitumenzugabe verwendet wurde. Die Reduktion der Indices bei Mx-100.r1 muss daher durch das Verjüngungsmittel verursacht worden sein.

Volumetrische Kennwerte des Mischgutes

Da keine neuen Mineralstoffe zugegeben wurden, musste auf die Untersuchung der Mischung Mx-100.r1 verzichtet werden, da dieses Material nach der Alterung für die Herstellung der Mischung Mx-100.r2 und deren Prüfkörper benötigt wurde.

Tab. 17 Mischgutkennwerte von der Mischserie Mx-100 nach wiederholtem Recycling

Mischgut		Mx0	Mx-100.r1	Mx-100.r2
Bindemittelanteil	M-%	5.8	n.b.	6.1
Hohlraumgehalt Marshall	%	2.7	n.b.	2.6
Marshall Stabilität	kN	11.2	n.b.	14.6
Marshall Fließen	mm	3.3	n.b.	4
Wasserempfindlichkeit ITS trocken	kN	1383	n.b.	1658
Wasserempfindlichkeit ITSR	%	85	n.b.	84

Die volumetrischen Kennwerte der Mischung Mx-100.r2 stimmen gut mit der Referenzmischung Mx0 überein. Die Werte Marshall Stabilität, indirekte Zugspannung im trockenen Zustand zeigen und die Modulwerte bei verschiedenen Temperaturen zeigen, dass die Prüfkörper deutlich steifer geworden sind, wie dies auch schon bei den Bindemittleigenschaften beobachtet wurde. Dies im Unterschied zur Serie Mx-40, wo durch die mehrmalige Zugabe von frischem Bindemittel, der Steifigkeitsmodul zurückging. Der relative Wert ITSR als Indikator für die Wasserempfindlichkeit blieb aber unverändert.

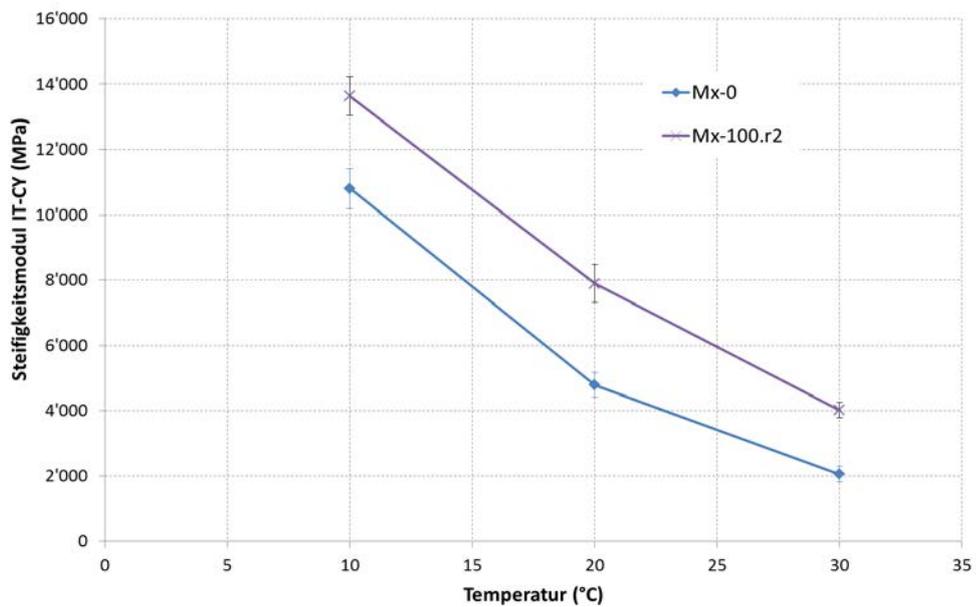


Abb. 55 Steifigkeitsmodul der Serie Mx-100 bei unterschiedlichen Temperaturen

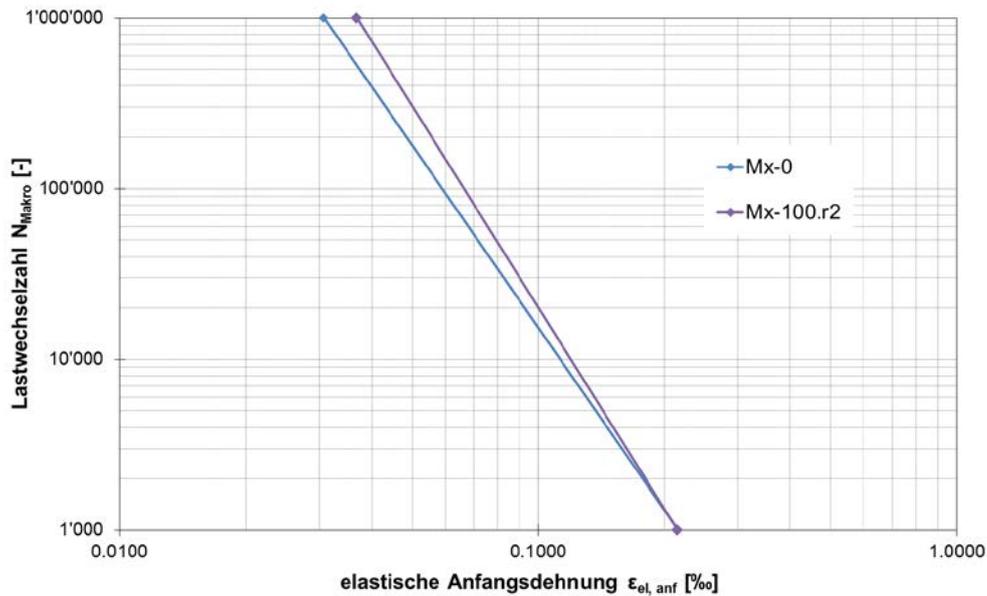


Abb. 56 Ermüdungsverhalten der Serie Mx-100

Der massgebende Wert ϵ_6 für die Ermüdungsbeständigkeit hat sich leicht verbessert und gleichzeitig hat sich die Steigung der Gerade erhöht.

