



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

Research Package on Recycling of Reclaimed As- phalt in Hot Mixes- EP4:Evaluation of Durability

**Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in
Heissmischgut - EP4: Beurteilung der Dauerhaftigkeit**

**Paquet de recherche de recyclage des matériaux
bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à
chaud– EP4 : Évaluation de la durabilité**

**Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and
Technology, Dübendorf
Lily D. Poulikakos, Dr. Sc. ETH, M.S. Civil Eng.
Manfred N. Partl, Prof. Dr. Sc. ETH, Dipl. Ing. ETH**

**Forschungsprojekt VSS 2005/455 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

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

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

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

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

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

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Research Package on Recycling of Reclaimed As- phalt in Hot Mixes - EP4:Evaluation of Durability

**Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in
Heissmischgut - EP4: Beurteilung der Dauerhaftigkeit**

**Paquet de recherche de recyclage des matériaux
bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à
chaud– EP4 : Évaluation de la durabilité**

**Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and
Technology, Dübendorf
Lily D. Poulikakos, Dr. Sc. ETH, M.S. Civil Eng.
Manfred N. Partl, Prof., Dr. Sc. ETH, Dipl. Ing ETH**

**Forschungsprojekt VSS 2005/455 auf Antrag des Schweizerischen
Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle

EMPA Dübendorf

Projektteam

Dr. Lily D. Poulikakos, EMPA Dübendorf
Prof. Dr. Manfred N. Partl, Empa Dübendorf

Zuständige Fachkommission VSS

Fachkommission 4: Baustoffe
Fachkommission 5: Bau- und Geotechnik

Gesamtprojekt (EP1, EP2, EP3, EP4, EP 5)

Projektleiter

Dr. M. Caprez, ETH Zürich

Begleitkommission

Präsident

Alex Nellen, Implenia Schweiz AG, Bern

Mitglieder

Thomas Arn, Lombardi SA, Minusio
Hans-Peter Beyeler, Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen
Andrea Bieder, Ammann Schweiz AG, Langenthal
Tony Bühler, Implenia Suisse SA, Satigny
Markus Grieder, Tiefbauamt Basel-Landschaft, Liestal
Martin Horat, Tiefbauamt Stadt Zürich, Zürich
Daniel Kästli, Kästli AG, Ostermundigen

Begleitkommission EP4

Präsident

Martin Horat, Tiefbauamt Stadt Zürich, Zürich

Mitglieder.

Thomas Arn, Lombardi SA, Minusio
Hans-Peter Beyeler, Bundesamt für Strassen ASTRA, Ittigen
Andrea Bieder, Ammann Schweiz AG, Langenthal
Tony Bühler, Implenia Suisse SA, Satigny
Markus Grieder, Tiefbauamt Basel-Landschaft, Liestal
Daniel Kästli, Kästli AG, Ostermundigen
Alex Nellen, Implenia Schweiz AG, Bern

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

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

Contents

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	8
Summary	9
 1 Introduction	 11
1.1. Scope	11
1.2. Background	11
1.3. Goals	12
1.4. Project Description	12
1.5. State of the Art	12
 2 Materials.....	 14
2.1. Selected Pavement Types	14
2.2. Materials.....	14
2.3. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)	15
 3 Selected Characterization Methods	 17
3.1. Binder	18
3.2.1. Dynamic Shear Rheometer (DSR).....	18
3.2.2. FTIR	18
3.2. Mixture.....	19
3.2.1. Water Sensitivity Tests Using the Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR)	19
3.2.2. Permanent Deformation Using French Wheel Tracking (Spurbildung).....	20
3.2.3. Particle Loss Using the Cantabro Test	20
3.2.4. Complex Stiffness Modulus.....	20
3.2.5. Fatigue Behavior	22
3.2.6. Cyclic Compression Test (Druckschwellversuch)	23
3.2.7. Water Susceptibility Using the Coaxial Shear Test (CAST)	26
 4 Aging Method	 27
 5 Experimental Results.....	 28
5.1. Mix Preparation Procedure	28
5.2. Extraction /Binder Content /Sieve Analysis, Bulk and Maximum Density of the Mixture ..	28
5.2.1. Mixture AC 11 S	28
5.2.2. Mixture AC EME 22 C2	29
5.3. Binder Analysis.....	30
5.3.1. Penetration and Softening Point	30
5.3.2. Dynamic Shear Rheometer (DSR).....	32
5.3.3. FTIR	34
5.4. Mechanical Tests	36
5.4.1. Marshall test.....	36
5.4.2. Water Sensitivity Tests Using the Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR)	37
5.4.3. Permanent Deformation Using French Wheel Tracking (Spurbildung).....	39
5.4.4. Particle Loss Using the Cantabro Test	42
5.4.5. Complex Stiffness Modulus.....	43
5.4.6. Fatigue Behavior	44
5.4.7. Cyclic Compression Test (Druckschwellversuch)	45
5.4.8. Indirect Tensile Strength at Low Temperature	46
5.4.9. Water Susceptibility Using the Coaxial Shear Test (CAST)	47
 6 Conclusions.....	 49
Acknowledgements	51
Abbreviations	52
References	53
Projektabschluss	55

List of Road Research Federal Reports 58

Zusammenfassung

Dieses Projekt ist ein Teilprojekt des Recycling Forschungspakets mit fünf Teilprojekten. Dieses Teilprojekt untersucht das Langzeitverhalten und die Performance des Ausbauasphalts. Es wurden eine Deckschicht AC 11 S und eine Hochmodul-Binderschicht AC EME 22 nach Schweizernormen chemisch und mechanisch mit Verwendung von 40% und 60% Ausbauasphalt (RAP) charakterisiert. Die hier präsentierten Ergebnisse beziehen sich exklusiv auf gealtertes Mischgut. Andere Teilprojekte im Recycling Paket haben gleiche Mischgüter in ungealtertem Zustand untersucht. In Einzelfällen wurden diese Ergebnisse auch hier präsentiert. Die künstliche Alterung wurde gemäss der AASHTO R30 Methode durchgeführt, da Langzeit Performance von Interesse war.

Es wurden chemische und mechanische Untersuchungen an Bindemitteln durchgeführt. Die chemischen Untersuchungen mit ATR-FTIR zeigten klare Zeichen einer Oxidation (Alterung) des Bindemittels mit Erhöhung des Karbonyl und Sulfoxid Indexes. Rheologische Untersuchungen mit DSR zeigten die Erhöhung des Modulwertes der Mischgüter für beide Materialien mit RAP, wobei bei hohen Temperaturen eine grössere Erhöhung der Modulwerte des Hochmodulmischguts festgestellt wurde. Ein grosser Unterschied zwischen den Eigenschaften dem Mischgut mit 40% RAP und 60% RAP wurde nicht festgestellt. Offensichtlich hat das Verjüngungsmittel die Erhöhung des RAP Anteils gut kompensieren können. Alterung und RAP haben die Penetrationswerte reduziert und den Erweichungspunktwert erhöht, wobei der Einfluss der Alterung grösser war als die Zugabe von RAP.

Da Asphaltbeläge hauptsächlich in drei Punkten versagen, Ermüdungsrisse, Thermalrisse und Spurbildung, wurden verschiedene Prüfmethoden benutzt, um das Langzeitverhalten des Materials festzustellen. Diese mechanischen Prüfungen haben gezeigt, dass die Zugabe von RAP das Langzeitverhalten und die Dauerhaftigkeit der Mischgüter nicht komprimiert hat. Beispielsweise wurde eine Erhöhung der Indirekten Zugswerte für AC 11 S und der Reduktion des Wertes für das Hochmodulmischgut festgestellt. Die Marshallwerte für das AC 11 S Mischgut mit RAP haben für die Stabilität und das Fliesen die normierten Anforderungen für Typ N erfüllt. Die Zugabe von RAP hat den Steifigkeitsmodul bei niedrigen Temperaturen nicht signifikant beeinflusst, obwohl bei hohen Temperaturen eine Erhöhung der EME Modulwerte festgestellt wurde. Widerstand gegen Ermüdung war besser für AC 11 S mit RAP als ohne und schlechter für AC EME ohne RAP als mit. Die Spurbildung, untersucht mit der Französischen Methode, hat gezeigt, dass die Prüfkörper mit RAP weniger Spuren bilden als solche ohne; mit allen Ergebnissen unter der normierten Anforderungen von 10% beziehungsweise 7.5%. Wie erwartet war die Spurbildung der AC EME erheblich geringer als beim AC 11 S. Unter Druckschwellversuche zeigten die Mischgüter mit RAP vor allem beim AC 11 S viel weniger permanente Deformationen und Dehnungsraten. Das Niedrigtemperaturverhalten der Mischgüter mit RAP wurde nicht signifikant beeinflusst, wobei die indirekten Zugswerte des Hochmodulmischguts niedriger waren als derjenige des AC 11 S. Die durch den Cantabro Test ermittelten Kornverlustwerte der Mischgüter mit RAP waren nicht erhöht. Zwei Methoden wurden für die Ermittlung der Wasserempfindlichkeit benutzt: KAST und ITSr. Beide Prüfungen zeigten keine statistisch signifikanten Veränderungen der Wasserempfindlichkeitswerte der Mischgüter mit RAP im Vergleich zu denjenigen ohne RAP.

Ein Vergleich mit den Anforderungen der Schweizernormen zeigt, dass die hier untersuchten Materialien die Anforderungen erfüllen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein hoher Anteil an RAP für Deckschicht AC und Binderschicht AC EME möglich ist und die Schweizernormen überarbeitet werden sollten, um diesen höheren Anteil zu ermöglichen.

Die Zugabe des gealterten Bindemittels des RAP im Mischgut kann das Mischgut verhärten und es spröder und weniger ermüdungsresistent machen. Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen, dass ein gealtertes Mischgut mit 40% und 60% RAP sich wie ein Originalmischgut (ohne RAP) verhalten kann.

Résumé

Ce projet est l'un des cinq sous-projets du paquet de recherche sur les matériaux des enrobés bitumineux recyclés (RAP) et il traite des performances à long terme et de la durabilité de ces matériaux. Dans ce but on a étudié les caractéristiques chimiques et physiques d'un enrobé AC11 S pour couche de roulement et un enrobé AC EME 22 à haut module pour couche de base selon les normes suisses avec une adjonction de 40% et de 60 % d'RAP. Les résultats présentés ont été obtenus exclusivement sur des éprouvettes après vieillissement. D'autres examens des mêmes enrobés ont été réalisés avant vieillissement dans des sous-projets d'un autre paquet de recherche sur le recyclage des enrobés bitumineux. Dans certains cas, des comparaisons ont été effectuées en utilisant les résultats obtenus sur les enrobés non vieillis. Pour l'étude de performances à long terme, le vieillissement accéléré a été effectué à l'aide de la méthode AASHTO R30.

