



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: VP6 In-situ Validierung

**Paquet de recherche de recyclage des matériaux
bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à
chaud: VP6: Projet de validation in-situ**

**Research package of the recycling of reclaimed asphalt
pavement in hot mix asphalt: VP6: In-situ validation**

**Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Fabio Piemontese, M.Sc.
Martin Hugener, Dr., Dipl. Phil. II.
Martin Arraigada, Dr., Dipl. Ing.**

**Forschungsprojekt VSS 2005/457 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Juli 2018

1636

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 Heissmischgut: VP6 In-situ Validierung

**Paquet de recherche de recyclage des matériaux
bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à
chaud: VP6: Projet de validation in-situ**

**Research package of the recycling of reclaimed asphalt
pavement in hot mix asphalt: VP6: In-situ validation**

**Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Fabio Piemontese, M.Sc.
Martin Hugener, Dr., Dipl. Phil. II.
Martin Arrigada, Dr., Dipl. Ing.**

**Forschungsprojekt VSS 2005/457 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Martin Hugener, Dr., Dipl. Phil. II., Empa

Mitglieder

Fabio Piemontese, M. Sc., Empa

Martin Arraigada, Dr., Dipl. Ing., Empa

André-Gilles Dumont, Prof. Dr., LAVOC-EPFL Lausanne

Michel Pittet, LAVOC-EPFL Lausanne

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3: Baustoffe

Begleitkommission

Präsident

Sandra Dünner

(Walo Bertschinger AG, Dietikon)

Mitglieder

Hans-Peter Beyeler

(ASTRA, Bern)

Tony Bühler

(Implenia Suisse SA, Onex)

Martin Horat

(Tiefbauamt Stadt Zürich)

Marcel Züger

(InfraGeo AG, Chur)

Nicolas Bueche

(Bernere Fachhochschule BFH, Burgdorf)

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 Ausgangslage und Forschungsbedarf	13
1.1 Forschungsbedarf	14
2 Vorgehen, Methodik, Lösungsansatz	15
2.1 Mix Design, Mischgut und Beläge	15
2.1.1 Mischgut	15
2.1.2 Mischanlage	15
2.1.3 Beläge	15
2.1.4 Dimensionierung	16
2.1.5 Anordnung/Aufbau der Beläge	16
2.2 Testgelände	18
2.2.1 Lage	18
3 Der mobile Verkehrslastsimulator MLS10	19
3.1 Technische Spezifikationen	19
3.2 Betriebsbedingungen MLS10	20
4 Messungen und Sensorik: Methodik und Auswertung	21
4.1 Kontinuierliche Messungen	21
4.1.1 Temperaturmessung mit Thermoelementen	21
4.1.2 Dynamische Dehnungsmessung mit Dehnmessstreifen (DMS)	22
4.1.3 Dynamische Verformungsmessung mit Beschleunigungssensoren	25
4.2 Periodische Messungen	26
4.2.1 Tragfähigkeit Planum	26
4.2.2 Rissermittlung durch visuelle Inspektionen	27
4.2.3 Ermittlung der Spurrinnenentwicklung durch Querprofilmessung	27
4.2.4 Ermittlung der Bodenverdichtung mit dem leichten Fallgewicht	29
4.2.5 Verformungsmessung mit FWD (Falling Weight Deflectometer)	30
4.3 Materialuntersuchungen im Labor	31
4.4 Messlayout und Datenerfassung	34
4.4.1 Frequenz der periodischen Messintervalle	37
5 Resultate	39
5.1 Mix Design	39
5.1.1 Kenndaten der Ausgangsmaterialien	40
5.1.2 Mineralstoffe	40
5.1.3 Ausbauasphalt	43
5.1.4 Bindemittel	43
5.1.5 Optimierung des AC 11 S	45
5.1.6 Optimierung des AC T 22 S	48
5.1.7 Probemischungen der Asphaltanlage	51
5.2 Belagsaufbau	54
5.3 Anzahl MLS10 Überrollungen	55
5.4 Kontinuierliche Belagsmessungen	56
5.4.1 Temperaturverlauf	56
5.4.2 Dynamische Belagsdehnungen	58
5.4.3 Dynamische Beschleunigungsmessungen	60
5.5 Periodischen Messungen	63

5.5.1	Tragfähigkeit Planie	63
5.5.2	Risse	63
5.5.3	Spurrinnenentwicklung.....	65
5.5.4	Pumping-Effekt	67
5.5.5	Untersuchung der Bodenverdichtung mit dem Leichten Fallgewicht	68
5.5.6	Falling Weight Deflectometer (FWD).....	71
5.6	Laboruntersuchungen an Bohrkerne	72
5.6.1	Kennwertbestimmung der Bohrproben	72
5.6.2	Modulbestimmung im Spaltzugversuch	73
5.6.3	Untersuchung der Schichthftung nach Leutner	75
5.7	Mischgutuntersuchungen im Labor.....	77
5.7.1	Belagseinbau - Mischgutkontrolle	77
5.7.2	Spurbildungstest	82
5.7.3	Wasserempfindlichkeit	84
5.7.4	Bruchfestigkeit bei -10 °C	85
5.7.5	Verdichtbarkeit mittels Gyrator	86
6	Diskussion und Schlussfolgerungen	87
7	Dank	91
	Anhänge.....	93
	Glossar.....	107
	Literaturverzeichnis.....	109
	Projektabschluss	113
	Verzeichnis der Forschungsberichte im Strassenwesen	117

Zusammenfassung

Im Fokus dieser Arbeit stand die praxisorientierte Validierung der Ergebnisse von früheren Forschungsprojekten über das Recycling von Asphaltbeton. Hierzu wurden in einem ersten Schritt, basierend auf der im Einzelprojekt EP5 entwickelten Mix-Designmethode, zwei Mischgüter mit einem hohen Anteil an RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) -Material im Labor hergestellt, geprüft und optimiert. In einem weiteren Schritt galt es diese vielversprechenden Materialien unter realen Lasten zu überprüfen.

Zu diesem Zweck wurden im Strasseninnovationspark Lenzburg aus den entwickelten Mischgütern zwei verschiedene Versuchsobjekte aufgebaut. Das erste wurde einschichtig aus AC T 22 S mit 75% RAP gestaltet. Ein weiteres wurde zweischichtig gebaut mit einer Tragschicht aus AC T 16 S und einer Deckschicht aus AC 11 S mit 60% RAP. Als Vergleichsbasis wurde neben jedem dieser Versuchsobjekte eine entsprechende Referenz ohne RAP eingebaut. Dadurch konnte jedes Paar zeitgleich belastet werden, was neben einer Zeit- und Ressourcenersparnis auch die Gewährleistung gleicher Umwelteinflüsse zum Vorteil hatte. Die Belastung erfolgte mit dem Verkehrslastsimulator MSL10, welcher in der Lage ist, durch beschleunigte Verkehrssimulation das Versagen eines Belages in einer verkürzten Zeitspanne herbeizuführen. Die in den Belägen entstandenen Fahrbahnrisse wurden visuell und die Spurrinntiefen mit einem Profilometer untersucht. Um die Fahrbahnreaktion auf die MLS10 Lasten zu überwachen, wurden Dehnmessstreifen und Beschleunigungssensoren eingesetzt. Während der gesamten Messkampagne wurde mit Thermoelementen die Temperatur unter und auf dem Belag kontinuierlich erfasst. Um die Tragfähigkeit der verschiedenen Beläge bewerten zu können, wurden vor der Erstbelastung Deflektionsmessungen mit einem Falling Weight Deflectometer (FWD) durchgeführt. Anschliessend an die Belastungsphase wurde mit einem leichten Fallgewicht die Verdichtung der Foundation unter den Teststrecken gemessen und weiter die Struktureigenschaften bestimmter Belagsproben im Labor ermittelt. Letzteres umfasste u.a. die Untersuchung des Elastizitätsmoduls, der Schichthaftung, Wasserempfindlichkeit und Tieftemperatursteifigkeit.

Die Laborergebnisse der Belagsproben waren mit jenen des Projektes EP1 vergleichbar und zeigten, dass ein hoher RAP-Anteil keinen relevanten Einfluss auf die oben genannten Grössen hatte. Im Widerspruch dazu standen die Resultate der Feldmessungen. Hier wurde hauptsächlich anhand der höheren Rissneigung deutlich, dass beide Versuchsobjekte schlechter als ihre entsprechenden Referenzen abgeschnitten hatten. Durch das Zusammenwirken der zyklischen MLS10-Lasten und Wasser in der Foundationsschicht entstand bei den gerissenen Belägen ein sogenannter Pumping-Effekt. Dabei wurde die Foundation geschwächt und Feinmaterial durch die Risse bis an die Belagsoberfläche gepumpt. Die Folge war ein Stabilitätsverlust der Auflagefläche, welcher sich in den Profilmessungen durch eine lokale Einsenkung des Belages bemerkbar machte. Die höhere Risstendenz der Versuchsobjekte stand im Einklang mit den Sensordaten aus Dehn- und Deflektionsmessungen. Hierbei wurde ersichtlich, dass die Versuchsobjekte tendenziell mehr als ihre Referenzen verformt wurden. Da im Labor Versuchsobjekt und Referenz vergleichbare Elastizitätsmodule aufwiesen, wird angenommen, dass auf dem Feld die Versuchsobjekte im nicht-linearelastischen Bereich beansprucht wurden.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass die Versuchsobjekte mit RAP eine niedrigere Dauerfestigkeit und folglich Lebensdauer aufwiesen als die entsprechenden Referenzen ohne RAP-Material. Die Ursache dieses ungünstigeren Verhaltens wird in der Inhomogenität des Bitumens in den Recyclingmischungen und der dadurch schwächeren Bindung zu den Mineralstoffen vermutet. Für zukünftige Forschung muss die Auswahl der Prüfmethode überdacht werden und insbesondere sollten auch Prüfungen für die Rissfortschreitung berücksichtigt werden. Zudem sind die Wirkung des Verjüngungsmittels, sowie der Einfluss der inhomogenen Vermischung von RAP, Zugabebitumen und Verjüngungsmittel genauer zu untersuchen. Auf jeden Fall sollten sich die Untersuchungen nicht nur auf das Labor beschränken, sondern müssen in der Praxis validiert werden, sei dies durch beschleunigte Belastung oder an Teststrecken.

Résumé

Ce travail porte sur la validation pratique des résultats de projets de recherche antérieurs sur le recyclage des bétons bitumeux. Dans une première étape fondée sur la méthode de mélange développée dans le projet EP5, deux mélanges à forte proportion d'enrobés bitumeux recyclés ont été préparés en laboratoire, testés et optimisés. L'étape suivante a consisté à vérifier pratiquement leur intérêt et leur résistance.

A cette fin, deux surfaces d'essai ont été réalisées au Parc d'innovation routière de Lenzburg. La première, simple couche d'AC T 22 S, contenait 75% de RAP; la seconde se composait de deux couches, une couche de fondation d'ACT T 16 S et une couche de roulement d'AC 11 S contenant 60% de RAP. A fins de comparaison, deux surfaces de référence sans RAP ont été réalisées à côté des surfaces d'essai. Il a ainsi été possible de solliciter simultanément chaque paire de surfaces, soit une économie de temps et de ressources, ainsi que la garantie d'une même exposition aux influences environnementales. Les revêtements ont été testés à l'aide d'un simulateur de charge MSL10 capable de solliciter un revêtement jusqu'à sa rupture en peu de temps.

Les fissures qui se sont produites dans le revêtement ont été examinées à l'œil et la profondeur des ornières mesurées au profilomètre. Des jauges de déformation et des accéléromètres ont permis de suivre la réaction de la chaussée aux sollicitations du MLS10. Les températures sous et sur les revêtements ont été saisies à l'aide de thermocouples, en continu tout au long de la campagne de mesures. Avant de procéder aux premiers essais de charge, la portance des différents revêtements a été évaluée au moyen d'un déflectomètre à masse tombante (FMD). A l'issue des essais de charge, le tassement de la couche de sous-fondation a été mesuré à l'aide d'une masse tombante réduite et les qualités structurelles de différents échantillons de revêtements analysées en laboratoire. Ces analyses ont en particulier porté sur le module d'élasticité des revêtements, leur adhérence, leur sensibilité à l'eau et leur rigidité à basse température.

Les mesures effectuées sur les surfaces d'essai en laboratoire ont donné des résultats comparables à ceux du projet EP1 et ont montré qu'une forte proportion de RAP n'avait pas d'influence notable sur les grandeurs étudiées. Par contre, les mesures sur le terrain n'ont pas montré une telle concordance. Elles ont mis en évidence une tendance à la formation de fissures nettement plus élevée dans les surfaces d'essai que dans leurs surfaces de référence. L'effet conjugué des charges cycliques du MLS10 et de l'eau présente dans la couche de fondation a agi comme une pompe dans le revêtement fissuré. La sous-fondation s'en est trouvée affaiblie et des matériaux fins ont été refoulés jusqu'en surface du revêtement. Il en a résulté une perte de stabilité de la surface d'appui constatable dans les mesures de profil (enfouissement local du revêtement). Les études de planéité et de portance ont confirmé ce constat. La tendance accrue à la fissuration des surfaces d'essai correspond bien aux mesures de tension et de déflexion. Il en ressort que les surfaces d'essai sont plus sujettes à la déformation que leurs surfaces de référence. Comme dans les essais en laboratoire les surfaces d'essai et leurs surfaces de référence présentaient un module d'élasticité comparable, on en conclut que, sur le terrain, les surfaces d'essai ont été sollicitées au-delà de leur domaine linéaire d'élasticité.

En résumé: les essais ont mis en évidence une résistance moindre et donc une durée de vie moindre des surfaces contenant des RAP que leurs surfaces de référence sans RAP. La cause de cette mauvaise tenue est attribuée au manque d'homogénéité du bitume dans le mélange recyclé et à la moindre force de liaison entre substances minérales qui s'en suit. Les prochaines recherches se focaliseront sur les performances sur le long terme et la sensibilité à la fissuration pour les mélanges d'enrobés contenant une importante quantité d'enrobés récupérés. Il est aussi important d'avoir une connaissance approfondie des effets d'un rajeunisseur, ainsi que l'influence des mélanges inhomogène d'enrobés récupérés, sur le bitume et les rajeunisseurs. Indépendamment, il ne faut pas uniquement s'en remettre aux essais de laboratoire, mais ceci doit être aussi validé par des essais in-situ à travers des essais de chargement accélérés ou l'utilisation de piste d'essais.

Summary

An extensive laboratory research project revealed that optimized mixtures containing high percentage of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) can reach similar performance as standard hot mix asphalt. Hence, high content RAP mixtures might be used as paving material following an appropriate mix design. However, this conclusion was based uniquely on laboratory experiments. There was an uncertainty regarding the field performance as in the laboratory, scale issues like mixture production, transport and compaction can be only partially simulated. Furthermore, the simulation of traffic loading conditions and the influence of the climatic can be only roughly achieved in the laboratory. Therefore, accelerated pavement testing (APT) was selected as the costly-effective fast alternative for a safe implementation of the research results. The objective of the present work was to benchmark the performance of the designed mixtures with RAP (test subjects) against the same mixtures without RAP (control subjects) using APT. To that end, two standard mixtures were selected:

- A surface course mixture AC11S
- A base course mixture ACT22S

In a first step of the project, two mixtures were produced, tested and optimized in the laboratory based on the mix design method developed in the project EP5 . In a second part, these materials were APT loaded using the Mobile Load Simulator MLS10.

As a result of the first phase, the test object mixture AC 11 S was prepared with 60% of RAP. The second mixture was prepared 75% of RAP and in both cases a rejuvenator was added.

In the second stage, two pavements structures containing the RAP mixtures were constructed at real scale. The same pavements without RAP were built in parallel to be used as control sections, making a total of four different pavement structures. Since the experiment was carried out in an outdoor facility, it was not possible to control the climatic conditions. Therefore, in order to avoid possible bias in the results, it was necessary to load the test and control sections at the same time.

Results obtained from laboratory tests on field cores showed that a high RAP content had no relevant influence on the above mentioned quantities. However, field measurements revealed that these materials had more susceptibility to cracking: both test objects cracked earlier than their corresponding control sections. The infiltration of water through the cracks combined with the cyclic MLS10 loading produced pumping of the fines from the unbound layers inducing a loose of support and increased rutting. Subsequent test of the base stiffness confirmed this observation. Strain and deflection data obtained from installed sensors showed that the pavement with RAP materials deformed more than the counterparts without recycling. Since the experimental object and the reference had comparable moduli of elasticity in the laboratory, it is assumed that the RAP materials in the field were loaded in the nonlinear elastic range.

In summary, it can be concluded that the test objects with high RAP content have a lower fatigue life and consequently less lifespan than the corresponding materials without recycled material. A cause of this deficient field performance might be the inhomogeneity of the bitumen in the recycling mixtures and the resulting weaker binding to the minerals. Future research should focus on the long term performance and crack susceptibility of high RAP content mixtures. Is also important to have a fundamental understanding of the effect of the rejuvenator, as well as the influence of the inhomogeneous mixing of RAP, virgin bitumen and rejuvenators. Regardless, it should not only be confined to the laboratory alone, but must be validated in-situ through accelerated loading tests or by using test tracks.

1 Ausgangslage und Forschungsbedarf

Das Recycling von Asphalt aus Strassen hat vor langer Zeit begonnen und in letzter Zeit stark zugenommen. Die grossen Mengen an Ausbauasphalt, die bei Erneuerungen und Reparaturen anfallen, lagern auf grossen Halden, die mit jedem Jahr grösser werden. Da der Anteil an Recyclingasphalt, der neuen Belägen zugegeben werden kann durch die Schweizer Norm 640431-1 NA [21] definiert ist, wird weniger verbaut als anfällt. Der maximal zulässige Anteil an Ausbauasphalt, welcher nach der genannten Norm als Warmzugabe einem Mischgut beigegeben werden darf, beträgt für Deckschichten 0-30 M-% und für Tragschichten 60 M-%. Obwohl inzwischen klar geworden ist, dass die anfallende Menge an Ausbauasphalt nicht vollständig in gebundenen bitumenhaltigen Schichten einbezogen werden kann, ist es trotzdem das Ziel, mehr als bisher festgelegt in gleichwertiger Weise wiederzuverwenden. Weil die Mischguteigenschaften durch einen hohen Anteil an Recyclingasphalt wesentlich beeinflusst werden, bestehen aber Zweifel und Unsicherheit bezüglich der Dauerhaftigkeit solcher Beläge. Aus diesem Grund wurde ein Forschungspaket geschnürt, in dem verschiedene Aspekte des Heissrecyclings vertieft untersucht wurden [1-5]. Die Resultate dieser Studien sind durchwegs gut ausgefallen, allerdings haben sich diese Untersuchungen auf die Herstellung und Prüfung des Recyclingmischgutes im Labor beschränkt. Deshalb war schon von Anfang an ein Folgeprojekt eingeplant, das die Laborresultate im Feld überprüfen sollte.

Im Einzelprojekt EP1 [1] zum optimalen Anteil von Recyclingasphalt (RAP, reclaimed asphalt pavement) wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass bei korrekter Korngrössenverteilung sehr hohe Anteile an RAP zugegeben werden können. Bei der Deckschicht AC 11 S wurde bis zu 60% RAP zugefügt und bei der Tragschicht AC T 22 S bis 80%. Bezüglich der Korngrössenverteilung wären bei der Tragschicht sogar 100% möglich gewesen, das Problem stellte sich jedoch bei der Erwärmung des RAP und der Reaktivierung des Bindemittels. Hinsichtlich des Spurbildungstests und Druckschwellversuche im höheren Temperaturbereich ergaben die Resultate trotz vergleichbarer Viskosität des Bindemittels durchwegs leicht verbesserte Eigenschaften beim Zufügen von RAP. Die Tatsache, dass die Untersuchungen im Labor durchwegs positiv verliefen, darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass, wie im Initialprojekt des Forschungspaketes [20] bereits erwähnt, eine gewisse Unsicherheit bezüglich des Einsatzes in der Strasse blieb, zumal im Labormassstab Mischgutherstellung, Verdichtung, Klimaeinflüsse und Verkehrsbelastung nur unvollständig abgebildet werden können. Daher war als natürlicher nächster Schritt eine Beurteilung der Laborergebnisse unter realen Bedingungen, also eine Validierung im 1:1 Massstab, zwingend. Insbesondere beim Einsatz von RAP-Anteilen von 60% und höher, welche die Zugabe von Verjüngungsmitteln bedingten, bestand ein gewisses Unbehagen. Die Erfahrung mit solchen Verjüngungsmitteln in der Schweiz ist relativ gering. In diesem Zusammenhang waren damals in der Schweiz nur wenige Produkte im Handel. Hiervon wurden zum Verhalten keine Resultate veröffentlicht und es bestanden Zweifel inwieweit im Labor die Praxisbedingungen in der Mischanlage und beim Einbau nachgestellt werden konnten. Diese Zweifel waren teilweise gerechtfertigt, wie Untersuchungen im Einzelprojekt EP4 [4] ergaben. Das in der Mischanlage hergestellte Referenzmischgut zeigte unverständlicherweise insbesondere in den Bindemitelegenschaften und der Spurbildungsprüfung andere Eigenschaften als jenes vom Labor.

Im vorliegenden Projekt wurden jeweils die Mischgutvarianten aus dem EP1 [1] mit den höchsten Recyclinganteilen bei Deck- und Tragschicht validiert. Dies waren eine Deckschicht AC 11 S mit 60% und eine Tragschicht AC T 22 S mit 80% Ausbauasphalt. Die Validierung wurde mit dem mobilen Verkehrslastsimulator MLS10 auf dem ASTRA-Testgelände in Lenzburg durchgeführt. Ziel war es eine Schädigungswirkung des real auftretenden Verkehrs in erheblich kürzerer Zeit herbeizuführen, ohne aufgrund des realen Verkehrsaufkommens mehrere Jahre auf erste Resultate warten zu müssen. Auch sollten Auskünfte über das vollständige Versagen gewonnen werden, wie dies unter Realverkehr wegen der Notwendigkeit rechtzeitiger Erhaltungsmaßnahmen kaum

möglich ist. Zudem bot sich mit diesem Projekt die im EP5 [5] erarbeitete Mixdesignmethode zu validieren.

1.1 Forschungsbedarf

In der Schweiz ist das Forschungspaket zum Thema Recycling von Ausbaupasphalt in Heissmischgut mit den Prüfungen im Labor abgeschlossen [1-5]. Viele Forschungsprojekte zum Recycling enden hier, da es zeitaufwendig und teuer ist, die erhaltenen Resultate in der Praxis zu validieren. Der Bau von den im Labor optimierten Mischgutzusammensetzungen unter realen Bedingungen in einer Verkehrsstrasse ist eine Möglichkeit, die aber durch die oft nicht übereinstimmenden Interessen von Bauherrschaft und Forschung nur beschränkt möglich ist. Deshalb werden in der Regel spezifische Testgelände mit Rundlaufversuchen in Hallen oder im Freien, und grossen Prüfstrecken bevorzugt [6, 24, 27, 28, 29]. Diese können wertvolle Resultate liefern, die erlauben die verwendeten Laborprüfmethoden besser zu validieren und Dimensionierungsgrundlagen für die untersuchten Belagsstrukturen zu erarbeiten [6-8, 22, 23, 25, 26]. Dies ist insbesondere auch für Beläge mit hohem RAP-Anteil wichtig, da die Bedenken gegenüber RAP-Material bezüglich Dauerhaftigkeit gross sind.

In der Schweiz wurden in-situ Prüfungen an zwei stationären Anlagen in Dübendorf (Rundlauf) und Lausanne (Halle-Fosse) durchgeführt [9, 11], die aber mittlerweile aus verschiedenen Gründen nicht mehr im Betrieb sind. Sie wurden vor ein paar Jahren durch den mobilen Verkehrssimulator MLS10 der Empa ersetzt [11-14]. Inzwischen werden solche Anlagen auch in Südafrika, Amerika, Schweden, Deutschland und China eingesetzt. Da die vorgängige Kalibration und Validierung dieser neuen Maschinen Zeit benötigt, ist die Anzahl der geprüften Beläge immer noch vergleichsweise klein [18].

Der MLS10 der Empa wurde in mehreren Forschungsprojekten im In- und Ausland eingesetzt, wo die Lebenserwartung von verschiedenen Belagstypen getestet wurde [15, 16]. Zusätzlich steht ein Testgelände für die Validierung von neuen Materialien und Belagstechnologien zur Verfügung. Dieses Gelände bietet die Möglichkeit, Beläge einzubauen und mit dem MLS10 praxisnah zu prüfen, um entsprechende Dimensionierungswerkzeuge zu entwickeln. In-situ Prüfungen wurden neben konventionellen Belägen auch an Belägen mit Recycling durchgeführt. In den USA wurden Beläge bis 45% Recyclinganteil im Labor und auf einer Teststrecke geprüft, mit grösstenteils positiven Resultaten [17]. Allerdings können diese Resultate nicht direkt auf die Materialien und Belagsarten in der Schweiz übertragen werden. In diesem Zusammenhang ist ebenfalls das Projekte NR2C der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) zu erwähnen: Hier wurde im Rahmen neuer Strassenbaukonzepte u.a. die Entwicklung einer Hochleistungsbinderschicht mit hohen Anteilen an Recycling-Material thematisiert [56].

2 Vorgehen, Methodik, Lösungsansatz

2.1 Mix Design, Mischgut und Beläge

2.1.1 Mischgut

Die Mischgutrezepturen wurden durch das LAVOC mit den in EP5 [5] entwickelten Methoden optimiert, wodurch diese validiert werden konnte. Da die Materialien im Forschungspaket Heissrecycling von einem anderen Hersteller kamen, mussten in einem ersten Schritt die verschiedenen Ausgangsmaterialien wie Bitumen, Mineralstoffe und Recyclinggranulat analysiert werden. Zusätzlich wurde das Mischgut der Referenzmischungen ohne Recycling der neuen Mischgutanlage untersucht. Aus den Eigenschaften der Ausgangsmaterialien konnten mittels der entwickelten Mix-Designmethode die Mischrezept für die beiden Mischguttypen AC 11 S und AC T 22 S mit dem gewünschten hohen Anteil an RAP berechnet werden (Mix-Design Methode und entsprechende Resultate in Kapitel 5.1 und im EP5 [5]). Dabei sollten die Mischgüter hinsichtlich Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt und Penetration des zurückgewonnenen Bindemittels mit der Erstprüfung der Referenzmischung übereinstimmen. Aus den hergestellten Asphaltmischungen wurden Prüfkörper hergestellt und geprüft, um daraus das Verhalten der Asphaltmischungen beschreiben zu können. Diese im Labor ermittelten Werte wurden dann mit den Resultaten der eingebauten Schichten verglichen.

2.1.2 Mischanlage

Bezüglich der Mischanlage waren zwei Voraussetzungen wesentlich. Zum einen sollte die Mischanlage nahe dem ASTRA-Testgelände bei Lenzburg gelegen sein und zum anderen in der Lage sein, Mischgut mit den verlangten hohen Recyclinganteilen herzustellen. Basierend auf diesen Kriterien wurde die Mischanlage BAB Belag AG Birmensdorf gewählt.

2.1.3 Beläge

Für die Validierung der oben erwähnten Mischgüter wurden folgende Beläge eingebaut.

Testfeld 1

Versuchsobjekt 1: Zweischichtiger Belag bestehend aus einer AC 11 S Deckschicht mit 60% RAP und einer AC T 16 S Tragschicht ohne RAP.

Referenz 1: Zweischichtiger Belag bestehend aus einer AC 11 S Deckschicht ohne RAP und einer AC T 16 S Tragschicht ohne RAP.

Testfeld 2

Versuchsobjekt 2: Einschichtiger Belag bestehend aus einer AC T 22 S Tragschicht mit 75% Ausbauasphalt. Beim Mixdesign stellte sich heraus, dass der ursprünglich vorgesehene RAP-Anteil von 80% mit dem neuen Material nicht möglich war und auf 75% reduziert werden musste (vgl. Kapitel 5.1).

Referenz 2: Einschichtiger Belag bestehend aus einer AC T 22 S Tragschicht ohne RAP

Die Anordnung der beschriebenen Beläge auf dem Testgelände in Lenzburg ist in Kapitel 2.1.5 ersichtlich.

2.1.4 Dimensionierung

Damit die im Forschungspaket verwendeten Belagsaufbauten verwendet werden konnten, mussten die nach Norm SN 640 430 [30] vorgegebenen Schichtdicken berücksichtigt werden. Das heisst eine Schichtdicke von 35 ... 50 mm für den Deckbelag AC 11 S und 65 ... 100 mm für die Tragschicht AC T 22 S. Weitere Einschränkungen kamen vom Testgelände, welches ein Planum mit einer mittleren Tragfähigkeit S2 aufwies. Darüber wurde eine 60 cm dicke ungebundene Schicht mit einer Gesteinskörnung 0/45 eingebaut. Diese Einschränkungen führten u.a. dazu, dass für beide Belagsaufbauten eine Gesamtschichtdicke von 8 cm gewählt wurde (Abb.1).

Die Belagsschicht aus AC T 22 S wurde als Trag-/Deckschicht konzipiert. Um die Versuchsdauer zu reduzieren, wurde eine möglichst tiefe Verkehrslastklasse gewählt. Für die Validierung wurde deshalb ein Oberbautyp 1 für eine Verkehrsklasse T3 gewählt, die erfahrungsgemäss bei kanalisiertem Betrieb ungefähr 500'000 Zyklen mit dem MLS10 erfordert [16]. Damit die Tragschicht AC T 16 S normgerecht mit der für diesen Belag definierten Mindestdicke von 45 mm eingebaut werden konnte, wurde für den AC 11 S die Mindestdicke 35 mm gewählt,

Beide Belagsaufbauten wurden jeweils mit (Versuchsobjekt) und ohne (Referenz) Asphaltgranulat geplant.

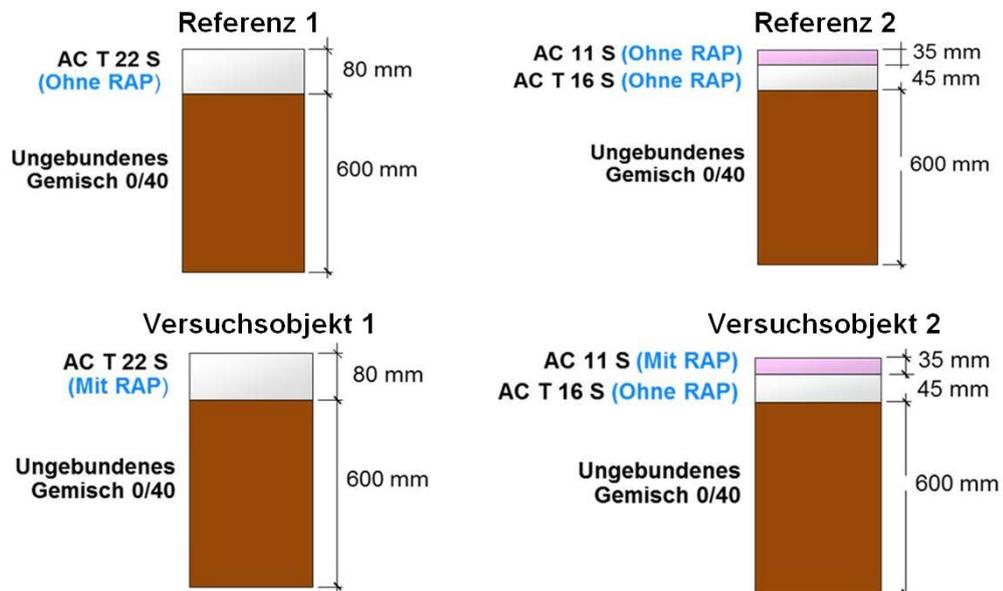


Abb. 1 Links, Angestrebter Aufbau der Referenz und des Versuchsobjektes 1; Rechts, Angestrebter Aufbau der Referenz und des Versuchsobjektes 2

2.1.5 Anordnung/Aufbau der Beläge

Für die oben beschriebenen Aufbauten wurden 4 Testfelder benötigt die gemäss Abb. 2 angeordnet und ausgelegt wurden. Damit gleiche Wetterbedingungen für die Beläge mit und ohne Recycling erzielt werden konnten und um Zeit und Kosten zu reduzieren, wurde der Verkehrssimulator MSL10 quer über diese zwei Felder gestellt (Abb. 2). So konnten mit nur zwei Testpositionen zwei Beläge parallel zur gleichen Zeit getestet werden. Diese strategische Anordnung erlaubte es die Prüfungen mit der MLS10 in ca. 2 Monate abzuschliessen. Insbesondere war damit ein direkter Vergleich von Referenz und zugehörigem Versuchsobjekt möglich. Zudem konnten allfällige Einflüsse durch das Anfahren des Fertigers besser eliminiert werden. Nachteilig an dieser Methode war, dass die Felder nicht in Einbaurichtung überrollt werden konnten. Zudem stellt die Längsfuge eine mögliche Schwachstelle dar, da im Randbereich die Verdichtung nicht immer

genügend ist. Aus diesem Grund wurden die zuerst eingebauten Recyclingbeläge breiter eingebaut, so dass danach ein Randstreifen von etwa 50 cm weggeschnitten werden konnte. Die Referenzbeläge wurden danach unter besonderer Berücksichtigung der Verdichtung direkt an das Versuchsobjekt eingebaut. Zusätzlich wurde in der Längsfuge ein Fugenband eingesetzt. Um die Verbindung zwischen Trag- und Decksicht von Versuchsobjekt 2 und von der Referenz 2 zu verbessern wurde Haftvermittler (Lackbitumen) eingesetzt. Dieser wurde vor dem Einbau der Deckschichten händisch auf die jeweiligen Tragschichten aufgesprüht.

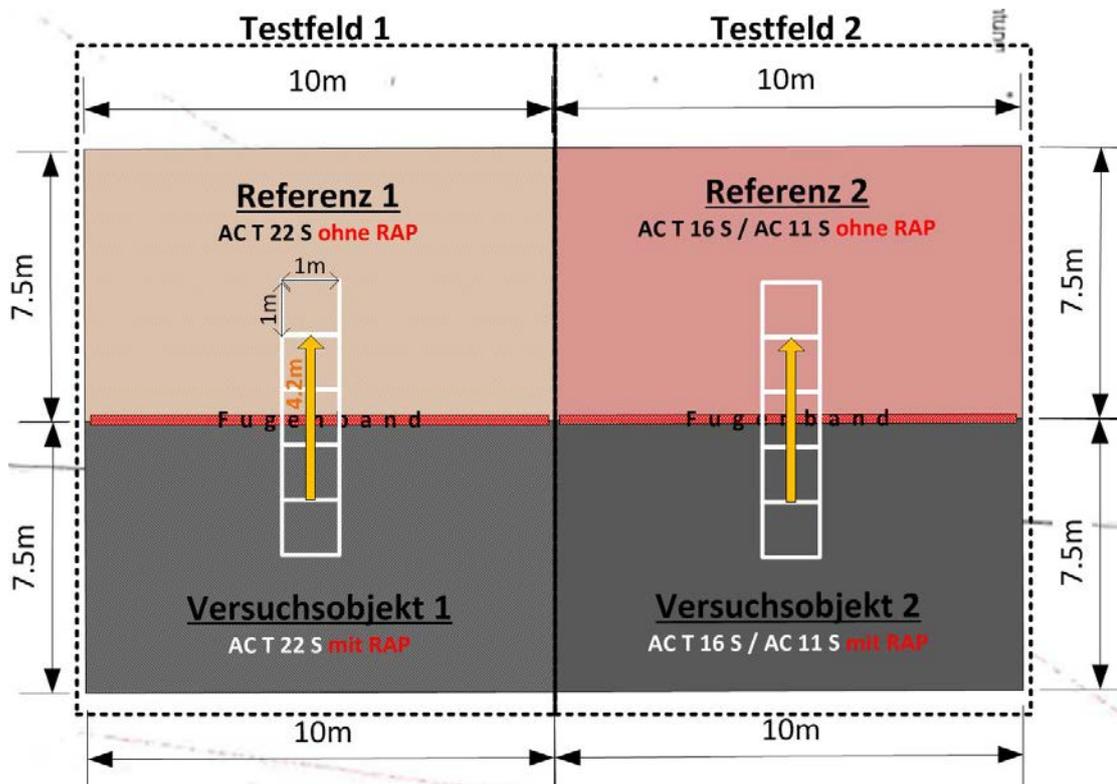


Abb. 2 Anordnung der aufgebauten Versuchsobjekte- und Referenzen in Testfeld 1 und 2. Oben, graphische Darstellung mit Dimensionen der Beläge und Belastungsausrichtung; Unten, Aufnahme mit hervorgehobenen Einteilungen der Beläge und der Belastungsstrecken

2.2 Testgelände

2.2.1 Lage

Die Testfelder wurden auf dem ASTRA-Strasseninnovationspark gebaut. Dieser befindet sich neben dem A1-Rastplatz Lenzburg im Kanton Aargau und ist 47 km von der Empa Dübendorf entfernt (Abb. 3).

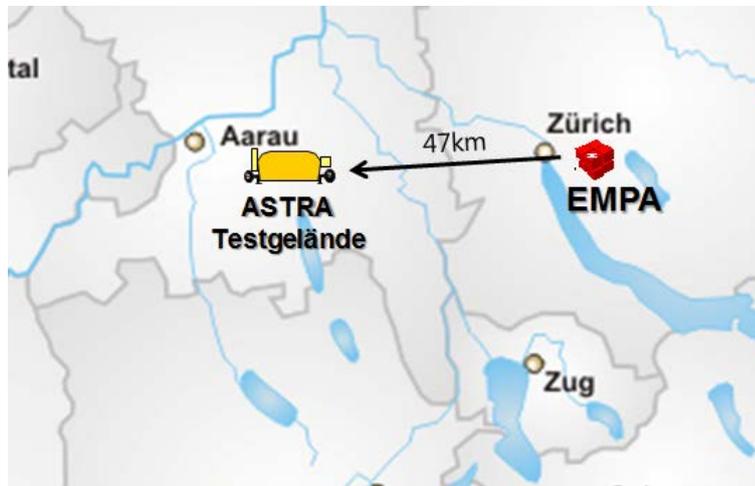


Abb. 3 Standort des Strasseninnovationsparks in Lenzburg

Der ASTRA-Strasseninnovationspark wurde im Jahr 2012 erstellt. Das Ziel dieses fixen Testgeländes ist unter möglichst realen Bedingungen Laborwerte zu verifizieren und Beläge mit dem MLS10 zu testen. Das Testgelände hat eine Grösse von ca. 28 m x 36 m und besteht aus ungebundenem Gemisch definierter Qualität und Geometrie, worauf die temporären Beläge für verschiedene Projekte eingebaut werden. Das Bodengefüge des Testgeländes besteht aus einem verdichteten Planum worauf ein Kieskoffer aus ca. 50 cm frostsicherem, ungebundenem Gemisch 0/45 und einer 5-10 cm dicken Planieschicht erstellt wurde. Diese Struktur entspricht dem regionalen Standard, was ein üblicher Aufbauaufwand erfordert. Da der Kieskoffer als Unterlage für alle einzubauenden Beläge dient, musste ein Kompromiss zwischen Frost- und Tragfähigkeitsdimensionierung gefunden werden. Die Entwässerung erfolgt über einen Sickerleitungsgraben. Die Infrastruktur umfasst alle nötigen Einrichtungen und Materialien wie Mess- und Supportcontainer, Strom- und Wasseranschluss, mobiler Lärmschutz, usw.