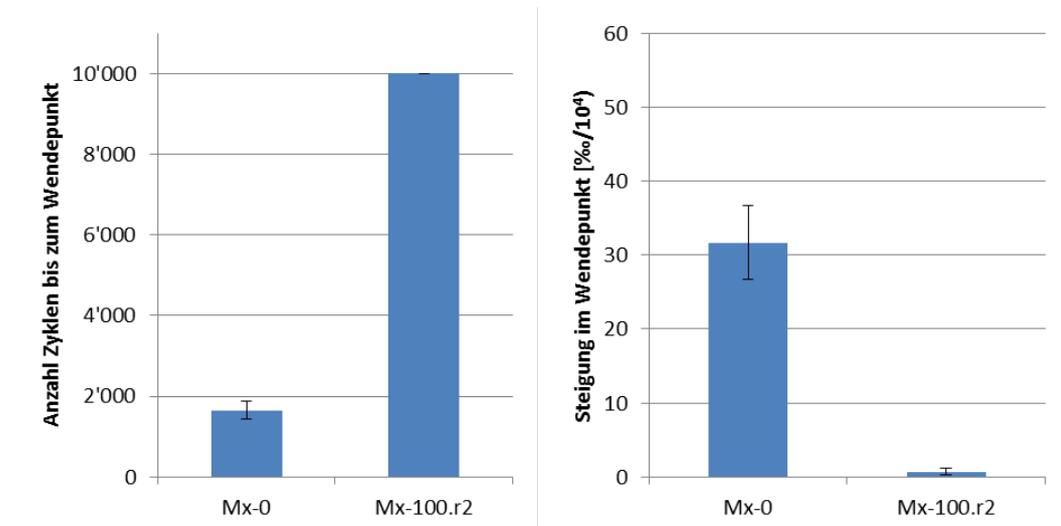


Abb. 57 Verformungseigenschaften (Druckschwellversuch) der Serie Mx-100

Die Zugabe von Verjüngungsmittel führt zu einer klar besseren Performance beim Druckschwellversuch. Obwohl das Bindemittel härter ist, was auch in einem höheren Modul zum Ausdruck kommt, kann die stark verbesserten Verformungseigenschaften nicht alleine auf Bindemittelhärte zurückzuführen werden. Ähnliche Unterschiede im Modul sind auch in der Serie Mx-40 aufgetreten, was aber bedeutend geringeren Einfluss auf die Verformung ergab. Es ist zu vermuten, dass das Verjüngungsmittel einen wesentlich Beitrag zu den verbesserten Verformungseigenschaften liefert.

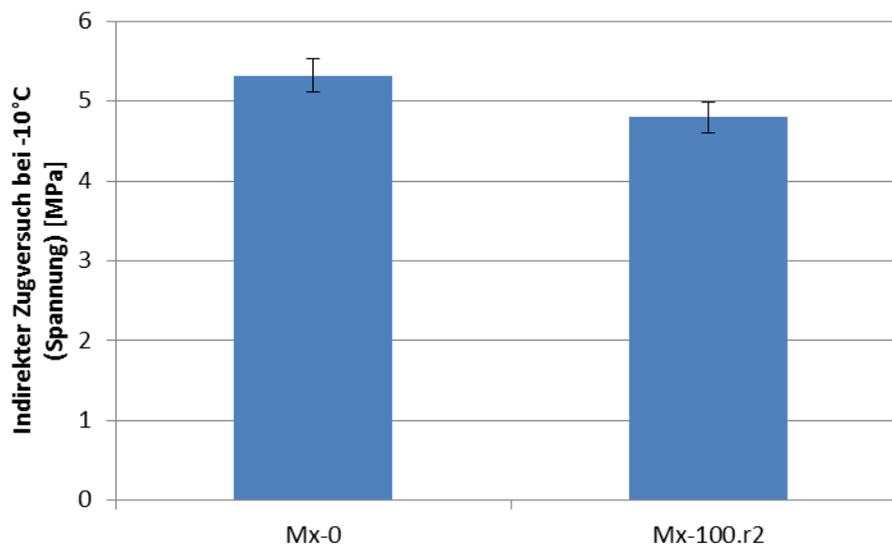


Abb. 58 Kälteeigenschaften der Serie Mx-100

Die Bindemittleigenschaften der Serie Mx-100 zeigen eine zunehmende Verhärtung in allen gemessenen Eigenschaften. Während nach dem ersten Recyclingschritt die Mischung Mx-100.r1 noch sehr ähnliche Bindemittleigenschaften zeigt wie die Referenzmischung, ist das Bindemittel der Mischung Mx-100.r2 deutlich härter, obwohl sie nach dem gleichen Rezept hergestellt wurde wie Mx-100.r1. Der Vergleich zwischen RAP-100.r1 und RAP-100.r2 ergibt, dass die Alterung der Mischung Mx-100.r1, die Verjüngungsmittel enthält, stärker altert als die Referenzmischung ohne Verjüngungsmittel. Dies ist nach dem zweiten Recycling bei RAP-100.r3 noch stärker bemerkbar. Dies bedeutet, dass die verwendete Formel für die Simulation der Alterung und Berechnung des Zugabebindemittels bei Verjüngungsmittel, zumindest beim eingesetzten Produkt, nicht mehr gültig ist. Die Verhärtung der Mischung Mx-100.r2 ist auch in den Resultaten der Prüfungen am verdichteten Mischgut gut ersichtlich. Interessanterweise verbessert sich das Ermüdungsverhalten trotz der aufgetretenen Verhärtung und das Tieftemperaturverhalten ist auch akzeptabel. Dies zeigt, dass die Belageigenschaften nicht immer mit den Penetrationswerten übereinstimmen. Es stellt sich deshalb die Frage, ob die Beurteilung der Bindemittelverhärtung alleine zur Beurteilung von Recyclingbelägen verwendet werden soll. Es ist zu hoffen, dass das geplante Validierungsprojekt noch zusätzliche Informationen dazu liefern kann.

3.2.6 Prüfserie Mx-PmB mit Polymerbitumenzusatz

In der Prüfserie PmB wurde ermittelt, inwieweit der Zusatz von PmB die Eigenschaften des Recyclingmischgutes beeinflusst. Leider konnten nur geringe Mengen an polymerhaltigem Bindemittel, das mit einem erhöhten Polymergehalt speziell für Recycling hergestellt wird, beschafft werden. Dies reichte nur für eine Mischung, weshalb kein zweites Recycling möglich war. Um keine zusätzlichen Parameter einzubringen, wurde nur das relativ weiche Polymerbitumen zugegeben. Durch Berechnung gemäss Formel 5 ergab sich daraus ein möglicher Recyclinganteil von 45 %.

Tab. 18 Kennwerte des rückgewonnen Bindemittels für Mischgut und künstlich hergestelltes RAP der Serie Mx-PmB

Mischgut	Penetration [0.1 mm]	ERK [°C]	PI
Ausgangsmischgut Mx0	42	55.7	-0.3
RAP-0	34	58	-0.3
Mischgut (1. Wied.) Mx-PmB.r1	58	55.2	0.4
RAP-PmB.r1	36	62.4	0.7

Die Resultate von Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel zeigen aber, dass die Berechnung des Zugabebindemittels für Polymerbitumen nicht gut funktioniert. Der gemessene Penetrationswert ist mit $58 \cdot 10^{-1}$ mm viel zu hoch, wobei der Erweichungspunkt Ring und Kugel aber wenig abnimmt. Nach der zweiten Alterung wird hingegen für die Penetration wieder ein ähnlicher Wert wie nach der ersten Alterung zum RAP-0 erhalten, gemäss Erweichungspunkt Ring und Kugel hat sich das Bindemittel im RAP-PmB.r1 aber stark verhärtet (ERK 62.4°C). Daraus ist zu folgern, dass die Zugabe von PmB die Bindemittleigenschaften im Mischgut in einer anderen Art beeinflusst als nicht-modifiziertes Bitumen. Dies ist nicht unerwartet, da Polymere zur Verbesserung des Belages eingesetzt werden. Da der Polymergehalt bei PmB für Recycling erhöht ist, kann dies die niedrige Dosierung (3.4% PmB) kompensieren. Die Berechnung der optimalen Bindemittelsorte und der Dosierung ist jedoch schwieriger und lässt sich vermutlich nicht über den Penetrationswert erreichen.