L'examen des liants comprenait des analyses chimiques et des essais mécaniques. L'analyse chimique par spectroscopie infrarouge ATR-FTIR a démontré clairement l'existence d'une oxydation (vieillissement) des liants mise en évidence par l'augmentation des indices carbonyles et sulfoxydes. L'examen rhéologique au moyen du rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) a montré une augmentation à haute température du module des deux types de matériaux renfermant des RAP, avec une différence plus significative pour l'AC EME renfermant un liant plus dur. Les propriétés du liant extrait de l'enrobé AC11 S avec 40% d'RAP ne présentaient pas de différence significative par rapport à celles du liant extrait du même enrobé renfermant 60% d'RAP, ce qui indique que le régénérateur ajouté à l'enrobé avec 60% d'RAP était capable de compenser les effets de la teneur accrue en RAP. Le vieillissement et l'adjonction d'RAP provoquaient une diminution de l'indice de pénétration et une augmentation du point de ramollissement des liants; toutefois l'effet du vieillissement était plus marqué que celui de l'adjonction d'RAP.

Différentes méthodes ont été utilisées pour caractériser les principaux modes de dégradation des revêtements bitumineux que sont la fissuration par fatigue, la fissuration thermique et l'orniérage. Les essais mécaniques réalisés ont montré que l'utilisation d'RAP ne compromet pas les performances mécaniques à long terme et la durabilité des enrobés. On a par exemple constaté pour la résistance à la traction indirecte une augmentation sur l'enrobé AC11 S et une diminution sur l'enrobé à haut module. Les résultats de l'essai de stabilité et de fluage Marshall montrent que les valeurs pour l'enrobé AC11 S avec adjonction d'RAP se situent à l'intérieur des valeurs limites de la norme pour le type N. L'utilisation d'RAP n'affecte pas significativement le module de rigidité des matériaux examinés à basse température. Toutefois, à haute température, ce module augmente davantage pour l'enrobé AC EME que pour l'enrobé AC11 S. La résistance à la fatigue était légèrement meilleure pour l'enrobé AC11 S avec RAP que pour celui sans RAP et meilleure sur l'enrobé AC EME sans RAP que sur celui avec adjonction d'RAP. Les déformations permanentes mesurées sur des éprouvettes dans l'essai d'orniérage avec l'orniéreur LCPC montrent que les éprouvettes avec RAP après vieillissement présentent un orniérage inférieur à celui des éprouvettes sans RAP. Tous les résultats sont inférieurs à la valeur maximale de 10% ou 7.5% prescrite par la norme. En outre, la déformation permanente de l'enrobé à haut module AC EME avec 40 % d'RAP était, comme on pouvait s'y attendre, considérablement inférieure à celle de toutes les formes d'enrobé AC11S. De plus, sous charge de compression cyclique, les enrobés avec RAP, en particulier l'enrobé AC 11S, présentaient des contraintes cumulées et un taux de contraintes inférieurs à celui des enrobés sans RAP. Le comportement à basse température n'était pas significativement affecté par l'adjonction d'RAP; toutefois la résistance à la traction indirecte à basse température de l'enrobé à haut module était plus basse avec l'adjonction d'RAP que sans. L'adjonction d'RAP n'augmentait pas les valeurs des pertes de particules à l'essai Cantabro. La susceptibilité à l'eau a été évaluée au moyen d'essais ITSR et CAST. Ces deux types d'essais ont montré soit des variations statistiquement non significatives, soit des susceptibilités à l'eau comparativement plus basses des enrobés avec RAP.

La comparaison des résultats avec les valeurs des normes suisses montre que ces enrobés satisfont les valeurs requises par ces normes. Finalement ces résultats indiquent que l'utilisation accrue d'RAP dans les enrobés pour couches de roulement AC et pour couches de base EME devrait être propagée et qu'une adaptation des normes actuelles qui ne permettent pas l'utilisation d'RAP dans ces enrobés devrait être envisagée.

L'adjonction de bitumes vieillis provenant d'RAP dans les enrobés peut éventuellement accroître leur rigidité, provoquer une augmentation de leur fragilité et entraîner une diminution de leur résistance à la fatigue. Cette étude montre que, dans les essais de laboratoire, les performances après vieillissement d'enrobés renfermant 40% et 60% d'RAP sont comparables à celles d'enrobés produits avec des matériaux vierges.

Summary

This project is part of the research package on recycled asphalt concrete materials with five sub projects. This sub-project addresses the long term performance and durability of specific recycled asphalt concrete materials. To this end, a Swiss standard surface course AC11 S and a high modulus base course AC EME 22 were investigated regarding their chemical and mechanical characteristics with the addition of 40% and 60% RAP. The results presented herein are exclusively for aged materials. Other investigations on these same mixtures were performed on unaged samples in other sub-projects belonging to the joint recycling package. In some cases comparisons have been done using results of the unaged mixtures. Artificially short and long term aging was done using the AASH-TO R30 method as long term performance was of interest.

Investigation of the binders comprised chemical and mechanical investigations. Chemical analysis of the binders using ATR-FTIR showed clear evidence of oxidation (aging) of the binders exemplified by the increase in the carbonyl and sulfoxide indexes. The rheological investigation using the DSR showed an increase in the modulus of the materials containing RAP at higher temperatures for both types of materials with the difference being more significant in case of the harder binder of AC EME. The properties of the binder extracted from the AC11 S mixture with 40% RAP did not show a significant difference with the binder with 60% RAP indicating that the rejuvenator added to the mixture with 60% RAP was able to compensate for the additional RAP. Aging and addition of RAP decreased the penetration and increased the softening point of the binders; however, the effect of aging was more significant than the addition of RAP.

As asphalt pavements have three principle failure modes: fatigue cracking, thermal cracking and rutting, various test procedures are explored in order to characterize these aspects in the long term performance of the materials. The mechanical tests showed that the use of RAP did not compromise the long term mechanical performance and durability of the mixtures. For example an increase in the indirect tensile strength of AC 11 S and decreased in the high modulus mixture were seen. The results for Marshall flow and stability show that values for AC11 S mixtures with RAP are within normative limits for Type N. Use of RAP did not significantly affect the stiffness modulus of the materials investigated at lower temperatures. However, at high temperatures increase in the modulus of the AC EME was much more than AC11 S. Resistance to fatigue was slightly better for the AC11 S mixture with RAP than without and better for AC EME without RAP than with. Permanent deformation of samples measured with the French wheel tracking test shows that samples with RAP and aged had less rutting than those without RAP. All results are below the normative requirement of 10% and 7.5% maximum permanent deformation respectively. Additionally the permanent deformation of the high modulus base course, AC EME with 40% RAP was considerably below all forms of AC11 S as expected. In addition, under cyclic compressive load, the mixture with RAP, in particular the AC 11 S mixture had lower cumulative strain and strain rate than the mixture without RAP. Low temperature behavior was not significantly affected by the addition of RAP; however low temperature indirect tensile strength of the high modulus mixture was lower with RAP than without. Furthermore, the addition of RAP did not increase the particle loss values measured with the Cantabro test. Water susceptibility was evaluated using the ITSr and CAST. Both types of tests showed either statistically insignificant changes in the values or comparatively less water susceptibility of the mixtures with RAP.

Comparison of the results with the Swiss standards indicates that the required limits have been met. Furthermore, the results indicate that the use of high amounts of RAP in surface AC courses and EME base courses should be expanded especially as current standards do not allow the use of RAP in some surface courses.

The addition of aged bitumen from RAP in the mixture can potentially stiffen it and result in added brittleness and reduced fatigue resistance. It was shown that a mixture with 40% and 60% RAP in aged state can perform in laboratory tests as well as the mixtures produced with virgin materials.

1 Introduction

1.1. Scope

This sub-project (EP4) is part of the research package on recycled asphalt concrete with the following sub-projects with each sub-project with its own report as referenced below.

- EP1: Optimal amount of reclaimed asphalt pavement (RAP) [Seeberger 2014]
- EP2: Re-recycling of asphalt pavements [Hugener 2014]
- EP3: Material transfer and sustainability [Dünner 2013]
- EP4: Durability of bituminous layers with reclaimed asphalt pavement (RAP)
- EP5: Mix optimisation using recycled asphalt pavements (RAP) [Bueche 2014]

The overall scope of this project, in cooperation with other sub-projects, was to further the use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in Switzerland. The goal of this sub-project (EP4) specifically is to investigate the long term durability of these pavements by:

1. Defining the relevant properties of the constituents of RAP and the mixture with regard to durability.
2. Evaluate the appropriate test methods to determine these properties
3. Determination of the influence of type and amount of RAP and additives on these properties

Over the course of the project some of the goals of the sub-projects were adjusted. Points one and two defined above were addressed in EP1 and this sub-project (EP4) was able to implement those results. On the basis of the gained knowledge evaluation criteria for the durability of asphalt pavements with RAP was developed.

1.2. Background

According to the Swiss national annex [640 431-1b-NA, 2008] the allowed amount of RAP in the mixture depends on the type of pavement layer. These maximums are listed in Table 1. 1. As shown in this table the amount of allowed RAP also depends on whether or not the addition is in the cold mix or hot mix situation.

Table 1. 1 Amount of recycling material allowed in Mass% [640 431-1b-NA, 2008]

Mixture Type	Cold Mix	Hot Mix
Asphalt concrete surface courses AC S, AC H, AC MR, Splittmasticsasphalt, Porous asphalt	0	0
Asphalt concrete surface courses AC N, AC L, Asphalt concrete binder courses AC B, AC EME	≤15	≤30
Asphalt concrete base courses AC T, AC RAIL	≤25	≤60
Asphalt concrete subbase courses AC F	≤30	≤70

The addition of RAP can results in the following and therefore is restricted:

- Higher variation in the aggregate distribution that can result in a local compaction problem. Especially for the surface courses this can result in crack formation and reduced durability.
- Excessive crushing of the aggregates through re-building and re-heating that can result in reduced mechanical properties.
- The short mixing time does not allow the old and new binders to mix adequately and

can result in inhomogeneity in the binder distribution. The old brittle binder can result in inadequate adhesion properties and lead to crack formation and particle loss.

As a result of the above mentioned phenomena it is suspected that the addition of RAP can reduce the durability of asphalt pavements.