3 Der mobile Verkehrslastsimulator MLS10

3.1 Technische Spezifikationen

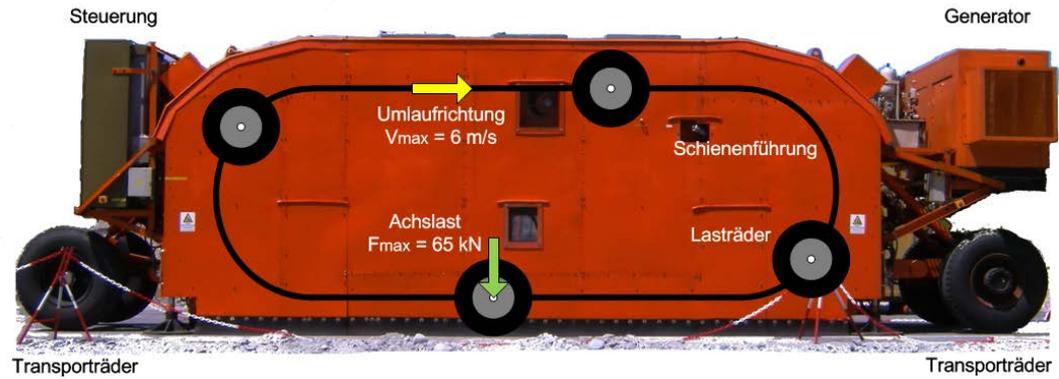
Der MLS10 beruht auf einem neuartigen Konzept. Kernstück bildet eine mit 24 linearen Induktions-Motoren (LIM) angetriebene, in sich geschlossene Kette aus vier Schienenwagen (sog. Bogies), die innerhalb der Maschine in eine Richtung umlaufen (Abb. 4). Jeder dieser Bogies ist jeweils mit einer hydraulisch gelagerten, doppel- oder einzelbereiften Halbachse zum Aufbringen der Verkehrslast bestückt. Die Bereifung der Lasträder kann mit Zwillingsrädern der Grösse 285/70 R19.5 oder mit Supersingles der Dimension 455/40 R22.5 erfolgen. Jeder Bogie wird auf den Umlaufschienen mit 12 Stahl-Doppelrädern geführt. Diese weisen einen Durchmesser von 250 mm auf und sind derart konstruiert, dass je nach Position des Bogies in der oberen oder unteren Hälfte der Umlaufstrecke die Führungswirkung optimal ist. Die Form der Laufschiene im Umlenkbereich ist derart optimiert, dass die Lasträder möglichst stossfrei auf den Belag aufsetzen.

Mit den hydraulisch gegen die Belagsoberfläche gepressten Reifen des jeweils untersten Bogies wird die Strasse mit einer Halbachslast von bis zu 65kN belastet (entspricht einer vollständigen Achslast von 130 kN) und über eine Länge von ca. 4.2 m mit einer maximalen Geschwindigkeit von 22 km/h überrollt. Damit zeichnet sich der Verkehrslastsimulator durch eine hohe Leistungsfähigkeit von 6'000 unidirektionalen Überrollungen pro Stunde aus.

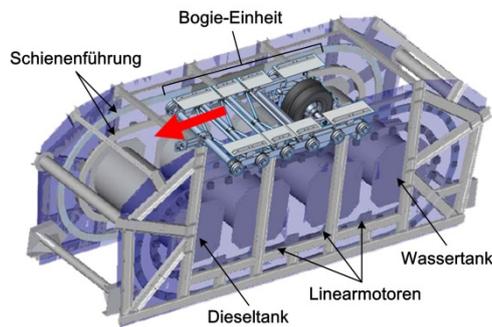
Der MLS10 ist ca. 11 m lang, 3 m hoch und 2.5 m breit. Er hat ein Gewicht von ca. 34 t und kann auf einem Spezialtieflader zur Prüfstation transportiert werden. Einmal dort angekommen, kann der MLS10 selbstständig mit einem Hydraulikmotor auf seinen Transporträdern im Schritttempo von einer Prüfstation zur anderen manövriert werden. Dieses Fahrsystem erlaubt auch das autonome Beladen des Tiefladers über eine maximal um 10% geneigte Rampe. Für periodische Messungen und Inspektionen der Belagsoberfläche lässt sich die Anlage mittels der hydraulisch beweglichen Arme der Transporträder um ca. 80 cm anheben.

Im Betrieb benötigt der MLS10 eine elektrische Leistung von ca. 50 kW, die von einem integrierten Dieselgenerator mit Partikelfilter erbracht wird. Die Anlage ist mit 3 Dieseltanks à 1'300 l bestückt, die einerseits die statische Steifigkeit der Maschine erhöhen und andererseits deren Energie-Autonomie sicherstellen. Die Lärmentwicklung beträgt ca. 83 dB(A) und liegt damit im Bereich der am Tage in der Schweiz tolerierbaren Lärmemissionen des Strassenverkehrs. Um die einseitige Abnutzung der Laufschiene zu vermeiden ist die maximal zulässige Strassenneigung im Betriebszustand auf 3% zu beschränken.

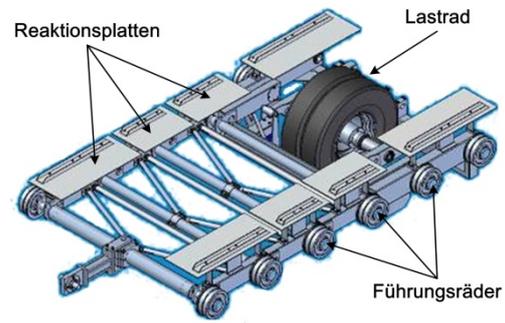
Der MLS10 kann mit einem Zusatzsystem ausgerüstet werden, welches auch die Simulation des in der Praxis vorkommenden seitlichen Spurrifens um ± 300 mm erlaubt. Bedingt durch das Antriebssystem wird beim Überrollen kein definierter Horizontalschub aufgebracht, weshalb beispielsweise der Effekt des Bremsens nicht simuliert werden kann. Gewisse Untersuchungen des Abriebverhaltens lassen sich aber dennoch durchführen. Die Anlage kann zudem auch mit künstlicher Beregnung der Belagsoberfläche betrieben werden. Dies kann sich in jenen Fällen als zweckmässig erweisen, wo die Wirkung von Wasser auf das Verhalten des Strassenbelages untersucht werden soll [11-15].



a)



b)



c)

Abb. 4 Mobile Load Simulator MLS10: (a) Reale Ansicht inklusive Funktionsprinzip; (b) Rahmen mit Bogie-Einheit, (c) Bogie-Einheit mit Lastrad

3.2 Betriebsbedingungen MLS10

Die Last der einzelnen Bogies des MLS10 wurde auf je 65 kN festgelegt. Dies entspricht einer totalen Achslast von 130 kN. Diese Last wurde in regelmässigen Zeitabständen mit einer statischen LKW Waage der Firma Hänni Instrumente AG überprüft. Der Reifendruck wurde auf 10.5 bar eingestellt. Zum Einsatz kam die Super Single Bereifung von Goodyear der Dimension 455/40 R22.5. Die Überrollgeschwindigkeit wurde auf 5 m/s, d.h. etwa 18 km/h, festgelegt.

4 Messungen und Sensorik: Methodik und Auswertung

Um den Zustand des Belags kontinuierlich erfassen zu können, wurden die Beläge mit verschiedenen Sensoren bestückt. Darüber hinaus wurden periodische Untersuchungen mit spezialisierten Messsystemen durchgeführt. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die eingesetzten Sensoren und Messsysteme.

4.1 Kontinuierliche Messungen

4.1.1 Temperaturmessung mit Thermoelementen

Für die Temperaturmessung wurden aus Nickel-Chrom gefertigte Thermoelemente des Typs K (Abb. 5), die in Asphalt, Beton oder Luft verwendet werden können, benutzt. Diese wurden während des Belageinbaus in verschiedenen Tiefen und an der Oberfläche platziert (Kapitel 4.4). Dank einer Teflon-Isolation können diese Sensoren den hohen Temperaturen beim Belageinbau standhalten. Innerhalb des Belages wurden die Kabel durch Kunststoffrohre bis zur Messstelle geführt. An der Oberfläche wurde dieser Weg durch möglichst dünne Schlitze im Belag zurückgelegt.

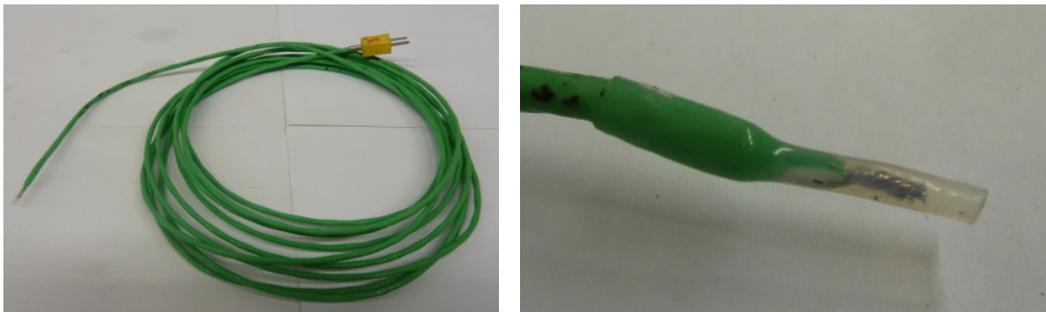


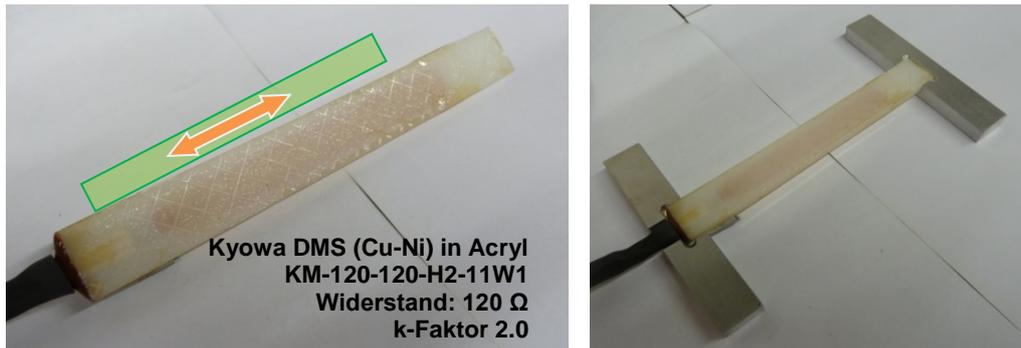
Abb. 5 Thermoelemente mit Teflon Isolation und temperaturempfindlicher Messspitze

Die Temperatur wurde alle 2 Minuten erfasst und mit der zugehörigen Zeitreferenz tabellarisch im internen Speicher des Datenerfassungsgeräts gespeichert. In regelmässigen Abständen wurden mittels einer speziellen Software ASCII-Sicherungskopien auf einem externen Rechner gesichert. Aus den ermittelten Daten konnte das zeitliche Temperaturprofil der Fahrbahn festgehalten werden.

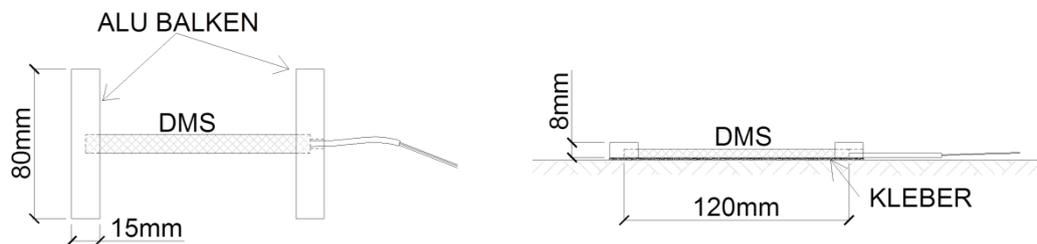
4.1.2 Dynamische Dehnungsmessung mit Dehnmessstreifen (DMS)

Mittels geeigneter Dehnmessstreifen wurden die Belagsdehnungen erfasst, welche durch die MLS10-Belastung in Längs- und Querrichtung erzeugt wurden. Die Sensoren wurden während des Belageinbaus zwischen Fundation und Tragschicht, sowie an der Oberfläche platziert (Kapitel 4.4). Ein Dehnmessstreifen stellt prinzipiell einen elektrischen Widerstand dar, welcher in einer Wheatstone'schen Brücke mit hochpräzisen Widerständen des gleichen Werts verschaltet ist. Bei einer auftretenden Dehnung des Messstreifens verändert sich dessen elektrischer Widerstand, was durch die Messbrücke registriert wird. Die eingesetzten DMS der Firma Kyowa, Japan [16] sind 120 mm lang und in Acryl eingebettet (Abb. 6).

a)



b)



c)



Abb. 6 (a) Dehnmessstreifen (DMS) im Anlieferungszustand mit angedeuteter Belastungsrichtung und nach Ankleben der Alubalken, (b) schematische Skizze der DMS mit Alubalken, (c) Einbau auf Belag und Fundation

Es wurde ein Anschluss in Dreileitertechnik zwecks Temperaturkompensation verwendet. Um eine verlässliche Verankerung im Belag und eine bessere Kräfteinleitung zu gewährleisten wurden Aluminiumbalken gefertigt, welche an beiden Enden senkrecht zur Sensorrichtung angeklebt wurden (Abb. 6). Um den hohen Belagstemperaturen beim Einbau Stand zu halten, wurden die Originalkabel durch verseilte, silberbeschichtete Kupferkabel mit Teflonisolation ersetzt. Um die Sensoren unter der Tragschicht vor der Einbauhitze und dem Gewicht der Baumaschinen zu schützen, wurde eine spezielle Installationsprozedur eingehalten. An der Oberfläche wurden die DMS-Sensoren über die Alubalken angeklebt und mit Kaltmischgut überdeckt, was ebenfalls zum Schutz der Sensoren beim Belagseinbau diente.

Die Abtastrate für die Dehnungsmessungen wurde auf 1200 Hz eingestellt. Die Dehnungssignale wurden in 5 Minutenintervallen für eine Zeitdauer von 30 Sekunden gespeichert. Die entstandenen Datensätze wurden im ASCII-Format und zusammen mit dem jeweiligen Zeitstempel gespeichert.

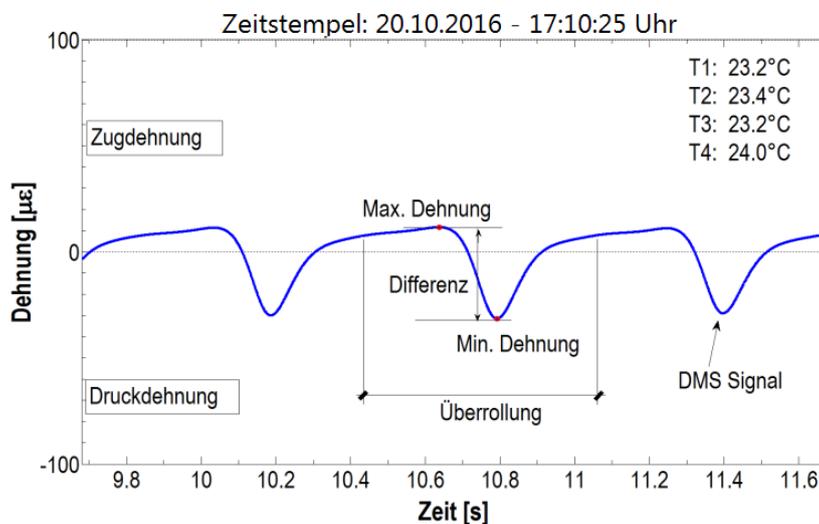


Abb. 7 Beispiel einer Dehnungsmessung im Belag

Abb. 7 zeigt einen typischen Dehnungsverlauf während einer MLS10 Belastung. In diesem Beispiel sind nur 2 Sekunden des Signals abgebildet, welches in dieser Zeitspanne 3 Spitzenwerte bzw. drei MLS10 Überrollungen zeigt. In derselben Abbildung sind auch der Zeitstempel der Datei sowie die gemessenen Temperaturen festgehalten. Zugverformungen sind mit positiven und Druckverformungen mit negativen Werten dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen permanenten (statischen) Dehnungen im Belag ist es schwierig eine gemeinsame Nulllinie aller Sensoren zu definieren. Um dem entgegenzuwirken und nur die durch die Belastung des MLS10 erzeugten, dynamischen Dehnungen zu messen, wurden alle Sensorsignale vor Beginn der Aufzeichnung tariert, d.h. softwaremässig auf Null gesetzt. Aufgrund der intensiven, repetitiven Belastung durch den MLS10 konnten kumulierte Dehnungen, welche zu permanenten Belagsdeformationen führten nicht ausgeschlossen werden. Die mit dieser Messmethode entstandenen Datenmengen sind so gross, dass ein vollständiger Überblick kaum gegeben werden kann. Daher wurde entschieden, die Auswertung dieser grossen Datenmenge auf diskrete Zeitintervalle bzw. Überrollungszustände einzuschränken. Nachfolgend wird die dafür angewendete Methode kurz erläutert.

Im Hinblick auf die Datenauswertung ist es wichtig zu berücksichtigen, dass jede Änderung in den gemessenen Dehnungsamplituden über die Zeit (oder der Anzahl der Überrollungen) eine Veränderung der strukturellen Belagsintegrität bedeuten kann. Es wurde daher angenommen, dass die Rissbildung und deren Fortschreiten, oder aber auch ein schlechter Schichtverbund, einen Einfluss auf die Einsenkungsmulde unter Belastung und somit auf die gemessenen Dehnungen hat.

Die gemessene Dehnung ist neben den genannten Einflüssen auch von weiteren Randbedingungen abhängig. Temperaturschwankungen während des Tages ändern die Steifigkeit des Asphaltbetons. Erwärmt sich der Belag im Laufe des Tages, so nehmen gleichzeitig der Modul der Asphaltsschichten ab und die Dehnungen entsprechend zu. Erwähnenswert ist auch der Einfluss der Überrollgeschwindigkeit der Radbelastungen auf die Dehnungen. Aufgrund der viskoelastischen Natur des Asphalts steigt diese mit abnehmender Belastungsfrequenz. Um den Faktor der Überrollgeschwindigkeit bei den gemessenen Dehnungen zu eliminieren, wurden mit der MLS10 nur Messungen mit einer Geschwindigkeit von 18 km/h durchgeführt was einer mittleren Belastungsfrequenz von ca. 1.5 Hz entspricht. Ziel der Datenauswertung war die Charakterisierung der Dehnungen im Belag durch einen Wert, der unabhängig von der Temperatur und der Überrollgeschwindigkeit ist. Dafür wurde die im Folgenden beschriebene Kompensationsmethodik angewendet.

Die gespeicherten Daten wurden mit einem Matlab-Programm automatisch nachbearbeitet und analysiert. Das entsprechende Skript arbeitet mit den Dehnungen, den gemessenen Temperaturen und der Anzahl MLS10 Überrollungen. Als Ergebnis liefert es eine Tabelle, welche die Dehnungen in Abhängigkeit der Überrollungsanzahl wiedergibt. Zuerst wurden die Daten überprüft und bereinigt. Beschädigte Dateien und/oder Dateien mit zu hohem Rauschen, Ausreißern, usw. wurden nicht berücksichtigt. Die restlichen Dateien wurden in einem Ordner mit dem entsprechenden Zeitstempel der Messung gespeichert. Das Skript liest jeden Ordner einzeln aus und führt die folgenden Schritte aus:

- a. Durchführen einer Tiefpassfilterung der Datensätze mit 20 Hz Grenzfrequenz um Hochfrequenzrauschen zu beseitigen.
- b. Berechnen der absoluten Differenz zwischen der maximalen und minimalen Dehnung jeder Überrollung, unabhängig davon, wo sich die Null-Linie befindet.
- c. Bestimmung des Durchschnitts aller Differenzen der einzelnen Überrollungen. Dies liefert als Ergebnis einen einzigen Wert, die Dehnungsamplitude. Dies wird für jeden Zeitstempel durchgeführt und mit dem Zeitstempel der jeweiligen Datei verknüpft.
- d. Die Zeitstempel werden benutzt, um die Werte der Thermoelemente aus der Datei mit den Temperaturen zu erhalten. Die Temperaturen werden danach mit der Dehnungsamplitude kombiniert in einer Tabelle gespeichert.
- e. Zudem werden die Dehnungsamplituden eines jeweiligen Tages mit der Anzahl der kumulierten Überrollungen bis zu diesem Zeitpunkt verknüpft und in der gleichen Tabelle gespeichert.

Das oben genannte Skript erzeugt aus den täglich erfassten Datensätzen eine Tabelle mit vier Spalten. In der ersten Spalte befindet sich der Zeitstempel, in der zweiten die Dehnungsamplitude des entsprechenden Tages, in der dritten die Belagstemperatur und in der letzten die kumulierte Anzahl der Überrollungen. Die Anzahl der Zeilen entspricht jener der gültigen Messungen. Anhand der erfassten Daten während des MLS10 Betriebes errechnet das Skript die durchschnittliche Temperatur. Es werden nur die Dehnungen berücksichtigt, welche im Bereich ± 0.5 °C dieser Durchschnittstemperatur erhoben wurden, benutzt.

4.1.3 Dynamische Verformungsmessung mit Beschleunigungssensoren

Zur Erfassung der dynamischen Durchbiegung des Belags unter der Last des MLS10 wurden vier Beschleunigungssensoren der Firma Kistler Instrumente AG (Schweiz) benutzt. Spezielle Aluminiumhalterungen wurden gefertigt um die Sensoren einzufassen und auf der Oberfläche des Belages kleben zu können. Diese wurden longitudinal (z-Achse senkrecht) zu der Fahrbahnoberfläche angeordnet. Um den Sensor nicht zu zerstören, wurde bei der Montage ein Abstand von 35 cm von der Mittelachse der MLS10 Radspur eingehalten (Kapitel 4.4). Die Kabel der Sensoren wurden durch eine schmale Aussparung im Belag von etwa 2 mm Breite und 3 mm Tiefe zur Messstelle geführt (Abb. 8).



Abb. 8 Links, Beschleunigungssensoren mit vorgegebenen Koordinatenrichtungen, Rechts auf dem Belag geklebter Sensor

Die Auswertung der gemessenen Beschleunigungen erfolgte nach derselben Methode wie für die Dehnungen (Kapitel 4.1.2). Anstelle der Dehnungsamplituden wurden hier die Beschleunigungsamplituden und deren äquivalente Werte berechnet.

4.2 Periodische Messungen

4.2.1 Tragfähigkeit Planum

- Vor dem Einbau der Testfelder wurden Plattendruckversuche zur Überprüfung der Tragfähigkeit des Planums durchgeführt. Das Ziel dieser Messungen war es, Drucksetzungslinien zu ermitteln und daraus die Tragfähigkeit des Untergrundes zu beurteilen. Aus den Drucksetzungslinien der Erstbelastung bzw. der Zweitbelastung konnten die Verformungsmodule E_{V1} und M_{E1} bzw. E_{V2} und M_{E2} nach SN 670 317b [31] und SN 670 312b [33] ermittelt werden. Beim Plattendruckversuch wurden die Setzungen einer kreisförmigen Platte mit einer Fläche von 700 cm^2 gemessen. Die stufenweise wiederholte Be- und Entlastung erfolgte mit Hilfe einer Druckvorrichtung und einem Lastwagen (

Abb. 9). Die mittleren Normalspannungen unter der Platte samt zugehörigen Setzungen der einzelnen Laststufen wurden in einem Drucksetzungsdiagramm dargestellt (Anhang II)



Abb. 9 Plattendruckversuche auf der Planie der Testfelder

4.2.2 Rissermittlung durch visuelle Inspektionen

Zwecks einer Identifikation allfälliger Risse und anderer strukturellen Schädigungen wurden zusätzlich visuelle Inspektionen der Belagsoberfläche und Fotodokumentationen durchgeführt. Hierzu wurden die Belastungsstrecken in 5 je 1 m² grosse Segmente eingeteilt (Abb. 10)

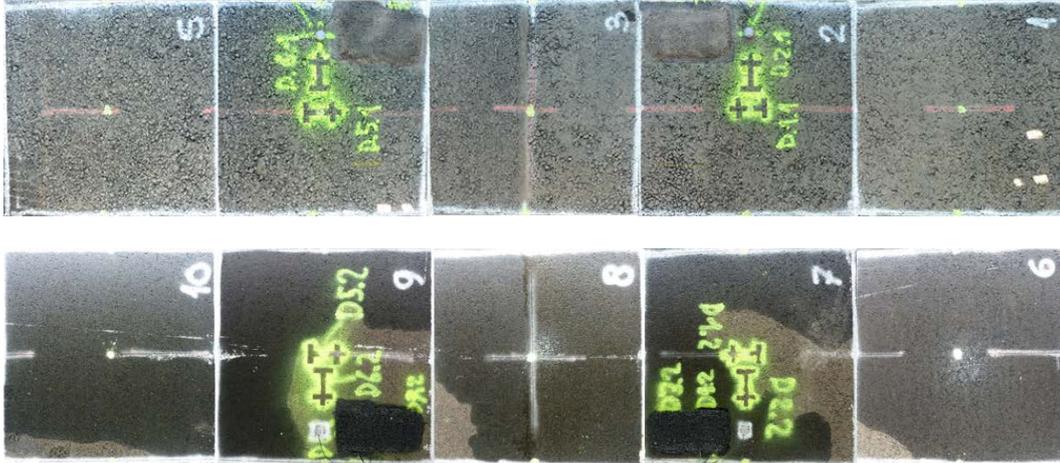
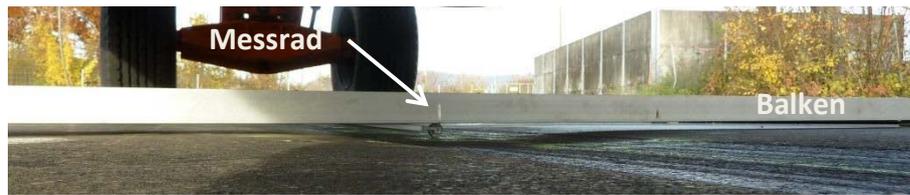


Abb. 10 Einteilung der Testfelder. Oben, Testfeld 1, Unten, Testfeld 2

4.2.3 Ermittlung der Spurrinnenentwicklung durch Querprofilmessung

Es wurden Querprofilmessungen mit einem Profilometer vorgenommen, um die Spurrinnenentwicklung und die permanente Deformation des Belags zu erfassen. Der eingesetzte Profilometer besteht aus einem Alubalken mit einem sich darin bewegenden Messrad (Abb: 11). Dieses ist dank einer Federlagerung in ständigem Kontakt mit dem Belag und bewegt sich entlang seines Trägers. Der Balken liegt an seinen Enden auf höhenverstellbaren Füßen, welche vor Beginn eines Tests fixiert werden, um die Referenzhöhe der Messung konstant zu halten. Mit diesem Messsystem können Unebenheiten mit einer Auflösung bis zu 1 mm aufgezeichnet werden. Die Kombination von horizontaler und vertikaler Bewegung ermöglicht es, das Querprofil und dessen Änderungen während des Testverlaufs zu messen.

a)



b)

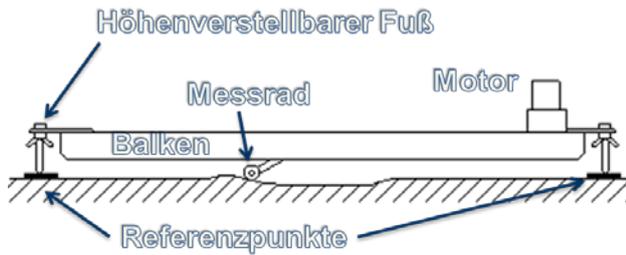


Abb: 11 (a) Foto des Profilometers zur periodischen Querprofilmessung, (b) schematische Skizze der Messanordnung

Die Messdaten des Profilometers wurden im ASCII-Format auf einem lokalen Rechner gespeichert. Die Datei enthält eine Tabelle mit der Position des Messrades entlang des Balkens und dessen Abstandes zur Belagsoberfläche. Die Gesamtlänge wurde auf 1400 mm begrenzt mit einem Messintervall von 5 mm. Die Rohdaten wurden zunächst bereinigt, d.h. es wurden Ausreisser entfernt, welche durch eventuelle kleine Steine im Weg des Messrades entstanden sind. Danach wurden die bereinigten Daten unter Berücksichtigung des 5 mm Intervalls gemittelt. Die erste Messung (Nullmessung) wurde als Referenz gesetzt. Die gemessene Spurrinnentiefe widerspiegelt demzufolge die Relation zu dieser Referenz. Um die maximale Spurrinnentiefe zu berechnen, wurde zuerst die mittlere Verformung der Fahrspur unter dem Reifen berechnet. Es muss berücksichtigt werden, dass aufgrund des Materialtransportes zu den Rändern der Spurrinne hin diese sich über der ursprünglichen Referenzhöhe befinden können. Bei der Berechnung der maximalen Spurrinnentiefe wurden diese Anhebungen als obere und die gemittelte Eindringtiefe des Belastungsrades als untere Extremität gewählt. (

Abb. 12). Dieses Resultat wurde zum Schluss der Anzahl Lastanwendungen der MLS10 gegenüber gestellt.

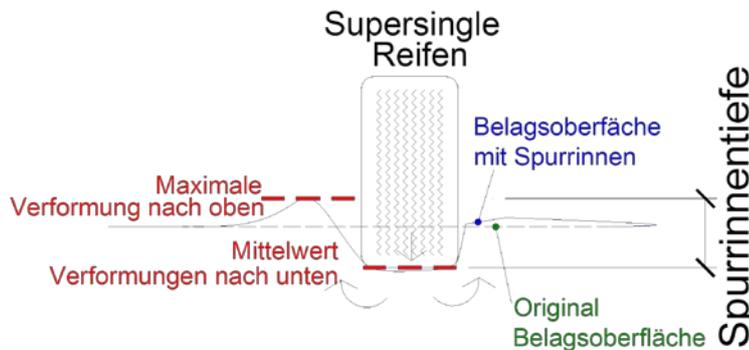


Abb. 12 Auswertung der Spurrinnentiefe

4.2.4 Ermittlung der Bodenverdichtung mit dem leichten Fallgewicht

Um die Fundationsverdichtung durch die MLS10 Latsten beurteilen zu können, wurden mit dem leichten Fallgewicht (LFG) gemäss der deutschen Prüfanleitung TP BF-StB, Teil B 8.4 [36] vor Beginn und nach Ende der Tests entsprechende Messungen durchgeführt. Das leichte Fallgewichtsgerät besteht aus einer Führungsstange, an deren oberen Ende ein 10 kg schweres Fallgewicht auf einer Höhe von 70 cm ausgeklinkt werden kann. Am unteren Ende der Führungsstange befindet sich ein Tellerfederpaket, welches das Fallgewicht wieder nach oben katapultiert, wo es wieder eingeklinkt wird (Abb. 13). Diese Führungsstange wird auf eine Lastplatte aus Stahl mit 30 cm Durchmesser aufgesetzt, die über ein Messkabel mit einer elektronischen Messeinrichtung verbunden ist. Diese Einrichtung misst die Setzung der Lastplatte und speichert die Daten. Daraus kann das dynamische Verformungsmodul E_{vd} berechnet werden. Die Resultate der entsprechenden Messungen sind in Kapitel 5.5.5 festgehalten.



Abb. 13 LFG Messungen

4.2.5 Verformungsmessung mit FWD (Falling Weight Deflectometer)

Eine international oft eingesetzte Methode zur strukturellen Evaluation des Belags erfolgt mit dem "Falling Weight Deflectometer" (FWD). Dieses Gerät simuliert die dynamische Belastung eines vorbeifahrenden Lastwagens indem es ein schweres Gewicht auf den Belag fallen lässt. Die dynamischen Eigenschaften der Last werden mittels einer Feder kontrolliert. Der kurzzeitige Impuls verursacht eine Durchbiegungsmulde auf der Belagsoberfläche, welche mit einer Reihe oberflächlich aufgesetzter Geophone registriert wird (Abb. 14). Die Deflektionen werden an 40 Stellen pro Testsektion ermittelt. Diese, können als Indikatoren für den Zustand des Belags herangezogen werden (Kapitel 5.5.6). Im vorliegenden Fall wurden die Messungen in Zusammenarbeit mit der Universität Parma mit einem Gerät des Unternehmens Dynatest durchgeführt. Details über das erwähnte Gerät, dessen Anwendung und die Ermittlungsmethode der Deflektionen sind in der Literatur [34] [35] ersichtlich.



Abb. 14 FWD Belagsmessung vor der Erstbelastung mit der MLS10 in Zusammenarbeit mit der Universität Parma

4.3 Materialuntersuchungen im Labor

Um das Material im Labor charakterisieren und die Schädigungswirkung der MLS10 Belastungen beurteilen zu können, wurde von jeder Belagssorte vor dem Einbau Mischgut und am Ende der Messkampagne Bohrkerne entnommen (Abb. 15). Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

An den Bohrkerne inkl. rückgewonnenem Bindemittel

- Bestimmung der folgende Eigenschaften
 - Löslicher Bindemittelanteil SN EN 12697-1 [38]
 - Rohdichte Bohrkerne SN EN 12697-5 [39]
 - Raumdichte, Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad SN EN 12697-6 [37]
 - Nadelpenetration SN EN 1426 [53]
 - Ring- und Kugel-Verfahren SN EN 1427 [55]
- Bestimmung des Schichtenverbundes nach Leutner SN 670 461 [40]
- Bestimmung des Elastizitätsmodul und Phasenwinkel SN EN 12697-26 [41]

Am Mischgut

- Löslicher Bindemittelanteil SN EN 12697-1 [38]
- Volumetrische Kennwerte SN EN 12697-8 [42]
- Korngrößenverteilung SN EN 12697-2 [43]
- Marshalltest SN EN 12697-30 [44] und SN EN 12697-34 [45]
- Spurbildungstest SN EN 12697-22 [46] und SN EN 12697-33 [47]
- Wasserempfindlichkeit SN EN 12697-12 [48]
- Bruchfestigkeit bei -10 °C SN EN 12697-23 [50]
- Verdichtbarkeit mittels Gyrator SN EN 12697-9 [51] und SN EN 12697-31 [52]



Abb. 15 Oben, Entnahme des Mischgutes während der Aufbauarbeiten in Lenzburg, Unten, Bohrkerntnahme nach der Messkampagne

Nach Abschluss der Messkampagne im Dezember 2016 wurden verschiedene Bohrkernproben aus beiden Testfeldern entnommen (Abb.16 und Abb. 17). Einerseits Bohrkernproben des Durchmessers 150 mm für die Schichtverbundprüfung nach Leutner [40] und andererseits Bohrkernproben des Durchmessers 100 mm für die Spaltzugversuche [41].