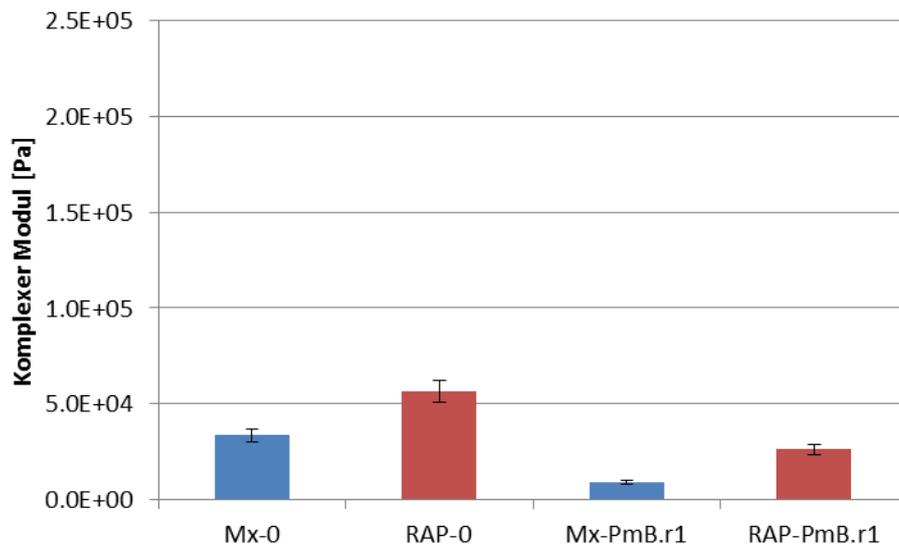


Abb. 59 Komplexer Modul des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutserie Mx-PmB und zugehörigem RAP

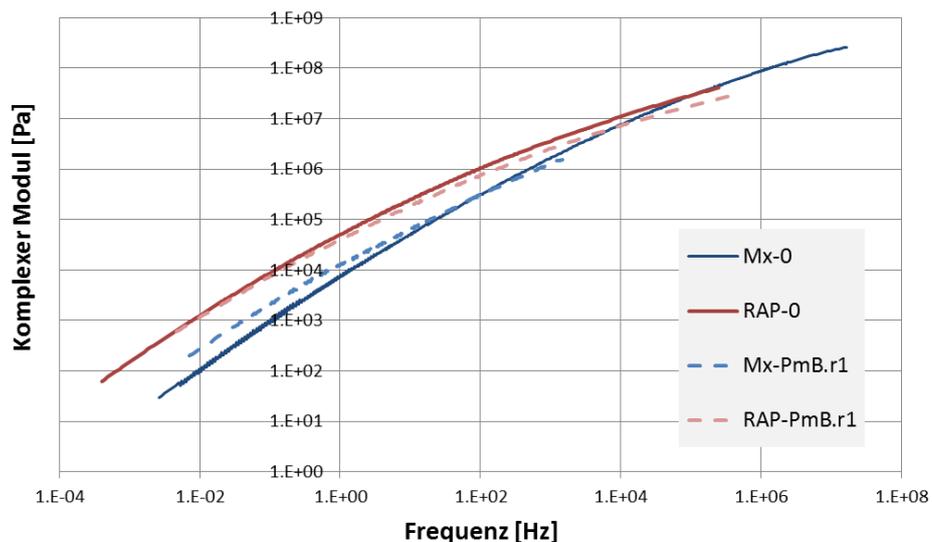


Abb. 60 DSR-Masterkurve des rückgewonnenen Bindemittels der Mischgutvarianten Mx-PmB und zugehörigem RAP

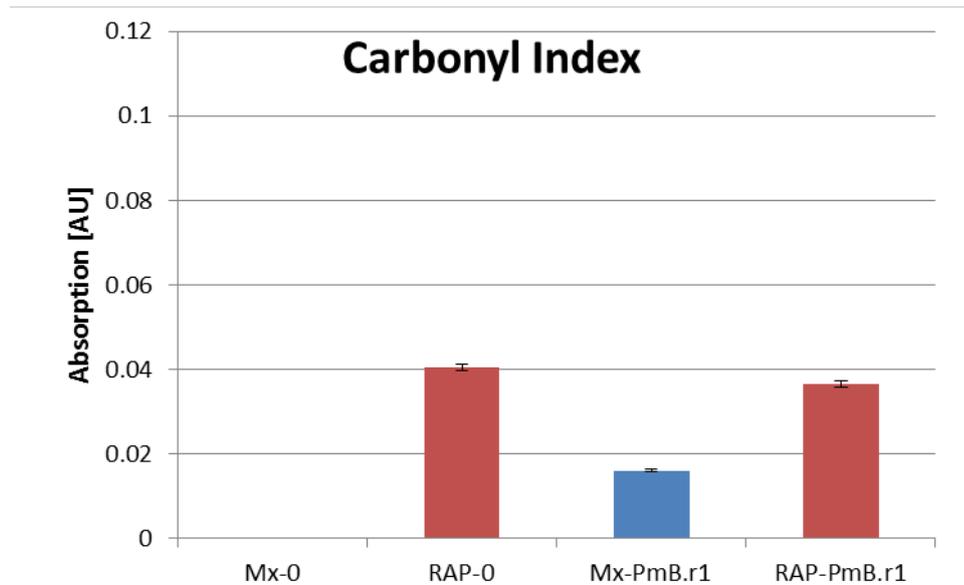


Abb. 61 Carbonyl-Index (FTIR) der Mischgutvarianten Mx-PmB und zugehörigem RAP

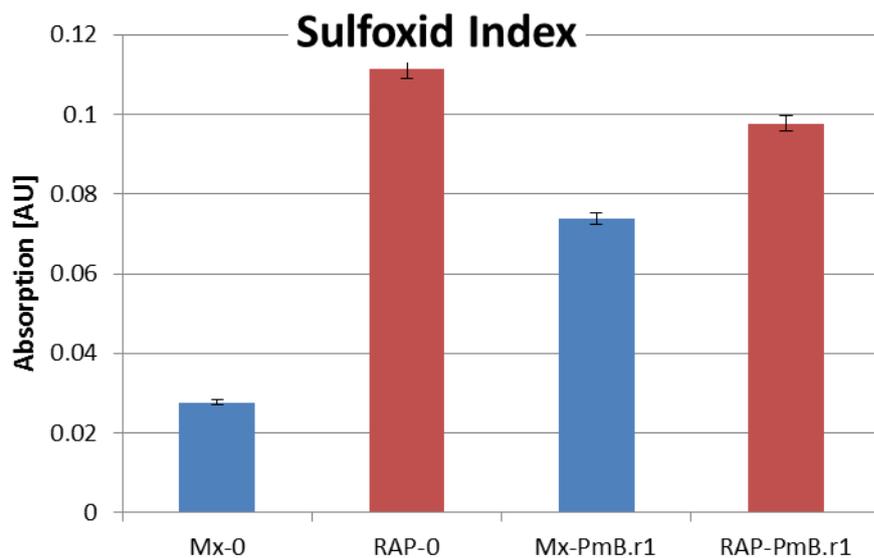


Abb. 62 Sulfoxid-Index (FTIR) der Mischgutvarianten Mx-PmB und zugehörigem RAP

Die FTIR-Resultate zeigen kleinere Werte für die Mischung Mx-PmB.r1 nach Zugabe des PmB, auch beim daraus hergestellten RAP liegen die Werte vor allem beim Sulfoxid-Index tiefer. Die PmB-Zugabe zeigt also einen positiven Effekt auf die Oxidation der Carbonyl- und Sulfoxidgruppen, indem die Oxidation dieser Gruppen offensichtlich gehemmt wird. Ob dies durch die bekanntlich parallel verlaufende Oxidation der Polymerketten bewirkt wird, müsste in einer weitergehenden Untersuchung geklärt werden.