1.3. Goals

This sub-project investigated the influence of the amount of RAP on the durability of asphalt pavement layers and with it provides a basis to evaluate the limits given in the Swiss NA SN 640 431 as listed in Table 1. 1

In general the goals were:

- To provide the expert commission EK 5.01 with information that shows how the addition of RAP influences the durability of the layers.
- To show how the durability of the mixtures can be controlled
- To improve the understanding of the influence of the addition of RAP on durability .
- To specifically deliver data on:
 1. The influence of the quality of binder in RAP
 2. The evolution of the minerals
 3. Fatigue and water susceptibility
 4. Influence of rejuvenators and adhesion enhancing additives on durability

As the various sub-projects in this research package developed some of the above mentioned goals were realized. Specifically information on point 1, 2 can be found in the EP1 report [Seeberger 2014].

1.4. Project Description

The mixtures that were investigated were AC 11 S and AC EME 22 C2 and as shown in Table 1. 1, for these mixtures, the addition of RAP is not allowed. The AC 11 S mixture is also investigated in the other sub-projects and therefore there are synergies that can be used. For the evaluation of the durability of the chosen mixtures short term and long term aging is done as described in detail in chapter 4. The selected characterization methods are discussed in detail in chapter 3 and the results presented in chapter 5. The test methods are chosen specifically to characterize the binder, mixture and the mechanical performance of the laboratory produced specimen. As asphalt pavements have three principle failure modes: fatigue cracking, thermal cracking and rutting, various test procedures are explored in order to characterize these aspects in the long term performance of the materials.

1.5. State of the Art

Materials aspects in recycled asphalt concrete (RAC) are the subject of significant research interest worldwide. Key parameters are types of fillers and proportion of reclaimed asphalt pavement (RAP). Although long-term performance is a key to material selection, neither a complete fundamental base of knowledge nor a wide palette of experience are available to date. Some recent examples of research works in the public domain are mentioned in the sequel:

Hong et al [2010] reported on the Long-Term Pavement Performance (LTPP) of the Texas Specific Pavement Studies investigating the in situ performance of hot mix asphalt (HMA) with RAP based on about 16 years of data. The overall evaluation revealed that a well-designed mixture with 35% RAP could perform as satisfactorily as that produced with no recycled materials. Performance of up to 50% RAP containing surface mixtures showed that the high RAP mixtures were only slightly more susceptible to thermal cracking. Increase in RAP generally increased resistance to moisture damage. It was also shown by Doyle et. al [3] that high RAP content mixtures can be more susceptible to du-

rability problems.

Sun et al. [2011] have shown that using fine recycled concrete aggregate and coarse granite aggregate the moisture stability, high-temperature property, low-temperature property and fatigue property of asphalt mixtures were improved. Using different amounts of RAP, Arshad et al. [2012] have shown that mixtures containing RAP showed significant variability and the variability increased with the increasing RAP content.

There are still many open questions regarding the use of RAC, especially when it contains high amounts of RAP. One concern is related to the contribution of RAP to the stiffness of the mixture. Furthermore, an important question is how the old binder from RAP mixes or blends with the new binder and how that translates into the macro-mechanical properties. Huang et al. [2005] made a hypothesis that the binder in RAP forms a stiff layer around the RAP aggregates that in turn is coated with virgin binder resulting in a composite system that can enhance the performance of this composite material. Nahar et al. [2013] and Nazzal et al. [2013] have studied the blending between RAP binder and virgin bitumen both by atomic force microscopy (AFM) and dynamic shear rheometer (DSR). Nahar et al. studied the microstructures of the 'blending zone' with AFM. Using the averaged microstructural properties imaged by AFM, the fully blended binder properties were found to be in between those of the two individual binders. Also, the measurements obtained with the DSR showed that the complex modulus of the blended binder was situated in between the RAP binder and the virgin binder. In the study by Nazzal et al., it was reported that the blending occurs at the nano/microscale level in a fairly uniform manner and that the blended binder had significantly lower modulus than the RAP, but still larger than for the virgin bitumen. The authors have also reported that RAP binder brought adverse effects to the adhesion properties. A correlation between the nano/microstructural properties and the macro-mechanical properties is still missing.

2 Materials

2.1. Selected Pavement Types

In this project two types of pavements and five mixtures have been investigated as listed in *Table 2. 1*. The first type AC 11 S is an asphalt concrete surface course that is produced with 0%, 40% and 60% RAP. The second type of pavement AC EME 22 C2 a high modulus base course was produced with 0% and 40% RAP. As a large number of experiments was planned, each mixture was produced in two batches of 150 kg each leading to two designations in some cases. Mix number 2 is highlighted in red as it is also used in the other sub-projects and therefore provides a basis for comparison. All mix designs used in this sub-project were performed in EP1 and more information can be obtained from the relevant report [Seeberger 2013]. The choice of the mixtures was in coordination with the other sub-projects.

Table 2. 1 Selected materials

Mix No.	Pavement type	RAP [%]	Mix designation
1	AC11 S	0	Mx05b, Mx05c
2	AC11 S	40%RAP1	Mx07a, Mx07b
3	AC11 S	60%RAP1 with rejuvenator	Mx10b
4	AC EME 22 C2	0	Mx30b
5	AC EME 22 C2	40%/RAP1 and 2 1:2 proportion	Mx32d

Notes:

RAP-A RAP 1=fine grained; RAP2=coarse grained

2.2. Materials

Table 2. 2 shows the materials used in the mixtures and their source and designation.

Table 2. 2 List of the materials used

Empa-Code	Description
RP- Min1	Filler BERAG
RP- Min2	Minerals BERAG Fraction 0/2
RP- Min3	Minerals BERAG Fraction 2/4
RP- Min4	Minerals BERAG Fraction 4/8
RP- Min5	Minerals BERAG Fraction 8/11
RP- Min6	Minerals BERAG Fraction 11/16
RP- Min7	Minerals BERAG Fraction 16/22
RP-RAP1	RAP A 0/11
RP-RAP2	RAP A 11/22
RP-Bit1	Bitumen 160/220
RP-Bit2	Bitumen 70/100
RP-Bit3	Bitumen 10/20

2.3. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)

Table 2. 3 shows the properties of the RAP materials used in the mixtures with the mineral gradation shown in Figure 2. 1. A photograph of RAP A is shown in Figure 2. 2.

Table 2. 3 Properties of RAP1 and RAP2 two fractions of RAP A (n.m. not measured)				
Empa-Designation			RP-RAP1	RP-RAP2
Description			RAP gradation 0/11	RAP gradation 11/22
Water content		Mass-%	1.61	0.35
Binder content		Mass-%	6.0	3.0
Maximum density		kg/m ³	2406	2587
Aggregate gradation	Sieve[mm]	Masse-%		
	31.5		100%	100%
	22.4		100%	100%
	16.0		100%	82%
	11.2		99%	47%
	8.0		93%	34%
	5.6		82%	27%
	4.0		71%	24%
	2.0		52%	18%
	1.0		38%	14%
	0.500		29%	11%
	0.250		21%	8%
	0.125		16%	6%
	0.063		12%	4%
PAK-content (16 EPA-PAK)		mg/kg	2000 ±1000	n.m.
Reclaimed Binder				
Penetration		0.1 mm	28	34
Softening point (Ring and Ball)		°C	60.6	57.8

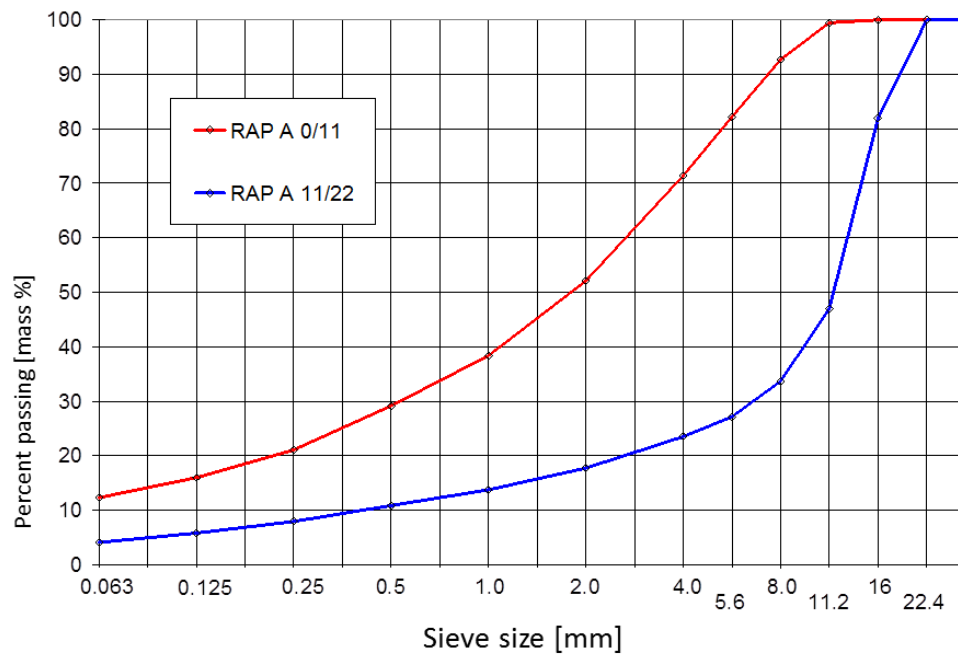


Figure 2. 1 Gradation of the mineral aggregates obtained from extracted minerals from RAP A (RAP1=RAPA 0/11; RAP2=RAPA 11/22)



Figure 2. 2 RAP A

3 Selected Characterization Methods

As asphalt pavements have three principle failure modes: fatigue cracking, thermal cracking and rutting, various test procedures are used in order to characterize the long term performance of the material. As listed in *Table 3. 1*, 12 characterization methods for the mixtures, the binder and mechanical performance of laboratory prepared specimens have been used in order to obtain a full set of data about the performance of the selected materials. In addition for the surface courses AC 11 S, the Cantabro test is used as the base courses do not experience particle loss.

Table 3. 1. Characterization methods

Characterization Nr.	Characterization Type	Characterization Method	Comments
1	Mixture	Extraction /Binder content /Sieve Analysis, Bulk and Max Density	
2	Binder	Softening point	
		Penetration	
3		Dynamic shear rheometer (DSR)	
4		Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)	
5	Mechanical Tests	Marshall test	
6		Water susceptibility (ITSR)	
7		Elastic stiffness modulus (IT-CY)	5°C, 10°C, 20°C, 30°C
8		French wheel tracking	
9		Fatigue: Indirect tensile strength (Spaltzug-Schwell, German std.)	
10		Cyclic compression, (Druckschwellversuch)	Permanent def. warm temp
11		Indirect tensile strength (-10°C)	cold temp behavior
12		Cantabro (Particle loss)	On AC 11 S
13		Water susceptibility with CAST	

Some of the experimental techniques are presented in detail in the sequel:

3.1. Binder

3.2.1. Dynamic Shear Rheometer (DSR)

This European Standard [EN 14770:2005] specifies the dynamic shear rheometer (DSR) as a method of measuring the rheological properties of bituminous binders. The procedure involves determining the complex shear modulus and phase angle of binders over a range of test frequencies and temperatures when tested in oscillatory shear mode.