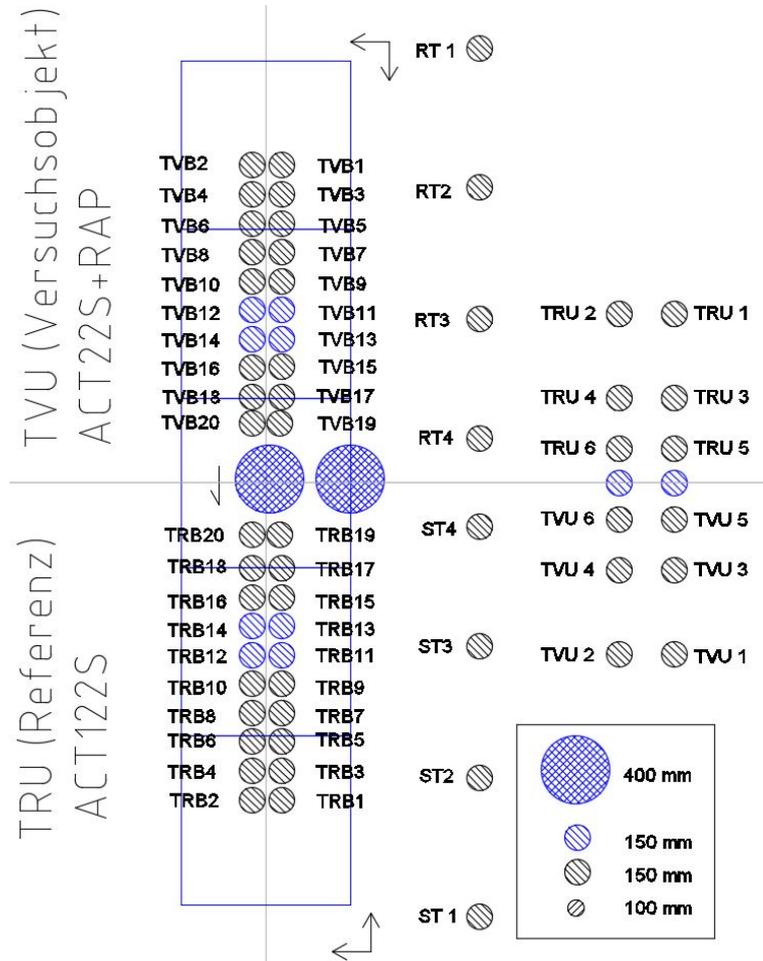


Abb.16 Bohrkernentnahme Testfeld 1 (einschichtiger Belag) mit Legende der Bohrkern Durchmesser

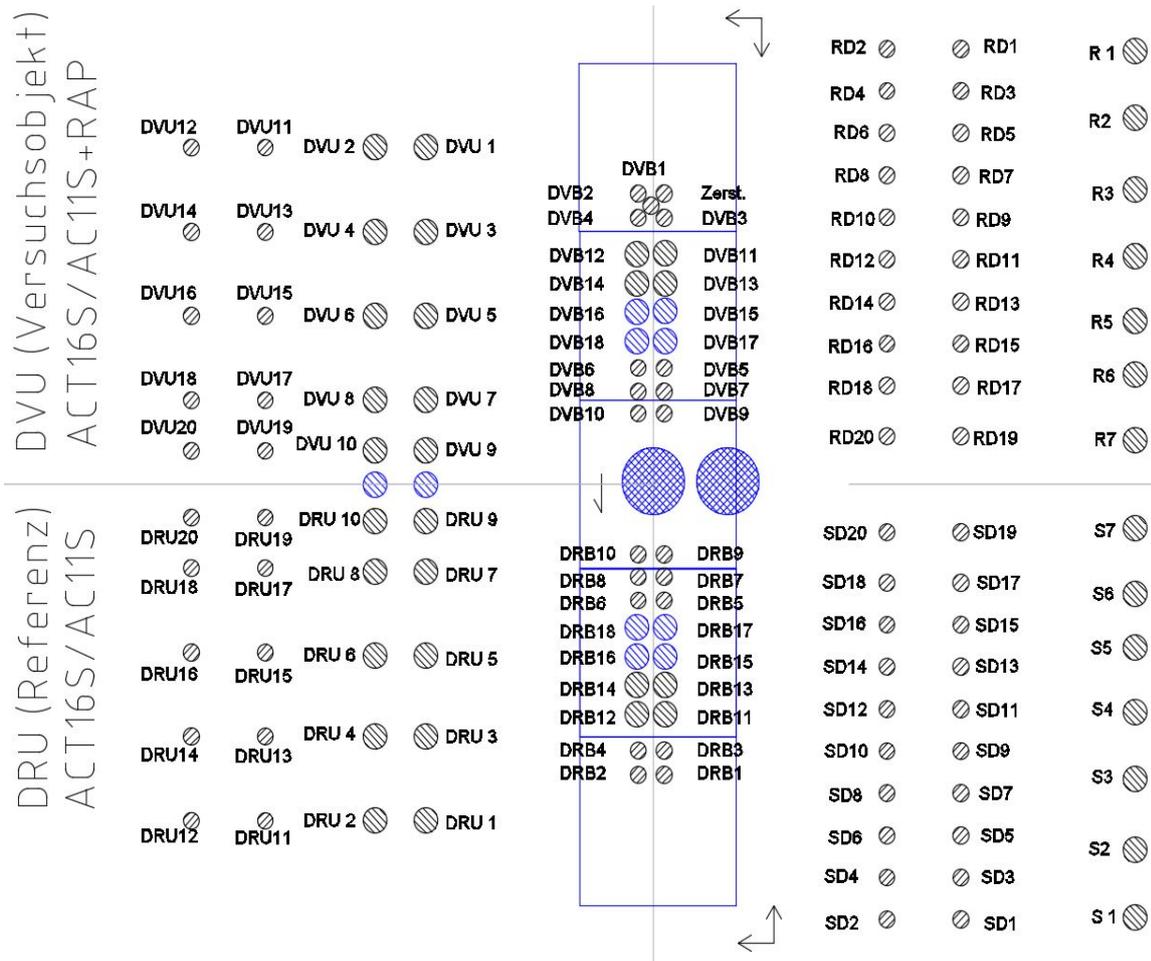


Abb. 17 Bohrkernentnahme Testfeld 2 (zweischichtiger Belag)

4.4 Messlayout und Datenerfassung

Um die Sensoren und Messpositionen aufeinander abzustimmen und eine effiziente Datenerfassung zu gewährleisten, wurde ein Messkonzept erarbeitet, welches die Anzahl und Position der Sensoren sowie die Zeitpunkte für die einzelnen Messungen festlegt.

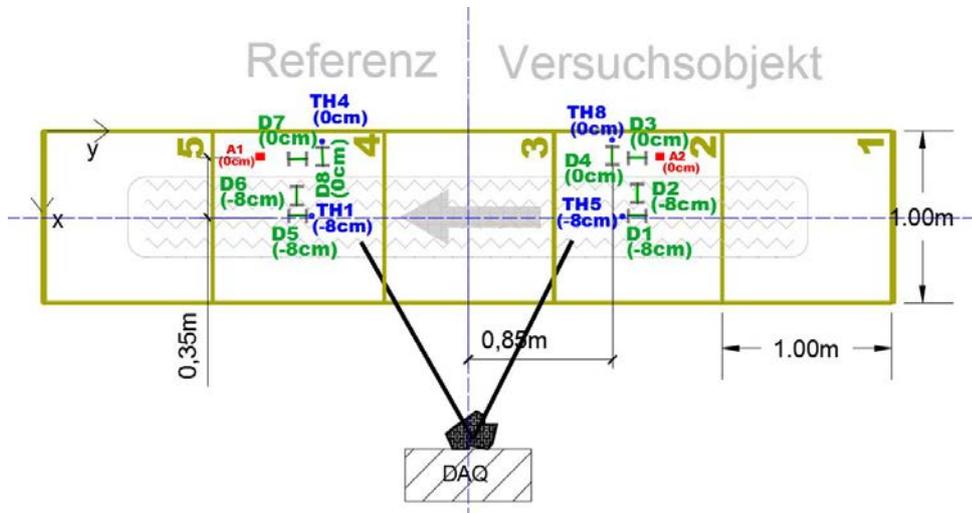


Abb. 18 Grün, Positionen der Dehnmessstreifen, blau der Thermoelemente und rot der Beschleunigungssensoren auf Testfeld 1

In vergangenen Projekten wurden die Versagensgrenzen von unterschiedlichen Normbelägen ermittelt. Dabei wurden bereits umfangreiche Dehnmessungen im kanalisierten Betrieb durchgeführt. In diesem Zusammenhang haben vor allem die Untersuchungen im Projekt ASTRA 2011/004 [16] aufschlussreiche Resultate über den Einsatz von DMS-Sensoren erbracht. Da die Erfahrung gezeigt hat, dass Sensoren zwischen den Asphaltsschichten die Gesamtstruktur wesentlich beeinträchtigen, wurde im hier vorliegenden Projekt auf einen entsprechenden Einbau verzichtet. Stattdessen wurden pro Testfeld je zwei DMS-Sensoren an der Oberfläche (D3 und D4 bzw. D7 und D8), neben der Fahrspur und auf der Foundation direkt unter (D1 und D2 bzw. D5 und D6) der Fahrspur platziert. Diese wurden so angeordnet, dass sowohl die transversalen als auch die longitudinalen Dehnungen erfasst werden konnten. Diese zweidimensionale Überwachung erlaubte es die kritischen Dehnungszustände im Belag zu erfassen. Neben jedem DMS-Paar an der Oberfläche wie auf der Foundation wurde je ein Thermoelement platziert (TH1 bis TH8). Dadurch konnten einerseits die gemessenen Dehnungen in Relation zur lokalen Temperatur gesetzt und weiter der Einbauprozess vereinfacht werden. Dank eines Beschleunigungssensors (A1 und A2), welcher an der Oberfläche neben der Fahrspur platziert wurde, konnte zudem in Querrichtung die Deflektionsmulde bestimmt werden. In der Auswertungsphase dienten diese Resultate und jene aus den DMS-Temperatur- und FWD-Messungen zur Charakterisierung des jeweiligen Belagsverhaltens (Kapitel 5.4)

Die periodisch durchgeführten Messungen wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten, bzw. Überrollungszuständen des Belags durchgeführt. Pro Testfeld wurde das Profil der Spurrinne zweimal gemessen. Dabei wurde zwischen den Messstellen ein Abstand von 2.4 m eingehalten und darauf geachtet, dass die Messstellen in einem Bereich verlaufen, welcher nicht durch im Belag eingebaute Sensoren gestört ist. Das Profil wurde jeweils auf einer Länge von 1.4 m um die Mittellinie der 100 mm breiten Fahrspur gemessen (Abb. 19).

Abb. 21 zeigt die Belagsschnitte von Testfeld 1, welche der Bestimmung der Tragfähigkeit der Fundation mit dem leichten Fallgewicht dienen. Dabei wurde im Bereich des Versuchsobjektes und der Referenz stets der befahrene und unbefahrene Bereich geprüft. Die Fundation unter Testfeld 2 (zweischichtiger Belag) wurde auf dieselbe Weise getestet. Um die Verdichtungswirkung der Fertigungsarbeiten erfassen zu können, wurde zusätzlich eine Messung ausserhalb des asphaltierten Geländebereiches durchgeführt.

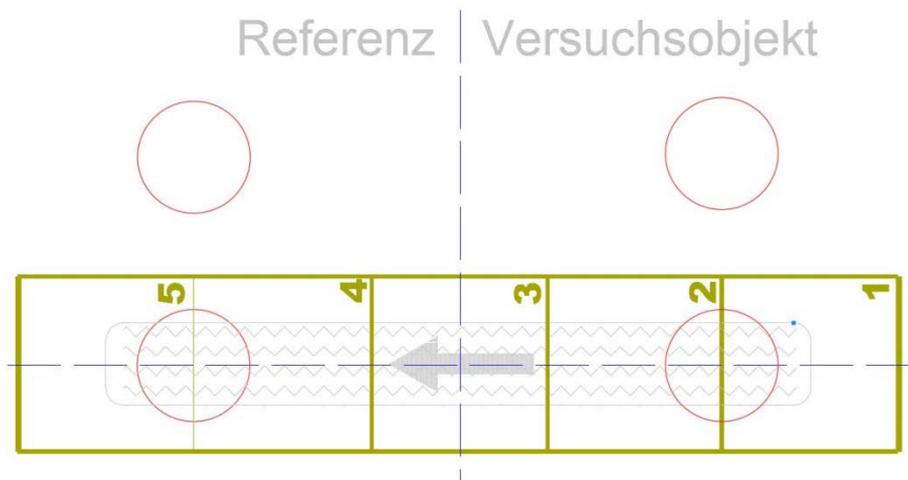


Abb. 21 Positionen der Messungen mit dem leichten Fallgewicht auf Testfeld 1

4.4.1 Frequenz der periodischen Messintervalle

Die Temperaturmessungen der Beläge wurden kontinuierlich durchgeführt. Dabei wurden die Messwerte alle fünf Minuten gespeichert. Die Messungen der Dehnungen und der Beschleunigungen erfolgten alle fünf Minuten für eine Zeitdauer von 30 Sekunden ausschliesslich während dem MLS10-Betrieb. Die Profilmessungen, die FWD- und die Messungen mit dem leichten Fallgewicht (LFG), sowie die Plattendruckversuche und die visuellen Rissinspektionen wurden wie erwähnt zu bestimmten Zeitpunkten während des Versuchsverlaufs durchgeführt. Einen Überblick der periodischen Messungen ist in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1 Messzeitpunkte der periodischen Messungen

Prüfposition	Überrollungen	Datum	Querprofil	Risse	FWD	LFG	Plattendruck
Testfeld1 (Einschichtig)	Nullmessung	29.06.2016					X
		04.08.2016			X		
		06.10.2016		X			
		06.10.2016	X				
	5'000	06.10.2016	X	X			
	10'000	07.10.2016	X	X			
	20'000	07.10.2016	X				
	50'000	10.10.2016	X	X			
	100'000	17.10.2016	X	X			
	150'000	19.10.2016	X	X			
	200'000	20.10.2016	X	X			
	250'000	21.10.2016	X	X			
	300'000	28.11.2016	X				
	350'000	30.11.2016	X				
	400'000	02.12.2016	X	X			
	Nachmessung	24.03.2017					X
Testfeld2 (Zweischichtig)	Nullmessung	29.06.2016					X
		04.08.2016			X		
		24.10.2016		X			
		24.10.2016	X				
	5'000	24.10.2016	X				
	10'000	26.10.2016	X				
	20'000	26.10.2016	X				
	50'000	28.10.2016	X	X			
	100'000	31.10.2016	X	X			
	150'000	01.11.2016	X	X			
	200'000	03.11.2016	X	X			
	250'000	04.11.2016	X	X			
	300'000	09.11.2016	X	X			
	350'000	15.11.2016	X	X			
	400'000	16.11.2016	X				
	450'000	17.11.2016	X	X			
500'000	21.11.2016	X	X				
550'000	22.11.2016	X	X				
600'000	24.11.2016	X	X				
Nachmessung	24.03.2017					X	

5 Resultate

5.1 Mix Design

Ziel des Mix-Design war die Formulierung von Mischrezepten für die beiden Mischguttypen AC 11 S und AC T 22 S mit den neuen Ausgangsmaterialien, die mit den Erstprüfungen des Mischwerkes übereinstimmen (Tab. 2). Dies bedeutet insbesondere identische Korngrößenverteilung, Bindemittelgehalt, Hohlraumgehalt Marshall und Zielpenetration am zurückgewonnenen Bindemittel. Abweichend ist hauptsächlich, dass hohe Anteile an RAP-Material zugegeben werden.

Tab. 2 Kenndaten der Erstprüfungen BAB Belag AG Birmensdorf (Juni 2016)

Eigenschaft	AC 11 S	AC T 22 S
Bindemittel	Bitumen 50/70	Bitumen 70/100 und Bitumen 250/330
Bindemittelgehalt	5.5 M-%	4.1 M-%
RAP-Gehalt	0%	50%
Hohlraumgehalt Marshall	4.6 Vol-%	5.8 Vol-%
Stabilität Marshall S	11.9 kN	12.6 kN
Fliesen Marshall F	3.3 mm	3.3 mm
Wasserempfindlichkeit ITSR	96%	96%
Spurrinntiefe	3.0% bei 10'000 Zyklen	2.2% bei 10'000 Zyklen
Penetration*	33 10 ⁻¹ mm	45 10 ⁻¹ mm
Erweichungspunkt Ring und Kugel*	59.0 °C	56.6 °C
Korngrößenverteilung		
Siebdurchgang [mm]		
	31.5	100
	22.4	100
	16	100
	11.2	97
	8	85
	4	62
	2	44
	1	28
	0.5	20
	0.063	9

* Prüfung am rückgewonnenen Bindemittel

5.1.1 Kenndaten der Ausgangsmaterialien

Alle Ausgangsmaterialien mit Ausnahme des Verjüngungsmittels wurden von der BAB Belag AG Birmensdorf zur Verfügung gestellt. Dies umfasste:

- Die Mineralstoffe der Asphaltanlagen in Volketswil und Birmensdorf
- Die Bindemittel Bitumen 70/100 und Bitumen 50/70 aus dem Tank der Mischanlage
- Der Ausbauasphalt, welcher homogenisiert und in die zwei Fraktionen 0/11 mm (RAP 11) und 11/22 (RAP 22) aufgeteilt wurde. Diese Fraktionen wurden separat gelagert und nur für dieses Projekt verwendet.

Als Verjüngungsmittel wurde ein Schweizer Produkt, ein Gemisch von Bitumen, Mineralöl- und Pflanzenölderivaten, verwendet.

5.1.2 Mineralstoffe

Korngrössenverteilung der Mineralstoffe

Tab. 3 Bestimmung der Korngrössenverteilung durch das LAVOC

Siebdurchgang [mm]	Füller <0.063	Sand 0/2	Splitt 2/4	Splitt 4/8	Splitt 8/11.2	Splitt 11.2/16	Splitt 16/22.4
0.063	80.8%	6.1%	0.6%	0.4%	0.3%	0.7%	0.1%
0.25		15.0%					
0.5		24.0%					
1		39.8%	0.8%				
2	100.0%	70.9%	1.2%	0.5%			
4		99.8%	69.3%	2.1%	0.7%		
5.6		99.9%	98.3%	35.7%		1.5%	
8		100.0%	100.0%	89.2%	4.3%		0.1%
11.2				100.0%	93.3%	4.6%	
16					100.0%	74.6%	0.2%
22.4						100.0%	67.4%
31.5						100%	

Zur Berechnung der Zugabemengen der einzelnen Korngruppen für die vorgegebene Korngrössenverteilung der beiden Mischguttypen wurden die Korngrössenverteilungen der angelieferten Korngruppen bestimmt (Tab. 3). Es wurde festgestellt, dass die Korngruppe 0/2 und 2/4 gröber waren und die Anforderungen der SN EN 13043-NA an die Korngrössenverteilung nicht erfüllten. Allerdings spielte dies für die Mischgutoptimierung keine grosse Rolle, da mit den erhaltenen Korngruppen und dem RAP die definierten Korngrössenverteilungen im Labor trotzdem hergestellt werden konnten.

Fliesskoeffizient des Sands (Kantigkeit)

Das Verhalten der im Projekt verwendeten Sandfraktion 0.063/2mm (orange) bezüglich Fliesskoeffizient (SN EN 933-6 [49]) ist gut ausgefallen und lag im Bereich der üblichen Grösse für Schweizer Gesteinskörnungen. Der Fliesskoeffizient der Sandfraktion des RAP 11 von BAB Belag AG Birmensdorf nach Extraktion lag wie schon im Vorgängerprojekt VSS 2005/450 (grün) deutlich tiefer als bei den natürlichen Gesteinskörnungen (Abb. 22).

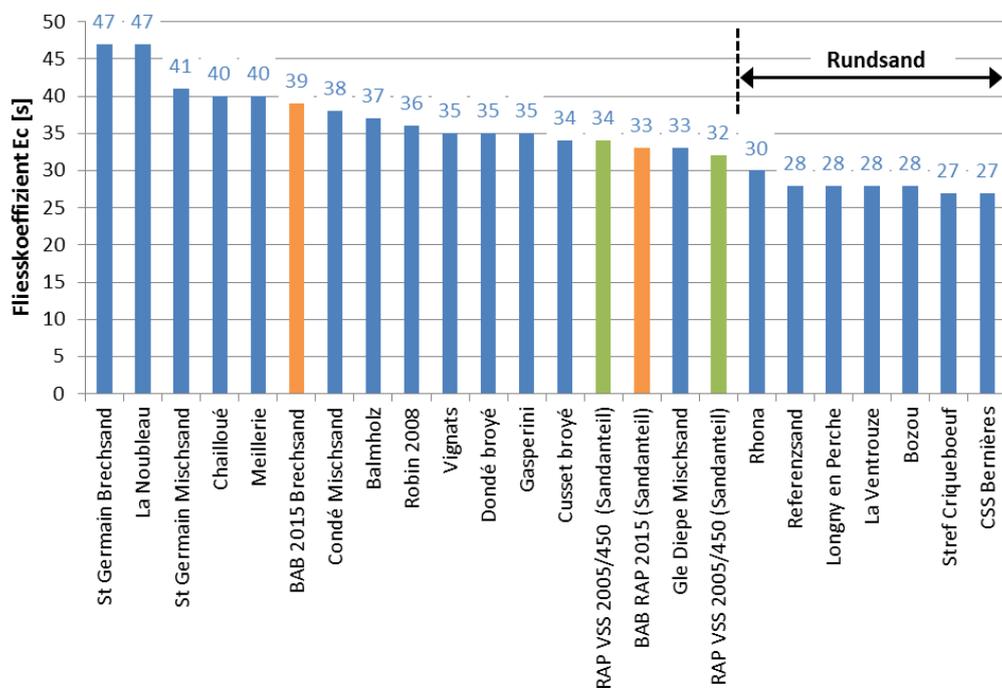


Abb. 22 Vergleich der Fliesskoeffizienten von Sand unterschiedlicher Herkunft

Plattigkeitskennzahl der Mineralstoffe

Tab. 4 Plattigkeitskennzahl für die Gesteinskörnung 4/25 mm

Korngruppe d/D [mm]	Schlitzweite des Stabsiebes [mm]	Plattigkeitskennzahl der Kornklasse Fli	Gesamt-Plattigkeitskennzahl pro Korngruppe FI	Gesamt-Plattigkeitskennzahl FI
25/31.5	16	-		
20/25	12.5	3	3	
16/20	10	3		
12.5/16	8	10		
10/12.5	6.3	11	10	8
8/10	5	10		
6.3/8	4	9		
5/6.3	3.15	11	10	
4/5	2.5	9		

Alle Mineralstoffgruppen waren sehr kubisch mit einer Plattigkeitskennzahl von 10 und tiefer und erfüllten die Normanforderungen der Klasse FI₂₅. Die Plattigkeitskennzahl der RAP-Mineralstoffe wurde nicht ermittelt, obwohl diese eigentlich vor allem für Recyclingbaustoffe wichtig wäre, da der Anteil an runden und teilweise runden Körnern in der Regel grösser ist, als bei heutigen Korngruppen. Dies rührt daher, dass vor rund 50 Jahren grössere Anteile an runden Gesteinskörnern erlaubt waren, die teilweise immer noch in den tieferen Trag- und Foundationsschichten vorhanden sein können.

Anteil gebrochener Körner

Tab. 5 Anteil gebrochener Körner für die verschiedenen Korngruppen

Korngruppe d/D [mm]	Anteil gebrochen und vollständig gebrochen [%]	Anteil vollständig rund [%]	Kategorie gemäss SN EN 13043-NA [57]
16/22	94	0	C _{90/1} (Anforderung: C _{70/10})
11/16	98	0	
8/11	98	0	
4/8	100	0	

Alle Korngruppen der Mineralstoffe waren praktisch vollständig gebrochen und erfüllten die Anforderungen für Deck- und Tragschichten gemäss SN EN 13043-NA [57].

Tab. 6 Füllereigenschaften

Eigenschaft	Prüfresultat
Rohdichte	2.704 Mg/m ³
Versteifende Wirkung (Verhältnis Bitumen 70/100/Füller =23.7:62.5 (v/v))	5.5 M-%
Delta Erweichungspunkt Ring und Kugel:	12.4 °C

5.1.3 Ausbauasphalt

Tab. 7 Eigenschaften des Ausbauasphaltes

		RAP 11 (0/11)	RAP 22 (11/22)
Bindemittelgehalt bez. Mischgut		5.39 M-%	2.51 M-%
Module de richesse		3.13	1.62
Penetration		21 10^{-1} mm	26 10^{-1} mm
Erweichungspunkt Ring und Kugel		64.5 °C	61 °C
Penetrationsindex		0.0	-0.2
Siebdurchgang [mm]	22.4	100.0	100.0
	16	100.0	94.3
	11.2	100.0	73.0
	8	99.7	51.5
	5.6	92.1	39.1
	4	81.4	32.5
	2	60.7	24.3
	1	44.4	18.8
	0.5	32.2	14.8
	0.25	23.2	11.2
	0.063	12.4	6.3

Der feine Ausbauasphalt hatte etwa den doppelten Bindemittelgehalt und Fülleranteil als der grobe. Zudem war das RAP-Bindemittel mit 21 10^{-1} mm beim RAP 11 etwas härter als beim RAP 22 mit 26 10^{-1} mm (Tab. 7).

5.1.4 Bindemittel

Es wurden zwei Bitumen verwendet, das Bitumen 50/70 für die Mischungen ohne Verjüngungsmittel und Bitumen 70/100 als Zugabebindemittel zusammen mit dem Verjüngungsmittel. Bei beiden Bitumen tritt durch die Alterung im RTFOT [58] eine Verhärtung ein, die vor allem bei den Penetrationswerten erkennbar ist. Erstaunlicherweise ist nach der Alterung praktisch keine Veränderung des Brechpunktes nach Fraass [59] feststellbar.

Tab. 8: Kenndaten des Zugabebindemittels vor und nach der RTFOT-Alterung

Bindemittel	Penetration	Erweichungspunkt Ring und Kugel	Brechpunkt nach Fraass	Penetrationsindex
Bitumen 50/70	59 10^{-1} mm	49.8 °C	-16 °C	-0.9
Bitumen 50/70 nach RTFOT	37 10^{-1} mm	51.3 °C	-15 °C	-1.1
Bitumen 70/100	81 10^{-1} mm	46.7 °C	-16 °C	-0.9
Bitumen 70/100 nach RTFOT	46 10^{-1} mm	51.3 °C	-15 °C	-1.1

Dosierung des Verjüngungsmittels

Um den Effekt des Verjüngungsmittels zu bestimmen, wurden Mischungen zwischen Zugabebindemittel und zwei unterschiedlichen Konzentrationen der Verjüngungsmittel hergestellt.

Tab. 9: Einfluss des Verjüngungsmittels auf die Bindemittelkennwerte

Bindemittel	Penetration	Erweichungspunkt Ring und Kugel	Penetrations- index
Bitumen70/100	81 10^{-1} mm	46.7 °C	-0.9
Bitumen 70/100 + 1.5% V1	106 10^{-1} mm	44.3 °C	-0.9
Bitumen 70/100 + 3.2% V1	139 10^{-1} mm	42.2 °C	-0.7

Wie Abb. 23 zeigt, wird der Penetrationswert um etwa $18 \cdot 10^{-1}$ mm pro Prozent zugegebenem Verjüngungsmittel erhöht.

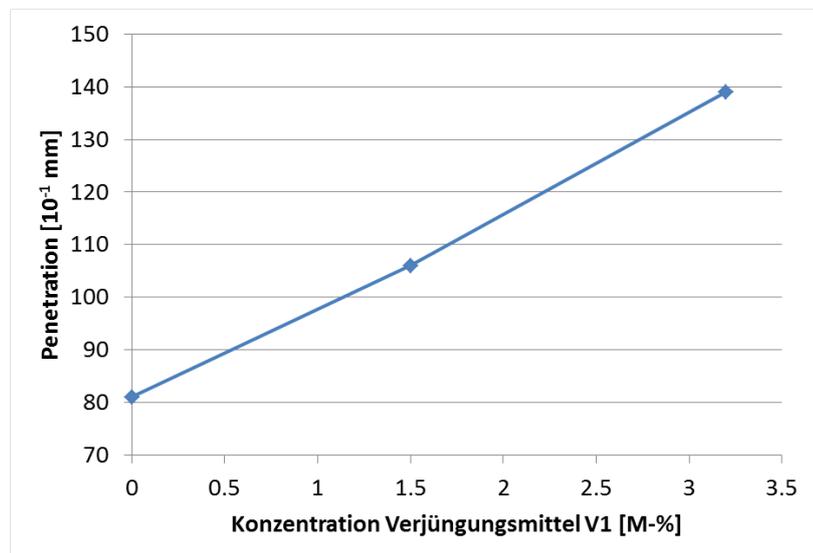


Abb. 23 Einfluss des Verjüngungsmittels auf den Penetrationswert des Bitumen 70/100

5.1.5 Optimierung des AC 11 S

Korngrößenverteilung der Mischung

Anhand der gemessenen Korngrößenverteilung der einzelnen RAP- und Mineralstoffgruppen wurden die Anteile der Korngruppen berechnet, die für die in der entsprechenden Erstprüfung definierte Korngrößenverteilung benötigt wurden.

Tab. 10 Zusammensetzung der Mischungen

Korngruppe [mm]	AC 11 S Anteil [M-%]	AC T 22 S Anteil [M-%]
RAP 22	8.2	52.2
RAP 11	51.8	22.8
16/22	0	13.4
11/16	0	0
8/11	9.9	0
4/8	11.6	1.2
2/4	4.4	3.6
0/2	12.6	5.6
Füller < 0.063	1.5	1.2

Herstellung von Probemischungen

Es wurden verschiedene Probemischungen mit der vorgegebenen Korngrößenverteilung für einen AC 11 S (Tab. 10) und dem gewünschten RAP-Anteil von 60% hergestellt. Dabei wurde die Dosierung des Verjüngungsmittels und der Bindemittelgehalt variiert (Tab. 11).

Tab. 11 Eigenschaften der Probemischungen AC 11 S

Dosierung Verjüngungsmittel [M-%]	(Ref) 0	1.5			2		4
RAP [M-%]	0	60			60	60	
Bitumen	50/70	70/100			70/100	70/100	
Bindemittelgehalt [M-%]	5.50	4.50	5.10	5.26	5.42	5.50	5.50
Verdichtbarkeit Gyrator							
Verdichtbarkeit nach 1 Umdrehung C1 [V-%]	80.1	80.1	81.8	85.6	88.1	82.9	85.2
Verdichtbarkeit nach 40 Umdrehungen C40 [V-%]	94.1	93.7	95.0	96.5	97.4	95.8	96.4
Steigung der Verdichtungsgerade k [-]	3.67	3.58	3.39	2.64	2.18	3.23	2.72
Marshall Versuch							
Hohlraumgehalt V _m [%]	3.0	4.3	3.3	2.2	1.7	2.2	2.0
Stabilität [kN]	10.5	14.1	12.9	11.8	11.5	11.4	10.7
Fliesen [mm]	3.0	2.5	2.8	3.8	4.2	3.2	3.5
Tangentialer Fließwert [mm]	1.7	1.3	1.6	2.7	2.9	2.2	2.6
Rückgewonnenes Bindemittel							
Penetration [10 ⁻¹ mm]	42	37	42	43	45	46	63
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	52.6	58.0	55.2	55.6	55.0	54.5	51.9
Penetrationsindex	-1.0	-0.1	-0.4	-0.2	-0.3	-0.3	-0.2

Tab. 12 Übersicht über die Prüfergebnisse des AC 11 S

Anteil an RAP	M-%	60
RAP 11	M-%	51.8
RAP 22	M-%	8.2
Anteil natürlicher Mineralstoffe	M-%	40
Zugabebitumen		70/100
Bindemittelanteil bezüglich Mischgut	M-%	5.10
Dosierung Verjüngungsmittel bez. Gesamtbindemittelgehalt	M-%	1.5
Verdichtbarkeit mittels Gyrator		
nach 1 Zyklus (C1)	V-%	81.8
nach 40 Zyklen (C40)	V-%	95.0
Steigung der Verdichtungskurve		3.39
Marshall-Versuch		
Hohlraumgehalt	V-%	3.3
Stabilität	kN	12.9
Fliesen	mm	2.8
Tangentialer Fließwert [mm]	mm	1.6
Spurbildungstest		
Hohlraumgehalt	V-%	5.0
Spurrinnentiefe berechnet 10'000 Zyklen	%	8.0
Spurrinnentiefe gemessen 10'000 Zyklen	%	7.6
Spurrinnentiefe berechnet 30'000 Zyklen	%	10.3
Spurrinnentiefe gemessen 30'000 Zyklen	%	-
Steigung		0.234
Indirekte Zugprüfung (ITT)		
Prüftemperatur	°C	-10
Mittlerer Hohlraumgehalt	V-%	2.8
Hohlraumgehalt – min	V-%	2.6
Hohlraumgehalt – max	V-%	2.9
Mittlerer Steifigkeitsmodul	MPa	5.0
Steifigkeitsmodul – min	MPa	4.9
Steifigkeitsmodul – max	MPa	5.1
Wasserempfindlichkeit (22 °C)		
ITS nass	kPa	1'180
ITS trocken	kPa	1'317
Ratio ITSR		90
Rückgewonnenes Bindemittel		
Penetration	10 ⁻¹ mm	42
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	55.2
Penetrationsindex		-0.4

Zusammenfassung

Die Anforderungen für einen AC 11 S gemäss SN 640431-1 (Bindemittelanteil ≥ 5.4 M-%, Hohlraumgehalt 3.0 ... 6.0 V-%) sind ohne Änderung der Korngrössenverteilung schwierig einzuhalten. Die Begleitkommission entschied das empfohlene Rezept mit 1.5% Verjüngungsmittel und 5.1 % Bindemittelgehalt (entspricht etwa 5.4 % dosiert) weiterzuverfolgen, da mit höherem Bindemittelgehalt der Hohlraumgehalt zu niedrig wurde.

Mit dem ausgewählten Rezept wurde die Hauptmischung produziert, mit der die benötigten Prüfkörper für die Performance orientierten Versuche hergestellt wurden.

5.1.6 Optimierung des AC T 22 S Herstellung von Probemischungen

Tab. 13 Eigenschaften der Probemischungen AC T 22 S

Dosierung Verjüngungsmittel bez. Gesamtbindemittel [M-%]	(Ref) 0	2	3.2	4
RAP [M-%]	0	80	75	80
Bitumen	50/70	70/100	70/100	70/100
Bindemittelgehalt [M-%]	5.50	5.50 5.10	3.80	4.10 5.50
Verdichtbarkeit Gyrator				
Verdichtbarkeit nach 1 Umdrehung C1 [V-%]	83.2	89.5	-	- 89.9
Verdichtbarkeit nach 40 Umdrehungen C40 [V-%]	98.2	95.7	-	- 95.9
Steigung der Verdichtungsgerade [-]	3.29	1.40	-	- 1.34
Marshall Versuch				
Hohlraumgehalt Vm[%]	1.7	3.4	4.5	3.5 3.4
Stabilität [kN]	10.0	10.3	14.2	14.5 9.5
Fliesen [mm]	4.7	5.2	3.0	3.1 5.1
Tangentialer Fließwert [mm]	2.9	3.4	1.6	2.2 3.6
Rückgewonnenes Bindemittel				
Penetration [10^{-1} mm]	44	37	38	42 49
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	48.4	57.9	58.2	57.8 54.0
Penetrationsindex	-1.9	-0.1	0.0	0.2 -0.3

Die Anforderungen für einen AC T 22 S gemäss SN EN 13108-1 (Bindemittelanteil ≥ 4.0 M-%, Hohlraumgehalt 4.0 ... 7.0 V-%) sind ohne Änderung der Korngrössenverteilung schwierig einzuhalten. Die Begleitkommission entschied das empfohlene Rezept mit 3.2 % Verjüngungsmittel und 3.8 % Bindemittelgehalt (entspricht etwa 4.0% dosiert) weiterzuverfolgen, da mit höherem Bindemittelgehalt der Hohlraumgehalt zu niedrig wird. Zudem wurde beschlossen, den Recyclinganteil von 80 auf 75% zu reduzieren, damit die Korngrössenverteilung besser eingehalten werden kann.

Tab. 14 Übersicht über die Prüfergebnisse des AC T 22 S

Anteil an RAP	M-%	75
RAP 11	M-%	22.8
RAP 22	M-%	52.2
Anteil natürlicher Mineralstoffe	M-%	25
Zugabebitumen		70/100
Bindemittelanteil bezüglich Mischgut	M-%	3.8
Dosierung Verjüngungsmittel bez. Gesamtbindemittelgehalt	M-%	3.95
Verdichtbarkeit mittels Gyrator		
nach 1 Zyklus (C1)	V-%	82.8
nach 80 Zyklen (C80)	V-%	95.9
Steigung der Verdichtungskurve		2.90
Marshall-Versuch		
Hohlraumgehalt	V-%	4.5
Stabilität	kN	14.2
Fliesen	mm	3.0
Tangentialer Fließwert [mm]	mm	1.6
Spurbildungstest		
Hohlraumgehalt	V-%	5.0
Spurrinnentiefe berechnet 10'000 Zyklen	%	5.7
Spurrinnentiefe gemessen 10'000 Zyklen	%	5.5
Spurrinnentiefe berechnet 30'000 Zyklen	%	7.1
Spurrinnentiefe gemessen 30'000 Zyklen	%	4.5
Steigung		0.204
Indirekte Zugprüfung (ITT)		
Prüftemperatur	°C	-10
Mittlerer Hohlraumgehalt	V-%	4.2
Hohlraumgehalt – min	V-%	4.0
Hohlraumgehalt – max	V-%	4.5
Mittlerer Steifigkeitsmodul	MPa	4.6
Steifigkeitsmodul – min	MPa	4.1
Steifigkeitsmodul – max	MPa	5.2
Wasserempfindlichkeit (22 °C)		
ITS nass	kPa	1'093
ITS trocken	kPa	1'182
Ratio ITSR		93
Rückgewonnenes Bindemittel		
Penetration	10 ⁻¹ mm	38
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	58.2
Penetrationsindex		0.0

Zusammenfassung

Die Verdichtbarkeit auf 4.1% Hohlraum nach 40 Umdrehungen mittels Gyrator entsprach den Erwartungen für einen Belag von 80 mm Dicke.

- Der Hohlraumgehalt Marshall von 4.5% entsprach den Anforderungen der Schweizer Norm.
- Die Schweizer Anforderungen an die Spurrinntiefe ($\leq 10\%$ bei 10'000 Zyklen) wurden erfüllt.
- Die Werte des indirekten Zugversuchs bei -10 °C waren genügend.
- Die Wasserempfindlichkeit mit ITSr 93% waren gut und innerhalb der Norm. Die indirekte Zugfestigkeit entsprach den üblichen Werten für diesen Belagstyp.
- Die Eigenschaften und das Verhalten des geprüften Mischgutes entsprachen den Erwartungen.
- Der ermittelte Bindemittelanteil war mit 3.8 M-% leicht tiefer als der vorgegebene Normwert von 4.0 M-% (dosiert). Dies hätte zu einer erhöhten Empfindlichkeit bei tiefen Temperaturen führen können, was jedoch beim indirekten Zugversuch bei -10 °C nicht festgestellt wurde. Mit der vorgegebenen Materialzusammensetzung und einem normkonformen Bindemittelanteil von 4.1% konnte der Hohlraumgehalt von 5.8% der Erstprüfung nicht erreicht werden. Deshalb war es notwendig den Bindemittelgehalt auf 3.8% zu reduzieren, um einen akzeptablen Hohlraumgehalt Marshall zu erreichen, andernfalls müsste die Korngrößenverteilung verändert werden. Der somit erzielte Hohlraumgehalt von 4.5% lag gut im Normbereich von 4.0 ... 7.0 % für einen AC T 22 S. Zudem wird in der Praxis oft mit einem leicht tieferen Bindemittelgehalt (löslicher Anteil) gearbeitet.

5.1.7 Probemischungen der Asphaltanlage

Da noch keine Mischrezepte vorhanden waren, wurden für die Recyclingmischungen in der Anlage der BAB Belag AG Birmensdorf verschiedene Probemischungen durchgeführt. Die Mischgutproben wurden danach durch das Baustofflabor Walo Bertschinger AG untersucht.