Tab. 19 Mischgutkennwerte von Mx-PmB nach einmaligem Recycling

Mischgut		Mx-0	Mx-PmB.r1
Bindemittelanteil	M-%	5.8	6.0
Hohlraumgehalt Marshall	%	2.7	2.5
Marshall Stabilität	kN	11.2	9.9
Marshall Fließen	mm	3.3	3.1
Wasserempfindlichkeit ITS trocken	kN	1383	909
Wasserempfindlichkeit ITSr	%	85	87

Die volumetrischen Kennwerte der Mischung Mx-PmB.r1 und der Referenzmischung Mx0 sind sehr ähnlich und liegen innerhalb der Vergleichbarkeit der Prüfmethode. Die Marshallstabilität, ITS trocken und die Modulwerte ergeben, dass die Recyclingmischung weicher ist.

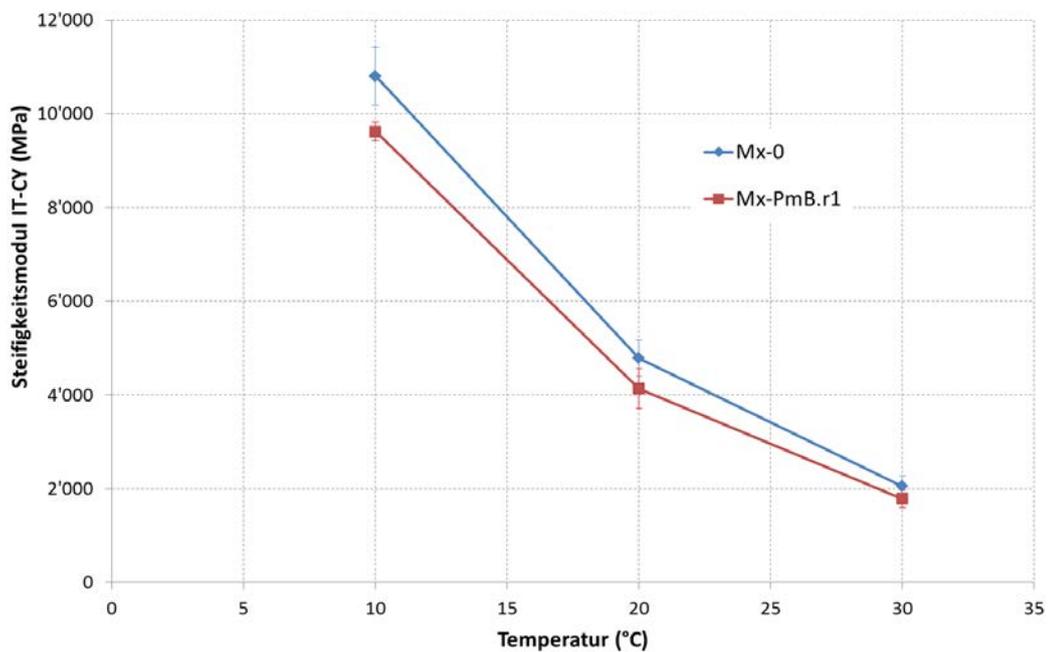


Abb. 63 Steifigkeitsmodul der Serie Mx-PmB bei unterschiedlichen Temperaturen

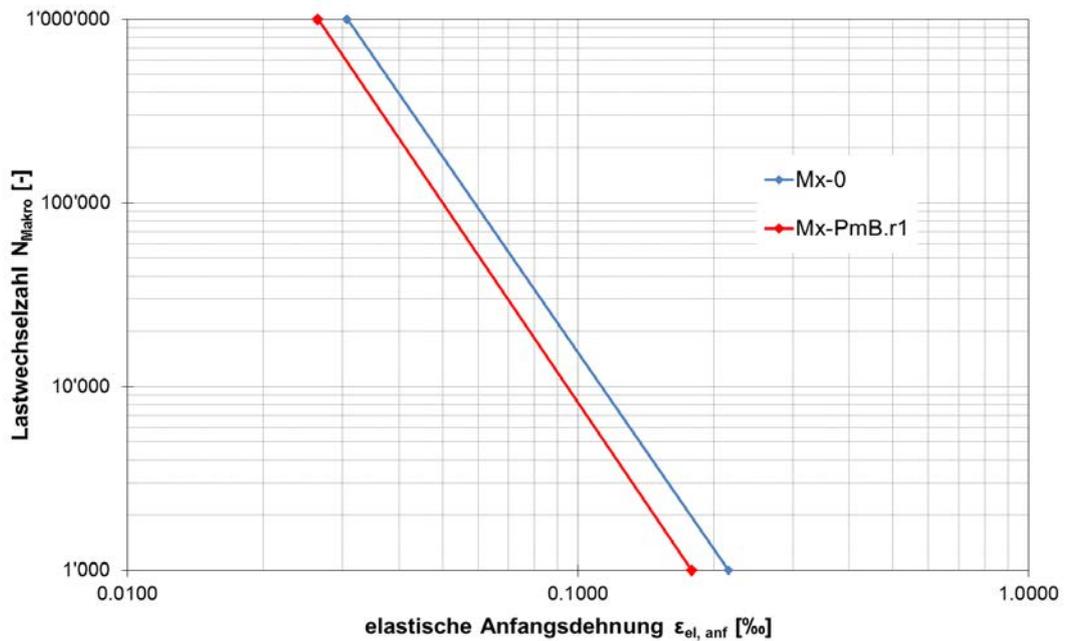


Abb. 64 Ermüdungsverhalten der Serie Mx-PmB

Die Ermüdungskurve nach dem Recycling hat sich parallel zur Referenzmischung nach links verschoben. Dies bedeutet, dass die Mischung Mx-PmB.r1 eine kleinere elastische Anfangsdehnung bei 1 Million Zyklen aufweist respektive bei gleicher elastischen Anfangsdehnung weniger Zyklen erreicht und deshalb weniger ermüdungsbeständig ist.