From the test, the norm of the complex shear modulus, $|G^*|$, and its phase angle, δ , at a given temperature and frequency can be calculated, as well as the real and imaginary components, G' , G'' , of the complex shear modulus as shown in equations 3.1 to 3.3. The DSR was used to determine the rheological properties of the reclaimed binders after the aging process. The frequency range was 0.1 to 20 Hz and the temperature range was from 10 to 80°C.

$$G' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta \quad (3.1)$$

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (3.2)$$

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (3.3)$$

In the above equations, G' and G'' are the real and imaginary parts of the complex modulus G^* and δ is the phase angle.

3.2.2. FTIR

In order to characterize chemical changes in the binders as a result of oxidation due to artificial aging, Attenuated Total Reflectance Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR) was used. ATR-FTIR measurements allow the identification of certain functional groups in bitumen. Infrared spectroscopy measures the infrared light absorbed by bonds in molecules when the infrared light has the same frequency as the vibration frequency of the bonds, enabling identification of chemical functionalities. The infrared spectrum represents the intensity of the spectral peaks, corresponding to the different bonds/functional groups, as a function of the wavenumber. The intensity of the peaks is a function of the concentration of the bonds/functional groups. In the case of aging in bitumen, changes in the intensity of the spectral peaks corresponding to carbonyl and sulfoxide functional groups are relevant as reported in the literature [Karlsson 2003, Petersen 2011]. The carbonyl functional groups of different compounds such as carboxylic acids, esters, anhydrides, ketones and aldehydes are generally located in the region of the spectrum from 1650-1800 cm^{-1} .

The ATR-FTIR measurements were performed at 23 °C in a Bio-Rad FTS 6000 Fourier Transform Infrared Spectrometer in the Attenuated Total Reflectance (ATR) mode with a diamond crystal. The spectra were collected in the 4000 to 600 cm^{-1} wavenumber range with a resolution of 4 cm^{-1} , and each final spectrum represented an accumulation of 32 spectra. The peak areas (A) under the curve of the functional groups of interest were integrated and analyzed using the Digital Resolutions Pro 4.0 software. Of particular interest were the peak corresponding to the carbonyl stretching vibration (peak centered around 1700 cm^{-1}), $A_{\text{C=O}}$, the sulfoxide stretching vibration (centered around 1030 cm^{-1}), $A_{\text{S=O}}$, and the peaks related to the asymmetric deformation vibration of CH_2 and CH_3 (around 1455 cm^{-1}) and to the symmetric deformation vibration (bending vibration) of CH_3 (around 1376 cm^{-1}), A_{CH_2} and A_{CH_3} . The limits of integration for the calculation of the areas under the peaks were taken as the inflexion points (deepest valley values) of each side of the peak. In the case of the carbonyl functional group the peaks were situated in the region between 1667 and 1722 cm^{-1} and in the case of sulfoxide functional group in

the region between 984 and 1047 cm^{-1} .

The carbonyl functional group has been used to characterize the level of bitumen oxidation and a linear relation between increase of the log of viscosity and the increase in carbonyl concentration during bitumen aging procedures has been established [Karlsso 2003 and references therein]. The use of ATR-FTIR spectroscopy allowed to monitor the change in the spectral peaks corresponding to oxidized molecules. It has been reported that the main organic component containing carbonyl functional groups in bitumen are ketones and that it is formed primarily from the oxidation of benzyl carbons in side chains attached to highly condensed aromatic ring systems [Dorrence 1974, Petersen 1998]. The other major functional group used to characterized oxidation level of bitumen is the sulfoxide functional group. Sulfoxide functional group is often produced in higher amounts than ketones, mainly in bitumen containing high sulfur content. The formation of the carbonyl and sulfoxide functional groups and its effect on viscosity properties is discussed by Karlsso [2003].

The indexes $I_{C=O}$ and $I_{S=O}$ for carbonyl and sulfoxide functional groups, respectively, were calculated using equations 3.4 and 3.5.

$$I_{C=O} = \frac{A_{C=O}}{A_{CH_2} + A_{CH_3}} \quad (3.4)$$

$$I_{S=O} = \frac{A_{S=O}}{A_{CH_2} + A_{CH_3}} \quad (3.5)$$

3.2. Mixture

3.2.1. Water Sensitivity Tests Using the Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR)

Water sensitivity of the samples was determined using the European standard [EN 12697-12] Method A: A set of six cylindrical test specimens was divided into two equally sized subsets and conditioned. One subset is maintained dry in a climate chamber at 25°C while the other subset is saturated and stored in water at elevated conditioning temperature (40°C) for 68 to 72h (Figure 3. 1). After conditioning, the indirect tensile strength of each of the two subsets is determined in accordance with EN 12697-23 at the specified test temperature (22°C). The ratio of the indirect tensile strength of the water conditioned subset compared to that of the dry subset is determined in accordance to equation (3.7) and expressed in percent.

$$IDT = \frac{2F}{\pi D h} \quad (3.6)$$

$$ITSR = 100 \cdot \frac{IDT_w}{IDT_d} \quad (3.7)$$

Where

ITSR is the indirect tensile strength ratio, in percent (%);
 IDT_w is the average indirect tensile strength of the wet group, (kPa);
 IDT_d is the average indirect tensile strength of the dry group, (kPa).
 F is the force (N),
 D and h are the diameter and the height in mm respectively.



Figure 3. 1 Water conditioning of specimen at 40°C

3.2.2. Permanent Deformation Using French Wheel Tracking (Spurbildung)

Permanent deformation or rut formation was assessed using the French wheel tracking tests (Figure 5. 14 and Figure 5. 15) in accordance to the European standards [EN 12697-22]. In this test, the susceptibility of bituminous materials to deform is assessed by the rut formed by repeated passes of a loaded wheel at constant temperature of 60°C. When comparing different mixtures, it was shown that the use of the French wheel tracking test helps improve the information on materials behavior [Partl 2009].

3.2.3. Particle Loss Using the Cantabro Test

The European Standard describes a test method for determining the particle loss of porous asphalt mixtures [EN 12697-17]. It is used in this case to assess the particle loss of recycled asphalt concrete specimen as it was suspected that the mixtures containing RAP might be more susceptible to particle loss. Particle loss (PL) is assessed by the loss of mass of samples after 300 turns in the Los Angeles machine (Figure 5. 19) at 30 rev/min to 33 rev/min. Five cylindrical specimen (100mm diameter, 65mm height) specimen were used for this test that were conditioned in an environmental chamber for 4h at 25°C and were also tested at 25°C.

3.2.4. Complex Stiffness Modulus

Using indirect tensile tests on Marshall compacted 100 mm diameter by 65 mm height cylindrical specimens (IT-CY), the European Standard EN 12697-26 procedure was used to characterize the so called stiffness modulus of bituminous mixtures in the linear viscoelastic range (LVE). This was achieved by keeping applied strains under 50 micro-strains. Three test specimens were used at each testing temperature. A repeated load with a haversine waveform (max 10kN, rise time 124ms) with rest periods and pulse repetition of 3s (Figure 3. 2, Figure 3. 3) was applied along the vertical diameter of the specimen via the loading platens. The experimental setup is shown in Figure 3. 4. The specimen were conditioned in the climate chamber at the test temperature of 5°C (only for AC11S), 10°C, 20°C and 30°C for four hours before the tests. After the initial adjustment phase, the stiffness modulus was determined twice by calculating the average from first and second five loading pulses using the ratio of force and the displacement using equation (3.8) as prescribed in the standard. The reported modulus is the average of the two.

$$E = \frac{F \cdot (\mu + 0.27)}{z \cdot b} \quad (3.8)$$

Where, E is the calculated stiffness modulus [MPa], F is the peak load [N], z is the ampli-

tude of the horizontal deformation [mm], h is specimen thickness [mm], μ is the Poisson's ratio defined in the standard to be 0.35. The test parameters are listed in Table 3. 2.

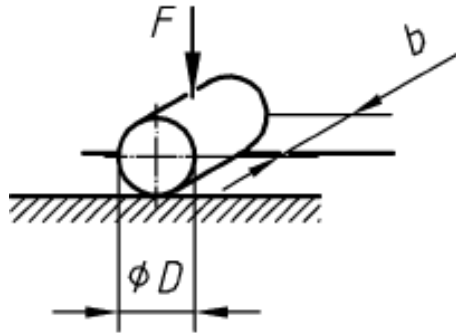


Figure 3. 2 Specimen and direction of load for the indirect tensile tests IT-CY [EN 12697-26:2004]

Table 3. 2 Test parameters for IC-TY	
Test parameter	Value
Temperature	5°C, 10°C, 20°C, 30°C
Peak load	10 kN
Rise time	124 ms
Pulse repetition period	3 s
Duration of the loading cycle	1.7 s
Rest period	1.5 s
Upper stress	0.35 MPa
Lower stress	0.025 MPa

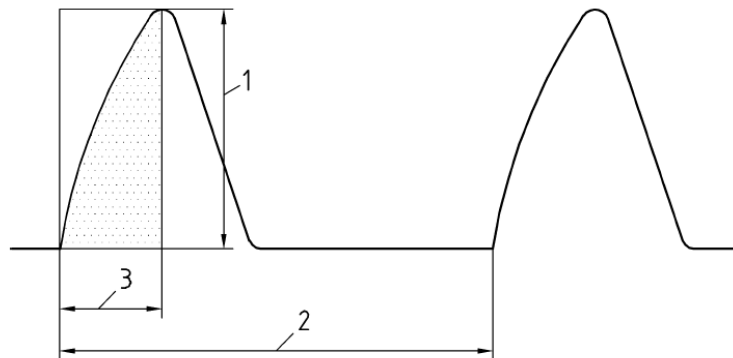


Figure 3.3 Form of load pulse, showing peak load (1), pulse repetition period (2) and the rise-time (3) [EN 12697-26:2004]