AC 11 S mit 60% Asphaltgranulat

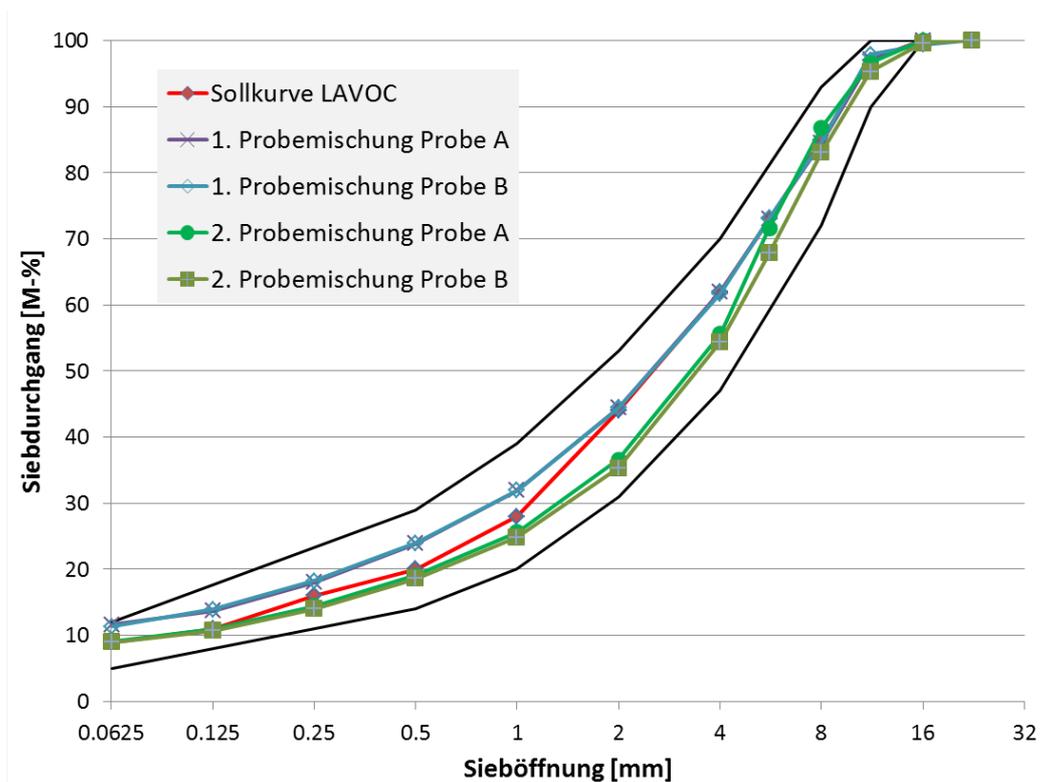


Abb. 24 Korngrößenverteilung der Deckschicht AC 11 S

Die erste Probemischung war etwas feiner als die vorgegebene Kurve der Korngrößenverteilung (Abb. 24). Der Hohlraumgehalt war dann auch mit Werten unter 2% dementsprechend tief. Für die 2. Probemischung wurde die Sieblinie angepasst, insbesondere im Bereich der Korngruppe 4/8 mm. Dadurch und durch die Reduktion des Bindemittelanteils um ein halbes Prozent wurde der Hohlraumgehalt 3.5 bis 4% in den unteren Normbereich verschoben. Damit wurde der Minimalwert des Bindemittelanteils knapp nicht erreicht. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der gemessene Bindemittelanteil immer etwas niedriger ist als der dosierte Bindemittelanteil. Dies entspricht der aktuellen Praxis und die Begleitkommission (BK) war mit den Resultaten der 2. Probemischung einverstanden.

Tab. 15 Probemischungen AC 11 S

		LAVOC	Sollwert [30], [32]	Probemischung 1		Probemischung 2	
				Probe A	Probe B	Probe A	Probe B
Bindemittelanteil	M-%	5.1	≥5.4 dosiert	5.69	5.64	5.11	4.95
Penetration	10 ⁻¹ mm	42		35			39
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	55.2		58.2			54.6
Penetrationsindex				-0.2			-0.7
Rohdichte	Mg/m ³			2.465	2.471	2.49	2.496
Raumdichte	Mg/m ³			2.428	2.424	2.404	2.395
Hohlraumgehalt	V-%	3.3	3 ... 6	1.5	1.9	3.5	4
Hohlraumfüllungsgrad VFB	V-%		(≤83)*	89.9	87.7	77.3	74.1
Marshall Stabilität	kN	12.9	(≥7.5)*	12.9	11.6	12	11.5
Marshall Fliesen	mm	2.8	(2 ... 4)*	2.8	4.2	2.5	2.6
Fließwert Ft	mm	1.6		1.6	2.8	1.2	1.1
Hohlraumg. Mineralstoffgerüst VMA	V-%			15.0	15.2	15.5	15.6

* Richtwert, nur für Belagstypen L und N massgebend

AC T 22 S mit 75% Asphaltgranulat

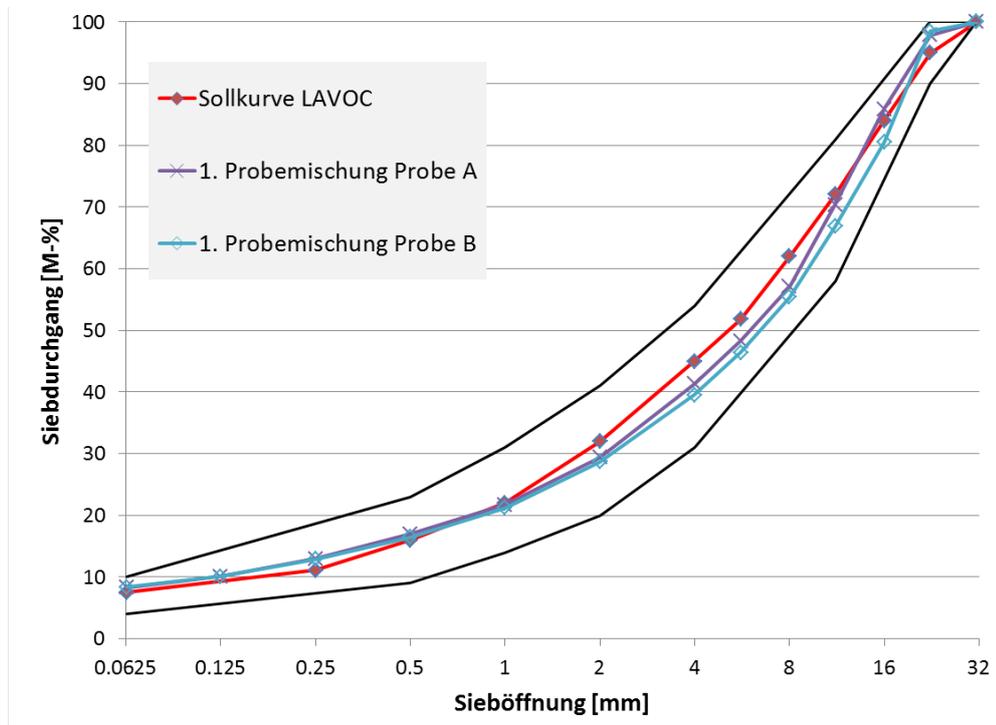


Abb. 25 Korngrößenverteilung der Tragschicht AC T 22 S

Die Korngrößenverteilung der Probemischungen des AC T 22 S stimmten gut mit der vorgegebenen Siebkurve des Lavoc überein. Der Bindemittelanteil lag mit 4.03 und 4.17 M-% an der unteren Grenze des Normbereichs. Der Hohlraumgehalt war mit 3.9 V-%

leicht zu tief. Die Begleitkommission (BK) war der Meinung, dass dies in der Endmischung noch korrigiert werden könnte und deshalb keine zweite Probemischung notwendig war.

Tab. 16 Probemischungen AC T 22 S

		LAVOC	Sollwert SN [30], [32]	Probemischung 1	
				Probe A	Probe B
Bindemittelanteil	M-%	3.8	≥4.0 dosiert	4.17	4.03
Penetration	10 ⁻¹ mm	38		48	
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C	58.2		53.0	
Penetrationsindex				-0.6	
Rohdichte	Mg/m ³			2.522	2.527
Raumdichte	Mg/m ³			2.424	2.428
Hohlraumgehalt	V-%	4.5	4 ... 7	3.9	3.9
Hohlraumfüllungsgrad VFB	V-%		(≤80)*	71.5	71.2
Marshall Stabilität	kN		(≥7.5)*	13.0	12.6
Marshall Fliesen	mm		(1.5 ... 3.5)*	2.2	2.5
Fließwert Ft	mm			1.0	1.0
Hohlraumg. Mineral- stoffgerüst VMA	V-%			13.8	13.4

* Richtwert, nur für Belagstypen L und N massgebend

5.2 Belagsaufbau

Die in Kapitel 2.1.4 erwähnten Zielgrößen der Versuchsobjekte konnten für den zweischichtigen Belag aufgrund der Einbauschwankungen und der sehr kurzen Einbaustrecke nicht vollständig eingehalten werden. Nachträgliche Untersuchungen haben für den AC 11 S eine Schichtdicke von 40 mm statt 35 mm und für den AC T 16 S eine Schichtdicke von 60 mm statt 45 mm ergeben (Abb. 26).

Beim einschichtigen Belag (AC T 22 S) konnten hingegen die vorgesehenen 80 mm Schichtstärken eingehalten werden (Abb. 26).

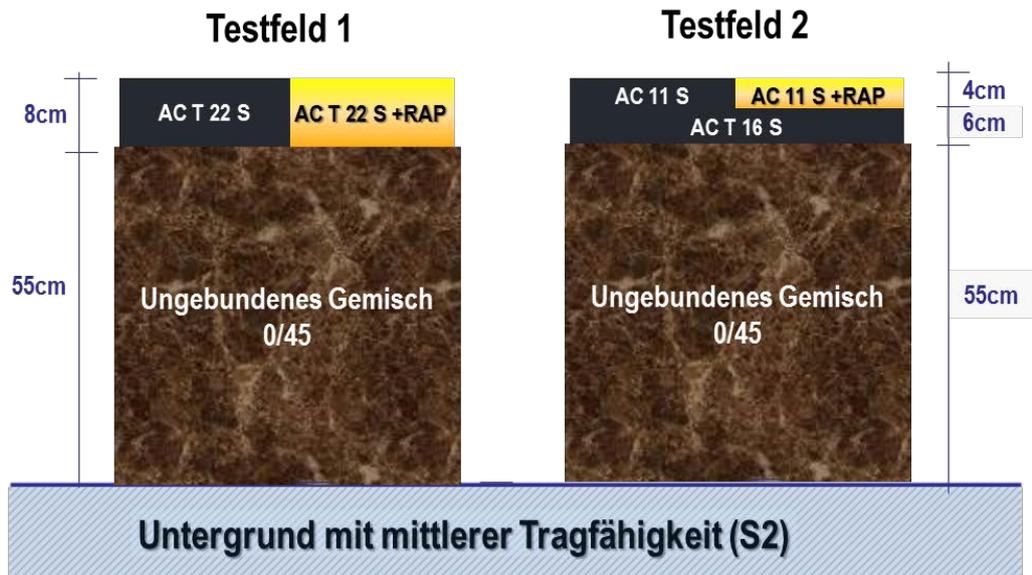


Abb. 26 Aufbau von Testfeld 1 und 2

5.3 Anzahl MLS10 Überrollungen

Die gewählte Überrollungszahl stützt sich auf die Resultate von vorgängigen Forschungsprojekten zur Ermittlung der Versagensgrenzen von Normbelägen [16]. Für die hier vorliegenden Beläge des Oberbautyps 1 und Verkehrsklasse T3 wurden wie in Kapitel 2.1.4 erwähnt pro Testfeld eine Belastung mit 500'000 Zyklen als ausreichend angenommen. Im Laufe der Messkampagne hat sich aber abgezeichnet, dass Testfeld 2 (zweischichtiger Belag) eine höhere Dauerfestigkeit aufweist als Testfeld 1 (einschichtiger Belag). Um genügend verlässliche Aussagen bezüglich der Schädigungswirkung und der zugrundeliegenden Mechanismen für beide Belagstypen machen zu können, wurde deshalb entschieden, Testfeld 2 mit 600'000 und Testfeld 1 mit 400'000 Zyklen zu belasten. Insgesamt wurden die vorgesehenen 1 Mio. Zyklen gefahren.

Die Belastungsdauer erstreckte sich über ca. 2 Monate von Anfang Oktober bis Ende November. Um alle Beläge unter ähnlichen klimatischen Bedingungen testen zu können und dadurch die Vergleichbarkeit der Resultate zu garantieren, wurde der MLS10 zweimal umplatziert. Zuerst wurde Testfeld 1 mit 250'000 Zyklen belastet, anschliessend Testfeld 2 mit 600'000 Zyklen, um schlussendlich die letzten 150'000 Zyklen wieder auf Testfeld 1 zu fahren. Die kumulierte Anzahl an Überrollungen ist in der nachfolgenden Abb. 27 ersichtlich.

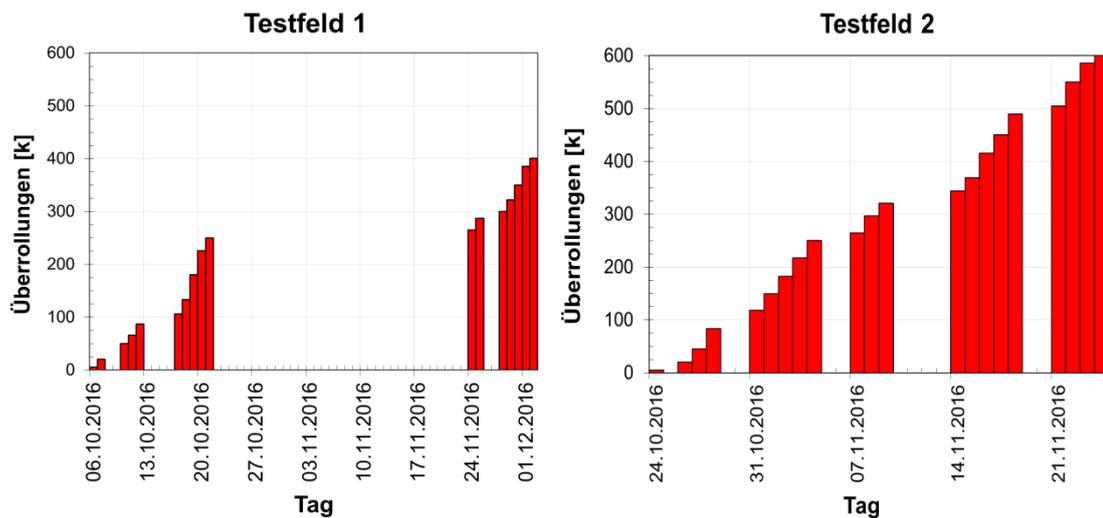


Abb. 27 Kumulierte Überrollungen auf Testfeld 1 und 2

5.4 Kontinuierliche Belagsmessungen

5.4.1 Temperaturverlauf

Wie bereits erwähnt hat die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf das Verhalten eines Belages. Für die Resultatinterpretation hebt dieser Umstand die Notwendigkeit einer angemessenen Temperaturüberwachung hervor. Entsprechend sind in Abb. 28 die gemessenen Temperaturen während des MLS10-Betriebes festgehalten. Auffallend sind die typischen Temperaturschwankungen zwischen Morgen und Abend.

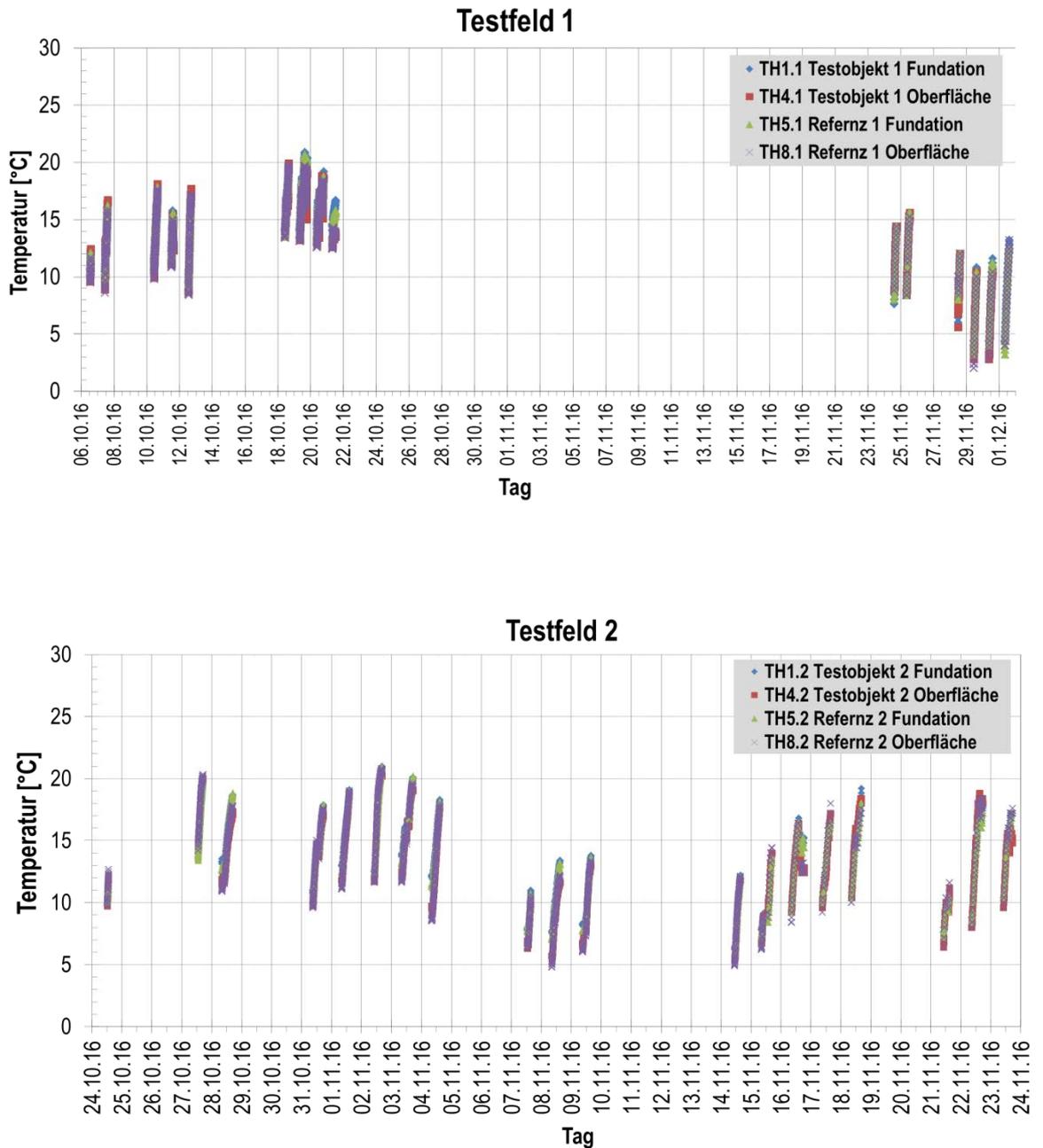


Abb. 28 Temperaturverlauf während der Betriebsphase. Oben, Resultate der Thermoelemente auf Testfeld 1, Unten, Resultate der Thermoelemente auf Testfeld 2

In Tab. 17 sind die gemittelten Temperaturen während der MLS10-Belastungen auf Testfeld 1 und 2 dargestellt.

Tab. 17 Mittlere und maximale bzw. minimale Temperaturen während des Betriebs

	Thermoelement	Mittlere Temp. [°C]	Max. Temp. [°C]	Min. Temp. [°C]
Testfeld 1 (einschichtig)	TH1.1 Versuchsobjekt Fundation	14.4	20.9	4
	TH4.1 Versuchsobjekt Oberfläche	14.2	19.9	2.8
	TH5.1 Referenz Fundation	14.1	20.7	3.2
	TH8.1 Referenz Oberfläche	13.7	19.8	2
	Mittelwert	14.1	20.3	3
Testfeld 2 (zweischichtig)	TH1.2 Versuchsobjekt Fundation	13.9	21	6.2
	TH4.2 Versuchsobjekt Oberfläche	13.4	20.4	5.4
	TH5.2 Referenz Fundation	13.6	20.9	5.8
	TH8.2 Referenz Oberfläche	13.5	20.8	4.8
	Mittelwert	13.6	20.8	5.6

Mit den durchgeführten Prüfungen, sollte das Verhalten der verschiedenen Beläge auf die Belastung mit dem MLS10 geprüft und ausgewertet werden. Zu niedrige oder zu hohe Temperaturen hätten die Analysen mit zusätzlichen Randbedingungen wie z.B. das Auftreten thermischer Spannungen oder einer Versprödung bzw. Erweichung des Materials erschwert. Daher wurde nur an Tagen mit gemässigten Temperaturen geprüft, so dass ein Temperaturbereich zwischen 2 °C und 21 °C erreicht wurde (Tab. 17). Massgebend für die Auswertungen waren vergleichbare Bedingungen zwischen den jeweiligen Referenzen und Versuchsobjekten zu erzielen. Diese Bedingung war die Entscheidungsgrundlage dafür, dass diese simultan geprüft wurden.

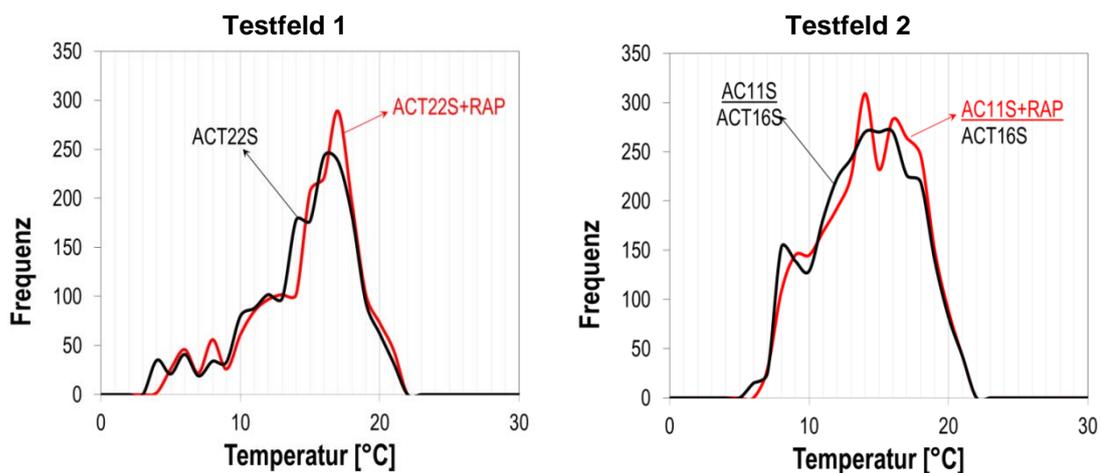


Abb. 29 Häufigkeitsverteilung der Temperatur auf der Fundation beider Testfelder

Abb. 29 zeigt die Histogramme der gemessenen Temperaturen auf der Fundation beider Testfeldern. Da von grösseren Störungen beeinflusst, wurde übersichtshalber die entsprechende Kurve der Oberflächentemperaturen ausgeblendet. Die häufigste registrierte Temperatur auf Testfeld 1 betrug 17 °C und auf Testfeld 2 14 °C.

5.4.2 Dynamische Belagsdehnungen

In Abb. 30 und Abb. 31 entspricht jede Markierung den gemittelten Differenzen der Dehnungsamplituden aus jeweils ca. 40 Überrollungen für eine bestimmte Temperatur (Kapitel 4.1.2). Die Datenerhebung erfolgte für die gesamte Betriebszeit des MLS10. Um einen temperaturunabhängigen Vergleich zwischen Referenz und Versuchsobjekt zu ermöglichen, wurden die Resultate für die am häufigsten auftretende Temperatur (ca. 14 °C für Testfeld 1 und ca. 17 °C für Testfeld 2) farblich hervorgehoben und linear interpoliert.

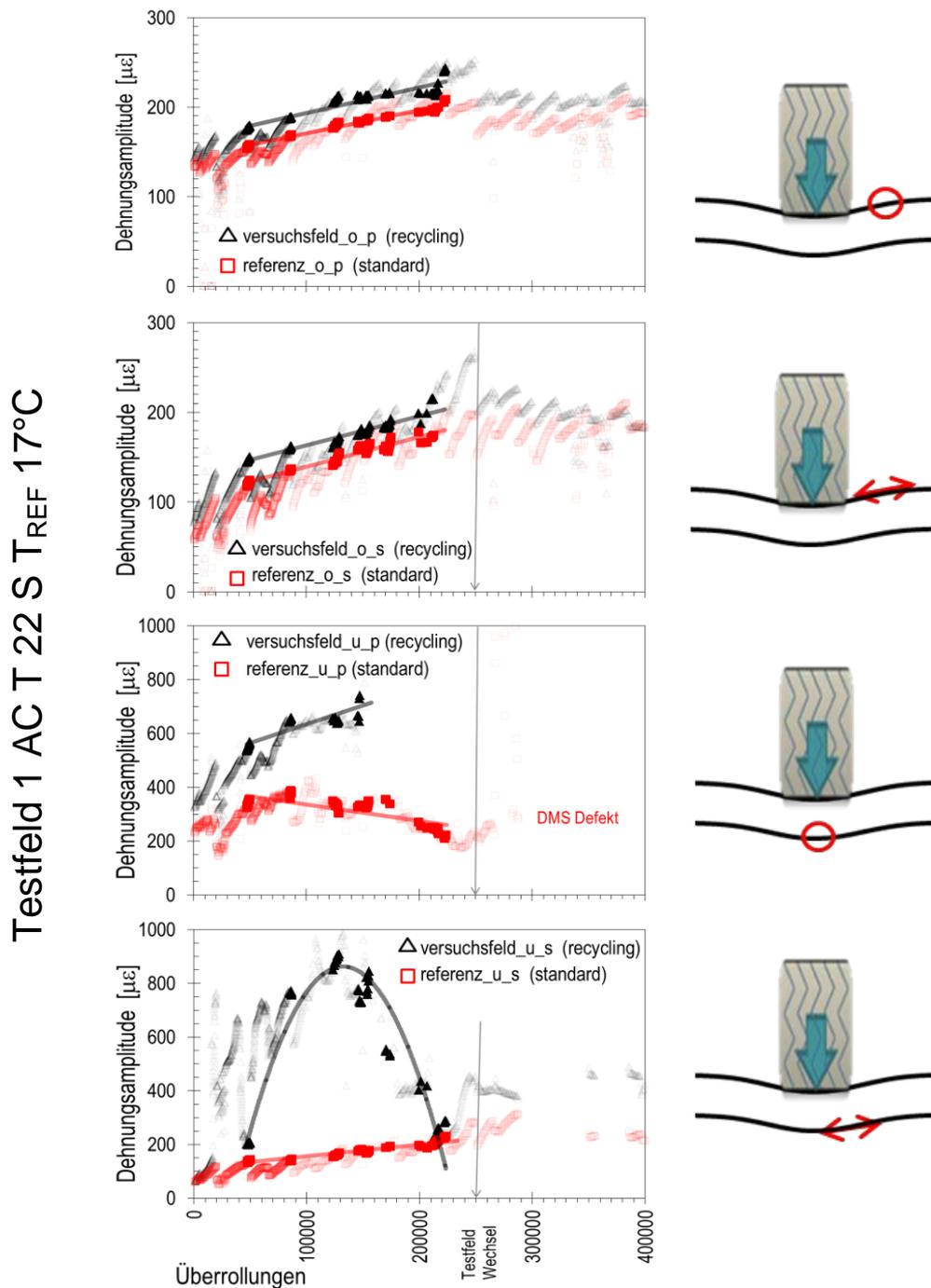


Abb. 30 Dehnungsamplituden in Abhängigkeit der Temperatur und Anzahl Überrollungen über die gesamte Belastungsdauer in Testfeld 1. Für die am häufigsten auftretende Temperatur 17 °C wurden die Resultate hervorgehoben und linear interpoliert.

Testfeld 2 AC T 16 / AC 11 S T_{REF} 14°C

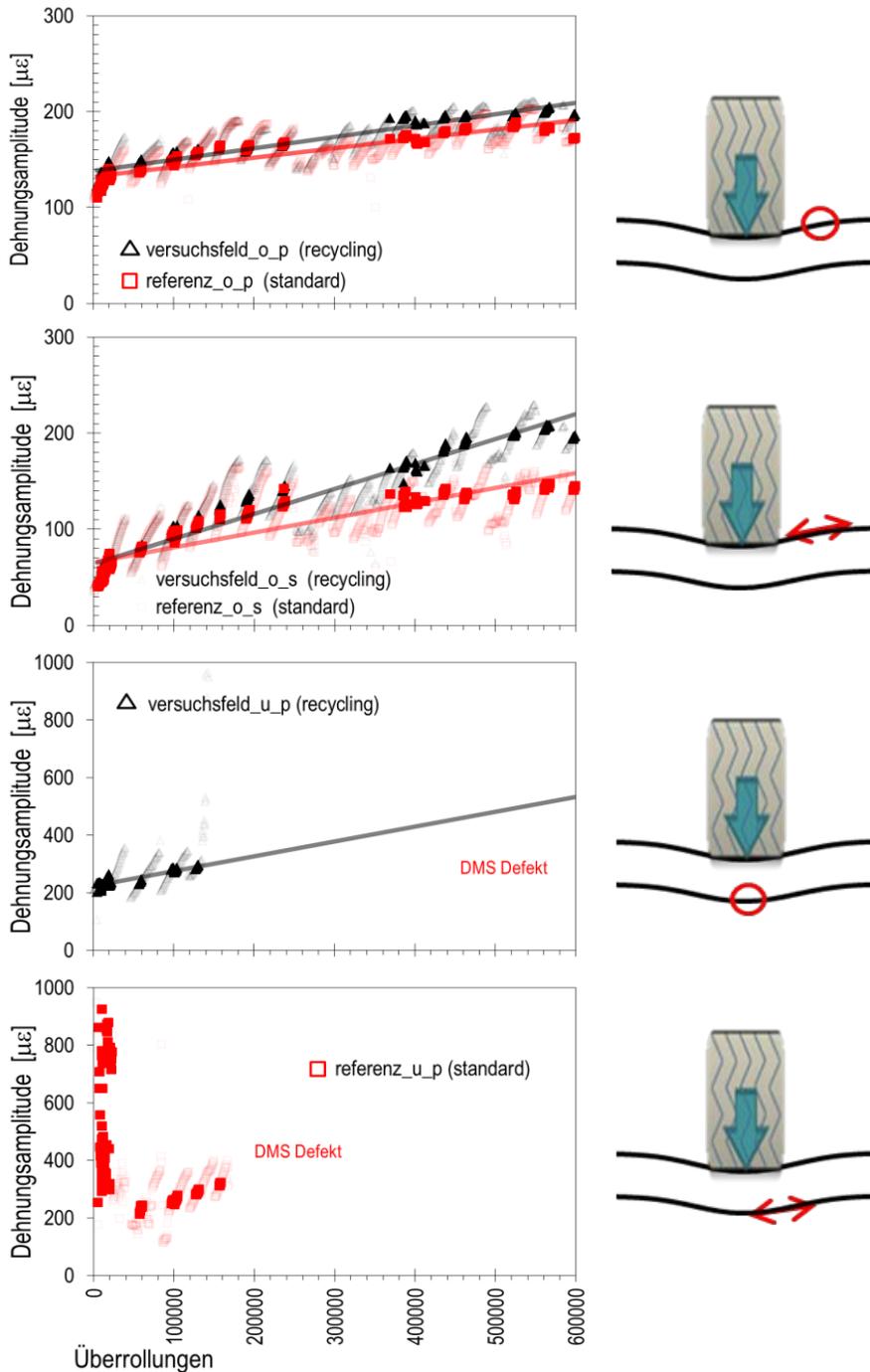


Abb. 31 Dehnungsamplituden in Abhängigkeit der Temperatur und Anzahl Überrollungen über die gesamte Belastungsdauer in Testfeld 2. Für die am häufigsten auftretende Temperatur 14 °C wurden die Resultate hervorgehoben und linear interpoliert.

Alle DMS-Sensoren auf der Fundation wurden beim Einbauprozess beschädigt. Die erhobene Datenmenge wurde für Analysen als unzureichend eingestuft und deswegen nicht weiter verfolgt. Aufgrund dieser hohen Ausfallquote wurde der Einbau von DMS-Sensoren für die hier verwendeten Belagsaufbauten als kritisch eingestuft.

Aus den Daten der Oberflächensensoren (Abb. 30 und Abb. 31) ist ersichtlich, dass mit steigender Temperatur alle Beläge höheren Dehnungsamplituden ausgesetzt wurden. Die linear interpolierten Dehnungen für 14 °C respektive 17 °C beim jeweiligen Versuchsobjekt und bei der jeweiligen Referenz zeigen, dass mit Fortschreiten der Stresszyklen bei beiden Testfelder

die Versuchsobjekte tendenziell mehr als die Referenzen verformt wurden. Um dieses Verhalten richtig interpretieren zu können, müssen die Resultate der Laboruntersuchungen mitbetrachtet werden (Kapitel 5.6.2). Im Gegensatz zu den oben genannten Feldversuchen haben indirekte Zugversuche an Bohrkernproben ähnliche Elastizitätsmodule zwischen Referenz- und Versuchsmaterial ergeben. Als Grund dieses Widerspruches wird vermutet, dass die zu den Laboruntersuchungen vergleichsweise höheren MLS10-Lasten die Versuchsobjekte im nicht linear elastischen Bereich belastet haben. Aus dieser Annahme kann gefolgert werden, dass, obwohl sich das RAP-Material elastisch wenig vom Referenzmaterial unterscheidet, dessen Verformbarkeit und Ermüdungswiderstand niedriger sein muss. Ein Indiz welche diese Annahme bestärkt, ist die im Vergleich zu den entsprechenden Referenzen höhere Rissneigung der Versuchsobjekte (Kapitel 5.5.2).

5.4.3 Dynamische Beschleunigungsmessungen

In Abb. 32 entspricht jede Markierung den gemittelten Differenzen der Beschleunigungsamplituden aus jeweils ca. 40 Überrollungen für eine bestimmte Temperatur (Kapitel 4.1.3). Die Datenerhebung erfolgte für die gesamte Betriebszeit des MLS10. Um einen temperaturunabhängigen Vergleich zwischen Referenz und Versuchsobjekt zu ermöglichen, wurden die Resultate für die am häufigsten auftretende Temperatur (14 °C für Testfeld 1 und 17 °C für Testfeld 2) farblich hervorgehoben und linear interpoliert.

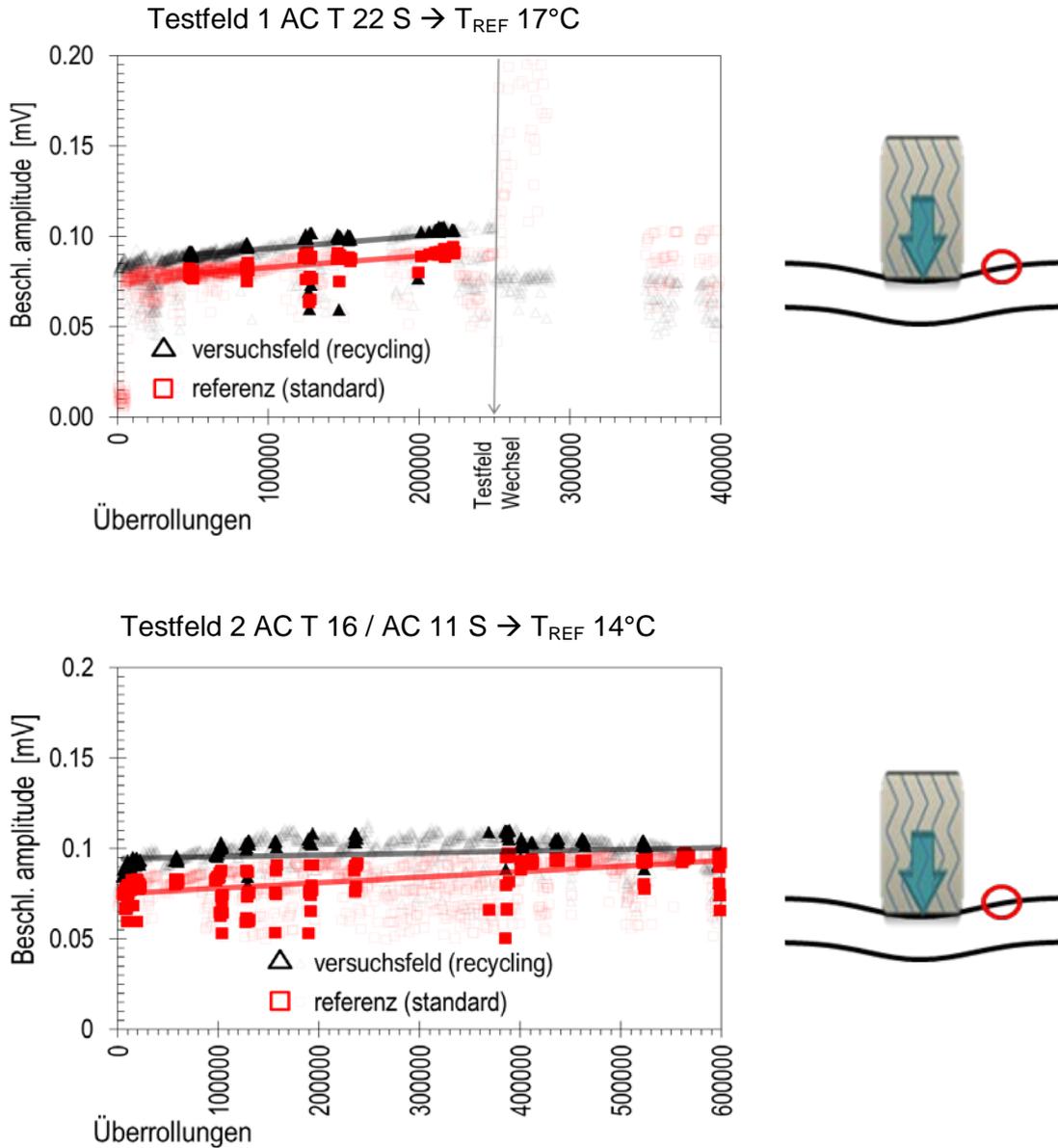


Abb. 32 Beschleunigungsamplituden in Abhängigkeit der Temperatur und Anzahl Überrollungen über die gesamte Belastungsdauer. Oben, in Testfeld 1 mit linearer Interpolation der Resultate bei 14 °C. Unten, in Testfeld 2 mit linearer Interpolation der Resultate bei 17 °C

Die ermittelten Deflektionen stehen im Einklang mit den beobachteten Dehnverhalten beider Testfelder. Auch in diesem Fall weisen die Versuchsobjekte über das gesamte Belastungsintervall höhere Werte auf als ihre entsprechenden Referenzen. Die tiefere Deflektionsmulde, welche beim Radübergang entstand, kann auch hier einer Materialbelastung im nicht linear elastischen Bereich zugeschrieben werden. Zum besseren Verständnis dieses Verhaltens ist in Abb. 33 eine vereinfachte und idealisierte Spannungsdehnung-Kurve dargestellt. Obwohl nicht mit der Realität konform, veranschaulicht diese Darstellung auf prägnante Weise, wie bei höheren Lasten die untersuchten Materialien trotz ähnlichem Elastizitätsmodul unterschiedliche Dehnungen aufweisen können. Unter den MLS10-Lasten erfährt der Belag kombinierte Spannungszustände (Zug, Druck, Biegung), welchen in Abb. 33 nicht Rechnung getragen wurde. Diese Abbildung soll wie erwähnt, lediglich das in Kapitel 5.4.2 und 5.4.3 beobachtete Materialverhalten qualitativ veranschaulichen.