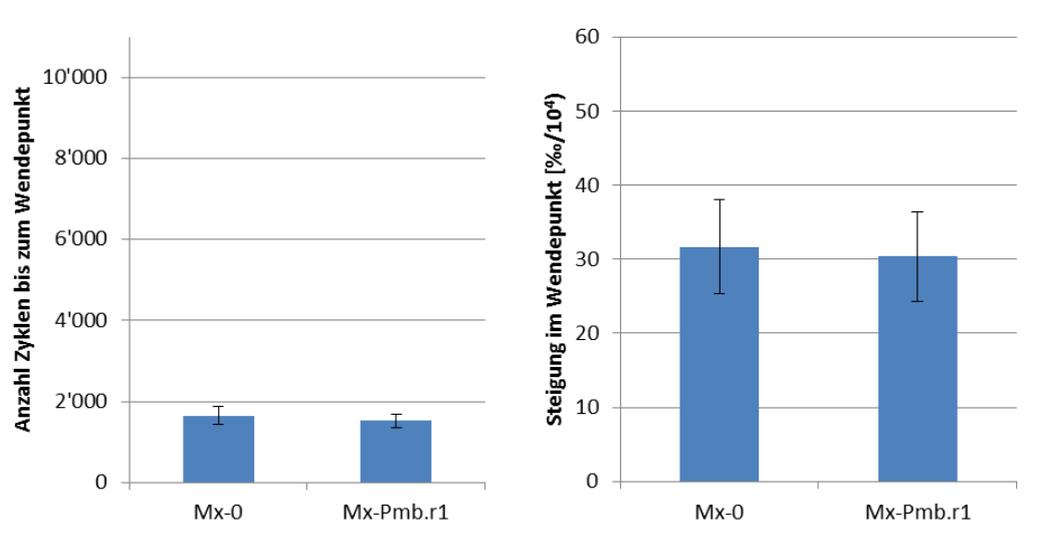


Abb. 65 Verformungseigenschaften (Druckschwellversuch) der Serie Mx-PmB

Obwohl das Bindemittel weicher ist, hat dies keinen nachteiligen Einfluss auf das Verformungsverhalten der Mischung Mx-PmB.r1. Dies muss deshalb auf das Polymerbitumen zurückzuführen sein.

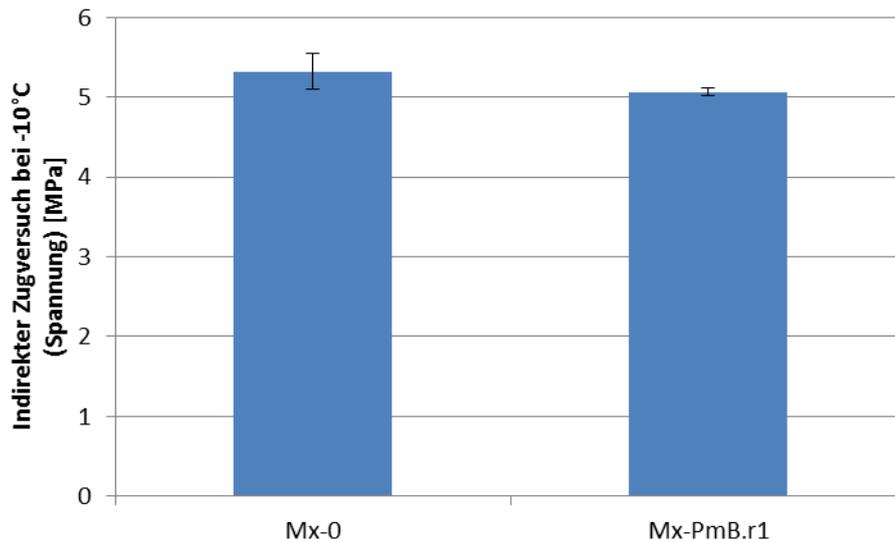


Abb. 66 Kälteeigenschaften der Serie Mx-PmB

Die Zugabe von polymerhaltigen Bindemitteln zeigt, dass sich das Verhalten der Recyclingmischung stark verändert. Die Berechnung des Penetrationswertes stimmt nicht mit dem gemessenen Wert des rückgewonnenen Bindemittels überein, das einen deutlich höheren Wert ergibt als berechnet. Hingegen ist der Erweichungspunkt Ring und Kugel der beiden Mischungen identisch. Der komplexe Modul bei 50°C wiederum ist bei der Mischung Mx-PmB.r1 tiefer verglichen mit der Referenzmischung Mx-0 und stimmt somit besser mit der Penetration überein. Aber auch die Mischguteigenschaften zeigen, dass die Mischung Mx-PmB.r1 (Marshallstabilität, Steifigkeitsmodul) weicher ist als die Referenzmischung. Überraschend ist aber dass, die Resultate des Druckschwellversuches für beide Mischungen identisch ist. Die weichere Mischung mit PmB zeigt also bei 50°C keine höhere Neigung zur Spurrinnenbildung, was auf die zugegebenen Polymere zurückzuführen ist. Hingegen wurde eine geringere Ermüdungsresistenz für Mx-PmB.r1 gemessen. Dies zeigt, dass bei der Zugabe von polymerhaltigen Bindemitteln die Optimierung basierend auf den Mischguteigenschaften erfolgen sollte, da die Bindemittleigenschaften alleine nicht genügend aussagekräftig sind.

3.3 Schlusdiskussion

Die Herstellung von Mischungen mit möglichst genauen Eigenschaften stellte sich als grosse Herausforderung dar, insbesondere auch deshalb, weil das Recyclingmaterial, auch nach dem Homogenisieren durch Herunterteilen nicht vollkommen homogen war. Dies hat im Labor durch die Verwendung relativ kleiner Mengen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss. Dadurch resultieren Abweichungen in den volumetrischen Eigenschaften der aus den Mischungen hergestellten Prüfkörper, welche die mechanischen Eigenschaften zu einem gewissen Grade beeinflussen und die Analyse des Einflusses durch mehrfaches Recyclings erschweren.

3.3.1 Einfluss auf die Mineralstoffeigenschaften

Die Beurteilung einer Veränderung der Mineralstoffeigenschaften durch das Fräsen und Brechen des Ausbausphaltes konnte nur in einem Recyclingzyklus beurteilt werden, da keine Möglichkeit bestand das Fräsgut für ein neues Mischgut zu verwenden und diese danach einzubauen. Allfällige Beeinträchtigungen der Mineralstoffqualität durch den Mischvorgang in der Asphaltanlage oder durch den Einbau mittels Vibrations-Walze konnten so auch nicht ermittelt werden.

Es konnte eine deutliche Veränderung der Korngrössenverteilung festgestellt werden,

insbesondere eine Reduzierung der groben Fraktionen. Die grösste Zunahme wurde in der Sandfraktion gemessen, während die Feianteile praktisch konstant blieben. Hierdurch wird bezüglich der Korngrössenverteilung aus einem AC 22 ein AC 16 respektive aus einem AC 11 ein AC 8.

Durch das Fräsen und Brechen werden wie schon erwähnt die groben Mineralstoffe gebrochen. Dadurch verbessern sich die Eigenschaften bei höherem Rundkornanteil, da die groben runden Mineralstoffkörner gebrochen werden. Dies ist aber nur in den groben Fraktionen der Fall. Obwohl eine relative Verbesserung zum Zustand vor dem Fräsen festgestellt werden kann, kann RAP immer noch grössere Anteile an Rundkorn enthalten. Dieser ist vor allem für Beläge mit hohen Anforderungen, beispielsweise für Deckbeläge oder Beläge vom Typ H, ein Problem. Eine Triage von RAP mit und ohne Rundanteil müsste deshalb für qualitative hochstehende Beläge gefordert werden.