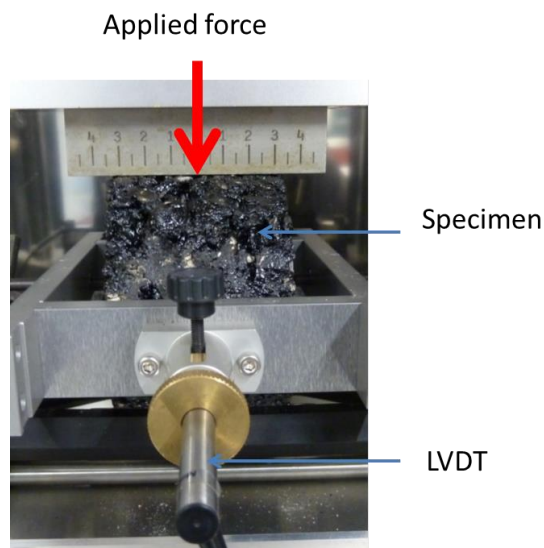


Figure 3.4 Experimental setup at Empa for the IT-CY test

3.2.5. Fatigue Behavior

The fatigue behavior was investigated using 100 mm diameter by 65 mm height cylindrical specimen employing the German standard AL-Sp Asphalt 09. The setup is the same as IT-CY shown in Figure 3.4 also using a servo-hydraulic testing apparatus. The principle of this test for fatigue is similar to the indirect tensile strength, where a cyclic sinusoidal load is applied to a cylindrical specimen. The loading frequency of 10Hz and temperature of 20°C was used. As required by the standard, three loading amplitudes are implemented allowing the loading cycles to reach the fatigue criterion that is between 10^3 and 10^6 cycles. The resulting strain in the middle of the specimen should be between 0.05 and 0.3 %. Through this vertical load a state of stress is produced in the middle of the specimen that leads to its eventual failure. A total of nine specimens were tested, three at each of three strain levels. The stress is determined using equation (3.8) with F and z being the difference between minimal and maximal load and deformation respectively. The stress and elastic strain in the middle of the specimen is determined using equation (3.9) and (3.10) respectively.

$$\sigma = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma \cdot (1 + 3\mu)}{|E|} \quad (3.10)$$

Where, σ is the horizontal stress in the middle of the specimen [MPa], F is the force [N], d and h are the diameter and height of specimen respectively [mm], ε_{el} is the elastic horizontal strain [‰], μ is Poissons ratio that was calculated to be 0.304. Equation (3.10) does not exactly correspond to equation (3.8).

The number of cycles is plotted against the so called “energy ratio” $ER(N)$ [MPa], which is defined as the product of stiffness modulus and number of cycles as shown in equation (3.11).

$$ER(N) = |E(N)| \cdot N \quad (3.11)$$

Where, $E(N)$ is the stiffness modulus at the particular cycle N . The fatigue behavior is defined through the number of cycles designated as N_{Makro} , where micro cracks begin to form and where $ER(N)$ reaches its maximum value and, dropping after posterior cycles (Figure 3. 5). The fatigue line is constructed using the following equation:

$$N_{Makro} = C_1 \varepsilon_{el,anf}^{C_2} \quad (3.12)$$

Where, $\varepsilon_{el,anf}$ is the elastic horizontal strain in the middle of the sample at the beginning of the experiment as defined in equation (3.10) [‰] and C_1 and C_2 are material specific parameters that are determined using a regression analysis.

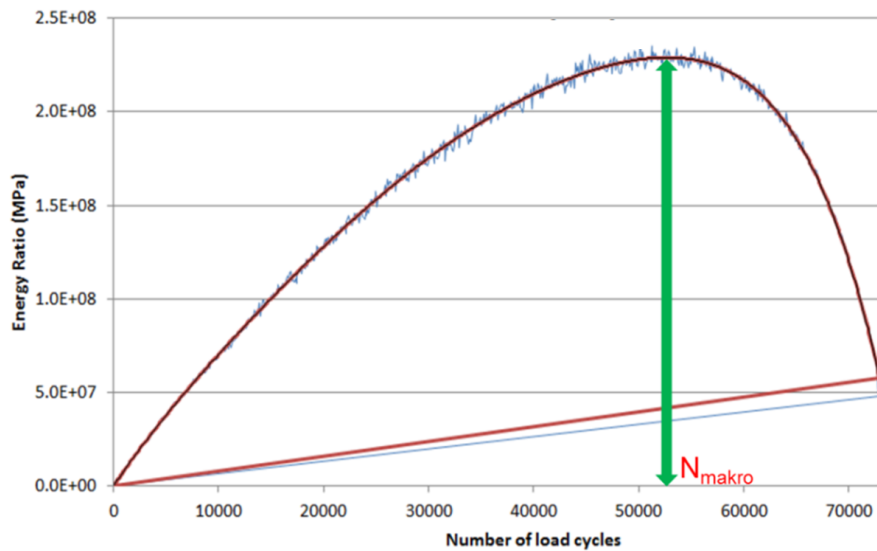


Figure 3. 5 Example demonstrating the number of loading cycles to N_{Makro}

3.2.6. Cyclic Compression Test (Druckschwellversuch)

The cyclic compression test is a kind of creep tests performed using the German standard TP asphalt-StB part 25 B 1. The test provides a method to evaluate the permanent deformation behavior of materials at warm temperatures using a haversine loading curve with a rest interval similar to the one shown Figure 3. 3. The specimens are cylindrical samples that are polished to 60 mm height and plane parallel. The compression stress is distributed evenly over the top of the sample through a platen that sits on it as shown in Figure 3. 6. For each test three specimens are used that are conditioned in an oven for 150 minutes at 50°C and tested at 50°C using the tests parameters listed in Table 3. 3.

The test is ended when 10,000 cycles are reached or the strain has reached 40%.

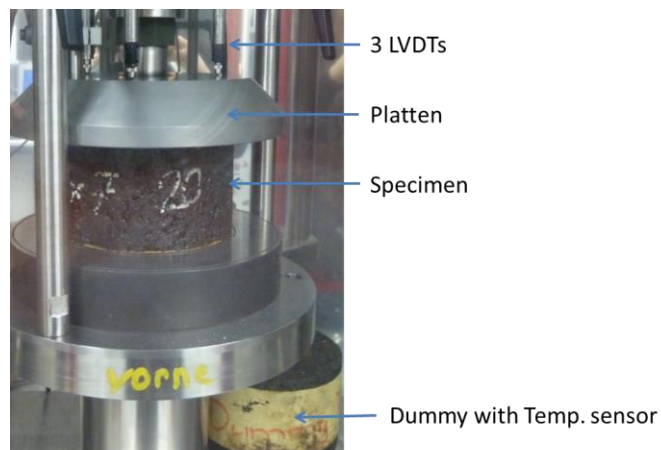


Figure 3. 6 Test set up for the cyclic compression test at Empa according to the German standards [TP asphalt-StB part 25 B 1]

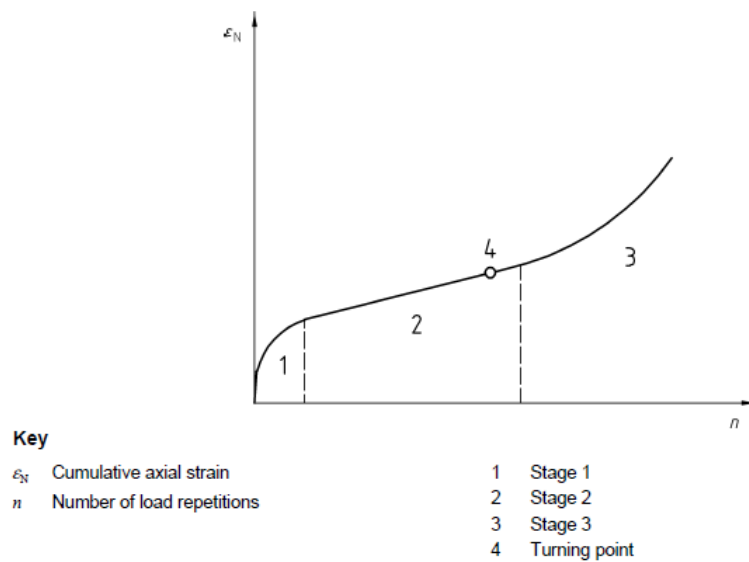


Figure 3. 7 Cumulative axial strain as a function of cycles [EN 12697-25]

The cyclic compression test is also a European standard test [EN 12697-25]. The main difference in the German procedure and the standardized EN is the size of the upper platen shown in Figure 3. 6. In the German standards the larger platen allows a uniform distribution of stresses on the sample. The creep curve shown in Figure 3. 7 displays the cumulative axial strain, expressed in %, of the specimen as a function of the number of load applications

Table 3. 3 Test parameters for the cyclic compression test [TP asphalt-StB part 25 B 1]

Parameter	Amount
Test Temp	(50±0.3) °C
Specimen diameter	(100±5) mm
Specimen height	(60±1) mm
Duration of load cycle	1.7 s
Duration of load	0.2 s
Duration of rest period	1.5 s
Upper stress	0.35 MPa
Lower Stress	0.025 MPa
Radial stress	0 MPa

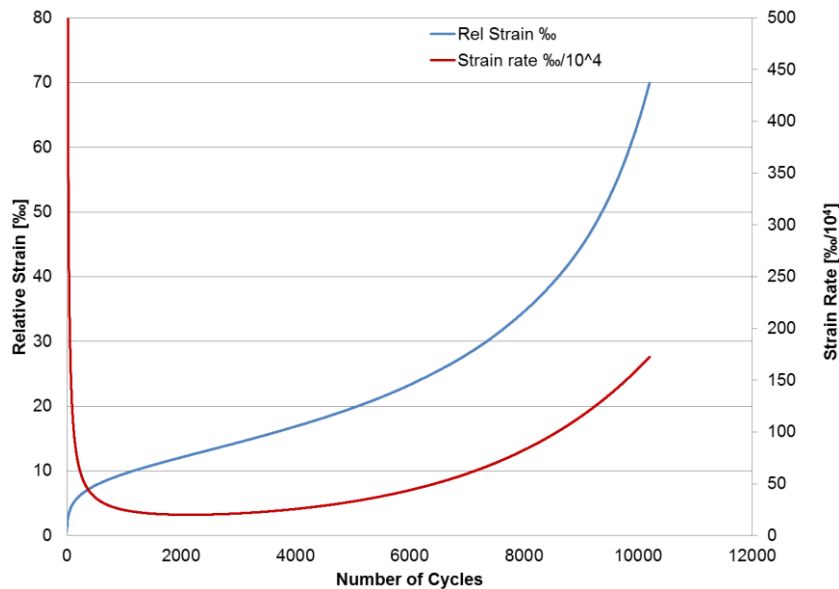


Figure 3. 8 Permanent strain and strain rate for a sample of Mx05

The permanent deformation ε_n is calculated after each cycle using the following formula:

$$\varepsilon_n = \frac{(h_0 - h_n)}{h_0} \cdot 1000 \quad (3.13)$$

Where,

ε_n = Strain after n cycles in ‰

h_0 = specimen height after initial loading

h_n = specimen height after n cycles of loading

Figure 3. 8 shows a typical impulse creep curve resulting from this test. Three phases can be distinguished. In phase I, at the beginning of the experiment, the rate of increase in permanent strain is progressively reduced. In phase II, the rate of increase of permanent deformation is close to constant. In phase III, the rate of increase in permanent defor-

mation increases exponentially. Depending on the testing conditions and on the mix, one or more stages may be absent.