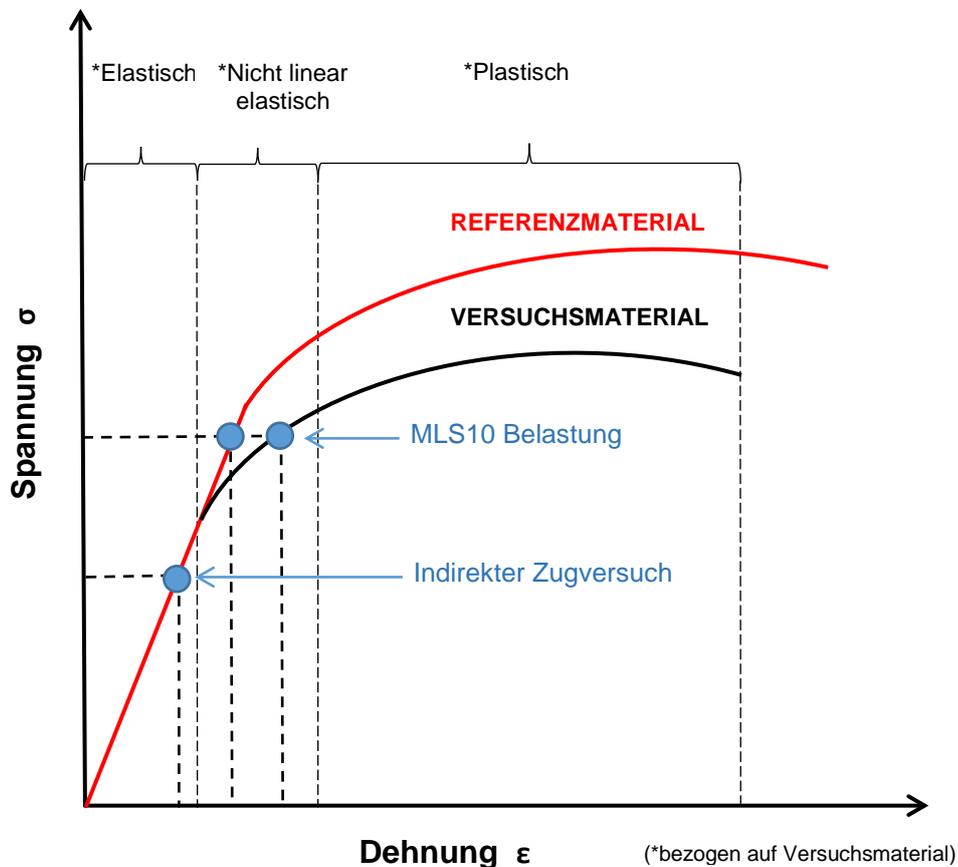


Abb. 33 Idealisierte und vereinfachte Spannungsdehnungskurven des Referenz- (rot) und Versuchsmaterials (schwarz). Im Diagramm sind qualitativ die Belastungsniveaus der indirekten Zugversuche im Labor und der MLS10-Belastungen auf dem Testfeld hervorgehoben. Die Grafik soll nur das beobachtete Materialverhalten veranschaulichen und kann nicht den realen Gegebenheiten zugeordnet werden.

5.5 Periodischen Messungen

5.5.1 Tragfähigkeit Planie

Die Anforderungen an die Verdichtung und Tragfähigkeit einer Planie im Strassenbau sind in der Schweizer Norm SN 640 585b [32] festgelegt. Als Indikator für die Verformbarkeit des Bodens kann u.a. das Verformungsmodul M_{E1} herangezogen werden. Für leichte bis extrem schwere Verkehrsklassen T2...T6, wie sie im vorliegenden Projekt angenommen werden, liegt der zulässige M_{E1} -Wert für ein ungebundenes Gemisch bei $>100 \text{ MN/m}^2$. Die Ergebnisse der M_E -Messungen für den Kieskoffer des Testgeländes Lenzburg, welche im Anhang II festgehalten sind, weisen einen Durchschnitt von 138 MN/m^2 über 2 Messungen auf.

5.5.2 Risse

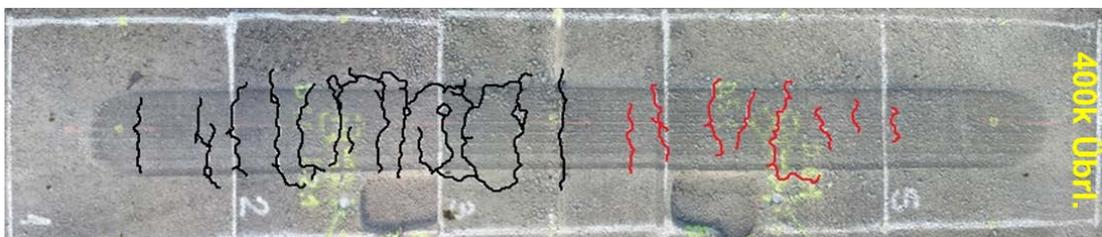
Die Rissbildung wurde in beiden Testfeldern visuell festgehalten.

Abb. 34 gibt einen Überblick über die Risse am Ende der Belastungszyklen. Die Ermittlung von Rissen mit Breiten unter 1mm konnte nur dank dessen höheren Feuchtigkeitsrückhaltung ermöglicht werden. Die Schwächung links und rechts der Längsnaht hat sich auf einen Bereich von je 50 cm beschränkt. Da in diesem Bereich die Risse nicht aussagekräftig sind, wurden sie ausser Acht gelassen. Im Anhang III sind Bilder der periodischen visuellen Oberflächeninspektionen nach einer bestimmten Anzahl Überrollungen hinterlegt.

Testfeld 1

Versuchsobjekt 1
(AC T 22S + RAP)

Referenz 1
(AC T 22 S)



Testfeld 2

Versuchsobjekt 2
(AC T 16S/ AC 11 S + RAP)

Referenz 2
(AC T 16S/ AC 11 S)

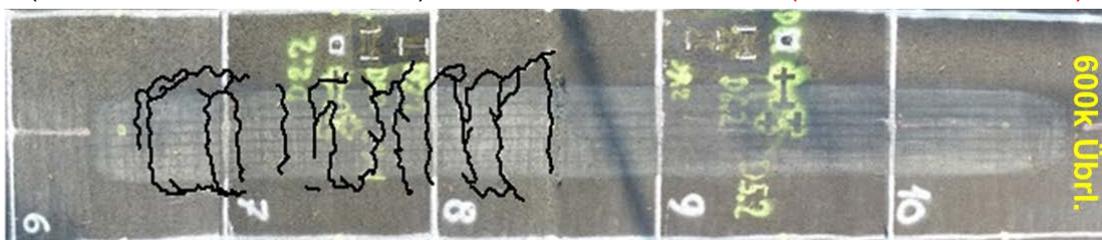


Abb. 34 Ansicht der Oberfläche mit hervorgehobenen Rissen am Ende der Tests, Oben, Testfeld 1, Unten, Testfeld 2

Um die Rissneigung der belasteten Felder quantifizieren und besser vergleichen zu können, wurden in periodischen Überrollungszuständen die Längen aller sichtbaren Risse aufsummiert und in der folgenden Grafik dargestellt (Abb. 35).

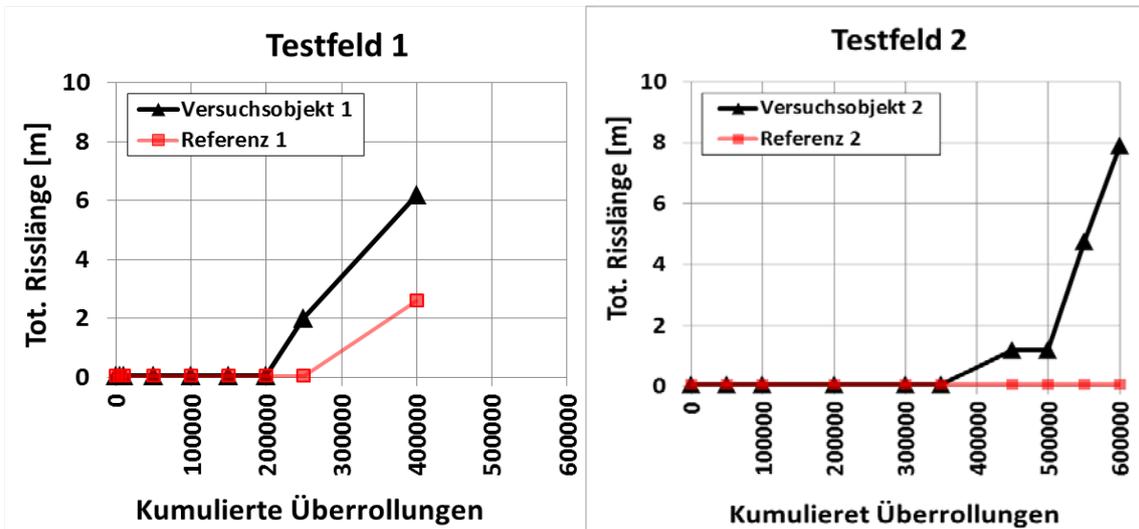


Abb. 35 Summe der Längen aller sichtbaren Risse bei bestimmten Überrollungszuständen (Rissevolution) in Testfeld 1 und 2

Während im Versuchsobjekt von Testfeld 1 Risse schon ab 250'000 Überrollungen sichtbar wurden, erschienen diese in der zugehörigen Referenz erst nach 400'000 Zyklen. Die ersten Risse im Versuchsobjekt von Testfeld 2 wurden nach 400'000 Zyklen sichtbar. In der Referenz desselben Testfeldes blieben sie hingegen bis ans Ende der Prüfung aus. Aus diesen Beobachtungen kann gefolgert werden, dass die Rissbildung beim ein- und zweischichtigen Belag im Versuchsobjekt tendenziell höher ist. Des Weiteren zeigte der zweischichtige Belag insgesamt eine höhere Dauerfestigkeit als der Einschichtige.

5.5.3 Spurrinnenentwicklung

In Abb. 36 und Abb. 37 sind die Spurrinnenentwicklungen für Testfeld 1 und 2 dargestellt.

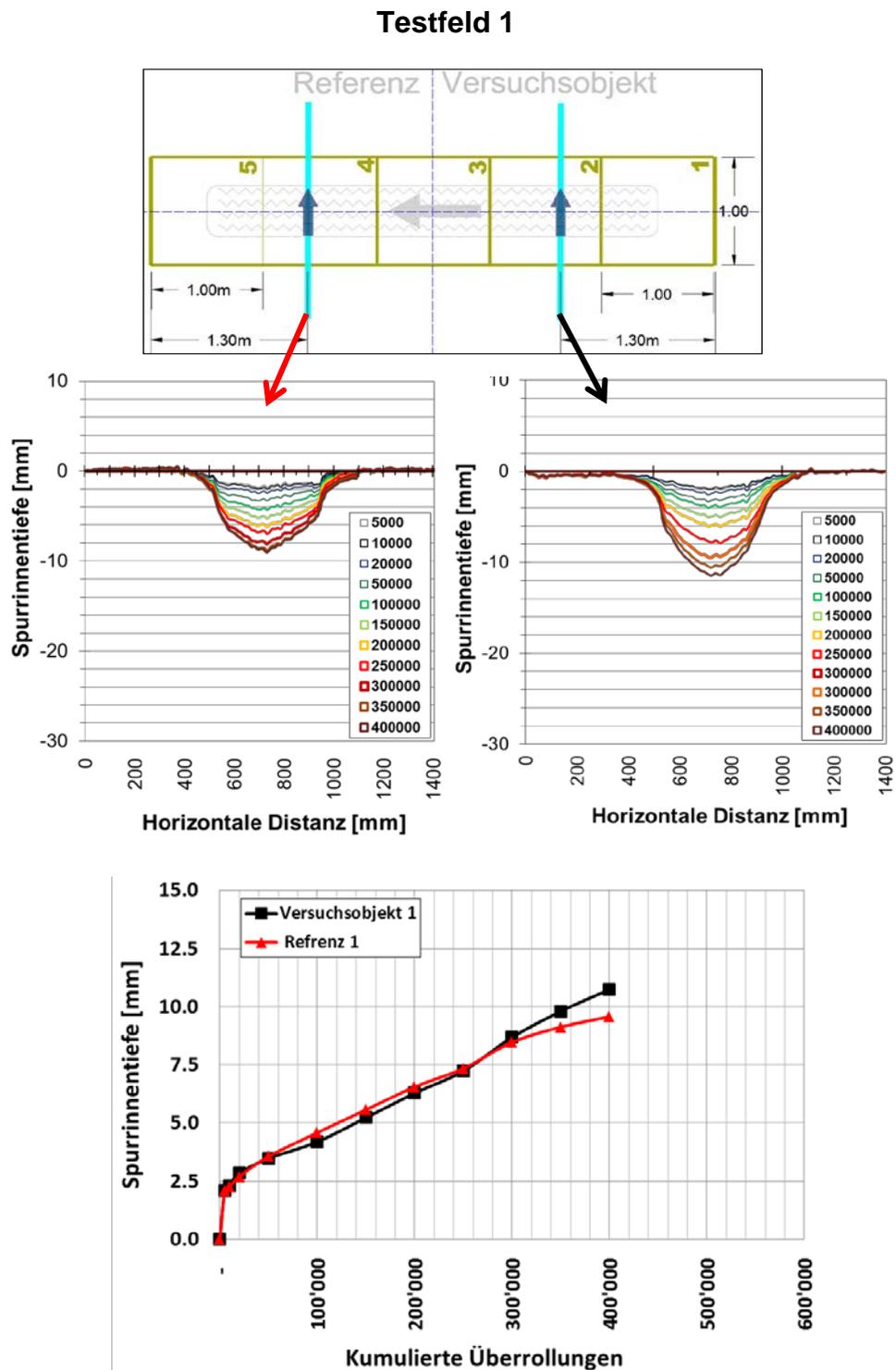


Abb. 36 Spurrinnenentwicklung Testfeld 1. Oben, Messpositionen, Mitte, gemessene Spurrinnentiefen; Unten, gemittelte Spurrinnentiefen des Versuchsobjekt und der Referenz

Testfeld 2

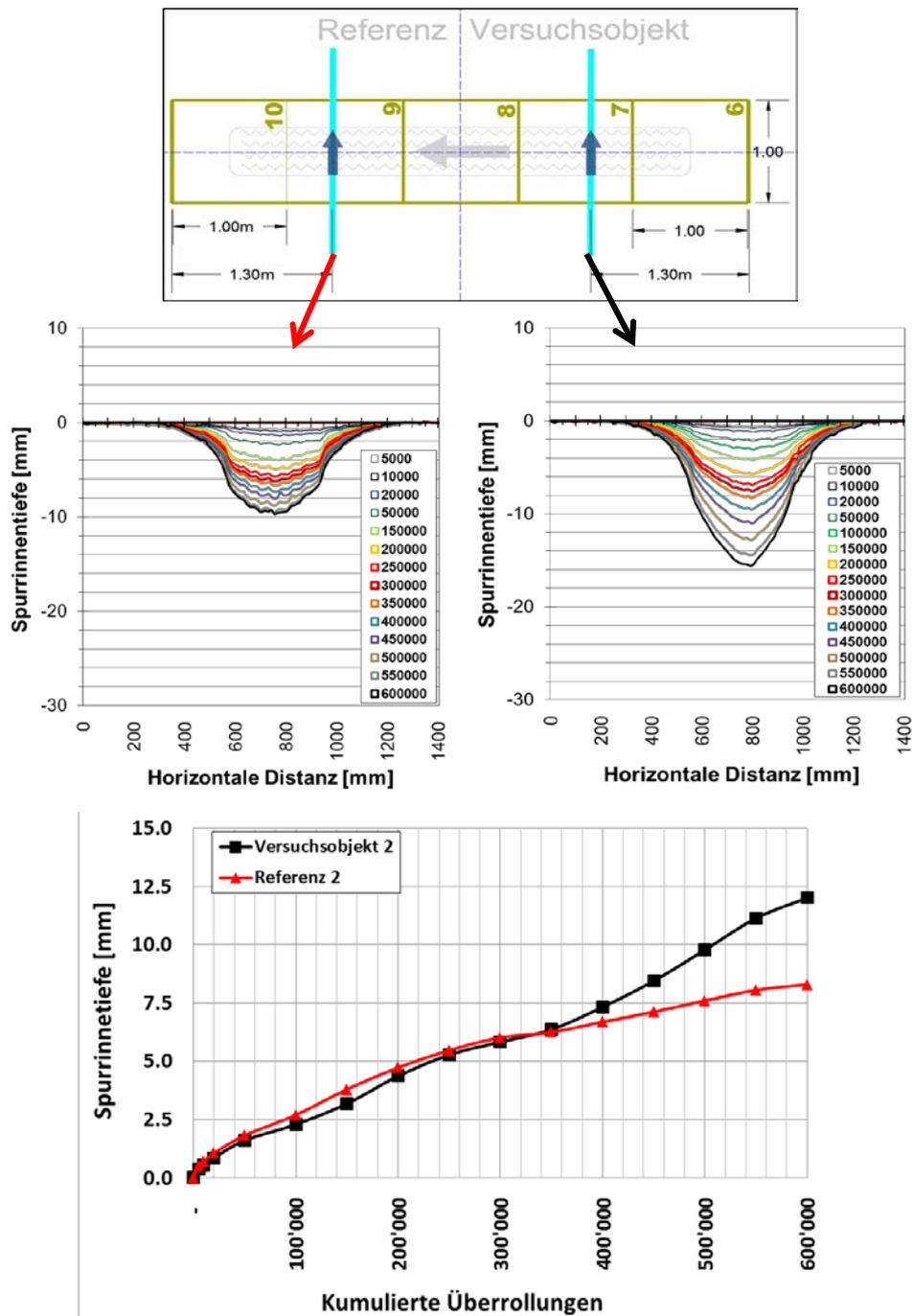


Abb. 37 Spurrinnenentwicklung Testfeld 2. Oben, Messpositionen, Mitte, gemessene Spurrinntiefen, Unten, gemittelte Spurrinntiefen des Versuchsobjekt und der Referenz

Am Ende der Prüfungen belaufen sich die mittleren Spurrinntiefen auf Testfeld 1 in der Referenz auf 9.6 mm und im Versuchsobjekt auf 10.7 mm. Auf Testfeld 2 bildete sich in der Referenz eine mittlere Spurrinne von 8.3 mm und im Versuchsobjekt eine von 12 mm Tiefe. Bis 200'000 Überrollungen auf Testfeld 1, respektive 350'000 Überrollungen auf Testfeld 2, wurde eine ähnliche Spurrinnenentwicklung zwischen Versuchsobjekt und Referenz gemessen. Ab den genannten Werten wurde eine höhere Spurrinnenentwicklung in den Versuchsobjekten beider Beläge beobachtet. Dieses Verhalten wurde der Rissentwicklung gegenübergestellt. Das Resultat dieses Vergleiches

ergab, dass die verstärkte Spurrinnenentwicklung mit den ersten Risserscheinungen in den Versuchsobjekten zusammenfällt. Dieser Zusammenhang ist im nachfolgenden Kapitel näher erläutert.

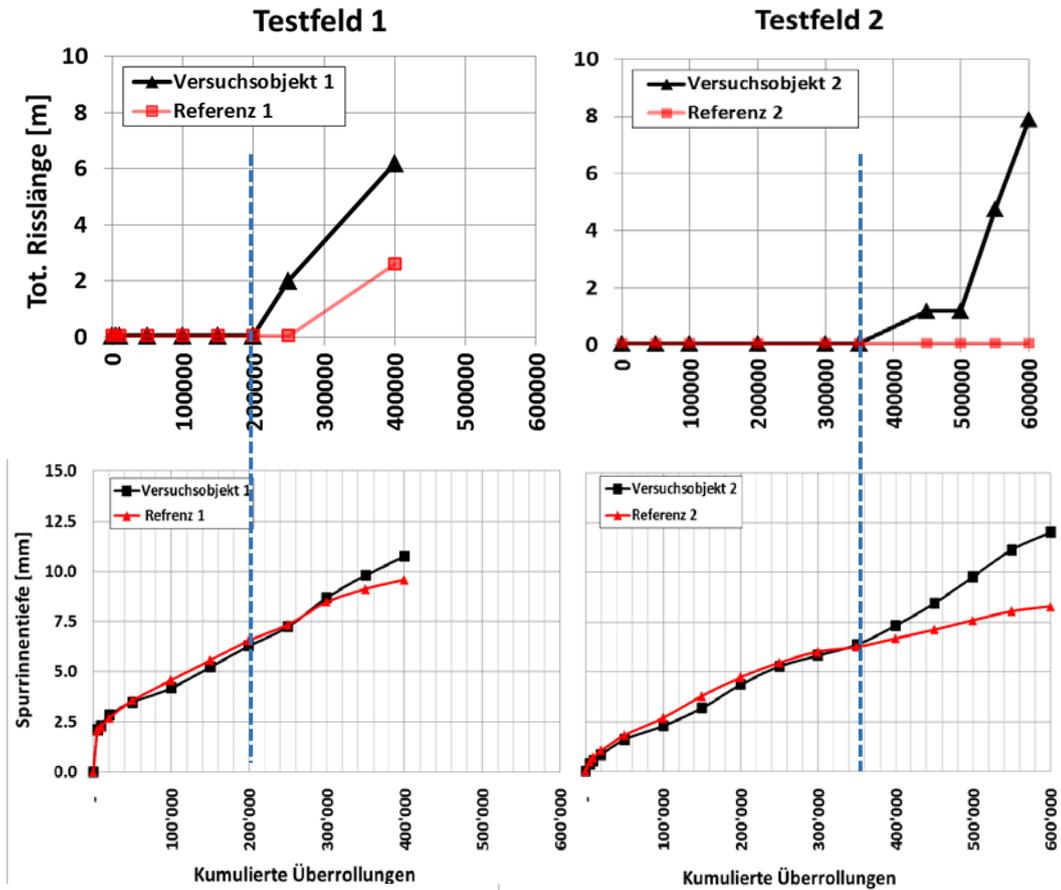


Abb. 38 Gegenüberstellung der Riss- und Spurrinnenentwicklung in Testfeld 1 und 2

5.5.4 Pumping-Effekt

Der Zusammenhang zwischen Riss- und Spurrinnenentwicklung kann mit dem sogenannten Pumping-Effekt erklärt werden. Dabei dringt durch die Belagsrisse Wasser bis zur Fundation ein, wo die Feinanteile herausgelöst werden. Das dadurch entstandene dickflüssige Gemisch wird von den zyklischen MLS10 Lasten an die Oberfläche getrieben. Die entstandenen Hohlräume in der Fundation verursachen eine lokale Schwächung und dadurch eine Einsenkung des Belages, welche als Spurrinne wahrgenommen wird. Dieser Stabilitätsverlust verstärkt die Wechselwirkung zwischen Riss- und Spurrinnenentwicklung zunehmend, was im Endeffekt zum beschleunigten Versagen der Struktur führt (Abb. 39).



Abb. 39 Von Pumping-Effekt ausgeschwemmte Fundation im Bereich der Spurrinnen

5.5.5 Untersuchung der Bodenverdichtung mit dem Leichten Fallgewicht

In Tab. 18 und Tab. 19 sind die Ergebnisse der LFG-Messungen in- und ausserhalb der Fahrspuren von Testfeld 1 und 2 festgehalten. Tab. 20 zeigt die Resultate der Messungen ausserhalb des asphaltierten Geländebereiches.

Tab. 18 Resultate der LFG-Messungen auf Testfeld 1

	Referenz				Versuchsobjekt			
	Nr	Sm [mm]	Evd [MN/m ²]	Mittelw. Evd [MN/m ²]	Nr	Sm [mm]	Evd [MN/m ²]	Mittelw. Evd [MN/m ²]
Unbelastet	1	0.173	130.06	139.98	1	0.194	115.98	134.182
	2	0.176	127.84		2	0.185	121.62	
	3	0.149	151.01		3	0.172	130.81	
	4	0.149	151.01		4	0.155	145.16	
	5			5	0.143	157.34		
Belastet	1	0.292	77.05	74.98	1	0.224	100.45	90.48
	2	0.313	71.88		2	0.3	75	
	3	0.296	76.01		3	0.248	90.73	
	4			4	0.235	95.74		

Tab. 19 Resultate der LFG-Messungen auf Testfeld 2

	Referenz				Versuchsobjekt			
	Nr	Sm [mm]	Evd [MN/m ²]	Mittelw. Evd [MN/m ²]	Nr	Sm [mm]	Evd [MN/m ²]	Mittelw. Evd [MN/m ²]
Unbelastet	1	0.233	96.98	93.59	1	0.243	92.59	125.77
	2	0.227	99.12		2	0.167	134.73	
	3	0.321	70.09		3	0.15	150	
	4	0.208	108.17					
Belastet	1	0.32	70.31	83.07	1	0.317	70.98	75.31
	2	0.268	83.96		2	0.278	80.94	
	3	0.237	94.94		3	0.304	74.01	

Tab. 20 Resultate der LFG-Messungen ausserhalb des asphaltierten Bereiches (Aussenbereich)

Nr	Sm [mm]	Evd [MN/m ²]	Mittelw. Evd [MN/m ²]
1	0.252	89.29	100.98
2	0.22	102.27	
3	0.202	111.39	

In Abb. 40 sind die LFG-Resultate von Tab. 18, Tab. 19 und Tab. 20 grafisch zusammengefasst.

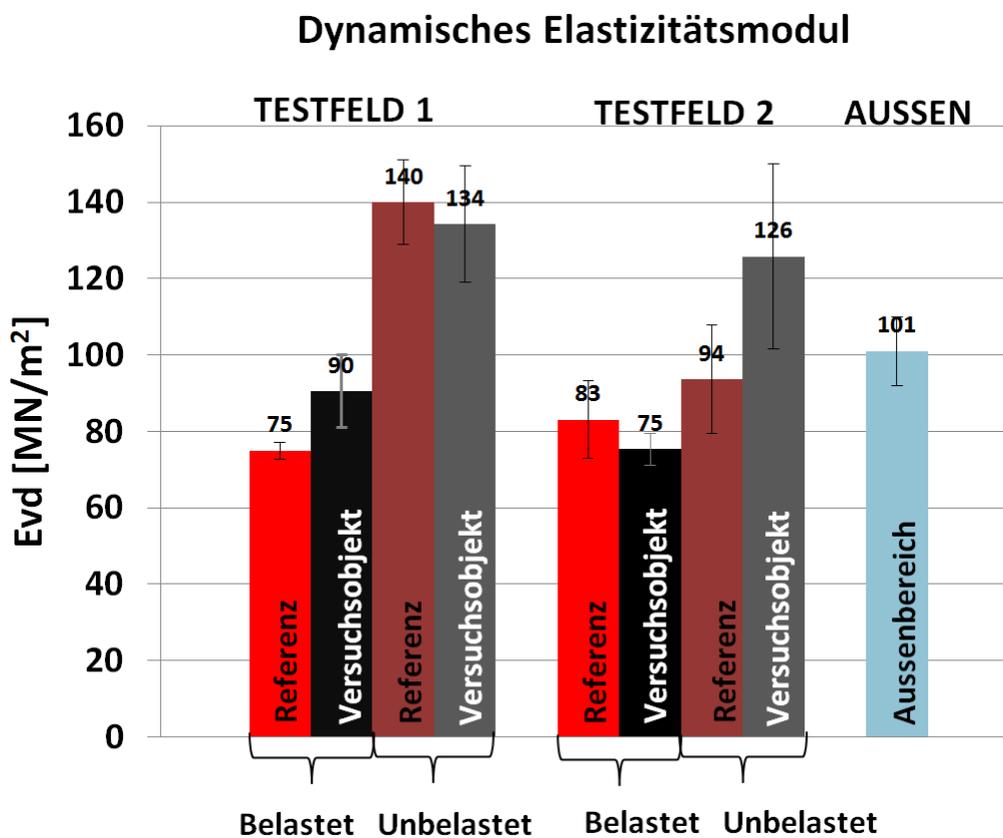


Abb. 40 Dynamisches Elastizitätsmodul aus den LFG-Messungen in den befahrenen und unbefahrenen Versuchsobjekten und Referenzen von Testfeld 1 und 2

Die Messungen mit dem leichten Fallgewicht haben entgegen den Erwartungen einen tendenziell höheren Elastizitätsmodul im unbelasteten Bereich beider Testfelder ergeben. Dieses unerwartete Ergebnis kann mit Pumping-Effekt (Kapitel 5.5.4) erklärt werden, welcher von den Rissen im belasteten Bereich ermöglicht wurde. Weil durch dieses Phänomen die herausgelösten Feinanteile der ungebundenen Fundationsschicht an die Oberfläche befördert wurden, entstand ein lokaler Materialschwund im betroffenen Bereich, welches vom umliegenden Material kompensiert wurde. Dadurch entstand eine „Auflockerung“ der Fundation, welche in der gemessenen Reduktion der Tragfähigkeit ersichtlich wurde. Bestärkt wird dieser Befund von den LFG-Messungen ausserhalb des Testgeländes. Diese zeigen einen Mittelwert, welcher sich zwischen jenen des belasteten und unbelasteten Prüfgeländegebietes befindet. Wie erwartet weist dieses Resultat darauf hin, dass bei dem Belagseinbau die Fundation verdichtet wurde (Abb. 41).



Abb. 41 Bohrkernaussparung mit hervorgehobenen Bottom-Up-Rissen im belasteten Bereich von Testfeld 1. Im Bild ist der durch den Pumping-Effek verursachte Transport der herausgelösten Feinanteile aus Fundationsschicht zur Oberfläche ersichtlich

5.5.6 Falling Weight Deflectometer (FWD)

Wie bereits in Kapitel 4.4 erwähnt, wurden bei diesem Projekt insgesamt 80 Lastapplikationen mit einem FWD gemessen und ausgewertet. Die Tragfähigkeit des Belages wurde anhand der damit erfassten Deflektionen abgeleitet. Die nachfolgende Graphik (Abb. 42) veranschaulicht farblich die Messresultate beider Testfelder vor der Erstbelastung mit dem MLS10. Violett gefärbte Bereiche entsprechen Regionen hoher und türkis gefärbte Bereiche tiefer Deflektionen.

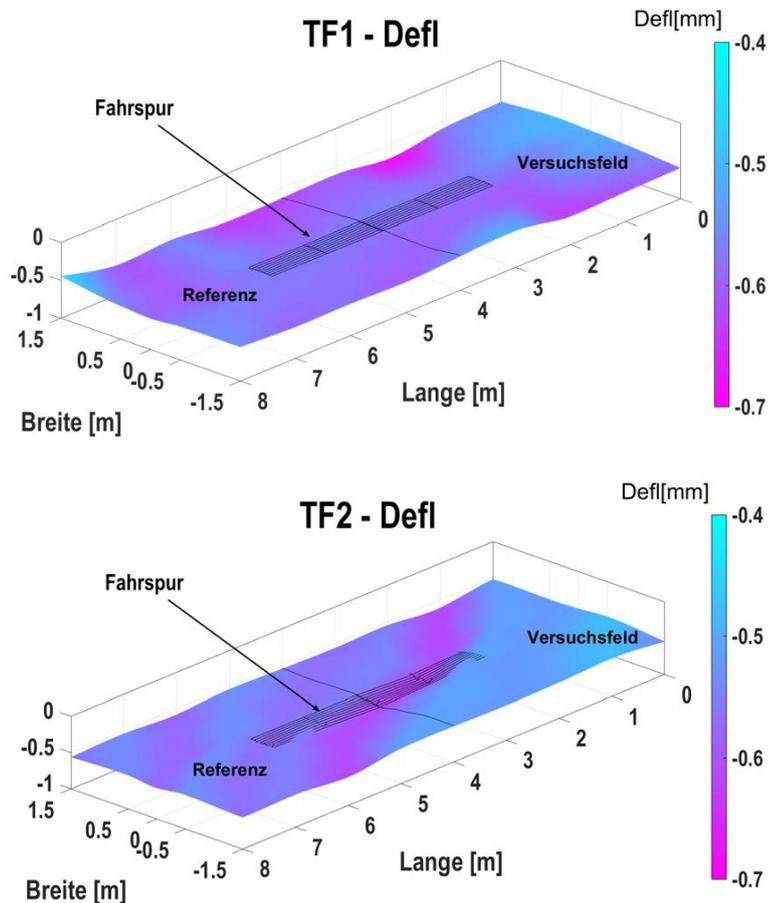


Abb. 42 Graphische Darstellung der gemessenen Deflektionen mit dem FWD an 40 Messpunkten in den Testfeldern 1 und 2. Oben, Resultate von Testfeld 1, Unten, Resultate von Testfeld 2.

Die Rückrechnungen der strukturellen E-Module aus den Deflektionen waren aus softwaretechnischen Gründen nicht in allen Messbereichen der Testfelder erfolgreich. Um trotz dieses Umstandes Aussagen über die Tragfähigkeit machen zu können, wurden statt der E-Module die Amplituden der gemessenen Deflektionen verwendet. Diese veranschaulichten eine homogene Dichteverteilung über die gesamte Struktur beider Testfelder. Dies lässt auf eine gute Einbauqualität der Asphaltsschichten schliessen. Das zweischichtige Testfeld 2 zeigte wie erwartet eine leicht höhere Tragfähigkeit als das einschichtige Testfeld 1. Dies hat sich insbesondere bei der Rissevaluation bestätigt (Kapitel 5.5.2).

5.6 Laboruntersuchungen an Bohrkerne

Um die Eigenschaften des verwendeten Materials sowie dessen Schädigung durch die MLS10-Lasten erfassen zu können, wurden nach der Messkampagne Bohrkerne entnommen. Wie in Abb.16 und Abb. 17 (Kapitel 4.3) dargestellt, wurden Proben der Durchmesser 100 mm und 150 mm aus den belasteten und unbelasteten Bereichen von Testfeld 1 und 2 entnommen. Diese wurden für folgende Untersuchungen verwendet:

- Kennwertbestimmung der Bohrproben (Kapitel 5.6.1)
- Modulbestimmung mit Spaltzugversuch (Kapitel 5.6.2)
- Schichthaftung nach Leutner (Kapitel 5.6.3)

5.6.1 Kennwertbestimmung der Bohrproben

Zur Bestimmung der Materialeigenschaften der Beläge aus Testfeld 1 und 2 wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Löslicher Bindemittelanteil SN EN 12697-1 [38]
- Rohdichte Mischgut SN EN 12697-5 [39]
- Bestimmen der Raumdichte und Berechnen des Hohlraumgehalts SN EN 12697-6 [37],
- Nadelpenetration SN EN 1426 [53]
- Erweichungspunkt Ring- und Kugel-Verfahren SN EN 1427 [55]

Die Ergebnisse der oben genannten Analysen sind in Tab. 21 und Tab. 22 zusammengefasst.

Tab. 21 Kennwerte der Bohrkerne aus Testfeld 1

Prüfung	AC T 22S		
	Referenz	Versuchsobjekt	Sollwert SN [30], [32]
Schichtdicke [mm]	83.5	81.6	80.0
Rohdichte [Mg/m ³]	2.520	2.525	-
Raumdichte [Mg/m ³]	2.391	2.410	-
Hohlraumgehalt [V-%]	5.1	4.4	2.5...6.5
Verdichtungsgrad [V-%]	100.2	98.9	>99%
Bindemittelanteil [M-%]	3.6%	4%	>4,0
Penetration [10 ⁻¹ mm]	31	29	-
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	64	64	-

Tab. 22 Kennwerte der Bohrkerne aus Testfeld 2

Prüfung	AC 11 S			AC T 16S		
	Referenz	Versuchs- objekt	Sollwert SN [30], [32]	Referenz	Versuchs- objekt	Sollwert SN [30], [32]
Schichtdicke [mm]	42.8	40.3	40	60.5	60.5	60
Rohdichte [Mg/m ³]	2.467	2.483	-	2.498	2.491	-
Raumdicke [Mg/m ³]	2.335	2.317	-	2.295	2.333	-
Hohlraumgehalt [V-%]	5.4	5.8	2,5...6,0	8.1	6.4	2,5...6,0
Verdichtungsgrad [V-%]	97.9	96.9	>98%	96.5	98.1	>98%
Bindemittelanteil [M-%]	5.4	5.2	> 5,4	4.7	4.6	>4,4
Penetration [10 ⁻¹ mm]	36	27	-	30	29	-
Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	62 °C	63	-	70	69	-

5.6.2 Modulbestimmung im Spaltzugversuch

Mittels indirekter Zugversuchsprüfung wurden gemäss EN 12697-26 [41] aus den Bohrkernproben von Testfeld 1 und 2 die Masterkurven bestimmt. Pro Belagsorte wurden dafür je drei Prüfkörper bei 20 °C geprüft. Um die Schädigungswirkung der MLS10-Belastung vergleichen zu können, wurde neben dem belasteten auch der unbelastete Bereich untersucht (Abb. 43 und Abb. 44).