3.3.2 Einfluss auf die Bindemittleigenschaften

Bei einem Recyclinganteil von 40%, wurde über drei Recyclingzyklen in einigen Prüfungen eine leicht niedrigere Performance bei den mechanischen Eigenschaften beobachtet. Bei der Marshallstabilität wurde nach dem ersten Recyclingschritt keine Veränderung beobachtet, gleiches gilt für die Tieftemperatureigenschaften, die mit der indirekten Zugprüfung bei -10°C bestimmt wurden. Hingegen nahm sowohl das Fließen Marshall als auch der Steifigkeitsmodul mit den Recyclingschritten zu, obwohl der Penetrationswert konstant blieb. Bei der Ermüdungsbeständigkeit konnte dies bis auf die letzte Mischung ebenfalls beobachtet werden. Allerdings sind diese Unterschiede nicht dramatisch und stellen nach drei Recyclingzyklen noch kein Problem dar. Es zeigt aber doch, dass ein wiederholtes Recycling die Bindemittleigenschaften beeinflusst.

Verjüngungsmittel werden notwendig bei hohen Recyclinganteilen und hartem RAP. Wohl sind weichere Bindemittel als das im Projekt verwendete Bitumen 160/220 auf dem Markt erhältlich, die aber in den meisten Fällen vom Hersteller selbst schon mit einem Verjüngungsmittel versetzt wurden, da weiche Bitumen durch direkte Destillation nur in wenigen Raffinerien hergestellt wird. Verjüngungsmittel werden aber nicht zwangsläufig aus Erdöl hergestellt, sondern beispielsweise auch aus pflanzlichen Abfällen. Diese vermögen die Viskosität des verhärteten RAP-Bindemittels zu senken, wie sie sich aber langfristig verhalten und wie die Bindemittleigenschaften hierdurch verändert werden ist unklar. Beim wiederholten Recycling werden sich diese Stoffe, die sehr unterschiedlich sein können, langsam anreichern und insbesondere auch die Alterungseigenschaften beeinflussen.

Die Wasserempfindlichkeit von Recyclingmischungen war bei der Untersuchung der Mineralstoffschädigung als auch bei der Bindemittelschädigung in einigen Fällen (Serie Mx-40) deutlich reduziert im Vergleich zur Referenzmischung ohne Recyclingasphalt.

Die Herstellung von Recyclingasphalt mit PmB-Zugabe ist komplexer. Die Wirkung des polymerhaltigen Bindemittels, insbesondere bei erhöhtem Polymergehalt, ist eindeutig bemerkbar. Die Berechnung der optimalen Zugabemenge und der PmB-Sorte ist schwieriger und sollte bezüglich der Mischguteigenschaften und nicht bezüglich der Bindemittleigenschaft wie Penetrationswert erfolge

4 Schlussfolgerungen

- Das Bindemittel verändert sich durch das Mehrfachrecycling mit einem Recyclinganteil von 40% nur gering. Sobald aber Verjüngungsmittel zugegeben wird, was ab einem Recyclinganteil von etwa 60% der Fall unumgänglich wird, ist diese Aussage nicht mehr garantiert. Es liegen aber noch zu wenige Daten vor (nur ein Verjüngungsmittel), um beurteilen zu können welche Eigenschaften wie beeinflusst werden. Insbesondere ist aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung kein allgemeines Verhalten für alle Verjüngungsmittel möglich.
- Die alleinige Beurteilung von Recyclingbelägen anhand der Bindemittelkennwerte Penetration und Ring und Kugel am rückgewonnenen Bindemittel ist für Beläge mit Polymerbitumenzugabe oder für hohe RAP-Anteile mit Verjüngungsmittel nicht ausreichend. Belagskennwerte wie Ermüdung, Steifigkeit und plastische Verformung sollten ebenfalls berücksichtigt werden.
- Die FTIR-Indices eignen sich nicht für die Beurteilung der Alterung von künstlich hergestelltem RAP, da die Resultate der FTIR-Messungen nicht mit den rheologischen Bindemittleigenschaften korrelieren. Beim RAP wurde das Potential für die Oxidierung zu Sulfoxidgruppen vollständig und zu den Cargonylgruppen zu einem Grossteil ausgeschöpft.
- Die Kälteprüfung ITS bei -10°C ist nicht sehr empfindlich, denn Unterschiede innerhalb der gleichen Mischserie werden nur ungenügend aufzeigt. Eine aussagekräftigere, einfache Prüfung für die Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften wäre wünschenswert.
- In Recyclingasphalt müssen vor allem die groben Mineralstoff-Fractionen ergänzt werden, da durch das Fräsen und Brechen eine Verfeinerung der Korngrössenverteilung auftritt.
- Für Beläge mit hohen Anforderungen (Deckschichten, Beläge vom Typ H) sollte nur RAP ohne Rundkornanteil verwendet werden, was nur über eine Triage von RAP mit und ohne Rundanteil zu erreichen ist.

Glossar

Begriff	Bedeutung
AASHTO	American Association of State and Highway Transportation Officials, US.
AC	Asphaltbeton (Asphalt concrete)
AU	Absorption units, Einheit für die Absorption von Licht
BERAG	Belagslieferwerk Rubigen AG
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
DSR	Dynamisches Scherrheometer
DSV	Druckschwellversuch
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
EP1 ... EP5	Einzelprojekt 1 ... 5 des Forschungspaketes Recycling
ERK	Erweichungspunkt Ring und Kugel
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie
ITSR	Indirect tensile strength ratio, Kennwert für die Wasserempfindlichkeit
ITT	Indirekter Zugversuch
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation der ETH Lausanne
MLS10	Mobiler Verkehrslastsimulator
PK	Prüfkörper
PmB	Polymerhaltiges Bitumen
RAP	Ausbauasphalt oft auch Recyclingasphaltgranulat (Reclaimed Asphalt Pavement)
RILEM	International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures
SN	Schweizer Norm
Stabw.	Standardabweichung
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
WP	Wendepunkt

Literaturverzeichnis

-
- [1] Partl, M. N., Hugener, M. Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut, Initialprojekt, VSS 2005/451, Forschungsbericht Nr. 1242, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK (2007), 66 p.
-
- [2] Seeberger, M., Hugener, M. Forschungspaket: Recycling von Ausbauasphalt Einzelprojekt: Optimaler Anteil an Ausbauasphalt, EP1: VSS 2005/452, Forschungsbericht Nr 1483, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK (2014), Forschungsbericht Nr 1483, 120p.
-
- [3] Dünner, S., Forschungspaket: Recycling von Ausbauasphalt Einzelprojekt EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung, Forschungsauftrag VSS 2005/454, Forschungsbericht Nr 1446, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK (2013), 69p.
-
- [4] Poulikakos, L. Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut - Einzelprojekt EP4: Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Strassenbelägen mit Ausbauasphalt, VSS 2005/455 (2014) Forschungsbericht Nr. 1478. 65p.
-
- [5] A.-G. Dumomt, N. Bueche, M. Pittet, Recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : EP5 Formulation, VSS 2005/456 :, im Druck
-
- [6] Jifeng, L., Wei, W., & Yanfeng, T. (2011, 24-26 June 2011). Study on the recycling of recycled aggregated concrete. Paper presented at the Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE), 2011 International Conference on.
-
- [7] Noguchi, T., & Tamura, M. (2001). Concrete design towards complete recycling. *Structural Concrete*, 2, 155-167. Retrieved from <http://www.icevirtuallibrary.com/content/article/10.1680/stco.2001.2.3.155>
-
- [8] J. de Brito, A.P. Gonçalves, R. Santo, Recycled aggregates in concrete production – multiple recycling of concrete coarse aggregates, *Rev Ing Construc*, 21 (1) (2006), pp. 33–40.
-
- [9] Heneash, U. (2013). Effect of the Repeated Recycling on Hot Mix Asphalt Properties Doctoral Thesis, University of Nottingham, Nottingham.
-
- [10] Su, K., Hachiya, Y., & Maekawa, R. (2008). Laboratory investigation of possibility of re-recycling asphalt concretes. Paper presented at the 6th ICPT, Sapporo, Japan.
-
- [11] Arraigada, M., Treuholz, A., Partl, M. N., Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10, ASTRA 2011/004, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2014, Nr. 1642.
-
- [12] AASHTO R 30-02 (2010) Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA), American Association of State and Highway Transportation Officials, US.
-
- [13] De la Roche, C., Van de Ven, M. V., Van den Bergh, W., Gabet, T., Dubois, V., Grenfell, J., et al. (2009). Development of a laboratory bituminous mixtures ageing protocol. In A. Loizos, M. N. Partl, T. Scarpas & I. L. AlQadi (Eds.), *Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials*, (Vol. 1-2, pp. 331-345): CRC Press.
-
- [14] Eddhahak-Ouni, A., Dony, A., Colin, J., Mendez, S., Navaro, J., Drouadaine, I., et al. (2012). Experimental investigation of the homogeneity of the blended binder of a high rate recycled asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 13(3), 566-575. doi: 10.1080/14680629.2012.700269
-
- [15] EN 12697-1:2005 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [16] EN 12697-2:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 2: Korngrößenverteilung, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [17] EN 12697-5:2009Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 5: Bestimmung der Rohdichte, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [18] EN 12697-6:2003+A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [19] EN 12697-8:2003 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [20] EN 12697-30:2004+A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [21] EN 12697-34:2004+A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 34: Marshall-Prüfung, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [22] EN 12697-12:2008 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-