A fit was done on the curve and the strain rate is calculated from the following formula:

$$\varepsilon_i^* = \frac{\varepsilon_{(i+1)} - \varepsilon_{(i-1)}}{n_{(i+1)} - n_{(i-1)}} \quad (3.14)$$

Where,

ε_i^* =strain rate at point i in %/loading pulse

ε_i =strain at point i in %

n=number of cycles at i

The strain rate in this case was calculated at the turning point and at 10,000 cycles.

3.2.7. Water Susceptibility Using the Coaxial Shear Test (CAST)

The coaxial shear test (CAST) is a cyclic, axially loading system to determine the complex modulus of an asphalt pavement [Poulikakos 2009, Partl 2010]. The setup shown in Figure 3. 9 allows loading along the same axis as that of traffic while the lateral confinement simulates a semi-infinite situation experienced on the road. The basic setup was modified so that the specimen is immersed in water with at least 10 mm of water above its the top surface. As the air voids in the mixtures under investigation here were relatively low (Table 5. 1), one vertical hole of diameter 6 mm was drilled in the sample to allow water to flow to the top of the sample allowing full emersion in water. This allows producing a vertical water flow and pumping action of water similar to the field situation. The test method produces mechanical damage due to repeated loading, temperature cycles and water immersion avoiding pronounced thermal stresses. In this case four temperature cycles from 25°C to 30°C and 30°C to 25°C each for 18,000 s were used. The tests were conducted under harmonic uniaxial deformation control with a sinusoidal deformation applied at frequency of 10 Hz, displacing the central core vertically. Complex modulus E^* (equation 3.3), with displacement control and stress and strain amplitude σ_0 and ε_0 respectively, is calculated using the finite element method [Gubler 2005, Sokolov 2005].

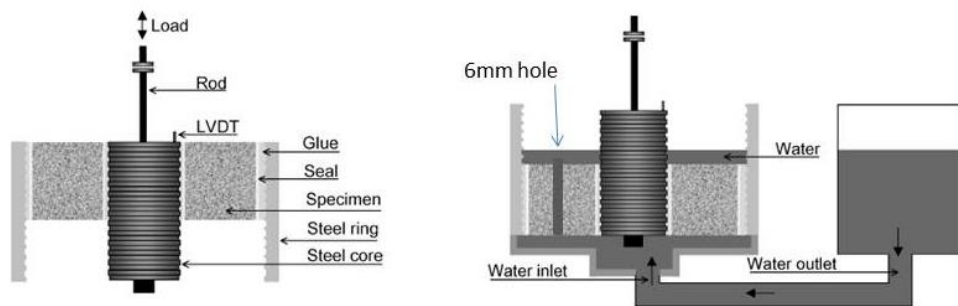


Figure 3. 9 Experimental Set Up of the Coaxial Shear Test (CAST) Dry Condition, Left and water submerged right.

4 Aging Method

The AASHTO R30 method of aging has been selected for this project. This method consists of short term oven aging (STOA) and long term oven aging (LTOA). For STOA the mixture is spread to a height of 50 mm on a metal pan and placed in a forced draft oven at 135°C for 4h. This process is supposed to simulate the aging before the material is placed on the road. Thereafter for LTOA, the specimen are fabricated from this aged mixture and then placed in the oven at 85°C for 5 days (Figure 4. 1, Figure 4. 2). Theoretically, this aging corresponds the aging of the pavement after being in service for 15 years.

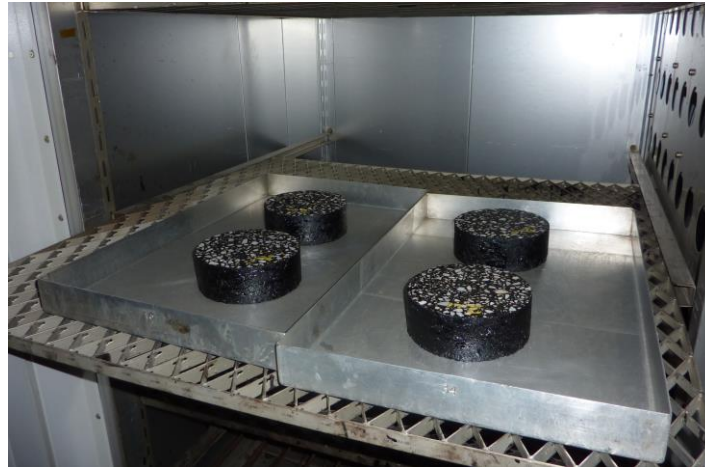


Figure 4. 1. Long Term Oven Aging (LTOA) of gyratory specimens in a forced draft oven



Figure 4. 2. Long Term Oven Aging (LTOA) of wheel tracking specimens in a forced draft oven

5 Experimental Results

5.1. Mix Preparation Procedure

The mixtures were produced using the Marshall design procedure, as this is the standard method in Switzerland. The mixtures with recycled material were designed to the target aggregate gradation and binder content and penetration of the virgin materials (with 0% RAP) that were used as reference mixtures. For the AC mixtures containing 40% RAP, the binder V70/100 was blended with the softer binder V160/220. AC EME mixtures need a hard bitumen similar to the old binder in the RAP. Hence, no soft binder was necessary and the same bitumen V10/20 as for the reference mixture without RAP was used. The following procedure was used to prepare the mixtures: RAP material, if used, was heated in an oven at 130°C and 135°C for AC11 S and AC EME 22 respectively for 3 hours. The virgin minerals were distributed in pans and heated in an oven for about 36 hours at the appropriate mix temperature for 0% RAP and 40 % RAP for the two types of mixtures (165°C and 185°C, 130°C and 170°C respectively). For the 40% RAP mixtures, the minerals were heated to higher temperatures (185°C and 200°C for Mx07 and Mx32 respectively) than RAP (130 °C and 135°C respectively) in order to ensure the target mixing temperatures. The binder was heated to the mixing temperature (130°C and 170°C) and the mixer was heated to 180°C. First, the heated minerals were added to the mixer, followed by the heated RAP material. These components were allowed to mix for 2 minutes before the heated new binder was added. Each mixture was prepared in 150 kg batches and distributed in 25 kg carton boxes to be used later for compacted sample preparation. For the preparation of 100 mm in diameter and 65mm high cylindrical samples standard Marshall hammer compaction was used with 2x50 blows.

5.2. Extraction /Binder Content /Sieve Analysis, Bulk and Maximum Density of the Mixture

5.2.1. Mixture AC 11 S

As shown in Figure 5. 1 and Table 5. 1, the aggregate gradation curves of the mixtures used in this study for AC11 S (Mx05, Mx07, Mx10) are well within the Swiss specifications for AC11 S. Furthermore, on the one hand they are well aligned with the expected values and on the other very similar to each other. Due to the large number of experiments several mixtures in batches of 150 kg were produced and designated with lower case letters i.e. a,b,c etc (*Table 2. 1*). In some cases these lower case letters were omitted in the figures for clarity.

The sieve analyses show that all values are within 3.6% of the expected values. The binder content of the reclaimed asphalt is between 0 and 4.9% of the required value (*Table 5. 1*).

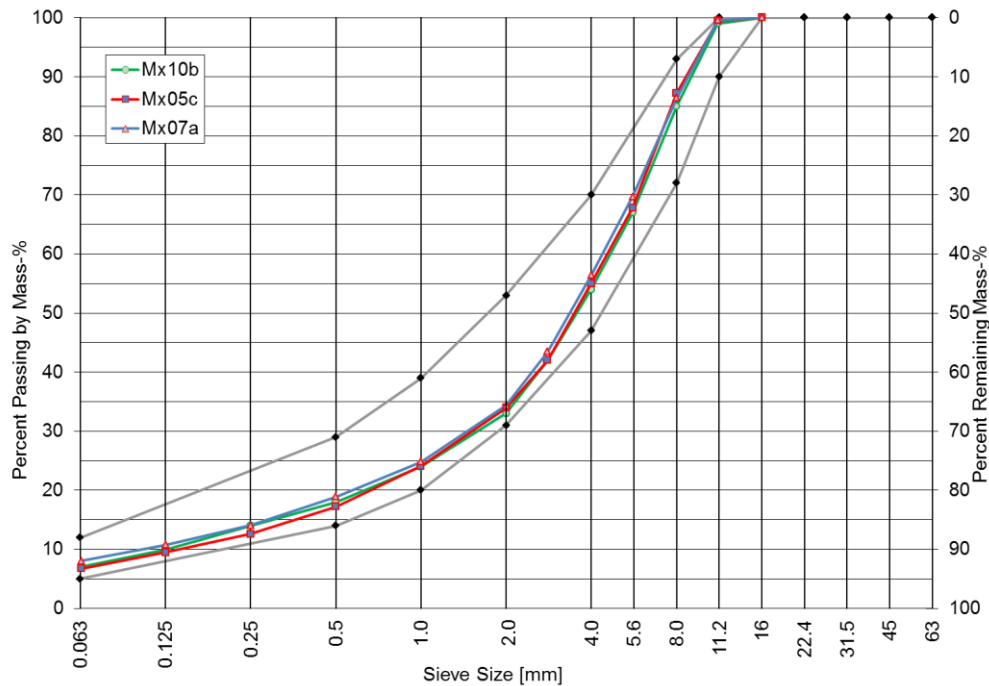


Figure 5. 1 Aggregate gradation curves of Mx05c (AC 11 S with 0%RAP), Mx07a (AC 11 S with 40%RAP) and Mx10b (AC 11 S with 60% RAP)

Table 5. 1 Standard material properties

Mix No.	Mx05	Mx07	Mx10	Mx30	Mx32	RAP1	RAP2
SN Designation	AC 11 S	AC 11 S	AC 11 S	AC EME 22 C2	AC EME 22 C2		
sieve size [mm]							
16	100	100	100	82	82	100	82
11.2	99	100	99	75	68	99	47
8	89	86	85	61	59	93	34
5.6	72	70	67	50	47	82	27
4	59	56	54	42	38	71	24
2.8	46	43	42	34	31	NA	
2	36	34	33	30	27	52	18
1	27	25	24	24	22	38	14
0.5	20	19	18	20	18	29	11
0.25	14	14	14	16	14	21	8
0.125	10	11	10	12	11	16	6
0.063	7	8	7	9	8.4	12	4
Bitumen Pen grade	70/100	70/100+ 160/220	160/220	.10/20	.10/20	NA	NA
Binder content [% by mass] (1)	5.7	6	5.9	5.7	5	6	3
Binder from RAP [% by mass]	NA	2.3	3.5	NA			
RAP [% by mass]	0	40	60	0	40		
RAP type	NA	RAP1	RAP+rejuv	NA	RAP1+RAP2;1:2		
Mix max density [kg/m ³]	2438	2443	2447	2470	2463		
Mix bulk density [kg/m ³]	2359	2354	2384	2421	2428	2406	2587
Mix void content [Vol %]	3.2	3.8	2.8	2	1.4		

(1) Recovered binder, (2) based on binder content

NA= Not applicable, rejuv.= vegetable resin based rejuvenator (2.6% of binder)

1:2= mixed with ratio of 1 to 2.