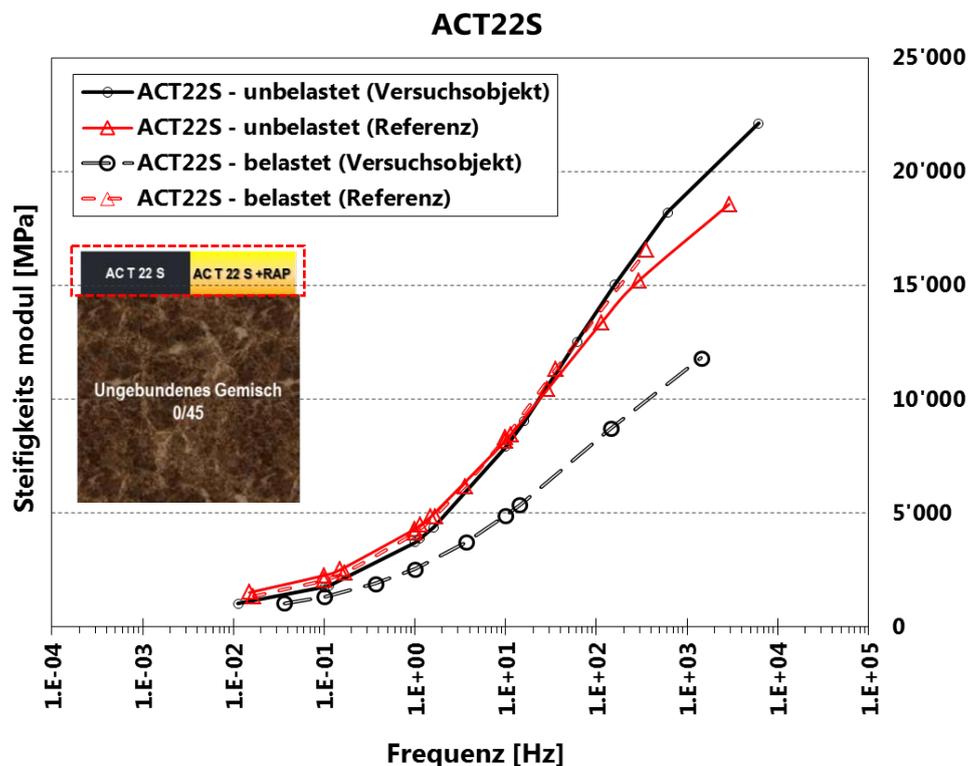


Abb. 43 Masterkurven bei 20 °C für Testfeld 1. Unterbrochene Kurven: Resultate der Bohrkernprüfungen des belasteten Bereiches, Kontinuierliche Kurven: Resultate der Bohrkernprüfungen des unbelasteten Bereiches

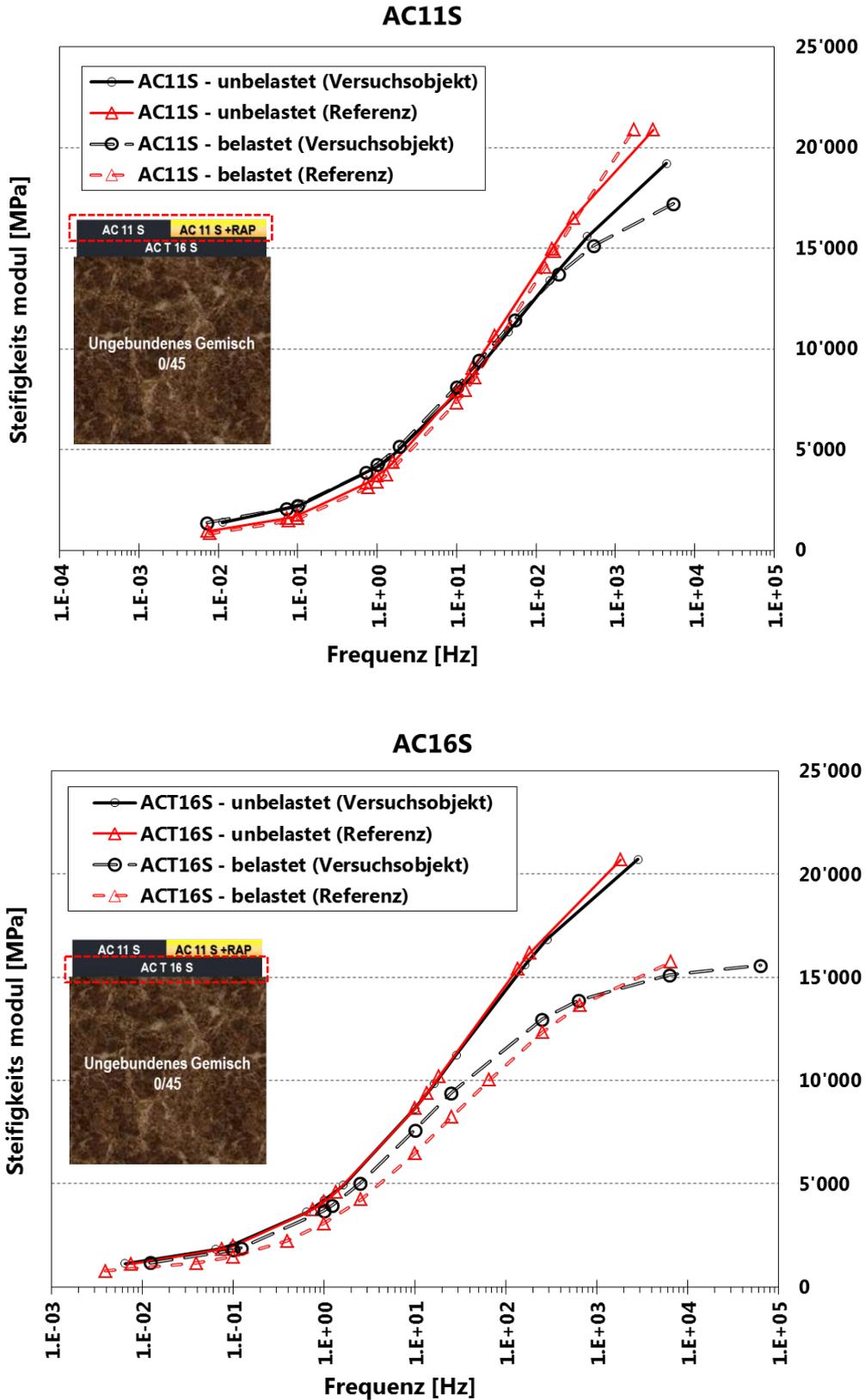


Abb. 44 Masterkurven bei 20 °C für Testfeld 2 für Deck- (oben) und Tragschicht (unten). Unterbrochene Kurven: Resultate der Bohrkernprüfungen des belasteten Bereiches, Kontinuierliche Kurven: Resultate der Bohrkernprüfungen des unbelasteten Bereiches

Für die untersuchten Materialien befinden sich alle Ergebnisse in der erwarteten Grössenordnung. Im unbefahrenen Bereich beider Testfelder zeigen die Masterkurven keinen relevanten Unterschied zwischen dem elastischen Modul der Referenz und des Versuchsobjektes. Dieses Resultat spricht dafür, dass ein hoher RAP-Anteil keinen wesentlichen Einfluss auf das Elastizitätsmodul der untersuchten Beläge hat.

Betrachtet man hingegen die Werte aus dem befahrenen Bereich, fallen diese für das Versuchsobjekt von Testfeld 1 etwas tiefere aus. Verglichen mit dem unbelasteten Bereich zeigt die Tragschicht von Testfeld 2 im belasteten Bereich (AC T 16 S) ebenfalls niedrigere Modulwerte, allerdings ohne relevante Unterschiede zwischen Versuchsobjekt und Referenz. Die tendenziell niedrigeren Werte im belasteten Bereich beider Testfelder können mit den dort entstandenen Rissen erklärt werden.

5.6.3 Untersuchung der Schichthaftung nach Leutner

Von den zweischichtigen Prüfkörpern aus Testfeld 2 (Abb. 45) wurde die Schichthaftung nach Leutner gemäss Schweizer Norm SN 670 641 [40] bestimmt. Es wurden jeweils 4 Bohrkern mit Durchmesser 150 mm aus dem unbelasteten und aus dem belasteten Versuchsobjekten und Referenzen getestet. Tab. 23 fasst die Ergebnisse der einzelnen Prüfkörper zusammen.



Abb. 45 Symbolische Schichthaftung Testfeld 2

Tab. 23 Resultate der Schichthaftung nach Leutner

	Referenz 2		Versuchsobjekt 2	
	Prüfkörper	Max-Kraft [kN]	Prüfkörper	Max-Kraft [kN]
Unbelastet	DRU01	36	DVU01	38
	DRU02	36	DVU02	40
	DRU03	37	DVU03	40
	DRU04	36	DVU04	42
Belastet	DRB15	37	DVB15	32
	DRB16	37	DVB16	38
	DRB17	36	DVB17	27
	DRB18	35	DVB18	35

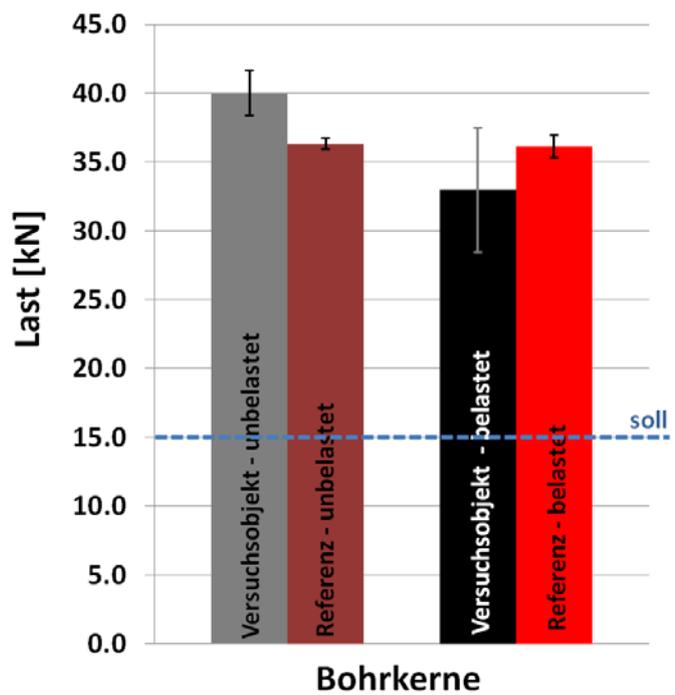


Abb. 46 Gemittelte Schichthaftung aus jeweils vier nach Leutner geprüften Bohrkerne, gemittelte Last über Weg;

Die Schichthaftung zwischen der Trag- und der Deckschicht ist in allen Fällen gut und über dem Sollwert von 15 kN, die Unterschiede zwischen belasteter und unbelasteter Referenz sind klein. Im belasteten Versuchsobjekt ist die Schichthaftung leicht niedriger als im unbelasteten Versuchsobjekt. Letzteres könnte den dort entstandenen Rissen zugeschrieben werden. Dies wird von der Tatsache bestärkt, dass alle anderen Bereiche auf Testfeld 2 nicht gerissen sind. Aufgrund der leichten Abweichung und der niedrigen Anzahl geprüfter Bohrkerne kann diese Aussage jedoch als Indiz verstanden werden. Im Endeffekt kann angenommen werden, dass für die hier betrachteten Fälle ein hoher RAP-Anteil keinen negativen Einfluss auf die Schichthaftung hat.

5.7 Mischgutuntersuchungen im Labor

5.7.1 Belageeinbau - Mischgutkontrolle

Die Mischrezepte der BAB Belag AG Birmensdorf sind im Anhang I zu finden. Die Qualitätskontrolle der eingebauten Mischgüter wurde durch die Walo Bertschinger AG durchgeführt. Dies umfasste die volumetrischen Kenndaten inklusive Marshall-Prüfung.

Testfeld 1: Deckschicht AC 11 S zweischichtiger Belag

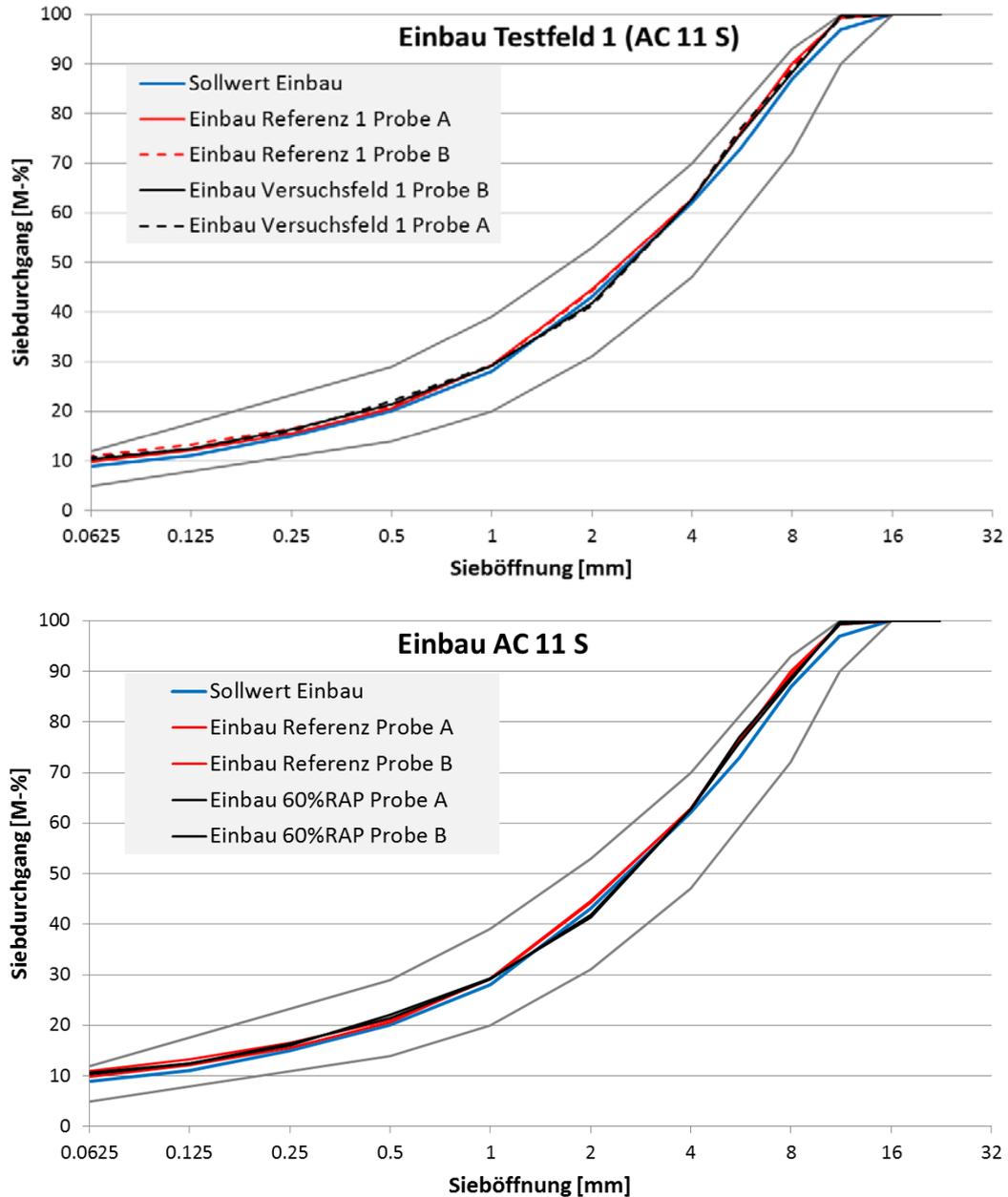


Abb. 47 Korngrößenverteilung der Deckschicht AC 11 S

Die Korngrößenverteilung aller Proben des AC 11 S stimmten gut mit der Sollwertkurve überein. Der gemessene Bindemittelanteil lag mit 5.3 M-% (Versuchsobjekt) und 5.6 M-% im Normbereich. Der Hohlraumgehalt genügte mit einer Ausnahme den

Normanforderungen. Interessanterweise war die Marshall-Stabilität beim Versuchsobjekt deutlich höher als bei der Referenz. Der Fliesswert war überall zufriedenstellend (<3 mm). Die Werte der Marshallprüfkörper der Referenz wichen stark von den anderen Mischungen ab, was nicht eindeutig nachvollziehbar ist. Das Bindemittel im Versuchsobjekt ist 6 Penetrationspunkte härter als bei der Referenz. Der Gehalt an Verjüngungsmittel betrug 0.074 M-% im Mischgut (I.1.1.1.2), respektive 1.4% bezüglich des Bindemittels, was der vom LAVOC empfohlenen Menge von 1.5% entspricht. Die Werte des Versuchsobjektes stimmen bis auf die Penetration gut mit den Labormischungen des Mix-Designs überein.

Tab. 24 Deckschicht AC 11 S

		Sollwert		Referenz		Versuchsobjekt		
		SN	BAB	Probe A	Probe B	Probe A	Probe B	Mix-Design
Bindemittelanteil	M-%	5.5	≥5.4 dosiert	5.56	5.66	5.29	5.26	5.1
Penetration	10 ⁻¹ mm			37		31		42
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C			58.6		60.2		55.2
Rohdichte	Mg/m ³	2.469		2.469	2.464	2.478	2.479	-
Raumdichte	Mg/m ³	2.358		2.367	2.401	2.388	2.394	-
Hohlraumgehalt	V-%	4.5	3 ... 6	4.1	2.6	3.6	3.4	3.3
Hohlraumfüllungs- grad VFB	V-%		(≤83)*	76.0	83.4	77.5	78.3	-
Marshall Stabilität	kN		(≥7.5)*	12.2	11.8	15.1	14.9	12.9
Marshall Fliesen	mm	11.9	(2 ... 4)*	2.2	2.7	2.8	2.7	2.8
Fließwert Ft	mm	3.3		1.1	1.4	1.2	1.3	1.6
Hohlraumg. Mineral- stoffgerüst VMA	V-%	5.5		16.9	15.9	15.9	15.7	-

* Richtwert, nur für Belagstypen L und N massgebend

Testfeld 1: Tragschicht AC T 16 S zweischichtiger Belag**Tab. 25** Tragschicht AC T 16 S

		Sollwert BAB	Sollwert SN [30], [32]	Referenz	
				Probe A	Probe B
Bindemittelanteil	M-%	4.6	≥4.0 dosiert	4.53	4.6
Penetration	10 ⁻¹ mm			27	
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C			65	
Rohdichte	Mg/m ³	2.507		2.503	2.500
Raumdichte	Mg/m ³	2.394		2.379	2.341
Hohlraumgehalt	V-%	4.5	4 ... 7	5.0	6.4
Hohlraumfüllungsgrad VFB	V-%		(≤80)*	67.8	62.2
Marshall Stabilität	kN		(≥7.5)*	12.6	10.1
Marshall Fliesen	mm		(1.5 ... 3.5)*	2.2	2.0
Fließwert Ft	mm			1.0	1.0
Hohlraumg. Mineral- stoffgerüst VMA	V-%	4.6		15.5	16.9

* Richtwert, nur für Belagstypen L und N massgebend

Die Sieblinien der beiden Proben sind etwas unterschiedlich ausgefallen, was sich auch im Hohlraumgehalt widerspiegelt. Alle Normanforderungen wurden erfüllt. Das

Bindemittel zeigte mit einem Penetrationswert von nur $27 \cdot 10^{-1}$ mm eine starke Verhärtung.

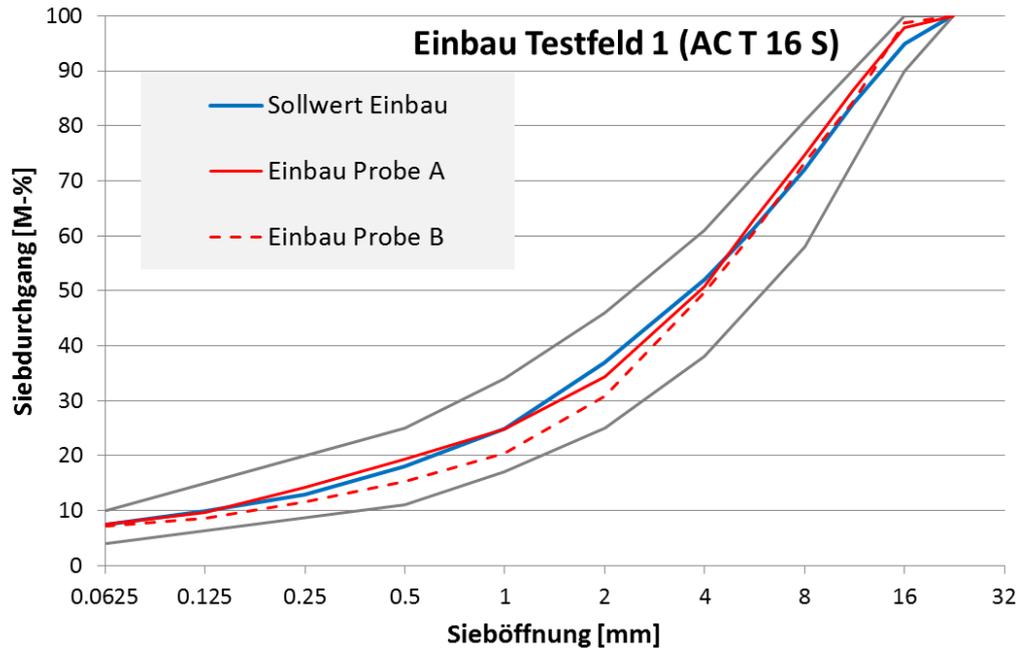


Abb. 48 Korngrößenverteilung der Tragschicht AC T 16 S

Testfeld 2: Tragschicht AC T 22 S einschichtiger Belag

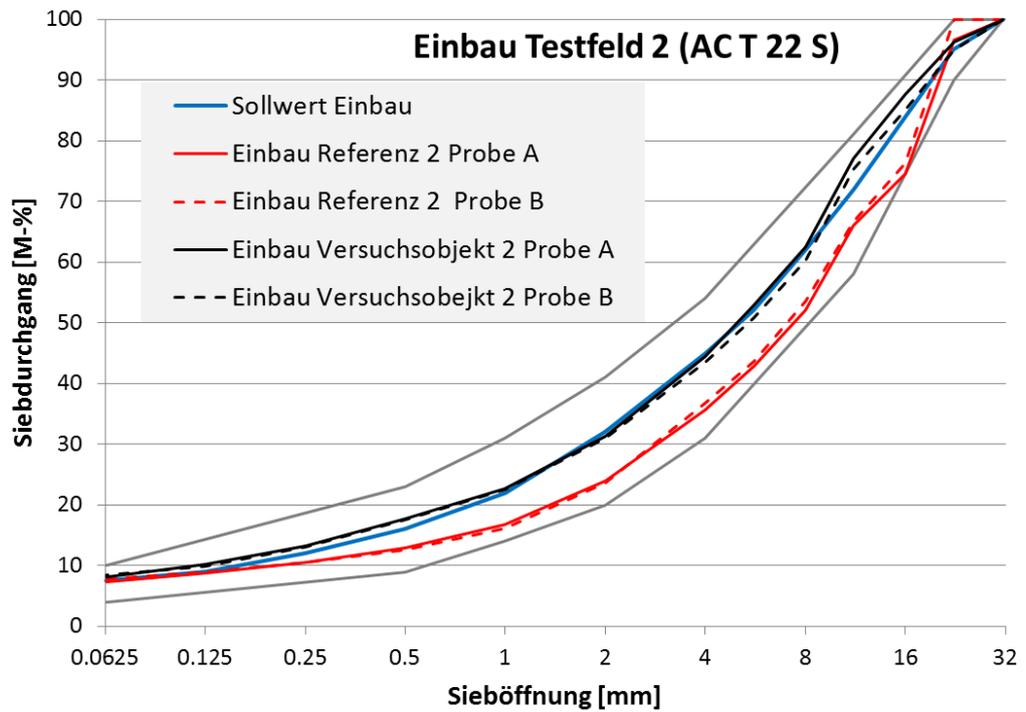


Abb. 49 Korngrößenverteilung der Tragschicht AC T 22 S

Die Korngrößenverteilung der Referenzmischung war sehr grob und wich stark von der Sollwertkurve ab, was sich in einem deutlich höheren Hohlraumgehalt ausdrückte. Der Bindemittelanteil lag beim Versuchsobjekt um 0.3% höher als bei der Referenz. Dieser Umstand hat dazu beigetragen, dass beim Versuchsobjekt die Anforderungen an den Hohlraumgehalt mit 3.4 V-% nicht erfüllt wurden. Der Gehalt an Verjüngungsmittel betrug 0.123 M-% im Mischgut (Anhang I.1.4), respektive 3.0% bezüglich des Bindemittels, was etwas unter der vom LAVOC empfohlenen Menge von 3.2% liegt. Im Vergleich des Mischgutes des Versuchsobjektes mit der Labormischung des Mix-Design, war der Bindemittelanteil um 0.3 M-% höher und der Hohlraumgehalt entsprechend etwa 1 V-% tiefer. Die Bindemittel- und Marshallwerte waren hingegen gut vergleichbar.

Tab. 26 Tragschicht AC T 22 S

		Sollwert		Referenz		Versuchsobjekt		
		BAB	SN [30], [32]	Probe A	Probe B	Probe A	Probe B	Mix-Design
Bindemittelanteil	M-%	4.1	≥4.0 dosiert	3.78	3.8	4.12	4.05	3.8
Penetration	10 ⁻¹ mm			40		36		38
Erweichungspunkt Ring und Kugel	°C			55.6		58.8		58.2
Rohdichte	Mg/m ³	2.522		2.525	2.524	2.52	2.523	-
Raumdichte	Mg/m ³	2.383		2.392	2.378	2.432	2.441	-
Hohlraumgehalt	V-%	5.5	4 ... 7	5.3	5.8	3.5	3.3	4.5
Hohlraumfüllungsgrad VFB	V-%		(≤80)*	62.6	60.4	73.5	74.8	-
Marshall Stabilität	kN	12.6	(≥7.5)*	9.9	11.1	13.2	14.3	14.2
Marshall Fließen	mm	3.3	(1.5 ... 3.5)*	1.9	2.1	2.3	2.5	3.0
Fliesswert Ft	mm			1.0	1.1	1.1	1.1	1.6
Hohlraumg. Mineral- stoffgerüst VMA	V-%			14.1	14.6	13.3	12.9	-

* Richtwert, nur für Belagstypen L und N massgebend

Durch die Empa wurden zusätzliche Laboruntersuchungen durchgeführt:

- Spurbildungstest SN EN 12697-22 [46] und SN EN 12697-33 [47]
- Wasserempfindlichkeit SN EN 12697-12 [48]
- Bruchfestigkeit bei -10 °C
mittels indirektem Zugversuch SN EN 12697-23 [50]
- Verdichtbarkeit mittels Gyrator SN EN 12697-9 [51] und SN EN 12697-31 [52]

5.7.2 Spurbildungstest

Neben den MLS10-Prüfungen auf dem Feld wurde die Spurbildungsneigung der verschiedenen Mischgüter im Labor geprüft. Hierfür wurde das französische Spurbildungs-Prüfgerät verwendet. Auch bei dieser Prüfung stand der Vergleich der neuentwickelten RAP-Materialien mit ihren Referenzen im Vordergrund. Da für die Tragschicht von Testfeld 2 in keinem Fall RAP-Material eingesetzt wurde, entfällt eine Vergleichsmöglichkeit. Aus diesem Grund wurde das entsprechende Mischgut nicht geprüft. Von den übrigen Materialien wurden rechteckigen Probenform (Länge: 50 cm, Breite: 18 cm, Tiefe: 5 resp. 10 cm) hergestellt, welche durch einen Pneu bidirektional bei 60 °C überrollt wurden.



Abb. 50 Prüfgerät für den Spurbildungstest

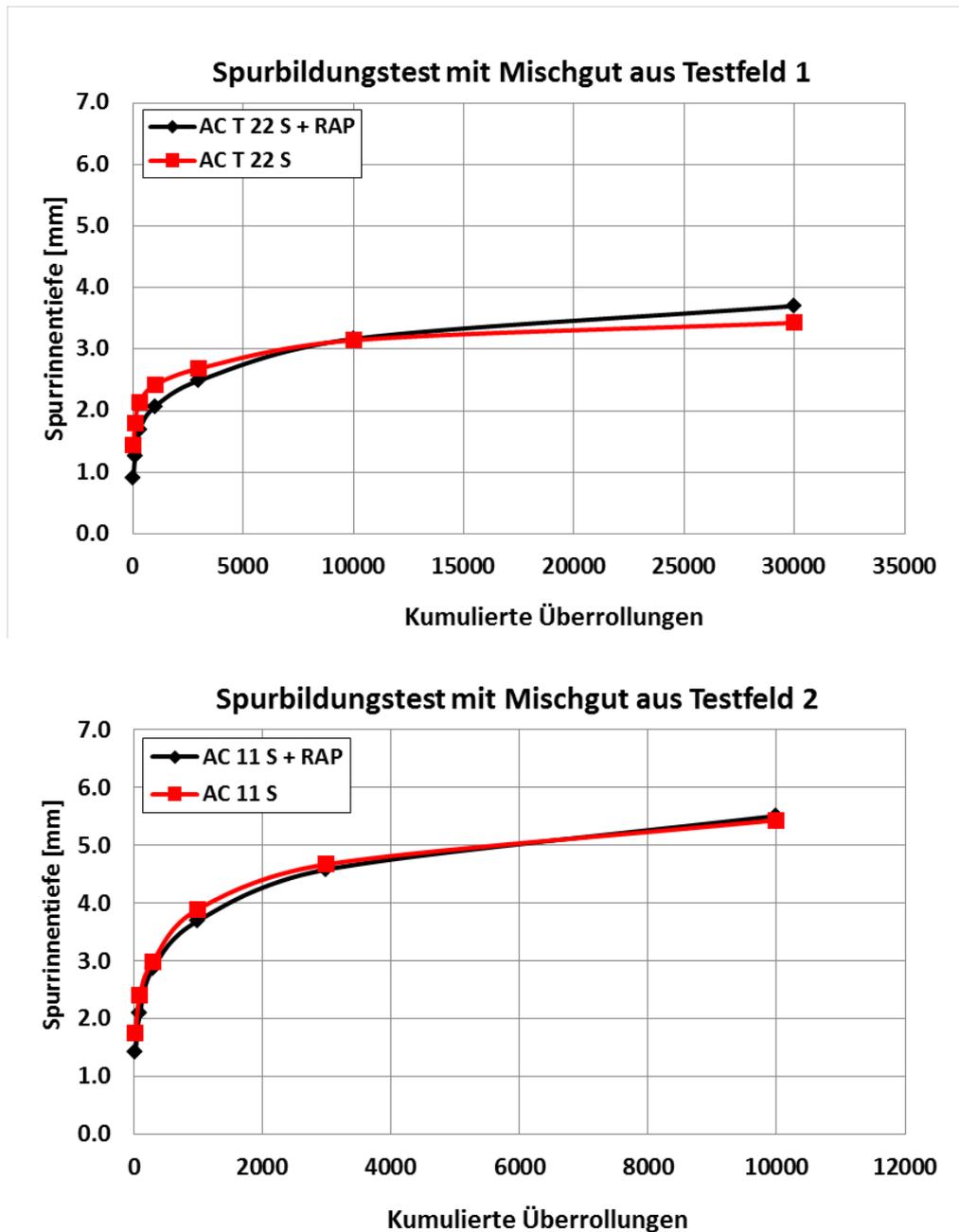


Abb. 51 Spurrinnenbildung im Fortschreiten der kumulierten Überrollungen für Prüfkörper aus Recycling- und Referenzmaterial. Oben, für das AC T 22 S Mischgut mit und ohne Recyclinganteil, Unten, für das AC 11 S Mischgut mit und ohne Recyclinganteil,

Die mit dem Spurrinnen-Prüfgerät erzeugten Spurrinnen der Prüfkörper aus Referenz- und RAP-Materialien von Testfeld 1 und 2 unterscheiden sich nur unwesentlich. Dies weist auf ein ähnliches plastisches Deformationsvermögen der verglichenen Materialien hin.

5.7.3 Wasserempfindlichkeit

Für die Bestimmung der Wasserempfindlichkeit gemäss SN EN 12697-12 [48] wurden pro Mischgutsorte sechs zylindrische Probekörper des Durchmessers 101.6 mm hergestellt. Die Sechsergruppe wurde jeweils in zwei gleich grosse Teilgruppen aufgeteilt. Die eine Teilgruppe wurde trocken bei Raumtemperatur gelagert, während die zweite Teilgruppe mit Wasser gesättigt und bei erhöhter Temperatur in Wasser gelagert wurde. Im Anschluss an die Klimatisierung wurde die indirekte Zugfestigkeit (ITS) beider Teilgruppen bestimmt. Das Verhältnis der gemittelten ITS der wassergelagerten Teilgruppe zu der trockenen Teilgruppe ist in Abb. 52 in Prozent angegeben (ITSR).

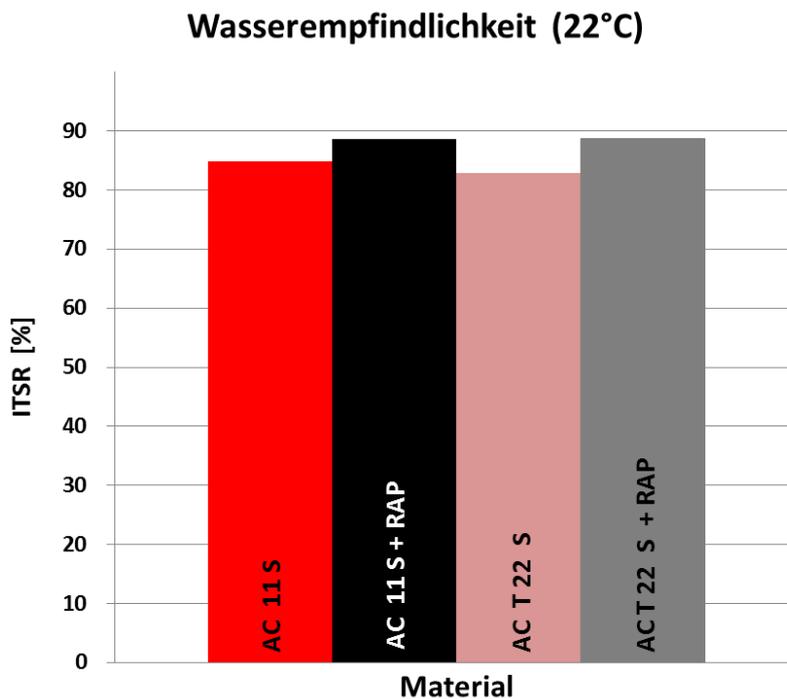


Abb. 52 Verhältnis der indirekten Zugfestigkeiten (ITSR-Wert) von trockenen und in Wasser gelagerten Prüfkörpern.

Alle ITSR-Werte liegen mit Werten über 80% im Normbereich (>70%). Da die Resultate der verschiedenen Materialien nur minimal schwanken, kann vermutet werden, dass ein hoher Recyclinganteil keinen wesentlichen Einfluss auf die Wasserempfindlichkeit hat.

5.7.4 Bruchfestigkeit bei -10 °C

Mit einem Schlagverdichter wurden pro Mischgutsorte je vier zylindrisch geformte Probekörper mit einem Durchmesser von 101.6 mm hergestellt. Diese wurden auf 10 °C temperiert und analog zur ITS-Prüfung diametral zur Zylinderachse mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet (SN EN 12697-23 [50]). Die dabei erreichte Höchstlast wurde für die jeweilige Mischgutsorte gemittelt und in

Abb. 53 festgehalten.

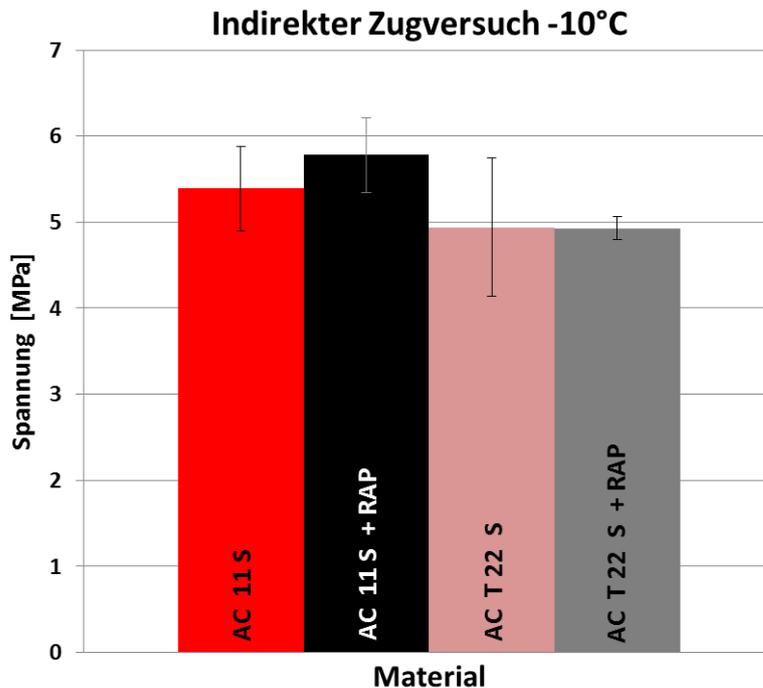


Abb. 53 Gemittelte indirekte Zugfestigkeit (ITS) aus je vier Probekörpern bei einer Temperatur von -10 °C.

Vergleicht man die Resultate des Referenz- und Versuchsmaterials kann kein signifikanter Unterschied in der Zugfestigkeit beobachtet werden. Gestützt auf diese Resultate scheint ein hoher Recyclinganteil keinen wesentlichen Einfluss auf die Bruchfestigkeit bei -10 °C der eingesetzten Materialien zu haben.

5.7.5 Verdichtbarkeit mittels Gyrator

Um die Verdichtbarkeit der eingesetzten Materialien vergleichen zu können, wurden diese u.a. einer Gyratorprüfung gemäss SN EN 12697-9 [51] und SN EN 12697-31 [52] unterzogen. Dabei wurde das jeweilige Mischgut in einer zylindrischen, durch Einsätze begrenzten Probenform eingefüllt und während der gesamten Dauer der Verdichtung auf einer konstanten Temperatur von 145 °C gehalten. Die Verdichtung wurde durch die gleichzeitige Wirkung eines statischen Druckes und der Schubwirkung erzielt, die sich aus der Bewegung der Achse der Probenform in der Prüfapparatur ergab. Pro Mischgutsorte wurden von je zwei Proben die Höhe und Zahl der Gyrationen kontinuierlich gemessen und anschliessend gemittelt. Daraus konnte das Prüfkörpervolumen, die geschätzte Raumdichte und folglich der Hohlraumgehalt berechnet werden (Abb. 54).