-
- [23] EN 12697-26:2004 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 26: Steifigkeit, Anhang C, Indirekte Zugprüfung an zylindrischen Probekörpern (IT-CY), CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [24] EN 12697-3:2005 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [25] EN 1426:2007 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [26] EN 1427:2007 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Erweichungspunktes - Ring und Kugel-Verfahren, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [27] SN 670202 NA (EN 12591:2009) Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Anforderungen an Strassenbaubitumen, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [28] EN 12697-23:2003 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern, CEN (Europäisches Komitee für Normung) 2003.
-
- [29] TP Asphalt-StB Teil 25 B 1 (2010). Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Einaxialer Druckschwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, Köln.
-
- [30] EN 12697-22:2003+A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 22: Spurbildungstest, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [31] AL-Sp-Asphalt 09 (2009) Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgrösse in die Dimensionierung, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, Köln.
-
- [32] EN 14770:2010 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR), CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [33] Mouillet V, Farcas F, Battaglia V, Besson S, Petiteau C, Lecunff F (2009) Identification and quantification of bituminous binder's oxygenated species. Analysis by Fourier transform infrared spectroscopy, Méthode d'essai LPC no. 69.
-
- [34] EN 933-5:1998 +A1: 2004 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 5: Bestimmung des Anteils an gebrochenen Körnern in groben Gesteinskörnungen
-
- [35] EN 933-6:2001 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften - Fliekoeffizienten von Gesteinskörnungen
-
- [36] Rti, R., Bürgi, C., Angst, C. Flieskoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz, Forschungsprojekt VSS 2005/403, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, im Druck.
-
- [37] URL <http://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/VirtTxtJml/Spectrpy/InfraRed/infrared.htm>
-
- [38] Angst, Ch. Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen, VSS 2005/504, im Druck
-
- [39] EN 12697-24:2004+ A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung, Anhang D Vierpunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörpern, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [40] Arand, W. (2004). Zur prftechnischen Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten - Teil 1. Bitumen, 66(1), 2-7.
-
- [41] Di Benedetto, H., de la Roche, C., Baaj, H., & Pronk, A. (2003). Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution. In M. N. Partl (Ed.), Proceedings pro028 : 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials (PTEBM'03) (pp. 15-38): RILEM Publications SARL.
-
- [42] Dragon, I., Wellner, F., Ringversuch zum Spaltzug-Schwellversuch an Asphaltprobekrpern (2012), Forschungsbericht, Professur für Straßenbau, Technische Universität Dresden.
-
- [43] EN 12697-46:2012 Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Klterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen), CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [44] Dumont, A. G., Turtshy, J.-C., Beauverd, J., & Bhler, T. (1999). Influence de la forme des granulats sur les caractéristiques d'un béton bitumineux, 2. partie VSS 1994/10. (424), 104.
-
- [45] Zaubanis, M., Mallick, R., & Frank, R. (2013). Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2370(-1), 1.
-
- [46] SN 640431-1 NA (EN 13108-1:2008) Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton, VSS.
-
- [47] Marsac, P., Pirard, N., Porot, L., Van den bergh, W., Grenfell, J., Mouillet, V., et al. (2014). Potential and limits of FTIR methods for reclaimed asphalt characterisation. Materials and Structures, 1-14. doi: 10.1617/s11527-014-0248-0
-

-
- [48] Petersen, J. C. (1986). Quantitative functional group analysis of asphalts using differential infrared spectrometry and selective chemical reactions - Theory and application. Transport Research Record, 1096, 1-11.
-
- [49] Hagner, T. (2003). Quantitative functional group analysis of asphalts. Doktorarbeit, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig.
-
- [50] Ongel, A., Hugener, M. (2014). Aging of bituminous mixes for rap simulation. Construction and Building Materials, 68(0), 49-54. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.030>
-
- [51] SN 670210b NA (EN14023:2010) Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Rahmenwerk für die Spezifikation von polymermodifizierten Bitumen, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-

Projektabschluss



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: 3.2.2015

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2005/453

Projekttitel: Recycling von Ausbauphase in Heissmischgut Einzelprojekt EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen

Enddatum: 26.1.2015

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Einzelprojekt EP-2 des Recyclingpaketes zum Heissrecycling von Ausbauphase (RAP) wurde untersucht, wie sich das wiederholte Recycling auf die Eigenschaften der Mineralstoffe, des Bindemittels und des Mischgutes auswirkt. Die Veränderungen der Mineralstoffe durch Fräsen und Brechen des alten Strassenbelages wurde möglichst praxisnah durchgeführt. Hierzu stand ein Testfeld mit einem zweischichtigen Belag, bestehend aus einer Tragschicht AC T 22 H und einer Deckschicht AC 11 N, sowie das für den Einbau verwendete Mischgut zur Verfügung. Der Belag wurde schichtweise mit einer grossen Strassenfräse im Kaltverfahren gefräst und nachträglich gebrochen. Aufgrund der kurzen Liegedauer war das RAP aber nur geringfügig gealtert. Die Untersuchungen ergaben, dass insbesondere die groben Mineralstofffraktionen reduziert wurden und sich der Anteil der mittleren Fraktion bis zum Sand erhöhte. Das produzierte RAP der Tragschicht entsprach der Korngrössenverteilung eines AC T 16, und das RAP der Deckschicht jener eines AC 8. Der Anteil an runden und teilweise runden Körnern wurde durch das Fräsen/Brechen reduziert. Aus dem RAP der Deckschicht wurde im Labor ein zum AC 11 N möglichst identischer Belag mit einem Recyclinganteil von 60% nachgebildet. Da die Ausgangsstoffe (Mineralstoffe, Bitumen), die für die Deckschicht verwendet wurden, nicht vorhanden waren, wurde das Material, das für das Recyclingpaket zur Verfügung gestellt wurde, verwendet. Der nachgebildete Belag war etwas dichter trotz tieferem Bindemittelgehalt, ergab aber bezüglich Neigung zur Spurrinnenbildung, Marshall-Stabilität und Tieftemperatureigenschaften ähnliche Resultate. Einzig die Wasserempfindlichkeit war deutlich reduziert, was unter Umständen auf die anderen Mineralstoffe zurückzuführen ist. Für die Untersuchung der Veränderung des Bindemittels durch das mehrfache Recycling wurde als Ausgangsmischgut der AC 11 S gemäss Rezept des roten Fadens des Forschungspaketes verwendet, jedoch ohne Ausbauphase. Das Referenzmischgut wurde im Labor künstlich während 4 Tagen bei 100°C gealtert, sodass ein RAP mit einer Penetration von 30 [0.1 mm] erhalten wurde. Dieses künstlich hergestellte RAP wurde mit einem Anteil von 40% für ein neues Mischgut verwendet, dessen Bindemittelleigenschaften und volumetrischen Kennwerte möglichst dem Referenzmischgut entsprechen sollten. Dieses Mischgut wurde danach wiederum künstlich gealtert bis schliesslich drei Recyclingzyklen durchgeführt worden waren. Die meisten Bindemittel- und Mischguteigenschaften blieben praktisch konstant, bei der Wasserempfindlichkeit wurde aber eine deutliche Abnahme des ITSR-Kennwertes festgestellt. Die Analyse mittels Fourier-Transform-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) zeigte, dass im RAP die potentiellen funktionellen Gruppen praktisch vollständig oxidiert waren und so keine Informationen zum Alterungsgrad des RAP geben konnten. Da in zunehmendem Masse höhere Recyclinganteile verwendet werden, um die massiven Überschüsse an RAP abzubauen, wurde auch der Einfluss eines Verjüngungsmittels auf das wiederholte Recycling untersucht. Dazu wurde das künstlich hergestellte RAP ohne Zugabe von Bitumen oder Mineralstoffen nur mit Verjüngungsmittel versetzt, was einem Recyclinganteil von 100% entspricht. Es zeigte sich, dass bei gleicher Zugabemenge an Verjüngungsmittel sich das Bindemittel im Mischgut bei jedem Recyclingschritt stärker verhärtete. Trotzdem zeigte das Mischgut aber gute Eigenschaften, insbesondere bezüglich Wasserempfindlichkeit, Ermüdungsverhalten und plastischer Verformung (Druckschwellversuch). Daraus muss geschlossen werden, dass für die Beurteilung von Recyclingbelägen nicht nur die Bindemittelkennwerte Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel verwendet werden können, sondern auch die Mischguteigenschaften berücksichtigt werden sollten. Allerdings sollten auch die Resultate des vorgesehenen Validierungsprojektes VP6, wo Recyclingbeläge mit Verjüngungsmittel eingebaut und geprüft werden, berücksichtigt werden. Durch das Mehrfachrecycling verändern sich die Mineralstoff-, Bindemittel- und Mischguteigenschaften in unterschiedlichem Masse. Bis 40% Recyclinganteil sind die beobachteten Einflüsse in der Regel jedoch gering, da das zugegebene Neumaterial das Verhalten dominiert. Bei höheren Recyclinganteilen, insbesondere wenn Verjüngungsmittel zugegeben werden muss, wird das Verhalten nach mehreren Recyclingschritten komplex und schwer vorhersagbar. In diesem Punkt ist sicherlich noch Forschungsbedarf vorhanden, um dauerhafte Strassenbeläge auch mit mehrfach recyceltem RAP in hohen Anteilen zu erhalten.



Zielerreichung:

Der ursprüngliche Arbeitsplan wurde teilweise auf Anregung der Begleitkommission geändert. Insbesondere wurde dem Anliegen entsprochen, dass das Fräsen praxisorientierter durchgeführt wird. Entsprechend wurde nur ein Recyclingzyklus für die Mineralstoffschädigung durchgeführt. Die Veränderung der Mineralstoffe in Bezug auf Korngrößenverteilung und Anteil rund/gebrochen durch das Fräsen und Brechen konnte aber trotzdem aufgezeigt werden. Der Einfluss des Mehrfachrecyclings nach bis zu drei Recyclingzyklen wurde an drei unterschiedlichen Bindemitteln mit mechanischen, rheologischen und spektroskopischen Methoden untersucht. Die beobachteten Änderungen im Bindemittel konnten aber nicht alle vollständig erforscht und erklärt werden.

Folgerungen und Empfehlungen:

Bei Recyclingbelägen mit hohem Recyclinganteil (ab ca. 60%), insbesondere beim Einsatz von Verjüngungsmitteln und kommerziellen weichen Bindemitteln, die Verjüngungsmittel enthalten (z.B. viele Bitumen 250/330), sollten neben Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel auch mechanische Mischgutkriterien für die Beurteilung in Betracht gezogen werden.

Publikationen:

Es ist mindestens eine Publikation in einer wissenschaftlichen Zeitschrift geplant. Teilresultate wurden anlässlich der VSS-Fachtagung "Umweltfreundlicher und nachhaltiger Strassenoberbau" 2014 präsentiert.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Hugener

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Empa, Abteilung Strassenbau/Abdichtungen

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Projektziele, die teilweise auf Anregung der Begleitkommission angepasst wurden, konnten erfüllt werden. Die Forschungsergebnisse zeigen auf, wo beim wiederholten Recycling Probleme zu erwarten sind. Diese treten vermutlich erst in einigen Jahren auf, wenn die Recyclinganteile erhöht werden. Dies erlaubt die möglichen Probleme noch rechtzeitig zu behandeln und geeignete Lösungen zu finden.

Umsetzung:

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass das wiederholte Recycling bis zu einem Recyclinganteil von 40%, unter gewissen Bedingungen auch mit höheren Anteilen kein Problem darstellt, sofern die Laborergebnisse im Feld bestätigt werden können. Erhöhte Aufmerksamkeit ist aber beim Einsatz von Verjüngungsmitteln gegeben. Allerdings stellt sich dieses Problem vermutlich erst in einigen Jahren bis Jahrzehnten.

weitergehender Forschungsbedarf:

Der Einfluss von Verjüngungsmitteln auf die Bindemittelalterung nach wiederholtem Rezyklieren muss dringend in einem spezifischen Forschungsprojekt vertieft betrachtet werden. Zudem ist eine Feldvalidierung der Laborergebnisse unumgänglich.

Einfluss auf Normenwerk:

Die erarbeiteten Resultate zeigen, dass die Thematik der Verjüngungsmittel in den nächsten Jahren auch in VSS-Normen behandelt werden sollte. Allerdings sind vorher noch weitere Abklärungen notwendig.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Beyeler

Vorname: Hans-Peter

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

VSS FK 3:

H. Beyeler 18.3.15

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbausphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbausphalt	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflasterungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassenetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbauasphalt mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarrer Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektiertungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Ganglinienorm	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkierungsanlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichsprüfung der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschieben von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeughaltensystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDA in SVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des ponts dalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoeermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009