5.2.2. Mixture AC EME 22 C2

As shown in Figure 5. 2 and Table 5. 1, the aggregate gradation curves of the two mixtures used in this study (Mx30 and Mx32) are well within the Swiss specifications for AC

EME 22. Furthermore, they are well aligned with the expected values and very similar to each other.

The sieve analyses show that all values are within 3.6% of expected values. The binder content of the reclaimed asphalt is between 0 and 4.9% of the required value.

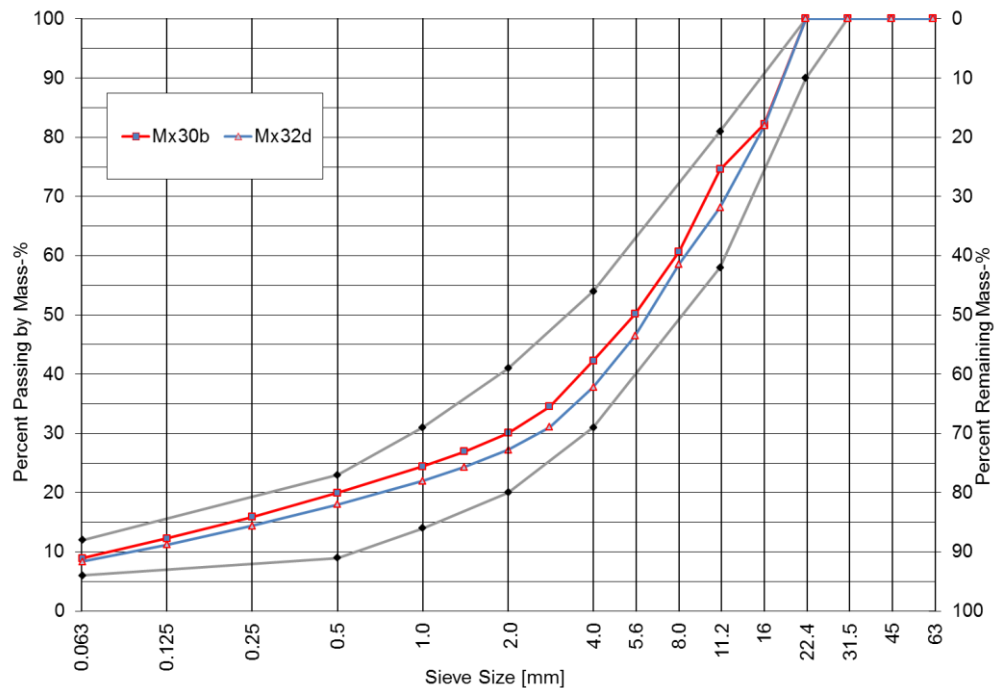


Figure 5. 2. Aggregate gradation and boundaries for Mx 30 and Mx 32 (AC EME 22 C2 with 0% and 40% RAP)

5.3. Binder Analysis

5.3.1. Penetration and Softening Point

The binders were reclaimed from the mixture using toluene. Table 5. 2 and Figure 5. 3 indicate that as a result of aging and addition of RAP, penetration value has decreased and softening point has increased. However, the percent change in properties shown in Table 5. 3 indicate that most of the change in property occurs due to the aging process and not due to recycling.

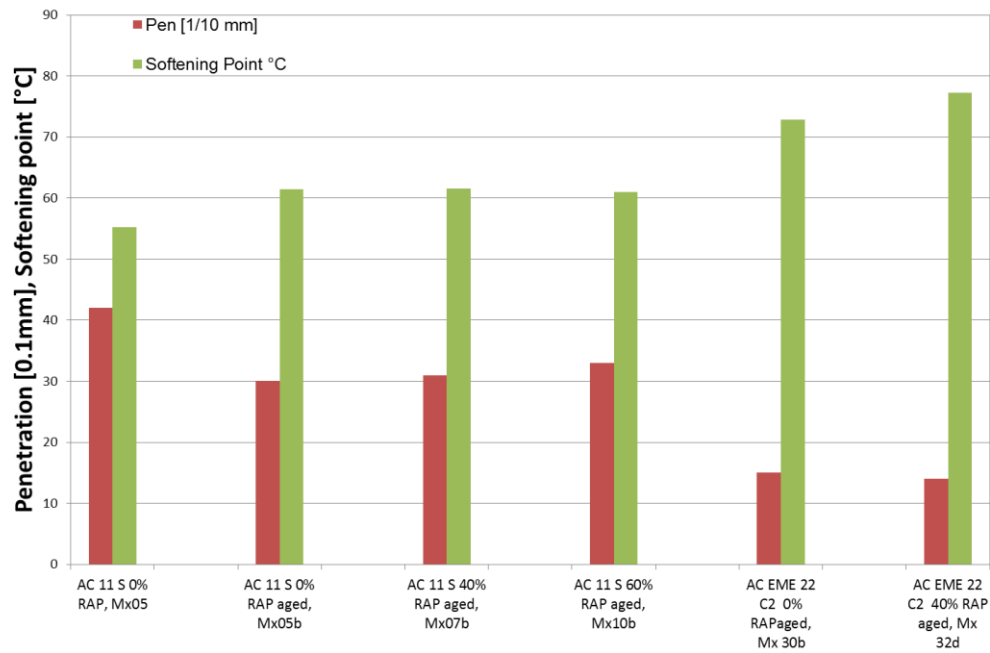


Figure 5. 3. Penetration and softening point of reclaimed binder

The results in Table 5. 3 separate changes in properties due to laboratory aging of the mixture and due to recycling and both. It is shown that for AC11 S as a result of aging the change was 29 and -10 % respectively whereas for recycling only, the change was -3.3% and -0.03%. For AC EME 22 C2 these values were 6.7% and -6.0% respectively. The properties of the binder extracted from the AC11 S mixture with 40% RAP did not show a significant difference with the binder with 60% RAP indicating that the rejuvenator added was able to compensate for the additional RAP.

Table 5. 2 Penetration and softening point

Mix Type	Mix des.	Aging	Recycling	Pen [1/10 mm]	Soft. Point [°C]
AC11 S	Mx05	N	N	42	55.2
AC11 S	Mx 05b	Y	N	30	61.4
AC11 S	Mx 07b	Y	40%	31	61.6
AC11 S	Mx 10b	Y	60%	33	61
AC EME 22 C2	Mx30b	Y	N	15	72.8
AC EME 22 C2	Mx32d	Y	40%	14	77.2

Y=yes, N=no

Table 5. 3 % Change in penetration and softening point as a result of aging and recycling

Property	% change in property				
	recycling				
	aging	recycling 40%		60%	recycling+aging
	AC 11 S	AC 11 S	AC EME 22 C2	AC 11 S	AC 11 S
Pen	29	-3	7	-3	26
Soft. Point	-11	-0.03	-6	1	-12

5.3.2. Dynamic Shear Rheometer (DSR)

The results of the tests with the DSR in Figure 5. 4 are shown in terms of master curves using the WLF method, with a reference temperature of 20°C, indicating a slight increase in the modulus at higher temperatures (lower frequencies) for both types of materials with the difference being more in case of the harder binder of AC EME (Mx30 vs Mx32).

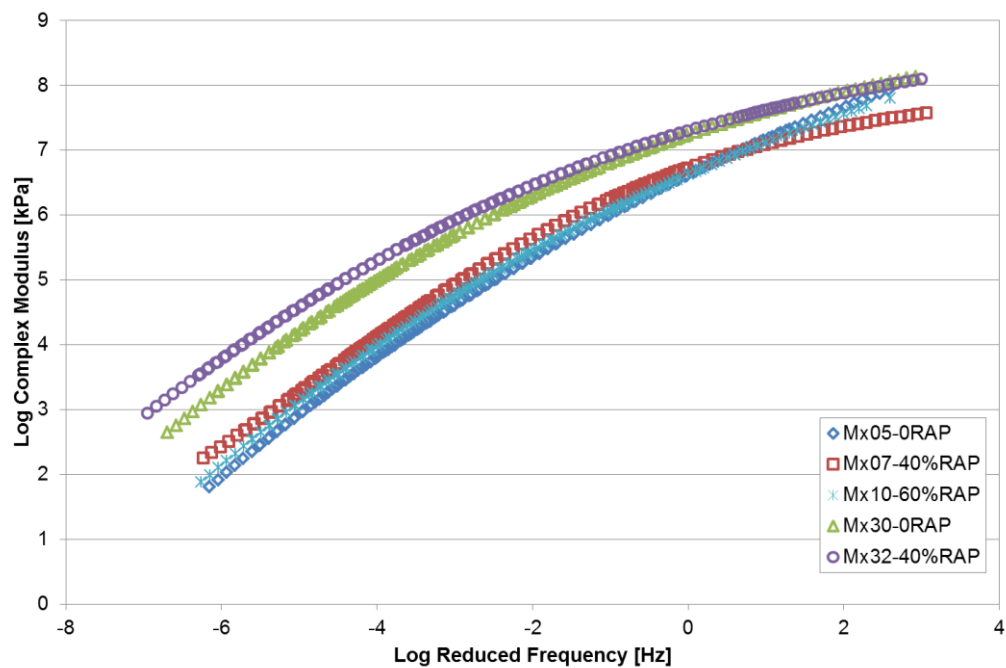


Figure 5. 4 Master curves resulting from DSR tests on reclaimed aged binder (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RA. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