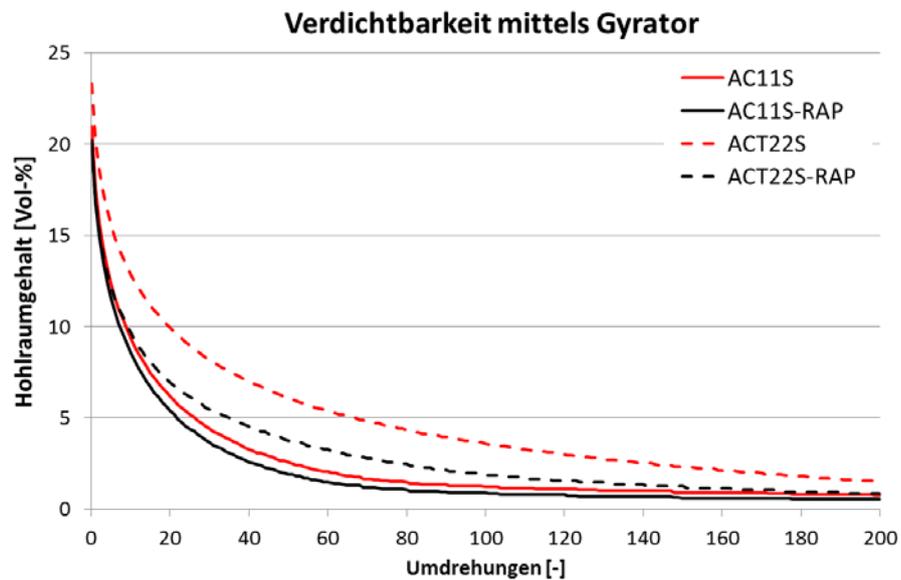


Abb. 54 Hohlraumgehalt der Tragschichten aus Referenz- und Versuchsmaterial von Testfeld 1 sowie der Deckschichten aus Referenz- und Versuchsmaterial von Testfeld 2

Bei der Deckschicht ist die Verdichtbarkeit mit und ohne Recycling ähnlich hoch, was auf den hohen Bindemittelgehalt zurückzuführen ist. Bei der Tragschicht ist die Verdichtbarkeit mit Recycling hingegen viel höher, was auch schon bei der Marshallverdichtung beobachtet wurde. Die höhere Verdichtbarkeit des RAP-Materials kann mit dem höheren Anteil an runden und teilweise gerundeten Mineralstoffen sowie der höheren Restfeuchtigkeit erklärt werden.

6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie schliesst an fünf Vorgängerprojekte an, welche die Eigenschaften von Asphalt mit RAP (Reclaimed Asphalt Pavement bzw. Recyclingasphaltgranulat) im Labor untersucht hatten. Im Zusammenhang mit der hier vorliegenden Arbeit ist vor allem das Einzelprojekt EP1 [1] zu erwähnen. Hier wurde ermittelt, welcher RAP-Anteil bestimmten Mischgütern beigefügt werden kann ohne die mechanische Performance der daraus resultierenden Beläge massgebend zu beeinträchtigen. Entsprechende Laboruntersuchungen ergaben, dass bei korrekter Korngrössenverteilung und dem richtigen Mix-Design ein AC 11 S aus bis zu 60% und ein AC T 22 S sogar aus bis zu 80% RAP-bestehen kann.

Es muss jedoch beachtet werden, dass unter Laborbedingungen die realen klimatischen und verkehrsbedingte Vorkommnisse nur unzureichend nachgebildet werden können. Darüber hinaus stellt sich die Frage in wie weit im Labor, die Praxisbedingungen in der Mischanlage und beim Einbau nachgestellt werden können.

Diese entscheidenden Wissenslücken führten zu einer Praxisvalidierung der erwähnten Laborresultate im 1:1 Massstab. Dazu wurde der Verkehrssimulator MLS10 auf dem Innovationspark des ASTRA in Lenzburg eingesetzt. Es wurden zwei unterschiedliche Versuchsobjekte eingebaut, wobei man sich an den RAP-Mischungen des EP1-Projektes orientierte. Ein Belag wurde einschichtig aus AC T 22 S mit 75% RAP eingebaut ein weiterer wurde zweischichtig eingebaut mit einer Tragschicht aus AC T 16 S und einer Deckschicht aus AC 11 S mit 60% RAP. Als Vergleichsbasis wurde neben jedem Versuchsobjekt eine entsprechende Referenz ohne RAP-Material vorgesehen. So angeordnet, konnten unter kontrollierten Bedingungen beide Beläge zeitgleich mit der MLS10 belastet werden. Diese Belastungsstrategie hatte neben einer Zeit- und Ressourcenersparnis auch die Gewährleistung gleicher Umwelteinflüsse zwischen Versuchsobjekt und Referenz zum Vorteil. Dadurch konnten diese Beläge besser miteinander verglichen werden.

Neben der mechanischen Beanspruchung mit der MLS10 gehörte zur Validierung auch die Anwendung der im Einzelprojekt EP-5 entwickelten Mix-Designmethode für die Berechnung der Mischrezepturen. Basierend auf den Eigenschaften der Ausgangsmaterialien wurden die Asphaltmischungen zuerst im Labor hergestellt, geprüft und optimiert, so dass sie anschliessend mit jenen der Testfelder und den entnommenen Bohrkernen verglichen werden konnten (siehe Mix-Design Methode und entsprechende Resultate in Kapitel 5.1 und im Forschungsbericht des EP5 [5]). Dabei wurde die Korngrössenverteilung am Anfang fixiert und als Zielwert definiert. Dies scheint im Nachhinein nicht korrekt gewesen zu sein, da sich bei der Gyratorversuchen deutlich unterschiedliche Verdichtungseigenschaften zeigten. Die Fixierung der Korngrössenverteilung hat dazu geführt, dass der Hohlraumgehalt und Bindemittelanteil tief und nicht vollkommen normkonform waren.

Für das Erreichen der Versagensgrenze der hier verwendeten Beläge wurden 500'000 Zyklen pro Belag als hinreichend angenommen. Während den Prüfungen hat der zweischichtige Belag jedoch eine höhere Dauerfestigkeit gezeigt. Daher wurde im Laufe der Messkampagne entschieden, diesen mit 600'000 und der einschichtige mit 400'000 Zyklen zu belasten

Die Prüfmethode unterteilen sich in drei Kategorien. Dazu gehörten die kontinuierlichen Prüfungen (während dem MLS10-Betrieb), die periodischen Prüfungen zwischen den verschiedenen Betriebsphasen und am Ende der Messkampagne die Laboruntersuchungen. Bei den letztgenannten Untersuchungen wurden Bohrkern- und Mischgutproben aus den Testfeldern im Labor charakterisiert. Dabei sollten insbesondere die Schädigungswirkung der MLS10-Belastung auf dem jeweiligen Versuchsobjekt und der Referenz verglichen werden. Hierzu wurden u.a. das Elastizitätsmodul, die Schichthaftung, die Wasserempfindlichkeit, die Bruchfestigkeit bei -10 °C sowie die Spurrinnenbildung untersucht. Die Resultate haben gezeigt, dass ein hoher RAP-Anteil

keinen relevanten Einfluss auf die oben genannten Grössen hatte. Dieser Befund steht im Einklang mit den Analysen des EP1-Projektes und bekräftigt dessen These.

Im Widerspruch dazu stehen die Resultate der periodischen und kontinuierlichen Feldmessungen in Lenzburg. Hier haben beide Versuchsobjekte mit hohen RAP-Anteilen deutlich schlechter als ihre entsprechenden Referenzen abgeschnitten. Diese Aussage stützt sich hauptsächlich auf die Resultate der Rissuntersuchungen. Während beim einschichtigen Belag (Testfeld 1) erste Risse in der Referenz erst ab 400'000 Zyklen sichtbar wurden, erschienen diese im Versuchsobjekt schon ab 250'000 Überrollungen. Ein ähnliches Verhalten wurde auch beim zweischichtigen Belag (Testfeld 2) beobachtet. Hier wurden im Versuchsobjekt erste Risse ab 400'000 Zyklen entdeckt, wogegen sie in der Referenz bis ans Ende der Prüfung ausblieben. Diese Befunde weisen in beiden Fälle auf eine höhere Rissneigung der Versuchsobjekte mit RAP-Material.

Im Rahmen der Spurrinnenuntersuchungen wurde ermittelt, dass die Risserscheinung mit einer verstärkten Spurrinnenbildung zusammenfällt. Vor den ersten Rissen wurde auf beiden Testfelder sogar eine leicht niedrige Spurrinnentiefe in den Versuchsobjekten gemessen. Der Zusammenhang zwischen Riss- und Spurrinnenentwicklung ist dem sog. Pumping-Effekt zuzuschreiben. Die zyklische MLS10-Belastung und zusammen mit Wasser verursachten einen Fluss von Feinpartikeln aus der Foundation durch die Risse an die Oberfläche. Der dadurch entstandene Materialschwund der Foundation ergab einen lokalen Stabilitätsverlust, welcher eine Einsenkung des Belages und weitere Rissbildungen begünstigte. Weil die Einsenkung lokal beschränkt war, wurde mit dem Profilometer relativ zu der „gesunden“ Oberfläche eine tiefere Spurrinne gemessen.

Ein weiterer Hinweis für den Pumping-Effekt ergab sich aus den Untersuchungen der Tragfähigkeit der Planie mit dem leichten Fallgewicht. Entgegen den ersten Erwartungen ergaben diese Messungen einen tendenziell höheren Elastizitätsmodul im unbelasteten Bereich beider Testfelder. Auch hier kann dieses Phänomen den Belagsrissen in den belasteten Prüfbereichen zugeschrieben werden. Der dadurch ermöglichte Pumping-Effekt verursachte eine „Auflockerung“ der Foundation, welche in einer Reduktion der Tragfähigkeit messbar wurde.

Warum die ersten Risse zuerst bei den Versuchsfeldern entstanden ist hiermit aber nicht geklärt. Gemäss Resultaten der Laboruntersuchungen in EP1 und EP4 des Forschungspaketes, ergaben sich keine grossen Änderungen bei der Zugabe von RAP. In diesem Projekt wurden im Labor diesbezüglich keine vergleichenden Prüfungen durchgeführt. Die untersuchten Recyclingbeläge erfüllten die von der Norm vorgegebenen Anforderungen bezüglich volumetrischen Kennwerten, Spurrinnenbildung und Wasserempfindlichkeit. Es besteht aber die Befürchtung, dass die bisher definierten Prüfungen zur Beurteilung des Langzeitverhaltens von Belägen nicht genügen. Das heutige Wissen basiert hauptsächlich auf Erfahrung und ist für neuartige Beläge, sei es mit hohem Recyclinganteil oder mit neuen Zusatzstoffen, nicht ausreichend. So konnte auch die Rolle des eingesetzten Verjüngungsmittels nicht beurteilt werden. Es ist deshalb unklar, ob mit einem anderen Produkt die Risse später aufgetreten wären, respektive ob sie auf das frühzeitige Versagen einen Einfluss hatten. Weitere MLS-10-Prüfungen mit anderen Produkten wären notwendig in Ergänzung zu einer erweiterten Prüfpalette im Labor. Es ist wichtig eine Lösung zu finden, wie im Labor das Verhalten im Feld vorhergesagt werden kann, denn es ist zu kostspielig für jede neue Belagsvariante eine Feldvalidierung durchzuführen.

Beachtet man die Sensordaten aus Dehn- und Deflektionsmessungen mit Fortschreiten der Überrollungen wird deutlich, dass die Versuchsobjekte beider Testfelder tendenziell mehr verformt wurden. Diese Ergebnisse scheinen im Widerspruch mit jenen der indirekten Zugversuche und FWD-Messungen zu stehen. Da das RAP- und Referenzmaterial bei diesen Versuchen vergleichbare Elastizitätsmodule bzw. Deflektionen aufwies, stellte sich die Frage nach dem Grund des höheren Verformungsverhaltens der Versuchsobjekte unter Belastung mit der MLS10. In einer Plausibilitätsprüfung wurde angenommen, dass die zu den Laboruntersuchungen und FWD-Impulsbelastung vergleichsweise höheren MLS10-Lasten die Versuchsobjekte im nicht-linear elastischen Bereich belastet haben müssen. Aus dieser Annahme und der

höheren Rissneigung kann eine niedrigere plastische Verformbarkeit und folglich ein tieferer Ermüdungswiderstand des RAP-Materials abgeleitet werden.

Die Kontrollprüfungen am eingebauten Belag zeigten, dass der Bindemittelanteil jeweils knapp die Normanforderungen erfüllten. Dies könnte für Beläge mit hohem Recyclinganteil zu niedrig sein, da vermutlich nicht der gesamte lösliche Bindemittelanteil im Belag aktiv ist. Allerdings führte eine Erhöhung des Bindemittelanteils im Mix-Design zu einem ungenügenden Hohlraumgehalt. Deshalb müsste auch die Sieblinie entsprechend angepasst werden. Das Konzept, dass für Recyclingbeläge die gleiche Korngrößenverteilung verwendet werden soll wie für Beläge ohne RAP hat sich als falsch erwiesen.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass beide analysierten Versuchsobjekte mit hohem RAP-Anteil eine niedrigere Dauerfestigkeit und folglich Lebensdauer aufwiesen als ihre entsprechenden Referenzen. Es wird vermutet, dass dies primär dem bituminösen Anteil der verwendeten RAP-Materialien zuzuschreiben ist. Im Vergleich zu reinem Bitumen ist die Homogenität des Bindemittels in den Versuchsobjekten nicht gewährleistet. Das Bindemittel aus dem RAP vermischt sich nicht vollständig mit dem Zugabebindemittel, das zusätzlich mit Verjüngungsmittel versetzt worden war. Dies verursacht eine Schwächung der Bindemittelkohäsion und kann die mechanischen Eigenschaften der Versuchsobjekte negativ beeinflussen. Während dieses Phänomen bei den indirekten Zugversuchen bei -10°C im Labor nicht ersichtlich war, könnte dies bei den Feldversuchen mit der MLS10 infolge der höheren und vielfältigeren Belastungen eine Schadensursache gewesen sein. Der indirekte Zugversuch ist deshalb nicht gut geeignet, um die Tieftemperatureigenschaften zu beurteilen. Inwieweit der höhere Rundanteil der im RAP enthaltenen Mineralstoffe die Dauerhaftigkeit vermindert, ist nicht genau zu sagen. Die Verdichtungsprüfungen mit dem Gyrator haben aber für die Versuchsobjekte einen niedrigeren Verdichtungswiderstand ergeben.

Der Einsatz des Verkehrslastsimulators MLS10 zur Validierung von Laborresultaten hat sich als sehr wertvoll erwiesen. Insbesondere hat sich die gleichzeitige Prüfung von Versuchsobjekt und Referenz bewährt. Auf diese Weise konnten Diskussion bezüglich ungleicher Witterungsverhältnisse vermieden werden. Die Schwächung links und rechts der Längsnaht hat sich auf einen Bereich von je 50 cm beschränkt. Dazu hat sicherlich auch der sorgfältige Einbau durch das Team der Firma WALO Bertschinger AG beigetragen. Die Ursache für die unterschiedlichen Resultate zwischen Labor und Feld ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass im Labor die Prüfkörper im unbeschädigten Zustand geprüft wurden. Dies war beispielsweise bei der Spurrinnenentwicklung gut zu beobachten, wo sich die Spurrinnentiefe der Versuchsobjekte vor dem Auftreten von Rissen nahezu identisch zu den Referenzen verhielt und sich erst danach vergrösserte.

Ein direkter Vergleich der erhaltenen Resultate mit dem Ausland ist aus verschiedenen Gründen schwierig. In den USA wird unter „hohem Recyclinganteil“ schon ab einer Zugabemenge von 25% RAP gesprochen [60]. Entsprechend sind kaum Resultate über in-situ Vergleichsprüfungen vorhanden. In einer Studie wurde Warmasphalt (Schaumbitumen) mit 50% RAP mit Belägen ohne RAP verglichen [61]. Interessanterweise wurde dort auch die Erfahrung gemacht, dass die Laborresultate nicht mit den in-situ-Ergebnissen übereinstimmten, allerdings verhielten sich die Recyclingbeläge in diesem Fall besser als vorhergesagt. Andere Studien beschränkten sich auf die Untersuchung von Recyclingbelägen mit hohem RAP-Anteil, aber ohne direkten Vergleich mit einem entsprechenden Referenzbelag [62, 63].

Für zukünftige Forschungsprojekte im Bereich Recycling, muss die Auswahl der Prüfmethode überdacht werden und insbesondere sollten auch Prüfungen für die Rissfortschreitung berücksichtigt werden. Zudem sind die Wirkung des Verjüngungsmittels, sowie der Einfluss der inhomogenen Vermischung von RAP-Bindemittel, Zugabebitumen und Verjüngungsmittel genauer zu untersuchen. Auf jedem Fall, sollten sich die Untersuchungen nicht nur auf das Labor beschränken, sondern müssen in der Praxis validiert werden, sei dies durch beschleunigte Belastung mittels MLS10 oder an Teststrecken.

7 Dank

Den Firmen Walo Bertschinger AG und BAB Belag AG Birmensdorf, sowie den Mitgliedern der Begleitkommission und der NSNW AG (Nationalstrassen Nordwestschweiz) ist an dieser Stelle herzlich gedankt für ihre Arbeit und wertvolle Unterstützung in diesem Forschungsprojekt.

Anhänge

I	Produktionsprotokolle BAB Belag AG Birmensdorf	95
I.1	Deckschicht AC 11 S ohne RAP-Material.....	95
I.2	Deckschicht AC 11 S mit 60% Asphaltgranulat	96
I.3	Tragschicht AC T 22 S ohne RAP-Material	97
I.4	Tragschicht AC T 22 S mit 75% Asphaltgranulat.....	98
I.5	Tragschicht AC T 16 S ohne RAP-Material	99
II	Prüfbericht Plattendruckversuche	100
III	Visuelle Dokumentation der Rissevolution	102
III.1	Rissevolution Testfeld 1	102
III.2	Rissevolution Testfeld 2	104

I.2 Deckschicht AC 11 S mit 60% Asphaltgranulat



Site Solutions
for Automation & Planning

Produktionsprotokoll Asphalt

Rezept

Anlage:	BAB Birrimsdorf - A2 Asphalt BAB	Produkt:	AC 11 S Empa VP 6	Abgabestelle:	Manual
Kennung:	51-1336119	Name:	AC 11 S Empa VP 6	Lieferschein mit Protokoll:	Nein

Rezeptwerte

Maximale Charge:	3.00 t	Grundmischdauer:	30 s
Chargen Granularität:	--	Trockenmischdauer:	0 s
Öffnungsdauer Dampfklappe:	0 s	Mischguttemperatur:	--

Rezeptkomponenten

Typ	Kennung	Name	Anteil	Phase	Zugabe Zeitpunkt	Zugabe auf Baustelle
AG	RC 0/22	RC 0/22	600 kg/t	1	0 s	Nein
BI	B 70/100	B 70/100	20.0 kg/t	1	0 s	Nein
PU	Pulvert	Pulvert <i>Blau Grisard</i>	0,74 kg/t	1	0 s	Nein
ZL	0/2 Brechsand	0/2 Brechsand	49 kg/t	1	0 s	Nein
ZL	2/4 Splitt	2/4 Splitt	85 kg/t	1	0 s	Nein
ZL	4/8 Splitt	4/8 Splitt	120 kg/t	1	0 s	Nein
ZL	8/11 Splitt	8/11 Splitt	125 kg/t	1	0 s	Nein

Produktionsprotokoll

Produktionsdatum:	01.07.16	Prod. Menge:	6,99 t	Mischmeister:	Clarmocch Silvio	Produktion:	485213	jb.lqtsxu-ROqEvy-HLymZgA
Charge 1	MZ: 33s	MgT: 179°C	Sollwerte:					
07:04:47	TRMz: 0s	147kg	0/2 Brechsand	2/4 Splitt	4/8 Splitt	8/11 Splitt	8/11 Splitt	
Verfadesilo 1	140kg* ^{rc}	171°C	147kg	255kg	345kg	375kg	385kg	
Charge 2	MZ: 33s	MgT: 174°C	Sollwerte:					
07:05:23	TRMz: 0s	98kg	0/2 Brechsand	2/4 Splitt	4/8 Splitt	8/11 Splitt	8/11 Splitt	
Verfadesilo 1	95kg* ^{rc}	171°C	98kg	155kg	275kg	280kg	285kg	
Charge 3	MZ: 33s	MgT: 175°C	Sollwerte:					
07:06:00	TRMz: 0s	98kg	0/2 Brechsand	2/4 Splitt	4/8 Splitt	8/11 Splitt	8/11 Splitt	
Verfadesilo 1	80kg* ^{rc}	168°C	98kg	170kg	245kg	255kg	255kg	
Total Komponenten:			343kg	592kg	835kg	870kg	870kg	
			315kg* ^{rc}	565kg	665kg	670kg	670kg	

** RC - Granulat zusammen gesetzt RC 0/11 520kg/t RC 11/12 80kg/t*

-- = LegendeRngErr • = Toleranzfehler akzeptiert ◀ = Handeingriff ~ = Zurückgestellt Δ = Automatische Sollwertkorrektur * = Probeentnahme ! = Rezept geändert

I.3 Tragschicht AC T 22 S ohne RAP-Material



Site Solutions
for Automation & Planning

Produktionsprotokoll Asphalt

Rezept		AC T 22 S		Manual			
Anlage:	BAB Birnensdorf - A2 Asphalt BAB	Produkt:	AC T 22 S	Abbestelle:	Nein		
Kenntnis:	51-7530111	Name:	AC T 22 S	Lieferschein mit Protokoll:	Nein		
Rezeptwerte							
Mischen	Maximale Charge:	3.00 t		Grundmischdauer:	25 s		
	Chargen Granularität:	--		Trockenmischdauer:	0 s		
Diverses	Öfungsdauer Dampfklappe:	0 s		Mischguttemperatur:	--		
Rezeptkomponenten							
Typ	Kenntnis	Name	Anteil	Phase	Zugabe Zeitpunkt	Zugabe auf Baustelle	
BI	B 35/50	B 35/50	14.0 kg/t	✓	0 s	Nein	
BI	B 70/100	B 70/100	25.0 kg/t	✓	0 s	Nein	
FU	Eigenfüller 1	Eigenfüller 1	49 kg/t	✓	0 s	Nein	
HA	Haltmittel	Weifix BE	0.120 kg/t	✓	0 s	Nein	
ZL	0/2 Brechsand	0/2 Brechsand	228 kg/t	✓	0 s	Nein	
ZL	2/4 Splitt	2/4 Splitt	102 kg/t	✓	0 s	Nein	
ZL	4/8 Splitt	4/8 Splitt	145 kg/t	✓	0 s	Nein	
ZL	16/22 Splitt	16/22 Splitt	192 kg/t	✓	0 s	Nein	
ZL	11/16 Splitt	11/16 Splitt	125 kg/t	✓	0 s	Nein	
ZL	8/11 Splitt	8/11 Splitt	120 kg/t	✓	0 s	Nein	
Produktionsprotokoll							
Produktionsdatum:	30.06.16	Prod. Menge:	14.99 t	Mischmeister:	Clarrocchi Gabriele	Produktion:	9mLyoGG-SRWWhz-xjYfGQ
Charge 1	MZ: 36s TrMz: 0s	0/2 Brechsan 683kg Solwerte: Iswerte: Temperatur:	11/16 Splitt 11/16 Splitt 375kg 350kg 665kg 154°C	2/4 Splitt 2/4 Splitt 308kg 335kg 560kg* 154°C	4/8 Splitt 4/8 Splitt 455kg 415kg 380kg 375kg	8/11 Splitt 8/11 Splitt 360kg 380kg 375kg 375kg	Total Mineral Eigenfüller Eigenfüller Weifix BE 174°C 185°C 174°C 185°C
Charge 2	MZ: 28s TrMz: 0s	0/2 Brechsan 683kg Solwerte: Iswerte: Temperatur:	11/16 Splitt 11/16 Splitt 375kg 400kg 655kg 136°C	2/4 Splitt 2/4 Splitt 308kg 310kg 545kg* 136°C	4/8 Splitt 4/8 Splitt 455kg 415kg 370kg 370kg	8/11 Splitt 8/11 Splitt 360kg 370kg 370kg 370kg	Total Mineral Eigenfüller Eigenfüller Weifix BE 174°C 185°C 174°C 185°C
Charge 3	MZ: 26s TrMz: 0s	0/2 Brechsan 683kg Solwerte: Iswerte: Temperatur:	11/16 Splitt 11/16 Splitt 375kg 390kg 655kg 147°C	2/4 Splitt 2/4 Splitt 308kg 295kg 545kg* 147°C	4/8 Splitt 4/8 Splitt 455kg 415kg 395kg 395kg	8/11 Splitt 8/11 Splitt 360kg 355kg 370kg 370kg	Total Mineral Eigenfüller Eigenfüller Weifix BE 174°C 185°C 174°C 185°C
Charge 4	MZ: 20s TrMz: 0s	0/2 Brechsan 677kg Solwerte: Iswerte: Temperatur:	11/16 Splitt 11/16 Splitt 371kg 400kg* 655kg* 136°C	2/4 Splitt 2/4 Splitt 303kg 320kg 555kg* 136°C	4/8 Splitt 4/8 Splitt 455kg 415kg 370kg 370kg	8/11 Splitt 8/11 Splitt 360kg 370kg 370kg 370kg	Total Mineral Eigenfüller Eigenfüller Weifix BE 174°C 185°C 174°C 185°C
Charge 5	MZ: 28s TrMz: 0s	0/2 Brechsan 675kg Solwerte: Iswerte: Temperatur:	11/16 Splitt 11/16 Splitt 370kg 370kg 665kg* 138°C	2/4 Splitt 2/4 Splitt 302kg 310kg 550kg* 138°C	4/8 Splitt 4/8 Splitt 455kg 415kg 370kg 370kg	8/11 Splitt 8/11 Splitt 360kg 370kg 370kg 370kg	Total Mineral Eigenfüller Eigenfüller Weifix BE 174°C 185°C 174°C 185°C
Total Komponenten:			1457kg 3095kg*	1523kg 2755kg*	1362kg 1965kg	751kg 1365kg	373.4kg 380.0kg
			1570kg	1800kg	1965kg	74.2kg	2.00kg

-- = LegendeRngErr • = Toleranzfehler akzeptiert * = Handeingriff ✓ = Zurückgestellt Δ = Automatische Sollwertkorrektur * = Probeentnahme ! = Rezept geändert

I.4 Tragschicht AC T 22 S mit 75% Asphaltgranulat



Produktionsprotokoll Asphalt

Rezept	Anlage: BAB Birmensdorf - A2 Asphalt BAB	Produkt: AC T 22 S Empa VP 6	Abbestelle: Manual
	Kennung: 51-7538119	Name: AC T 22 S Empa VP 6	Lieferschein mit Protokoll: Nein
Rezeptwerte	Mischen	3.00 t	Grundmischdauer: 30 s
	Maximale Charge:	--	Trockenmischdauer: 0 s
	Chargen Granularität:		Mischguttemperatur: --
	Diverses	0 s	

Typ	Kennung	Name	Anteil	Phase	Zugabe Zeitpunkt	Zugabe auf Baustelle
AG	RC 0/22	RC 0/22	750 kg/t	1	0 s	Nein
BI	B 70/100	B 70/100	10.0 kg/t	1	0 s	Nein
PU	Pulver1	Pulver <i>Belu Grisead</i>	1.23 kg/t	1	0 s	Nein
ZL	0/2 Brechsand	0/2 Brechsand	50 kg/t	1	0 s	Nein
ZL	2/4 Splitt	2/4 Splitt	24 kg/t	1	0 s	Nein
ZL	16/22 Splitt	16/22 Splitt	145 kg/t	1	0 s	Nein
ZL	4/8 Splitt	4/8 Splitt	20 kg/t	1	0 s	Nein

Produktionsprotokoll		Produktionsdatum:	30.06.16	Prod. Menge:	14.95 t	Mischmeister:	Vescio Michele		Produktion:	495149	WJ7CZYU3-ObuGS+-xTRVL9SA
Charge: 1	MZ: 42s	0/2 Brechsan	149kg	16/22 Splitt	72kg	B 70/100	Pulver1	RC 0/22	Total		
07:12:51	Tr/Mz: 0s	140kg* Temperatur: 230°C	435kg	16/22 Splitt	90kg	30.0kg	3.6kg	RC 0/22	3000kg		
Verfadesalo 3			450kg		72kg	30.0kg* 165°C	3.0kg		2250kg	3000kg	
Charge: 2	MZ: 33s	0/2 Brechsan	149kg	435kg	72kg	30.0kg	3.6kg		2250kg	3000kg	
07:14:09	Tr/Mz: 0s	180kg* Temperatur: 231°C	430kg	430kg	60kg* 165°C	33.0kg	3.0kg		2275kg	3030kg	
Verfadesalo 3											
Charge: 3	MZ: 33s	0/2 Brechsan	149kg	435kg	72kg	30.0kg	3.6kg		2250kg	3000kg	
07:16:33	Tr/Mz: 0s	140kg* Temperatur: 233°C	450kg	450kg	55kg	32.0kg	3.0kg		2250kg* 2963kg	3000kg	
Verfadesalo 3											
Charge: 4	MZ: 33s	0/2 Brechsan	150kg	438kg	72kg	30.2kg	3.7kg		2259kg	3025kg	
07:17:36	Tr/Mz: 0s	150kg* Temperatur: 233°C	435kg	435kg	49kg	31.0kg	3.0kg		2259kg* 2995kg	3025kg	
Verfadesalo 3											
Charge: 5	MZ: 34s	0/2 Brechsan	152kg	442kg	73kg	30.5kg	3.7kg		2291kg	3055kg	
07:19:25	Tr/Mz: 0s	170kg* Temperatur: 231°C	420kg	420kg	60kg	32.0kg	3.0kg		2250kg* 3006kg	3006kg	
Verfadesalo 3											
Total Komponenten:			750kg*	2185kg	367kg	150.8kg	18.5kg		11310kg	15000kg	
			750kg*	2215kg	290kg*	158.0kg	15.0kg		11200kg*	14948kg	

** RC-Granulat zusammen gesetzt < RC 0/11 230kg/t
RC M/22 520 kg/t*

-- = **LegendeRngErr** • = **Toleranzfehler akzeptiert** « = **Handeingriff** ~ = **Zurückgestellt** Δ = **Automatische Sollwertkorrektur** * = **Probenentnahme** ! = **Rezept geändert**

I.5 Tragschicht AC T 16 S ohne RAP-Material



Site Solutions
for Automation & Planning

Produktionsprotokoll Asphalt

Rezept	Anlage: BAB Birmensdorf - A2 Asphalt BAB	Produkt: AC T 16 S	Abgabestelle: Manual
	Kenntnis: 51-7430111	Name: AC T 16 S	Lieferschein mit Protokoll: Nein

Rezeptwerte	Maximale Charge: 3.00 t	Grundmischdauer: 30 s
	Charigen Granularität: --	Trockenmischdauer: 0 s
Diverses	Öfungsflauer Dampfkappe: 0 s	Mischguttemperatur: --

Rezeptkomponenten	Typ	Kenntnis	Name	Anteil	Phase	Zugabe Zeitpunkt	Zugabe auf Baustelle
BI	B 35/50	B 35/50	B 35/50	23.0 kgt ✓	1	0 s	Nein
BI	B 70/100	B 70/100	B 70/100	23.0 kgt ✓	1	0 s	Nein
FU	Eigenfüller 1	Eigenfüller 1	Eigenfüller 1	50 kgt ✓	1	0 s	Nein
HA	Hafmittel 1	Wertix BE	Wertix BE	0.140 kgt ✓	1	0 s	Nein
ZL	0/2 Brechsand	0/2 Brechsand	0/2 Brechsand	310 kgt ✓	1	0 s	Nein
ZL	2/4 Splitt	2/4 Splitt	2/4 Splitt	140 kgt ✓	1	0 s	Nein
ZL	4/8 Splitt	4/8 Splitt	4/8 Splitt	194 kgt ✓	1	0 s	Nein
ZL	11/16 Splitt	11/16 Splitt	11/16 Splitt	150 kgt ✓	1	0 s	Nein
ZL	8/11 Splitt	8/11 Splitt	8/11 Splitt	110 kgt ✓	1	0 s	Nein

Produktionsdatum:	30.06.16	Prod. Menge:	18.00 t	Mischmeister:	Ciarrocchi Silvio	Produktion:	495187	kmuU3kohH-TM2jkL5DDyo0VA
Charge 1	MZ: 42s	MGT: 208°C	0/2 Brechsand: 11/16 Splitt: 450kg	8/11 Splitt: 330kg	Eigenfüller: 150kg	B 35/50: 69.0kg	B 70/100: 69.0kg	Total: 3000kg
13-04-16	Tr/Mz: 0s		4/8 Splitt: 582kg	330kg	151kg	68.0kg	70.0kg	3003kg
Verfadesalle 3	Tr/Mz: 0s	235°C	430kg	565kg	151kg	174°C	185°C	3000kg
Charge 2	MZ: 33s	MGT: 193°C	450kg	582kg	150kg	69.0kg	69.0kg	3011kg
13-05-20	Tr/Mz: 0s		470kg	575kg	151kg	68.0kg	69.0kg	3011kg
Verfadesalle 3	Tr/Mz: 0s	230°C	420kg	572kg	150kg	174°C	185°C	3000kg
Charge 3	MZ: 34s	MGT: 183°C	450kg	582kg	148kg	69.0kg	69.0kg	3004kg
13-06-18	Tr/Mz: 0s		435kg	555kg	148kg	68.0kg	69.0kg	3004kg
Verfadesalle 3	Tr/Mz: 0s	215°C	420kg	552kg	150kg	174°C	185°C	3000kg
Charge 4	MZ: 34s	MGT: 191°C	450kg	582kg	150kg	69.0kg	69.0kg	3013kg
13-07-09	Tr/Mz: 0s		470kg	580kg	153kg	69.0kg	70.0kg	3013kg
Verfadesalle 3	Tr/Mz: 0s	202°C	440kg	575kg	148kg	174°C	185°C	3000kg
Charge 5	MZ: 34s	MGT: 183°C	447kg	578kg	145kg	68.6kg	68.6kg	2985kg
13-08-20	Tr/Mz: 0s		430kg	565kg	153kg	69.0kg	69.0kg	2983kg
Verfadesalle 3	Tr/Mz: 0s	195°C	417kg	559kg	148kg	174°C	185°C	3000kg
Charge 6	MZ: 34s	MGT: 187°C	447kg	578kg	148kg	68.6kg	68.6kg	2988kg
13-08-21	Tr/Mz: 0s		455kg	580kg	150kg	68.0kg	71.0kg	2990kg
Verfadesalle 3	Tr/Mz: 0s	195°C	420kg	570kg	148kg	174°C	185°C	3000kg
Total Komponenten:			2695kg	1978kg	1624kg	413.3kg	413.3kg	17970kg
			5545kg	3440kg	16267kg	506kg	415.0kg	18004kg

~ = LegendeRngErr • = Toleranzfehler akzeptiert « = Handengriff - = Zurückgestellt Δ = Automatische Sollwertkorrektur * = Probeentnahme ! = Rezept geändert

II Prüfbericht Plattendruckversuche



Technik und Forschung im Betonbau

Prüfbericht:

Plattendruckversuch M_E und E_V gemäss SN 670 317b / SOP 3080

Messung mit TFB-LKW als Gegengewicht

Projekt-Nr.: 166162-01
Objekt: Ruppertsweilerweg (41016033)
Messort/Bauteil: Lenzburg
Messdatum: 29.06.2016 **Messbeginn vor Ort:** 11:09
Temperatur: 20 °C **Messende vor Ort:** 11:45
Witterung: teils sonnig, leichte Bewölkung **Visuelle Bodenfeuchte:** trocken
Bodenart: Kiessand / UG **Korngrösse max.:** 45 mm
gemessene Schicht: Foundationsschicht, Fahrbahn **Prüfung durchgeführt:** pe

Messung 1-6	Erstbelastung						Entlastung			Zweitbelastung				
	1	2	3	4	5	6	E1	E2	E3	1	2	3	4	5
Spannung [MN/m ²]	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45		0.25	0.10	0.01	0.05	0.15	0.25	0.35	
Setzung [mm]	0.13	0.43	0.60	0.82	0.96		0.86	0.76	0.54	0.61	0.77	0.88	0.97	
Spannung [MN/m ²]	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45		0.25	0.10	0.01	0.05	0.15	0.25	0.35	
Setzung [mm]	0.13	0.37	0.57	0.77	0.93		0.86	0.71	0.50	0.55	0.71	0.82	0.90	
Spannung [MN/m ²]														
Setzung [mm]														
Spannung [MN/m ²]														
Setzung [mm]														
Spannung [MN/m ²]														
Setzung [mm]														
Spannung [MN/m ²]														
Setzung [mm]														

Verlangter M_{E1} -Wert:		nach SN 670'317b		100 MN/m ²		auf Foundationsschicht		
		nach SN 670'317a		(100'000) kN/m ²		im Bereich 0.15 - 0.25		MN/m ²
Messung Nr.	Profil	E_{V1} [MN/m ²]	E_{V2} [MN/m ²]	M_{E1} [MN/m ²]	[kN/m ²]	M_{E2} [MN/m ²]	[kN/m ²]	M_{E2}/M_{E1} [-]
1		105.0	204.9	134.1	ok (173'400)	253.0	(285'700)	1.89
2		109.4	214.8	142.1	ok (154'600)	261.0	(285'700)	1.84

Beurteilung der Messwerte:

- M_{E1} : ok = verlangter M_{E1} -Wert erreicht; I = verlangter M_{E1} -Wert nicht erreicht

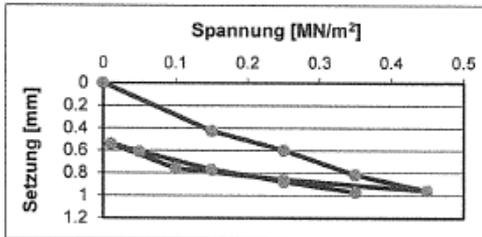
Bemerkungen:



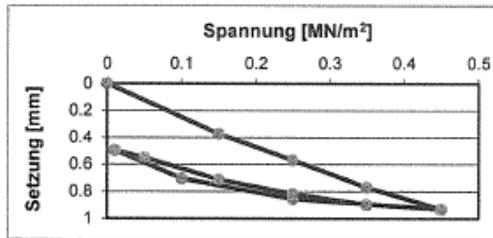
Technik und Forschung im Betonbau

Projekt-Nr.: 166162-01
 Objekt: Ruppertsweilerweg (41016033)
 Messort: Lenzburg
 Messdatum: 29.06.2016

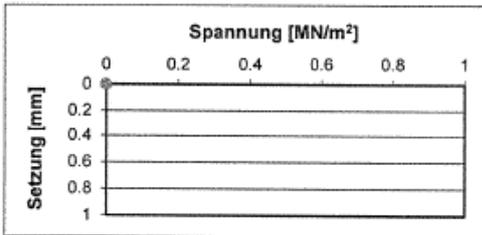
Messung Nr. 1:



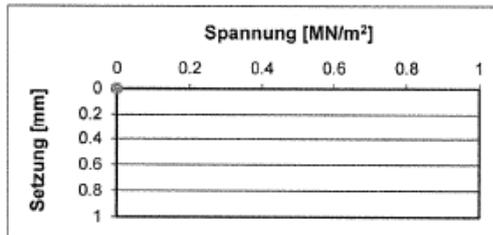
Messung Nr. 2:



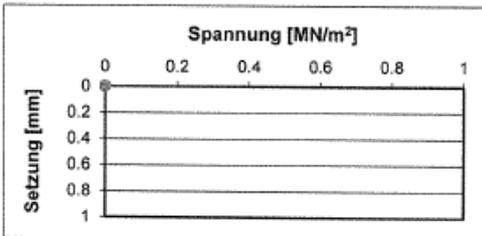
Messung Nr. 3:



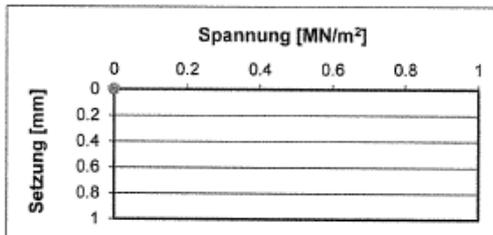
Messung Nr. 4:



Messung Nr. 5:



Messung Nr. 6:



Verena Schoch

Wildegg, 29. Juni 2016

ME-Messungen: Verena Schoch

Qualität signiert durch Verena Schoch
 TFB AG
 29. Juni 2016

Bei Messungen mit dem TFB-LKW als Gegengewicht erfolgt die Setzungsmessung elektronisch. Bei Handmessungen (Gegengewicht bauseitig) ist die Setzungsmessung mechanisch. Für die Plattenunterlage wird trockener Sand verwendet. Die Prüfergebnisse haben nur Gültigkeit für die untersuchten Stellen am Bauobjekt. Die Laststufen sind der jeweiligen Verwendung der untersuchten Schicht (Fundation, Tragschicht, Planum bzw. Unterbau) angepasst und können auf speziellen Wunsch bei der TFB nachgefragt werden. Dieser Bericht darf nicht auszugsweise kopiert werden. Das Auftragsdossier wird während 13 Jahren archiviert. Der Auftraggeber kann die Dienstleistungen innerhalb von 30 Tagen beanstanden. Bitte beachten Sie die "Allgemeinen Geschäftsbedingungen". Weitere Informationen: www.tfb.ch.



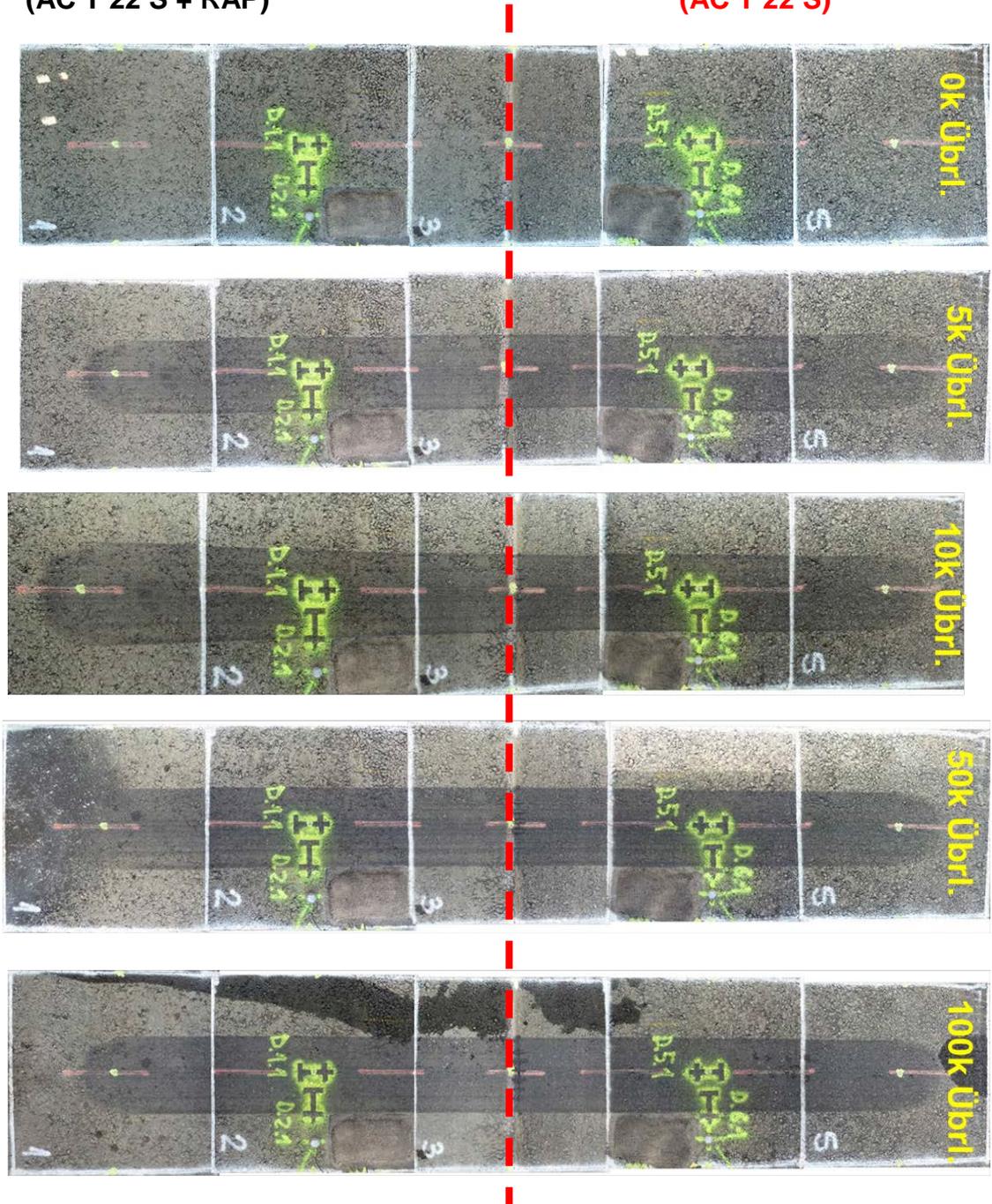
TFB AG – Lindenstrasse 10 – CH-5103 Wildegg – Tel 062 887 72 72 – Fax 062 887 72 70 – www.tfb.ch

III Visuelle Dokumentation der Rissevolution

III.1 Rissevolution Testfeld 1

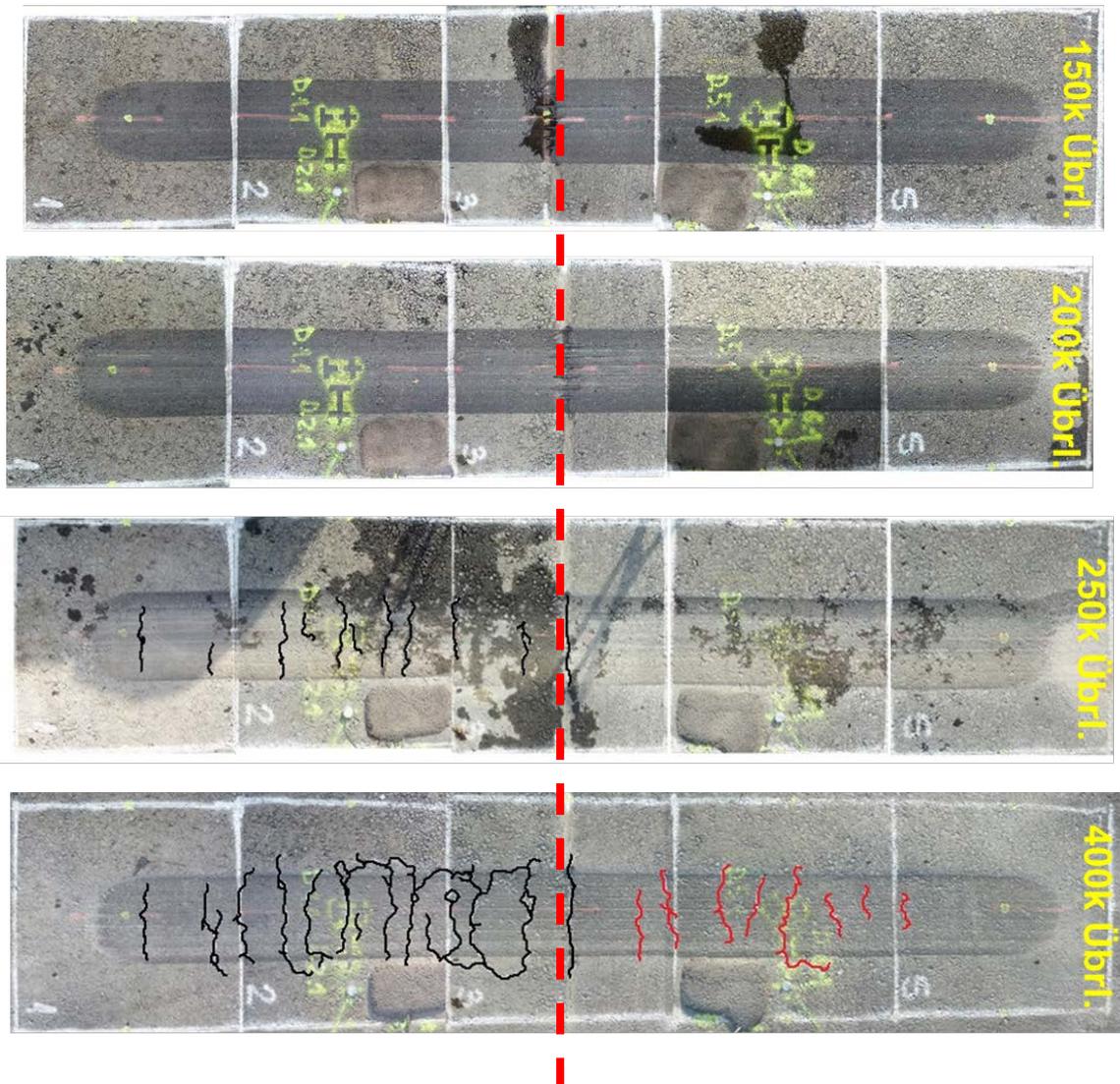
Versuchsobjekt 1
(AC T 22 S + RAP)

Referenz 1
(AC T 22 S)



**Versuchsobjekt 1
(AC T 22 S + RAP)**

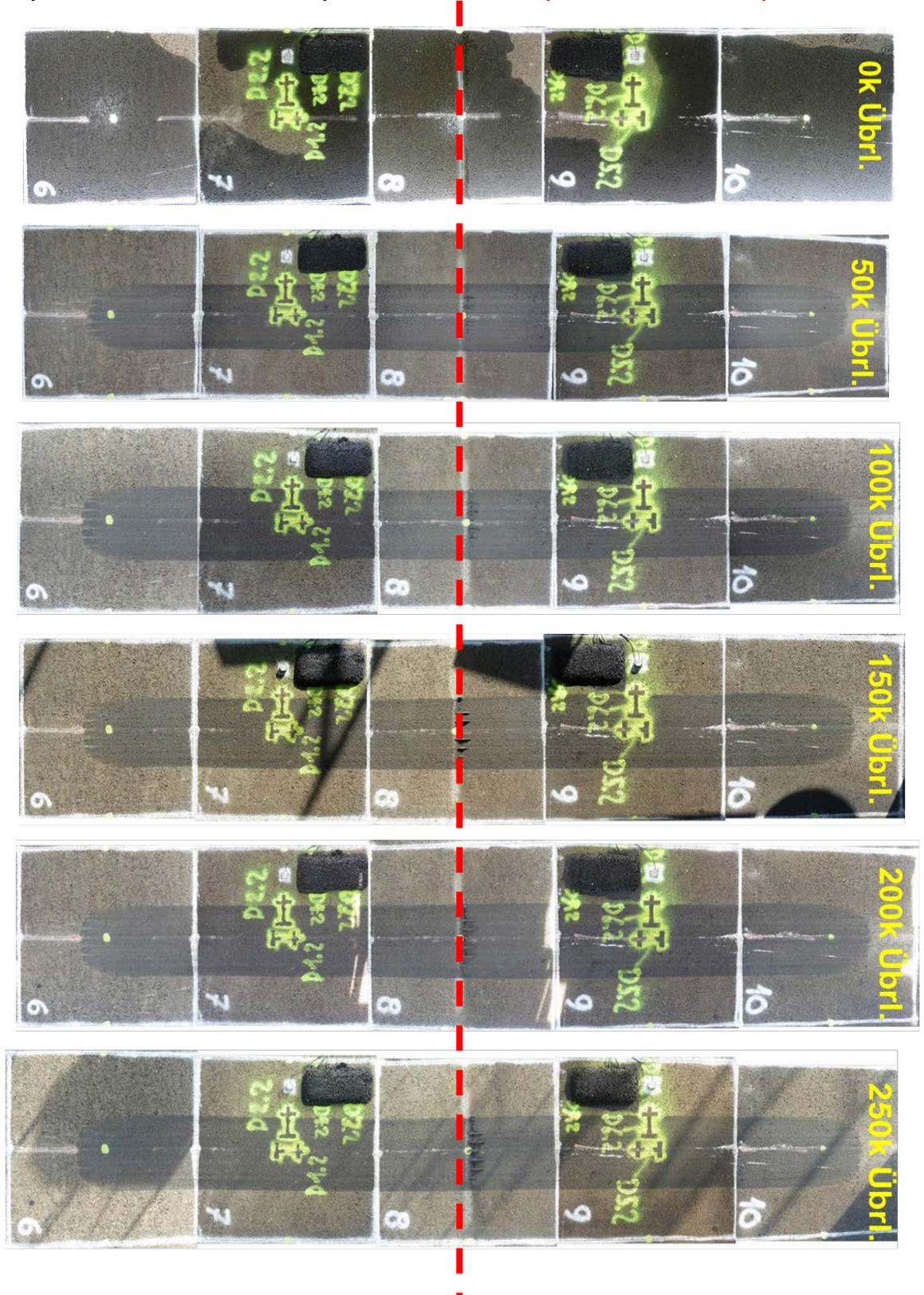
**Referenz 1
(AC T 22 S)**



III.2 Rissevolution Testfeld 2

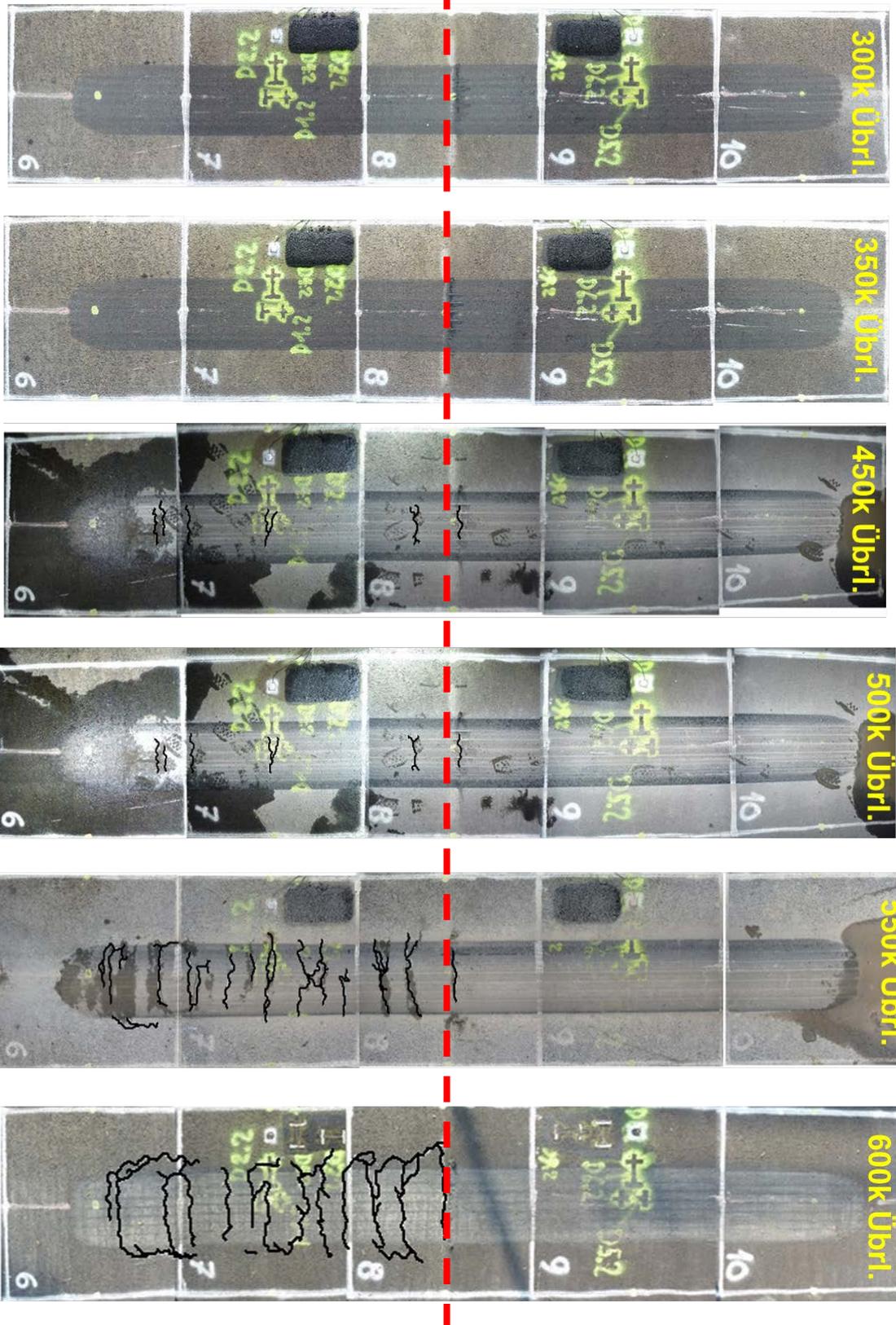
Versuchsobjekt 2
(AC T 16S / AC 11 S + RAP)

Referenz 2
(AC T 16S / AC 11 S)



Versuchsobjekt 2
(AC T 16S / AC 11 S + RAP)

Referenz 2
(AC T 16S / AC 11 S)



Glossar

Begriff	Bedeutung
APT	Accelerated Pavement Testing
ASTRA OFROU	Bundesamt für Strassen Office fédéral des routes
BAB	Belag AG Birmensdorf
EN	Europäische Norm
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Ev1	statischer Verformungsmodul des Bodens bei Erstbelastung
Ev2	statischer Verformungsmodul des Bodens bei Zweitbelastung
Evd	elastischer Verformungsmodul des Bodens
FWD	Falling Weight Deflectometer
IGT	Institute for Geotechnical Engineering
ITSR	Verhältnis der indirekten Zugfestigkeiten, englisch Indirect tensile strength ratio
ITS	Indirekte Zugfestigkeit, englisch Indirect tensile strength
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation (nicht mehr operativ)
LFG	Leichtes Fallgewichtsgesetz
MLS10	Mobile Load Simulator
ME	Verformungsmodul des Bodens
ME1	Verformungsmodul des Bodens bei Erstbelastung
ME2	Verformungsmodul des Bodens bei Zweitbelastung
RAP	Ausbauasphalt englisch Reclaimed Asphalt Pavement
SN	Schweizer Norm
ITSR	Verhältnis der indirekten Zugfestigkeiten, englisch Indirect tensile strength ratio
ITS	Indirekte Zugfestigkeit, englisch Indirect tensile strength
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

Literaturverzeichnis

-
- [1] Seeberger, M., Hugener, M., "Recycling von Ausbauphosphal in Heissmischgut Einzelprojekt EP1: VSS 2005/452 Optimaler Anteil an Ausbauphosphal", Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
- [2] Hugener, M., "Recycling von Ausbauphosphal in Heissmischgut - Einzelprojekt EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen mit Ausbauphosphal, VSS 2005/453", Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
- [3] Dünner, S., (2013), "Forschungspaket: Recycling von Ausbauphosphal Einzelprojekt EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung, Forschungsauftrag VSS 2005/454", Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Forschungsbericht Nr 1446, 69p.
- [4] Poulikakos, L. "Recycling von Ausbauphosphal in Heissmischgut - Einzelprojekt EP4: Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Strassenbelägen mit Ausbauphosphal, Forschungsprojekt VSS 2005/455", Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
- [5] Dumont, A.-G., Bueche, N.; Pittet, M., "Recycling von Ausbauphosphal in Heissmischgut - Einzelprojekt EP5: - VSS 2005/456 Mischgutoptimierung von Recyclingbelägen", Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
- [6] Choubane, B. (2014), "Accelerated pavement testing and florida's experience", International Journal of Pavement Research and Technology, 7(2).
- [7] Hua, J. (2000), "Finite element modeling and analysis of accelerated pavement testing devices and rutting phenomenon", PhD Thesis, Purdue University, Retrieved from [http://search.proquest.com/docview/304652077?accountid=28439. \(304652077\)](http://search.proquest.com/docview/304652077?accountid=28439. (304652077))
- [8] Teng X.-Q. et al. (2008), "Application of finite element analysis to access the rutting potential in asphalt pavements", Proceedings of the 1st International Symposium on Transportation and Development, Volume 319, 2008, 480 – 485m
- [9] Scazziga, I. (1973), "Der Rundlauf als Mittel der Oberbaudimensionierung", Inst. f. Strassen- und Untertagbau, ETH Zürich, 174p
- [10] Scazziga I., et al.(1994), "Vergleich von Oberbauvarianten für Kantons- und Gemeindestrassen (Rundlauf-versuch Nr. 3)", Schlussbericht zu Forschungsauftrag 35/80 und 17/85, UVEK/ASTRA Report Nr. 316
- [11] Arraigada, M., Kalogeropoulos, A., Hugenschmidt, J., Partl, M.N., Caprez, M., Rabaiotti, C. (2009), "Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen", Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. ASTRA 2004/018, Bericht Nr 1261
- [12] Arraigada, M. et al. (2012), "Initial tests results from the MLS10 Mobile Load Simulator in Switzerland", Advances in Pavement Design through Full scale Accelerated Pavement Testing – Jones, Harvey, Mateos & Al – Qadi (Eds.)
- [13] Partl, M.N., Arraigada, M. (2011b), "Der neue Mobile Load Simulator MLS10", Strasse und Autobahn, 62, Nr. 4 April, 252 – 257
- [14] Partl, M.N., Arraigada, M.(2011a), "Beschleunigte Verkehrslastsimulation mit dem Mobile Load Simulator MLS10", Strasse und Verkehr, Nr. 3 März, 32 – 38
- [15] Arraigada, M., Partl, M.N., Kato, H., Pugliesi, A., Treuholz, A. (2013) „Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz“, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. Forschungsauftrag 2007/011, Bericht Nr. 1432
- [16] Arraigada, M., Treuholz, A., Partl, M.N. (2014) „Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10“, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. ASTRA 2011/004, Bericht Nr. 1462
- [17] West, R., Kvasnak, A., Tran, N., Powell, B., & Turner, P. (2009). "Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes Laboratory and Accelerated Field Performance Testing at the National Center for Asphalt Technology Test Track", [Article]. Transportation Research, Record (2126), 100-108. doi: 10.3141/2126-12
- [18] Wu, J., & Ye, F. (2014), "Analysis for rutting deformation of asphalt pavement based on accelerated pavement testing with MLS66", Jianzhu Cailiao Xuebao/Journal of Building Materials, 17(3), 406-413
- [19] Wu, J. et al. (2012): "Rutting resistance of asphalt pavements with fine sand subgrade under full – scale trafficking at high and ambient air temperature", Advances in Pavement Design through Full – scale Accelerated Pavement Testing – Jones, Harvey, Mateos & Al – Qadi (Eds.)
- [20] Partl, M.N., Hugener, M. "Recycling von Ausbauphosphal in Heissmischgut - Initialprojekt, Forschungsprojekt VSS 2005/451 Bundesamt für Strassen", Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2007, Forschungsbericht Nr. 1242, 66p.
-

- [21] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), **“Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton”**, SN 640 431-1-NA (EN 13108-1)
- [22] Sirin, O. et al. (2007), **“Evaluation of performance characteristics of the heavy vehicle simulator in Florida”**, Building and Environment 42, 1270-1277
- [23] Bayat, A. et al. (2010), **“Flexible pavement response under dynamic wheel loads – a CPATT full – scale instrumented test road study”**, Proceedings Annual Conference – Canadian Society for Civil Engineering Volume 2, 2010, 1264 – 1273
- [24] Hugo, F. et al. (2012): **“International case studies in support of successful applications of accelerated pavement testing in pavement engineering, Advances in Pavement Design through Full – scale Accelerated Pavement Testing”**, Jones, Harvey, Mateos & Al – Qadi (Eds.)
- [25] Villiers, C. et al. (2005), **“Interpretation of transverse profiles to determine the source of rutting within an asphalt pavement system”**, (Conference Paper), Transportation Research Record, Issue 1905, 2005, 73 – 81
- [26] Hugo, F., Epps Martin, A. L., 2004, **“Significant Findings from Accelerated Pavement Testing”**, NCHRP Synthesis 325, Transportation Research Board, Washington
- [27] Bueche, N.; Vanelstraete, A.; Dumont, A.-G., (2007) NR2C, **“New Road Construction Concepts. Work Pack-age 2: Interurban infrastructures. Concept and design of selected innovations for interurban infrastructure. Development of high performance underlayers with low cost materials and high percentage of reuse”**, LAVOC-REPORT-2008-038, EPFL
- [28] Perret, J. (2003). **“Déformations des couches bitumineuses au passage d'une charge de trafic”**, Thèse 2786 EPFL. Retrieved from <http://infoscience.epfl.ch/record/33261>
- [29] Perret, J., Dumont, A. G., Turtshy, J. C., & Ould-Henia, M. (2001). **“Evaluation des performances de nou-veaux matériaux de revêtement. 1ère partie: Enrobés à haut module. VSS 1996/035”**, Bundesamt für Strassen, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, No 1000, 104p.
- [30] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), **“Walzasphalt: Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten”**, SN 640 430
- [31] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (1998), **“Böden - Plattendruckversuch EV und ME”**, SN 670317b
- [32] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2006) **“Verdichtung und Tragfähigkeit – Anforderungen”**, SN 640 585b
- [33] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (1998), **“Gerät für den Plattendruckversuch E_v und M_e”**, SN 670312b.
- [34] A. Bohn, P. Ullidtz, R. Stubstad und A. Sørensen (1972), **“Danish Experiments with the French Falling Weight Deflectometer”**, Proc. 3rd International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1:1119–1128
- [35] H. Beckedahl, H. Hürtgen, E. Straube und H-W. Horz (1996), **„Begleitende Forschung zur Einführung des Falling Weight Deflectometer (FWD) in der Bundesrepublik Deutschland“**, Bonn-Bad Godesberg : Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Strassenbau. (Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik ; Heft 733.
- [36] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrsweesen FGSV (2016), **„Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Strassenbau, Kalibriervorschriften für das Leichte und das Mittelschwere Fallgewichtsgerät,“** TP BF-StB, Teil B 8.4
- [37] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), **„Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern“**, SN 670 406 (EN 12697-6)
- [38] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2013), **„Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt“**, SN 670 401 (EN 12697-1)
- [39] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2012), **„Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt -Teil 5: Bestimmung der Rohdichte“**, SN 670405 (EN 12697-5/AC)
- [40] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2000), **„Bituminöses Mischgut - Bestimmung des Schichtenverbunds (nach Leutner)“**, SN 670 461
- [41] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2015), **„Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 26: Steifigkeit“**, SN 670 426 (EN 12697-26)
- [42] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2005), **„Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern“**, SN 670 408 (EN 12697-8: 2003)
- [43] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), **„Asphalt: Prüfverfahren - Teil 2: Korngrößenverteilung“**, SN 670 402 (EN 12697-2)
- [44] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2015), **„Asphalt: Prüfverfahren für Heissasphalt –Teil 30: Probevorbereitung, Marshall Verdichtungsgerät“**, SN 670 430 (EN 12697-30)
- [45] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2015), **„Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 34: Marshall-Prüfung“**, SN 670 434 (EN 12697-34)

-
- [46] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2009), „**Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 22: Spurbildungstest**“, SN 670 422a-NA (EN 12697-22:2003/ A1: 2007)
-
- [47] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2009), „**Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt - Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät**“, SN 670 433a-NA (EN 12697-33: 2003 / A1: 2007)
-
- [48] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), „**Asphalt: Prüfverfahren – für Heissasphalt –Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörper**“, SN 670 412 (EN 12697-12)
-
- [49] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), „**Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften - Flieskoeffizienten von Gesteinskörnungen**“, SN 670 902-6 (EN 933-6)
-
- [50] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2005), „**Prüfverfahren – für Heissasphalt –Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern**“, SN 670 423 (EN 12697-23: 2003)
-
- [51] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2005), „**Prüfverfahren – für Heissasphalt –Teil 9: Bestimmung der Bezugsraumdicke, Gyrator-Verdichter**“, SN 670 409 (EN 12697-9: 2002)
-
- [52] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2008), „**Asphalt - Prüfverfahren für Heissasphalt–Teil 31: Herstellung von Probekörpern mit dem Gyrator-Verdichter**“, SN 670 431a (EN 12697-31: 2007)
-
- [53] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), „**Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel– Bestimmung der Nadelpenetration**“, SN 670511 (EN 1426)
-
- [55] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2016), „**Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel– Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren**“, SN 670 512 (EN 1427)
-
- [56] N.Bueche, J.Dumoulin, T.Sedran, J.-P.Marchand, D.Kokot, B.Kalaman et al.(2006) , „**NR2C-New Road Construction Concepts- WP2 Concept and design of selected innovations for interurban infrastructure - Development of high performance base layers with low cost materials and high percentage of re-use**“
-
- [57] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (2006), „**Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Strassen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen**“, SN 670103b (EN 13043: 2002 / AC:2004)
-
- [58] Europäisches Komitee für Normung CEN (2017), „**Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren**“, SN EN 12607-1
-
- [59] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS (20016), „**Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Brechpunktes nach Fraass**, SN 670 507 (EN 12593) ()
-
- [60] Zaumanis, M. and R.B. Mallick, **Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art**. International Journal of Pavement Engineering, 2015. 16(1): p. 39-55
-
- [61] West, R., et al., 2012. Phase IV NCAT **pavement test track findings**. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, Report Number NCAT 12-10
-
- [62] Arnold, C., et al., 2012. **Unlocking the full potential of reclaimed asphalt pavement (rap): high quality asphalt courses incorporating more than 90% RAP: a case study**. In: 5th Euroasphalt and Eurobitume congress, 13–15 June 2012 Istanbul, Turkey. Istanbul: European Asphalt Pavement Association, Paper No. 05EE–187
-
- [63] Zaumanis, M., R.B. Mallick, and R. Frank, **100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits**. Transportation Research Procedia, 2016. 14: p. 349
-

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: 12.2.2018

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2005/457
 Projekttitel: Forschungspaket Recycling von Ausbausphalt in Heissmischgut: VP6 In-situ Validierung
 Enddatum: 06.11.2017

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Die praxisorientierte Validierung der Ergebnisse des Forschungspaketes zum Heissrecycling von Asphaltbeton hat sich auf zwei Mischgüter mit einem hohen Anteil an RAP (Reclaimed Asphalt Pavement)-Material fokussiert:

- Tragschicht AC T 22 S mit 75% RAP
- Deckschicht AC 11 S mit 60% RAP

Hierzu wurden in einem ersten Schritt, basierend auf der im Einzelprojekt EP5 entwickelten Mix-Design-Methode, zwei Mischgüter mit einem hohen Anteil an RAP im Labor hergestellt, geprüft und optimiert. In einer weiteren Projektphase galt es diese Mischgüter unter realen Lasten auf ihre Praxistauglichkeit zu überprüfen.

Zu diesem Zweck wurden im Strasseninnovationspark Lenzburg aus den entwickelten Mischgüter zwei verschieden Versuchsbeläge aufgebaut. Der erste wurde einschichtig aus AC T 22 S mit 75% RAP mit einer Gesamtdicke von 80 mm gestaltet. Der zweite wurde hingegen zweischichtig gebaut aus einer Tragschicht AC T 16 S und einer Deckschicht aus AC 11 S mit 60% RAP mit der gleichen Gesamtdicke. Als Vergleichsbasis wurden analoge Referenzbeläge ohne RAP eingebaut.

Die Belastung erfolgte mit dem Verkehrslastsimulator MSL10, welcher in der Lage ist, durch beschleunigte Verkehrssimulation das Versagen eines Belages in einer verkürzten Zeitspanne herbeizuführen. Beide Belagsaufbauten wurden insgesamt mit 1'000'000 Zyklen bei Temperaturen zwischen 5 und 22°C belastet. Die Untersuchungen ergaben, dass die Versuchsbeläge mit hohem RAP-Gehalt eine niedrigere Dauerfestigkeit und folglich Lebensdauer aufwiesen als ihre entsprechenden Referenzen. Obwohl die Laborresultate keine grossen Unterschiede zwischen den Mischgütern mit und ohne RAP zeigten, wurde bei der Belastung mit dem Verkehrslastsimulator MSL10 bei beiden Recyclingbelägen eine frühere Schädigung in Form von Rissen festgestellt. Die Spurrinnenbildung war bis zum Erscheinen der ersten Rissen vergleichbar, erhöhte sich aber bei den Recyclingbelägen danach ebenfalls.

Es wird vermutet, dass einerseits der höhere Rundanteil der im RAP enthaltenen Mineralstoffe die Dauerhaftigkeit mindert und andererseits das Bindemittel trotz Zugabe eines Verjüngungsmittels nicht die gleiche Qualität wie ein neues Bitumen aufweist. Dabei kann das Verjüngungsmittel eine Rolle spielen, indem es die Struktur des verhärteten RAP-Bitumens nicht genügend und gleichmässig zu "verjüngen" vermag. Es wird abgenommen, dass die Vermischung von RAP-Bitumen, Zugabebitumen und Verjüngungsmittel teilweise ungenügend ist, was zu Inhomogenitäten, respektive geschwächerter Kohäsion und Adhäsionseigenschaften im Belag führt.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die beiden vorgesehenen Mischgutttypen wurden wie vorgesehen im Labor optimiert, anschliessend im Mischwerk hergestellt und auf dem ASTRA-Testgelände in Lenzburg zusammen mit Referenzbelägen ohne Recycling eingebaut. Es wurden total 1 Million Überrollungen mit der MLS-10 durchgeführt, die allerdings nicht ganz ausreichten um alle Belagsaufbauten zu schädigen. Es hat sich aber bei beiden Belagstypen gezeigt, dass die Beläge mit hohem Recyclinganteil unter verkehrähnlicher Belastung nicht die gleiche Dauerhaftigkeit aufweisen wie die Referenzbeläge ohne RAP. Das angestrebte Ziel, zwei Belagsaufbauten mit und ohne RAP direkt in-situ zu vergleichen, wurde somit erfüllt.

Folgerungen und Empfehlungen:

Die Resultate der Feldvalidierung zeigten, dass die verwendeten Laborprüfungen nicht geeignet waren, um die unterschiedliche Dauerhaftigkeit der Beläge vorherzusagen. Bis zur Rissbildung sind die Resultate noch vergleichbar, aber nach dem Auftreten der ersten Schädigung nicht mehr. Die Auswahl der Prüfmethode muss deshalb überdacht werden und insbesondere auch Prüfungen für die Rissfortschreitung berücksichtigt werden. Zudem ist die Wirkung des Verjüngungsmittels, sowie der Einfluss der inhomogenen Vermischung von RAP-Bindemittel, Zugabebitumen und Verjüngungsmittel genauer zu untersuchen. Auf jeden Fall sollten sich die Untersuchungen nicht nur auf das Labor beschränken, sondern müssen in der Praxis validiert werden, sei dies durch beschleunigte Belastung mittels MLS10 oder an Teststrecken.

Publikationen:

Field Validation of High Content Recycled Asphalt Concrete Mixtures with Accelerated Pavement Testing: Preceding und Präsentation an der ISAP Konferenz vom 19.-21.Juni 2018 in Fortaleza

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Hugener

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Empa

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Dübendorf, 15. 2. 18

**FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK****Formular Nr. 3: Projektabschluss****Beurteilung der Begleitkommission:**

Beurteilung:

Die Resultate des Validierungsprojektes haben die Erwartungen nicht erfüllt und zeigten, dass die Recyclingbeläge mit hohem Recyclinggehalt nicht ebenbürtig sind zu konventionellen Belägen ohne RAP. Dies widerspricht den Resultaten, die im Labor gefunden wurden und es stellt sich die Frage, wo der Grund dazu liegt. Möglicherweise sind die heute angewendeten Testmethoden nicht geeignet oder ausreichend, um das Verhalten im Feld vorherzusagen. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass nur zwei Produkte validiert werden konnten und so ist es ungewiss, ob diese Resultate verallgemeinert werden können. Insbesondere stellt sich auch die Frage, was die Verjüngungsmittel für einen Einfluss auf die Belageigenschaften haben und ob andere Produkte zu einem anderen Resultat geführt hätten.

Umsetzung:

Vor einer Umsetzung sind weitere Forschungsanstrengungen notwendig um die offenen Fragen (siehe oben) zu klären.

weitergehender Forschungsbedarf:

- der Einfluss von Verjüngungsmitteln ist verstärkt zu untersuchen (z.T. schon im Gang)
- Labor-Prüfmethoden zur Vorhersage der Belageigenschaften sollten im Feld validiert werden
- Interaktion von neuem Bindemittel (Verjüngungsmittel) und altem RAP-Bindemittel während und nach dem Mischprozess
- Einfluss von Kornform und Anteil runden Mineralstoffkörnern bei hohem RAP-Anteil auf die Belageigenschaften
- wie können höhere Recyclinganteile erreicht werden

Einfluss auf Normenwerk:

Aufgrund der vorliegenden Resultate kann der in den Normen festgelegte Recyclinganteil nicht so stark erhöht werden, wie dies angestrebt wurde. Die bestehenden Anforderungen an den maximalen RAP-Gehalt in der SN EN 13108-1-NA:2013 müssen überdacht werden. Ein neues Konzept ohne Festlegung eines maximalen RAP-Anteil sollte angestrebt werden.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:Name: *Dünner* Vorname: *Sandra*Amt, Firma, Institut: *Walco Bertschinger Central AG***Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:**

VSS Fk3: i.V.

Verzeichnis der Forschungsberichte im Strassenwesen

Das Verzeichnis der in der letzten Zeit publizierten Schlussberichte kann unter www.astra.admin.ch (*Strassenbau --> Forschung im Strassenwesen --> Downloads --> Formulare*) heruntergeladen werden.