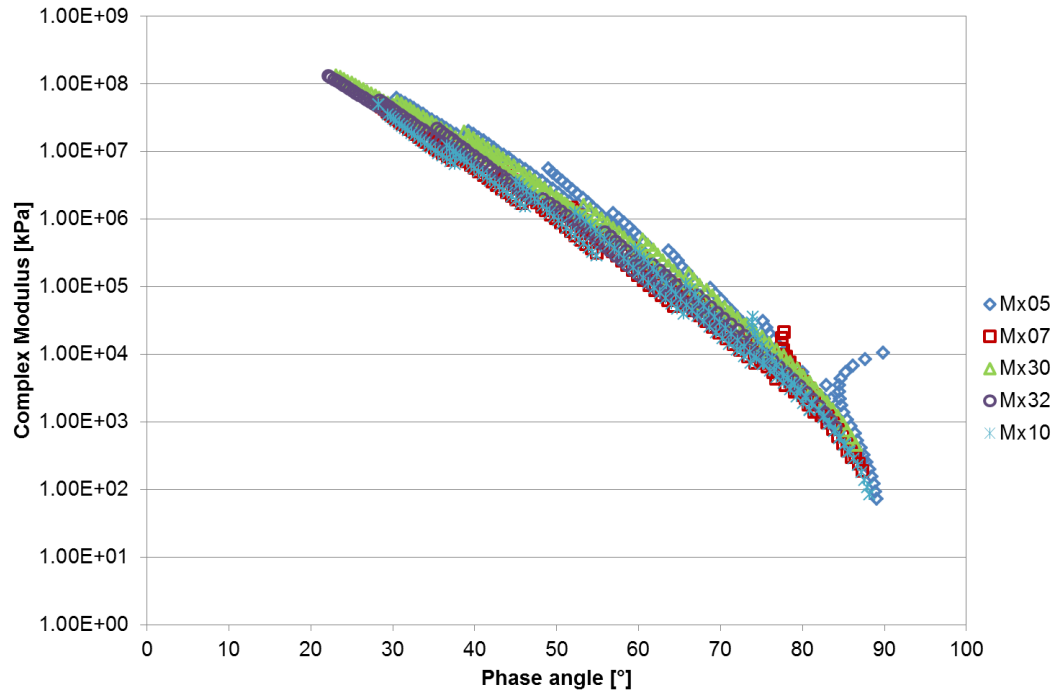


Figure 5. 5 Black diagram for the extracted binders (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RAP. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

Presentation of the results in terms of Black diagrams (complex modulus vs. phase angle) allow elimination of the temperature factor and calculation of the elastic modulus at zero phase angle. Figure 5. 5 shows the results of the Black diagrams. At lower phase angles when the material is behaving mostly elastic, the difference is small. It can be seen that at 1.5×10^9 the pure elastic modulus are almost equal for the materials investigated. The slopes in the Black diagrams, i.e. the relationships between complex modulus and phase angle are also similar. At intermediate phase angles (around 50°), for the same phase angle a larger difference between mixtures with recycling and without can be seen, with the mixtures with recycling having lower modulus. At larger phase angles when the material is viscous, the behavior becomes non-Newtonian.

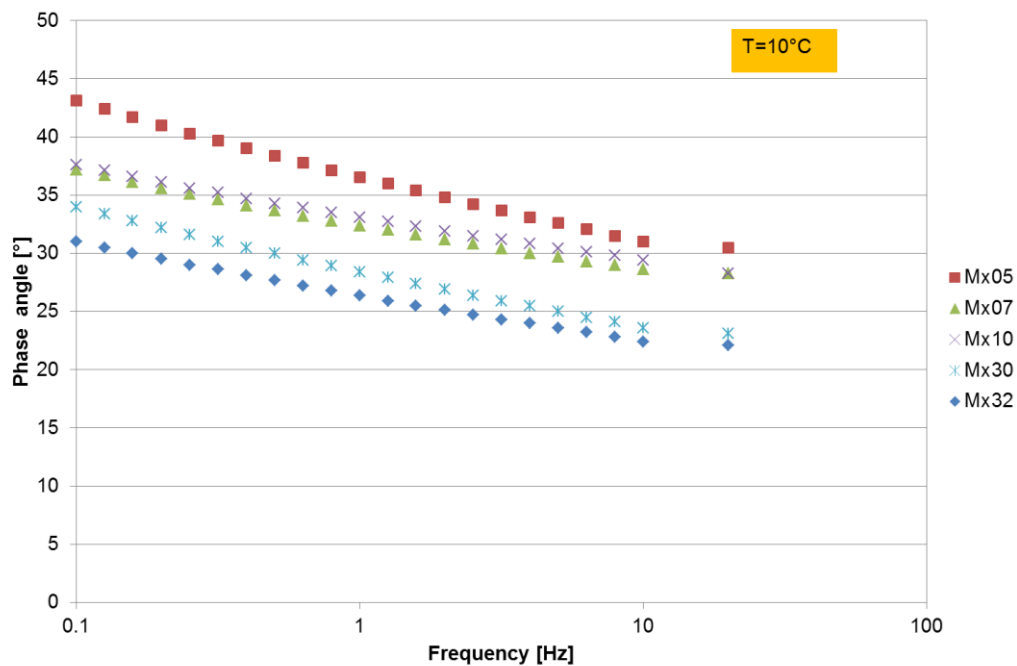


Figure 5. 6 Phase angle vs. Frequency at 10°C (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RAP. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

In Figure 5. 6 for the purpose of clarity the phase angle at 10°C at various frequencies is displayed for all the investigated materials. It can be seen that at a frequency of 0.1 Hz Mx05, Mx07, Mx10, Mx30 and Mx32 have a phase angle of 43.1°, 37.2°, 37.6°, 34° and 31° respectively. Reduction in the phase is an indication of reduction in the viscous part of the complex modulus and increase in the elastic part. As this figure shows there is a larger reduction due to the addition of recycling material (Mx05 vs. Mx07 or Mx30 vs. Mx32) However, the reduction due to increase in recycling (Mx05 vs. Mx10) is small.

5.3.3. FTIR

Table 5. 4 shows the measured bitumens/materials. Here, the spectral infrared peaks related to two functional groups for the different bitumens were studied. Figure 5. 7 shows an example of the spectra for the virgin binder V10/20, and for the corresponding extracted binders from the aged Mx30b and Mx32d (see Table 5. 4). The carbonyl (around 1700 cm^{-1}) and the sulfoxide (1030 cm^{-1}) peaks show an increase in intensity when comparing V10/20 to the binder extracted from the aged Mx30b and a further increase when comparing the extracted binder from the aged sample containing 40 % RAP (e.g., Mx30b versus Mx32d). A similar trend was obtained when comparing V70/100 and V160/220 with the extracted binders from the aged mixtures Mx05b and Mx07a.

Table 5. 4 Mixtures designation and binder content

Mix		Binder	Amount	Relative Amount
V160/220	Virgin	RP-Bit1 (Bit 160/220)		
V70/100	Virgin	RP-Bit2 (Bit 70/100)		
V10/20	Virgin	RP-Bit3 (Bitumen 10/20)		
Mx05 a	0%RAP	RP-Bit2 (Bit 70/100)	6.10%	
Mx07 a	40%RAP	RP-Bit1 (Bit 160/220)	3.80%	77.57%
		RP-Bit2 (Bit 70/100)		22.43%
Mx30 b	0%RAP	RP-Bit3 (Bitumen 10/20)	5.40%	
Mx32 d	40%RAP	RP-Bit3 (Bitumen 10/20)	4.00%	

Figure 5. 8 shows the oxidation indexes $I_{C=O}$ and $I_{S=O}$ (equations (3.4) and (3.5)) for the virgin binders (V160/220, V70/100 and V10/20) as well as the extracted binders from Mx05b, Mx07a and Mx30b and Mx32d. Generally, both $I_{C=O}$ and $I_{S=O}$ increase when virgin binder was compared to the extracted binders from the mixture without RAP and from the aged mixture containing 40 % RAP, as it was expected since the aging procedures and the presence of bitumen from RAP increased the amount of oxidized molecules.

Furthermore, the data shows that the oxidation level is higher for the binders extracted from the aged mixtures containing originally softer binders (V70/100 and V160/220): higher for the extracted binders from Mx05b and Mx07a when compared to the extracted binders Mx30b and Mx32d, respectively. The reason for this may be related to the viscosity of the bitumen: as the viscosity increases the mobility of the molecules in the bitumen as well as the diffusion of oxygen decreases and, consequently, the amount of the carbonyl and sulfoxide functional groups produced is lower for the bitumen with higher viscosity. This explanation could be supported with the result showing that the level of oxidation, particularly for the carbonyl group, of V70/100 and V160/220 is lower than V10/20. However when exposed to oxygen or aging procedures, the amount of oxidized molecules is higher for the mixtures containing the softer bitumens.

It was also noticed that the $I_{S=O}$ measurements show high scatter for the virgin binders (V70/100 and V160/220). This could come from the combination of lower viscosity of V70/100 and V160/220 allowing faster diffusion of oxygen, inhomogeneity in the distribution of sulfur containing components, inhomogeneity in oxygen distribution, complexity and nature of oxidation mechanism and instability of intervenient compounds during oxidation mechanisms.

As expected, a difference in the oxidation level was measured between bitumen inner layers and top layers (in container); noticed in particular for the virgin bitumens (compare

V160/200 I with V160/220 T and V10720 I with V10/20T) in Figure 5. 9

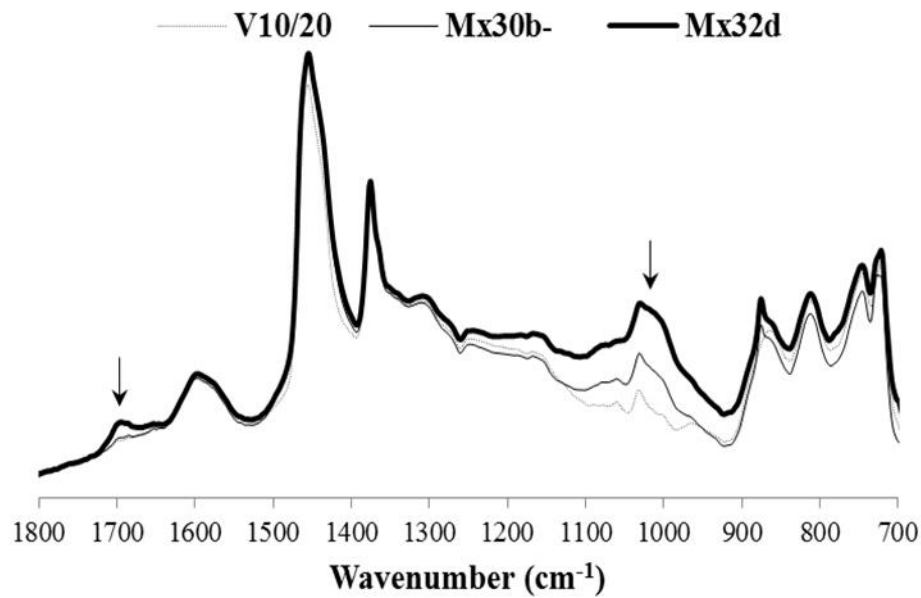


Figure 5. 7 Spectra for bitumens V10/20, Mx30 b and Mx32 d for 28 min. The arrows point at the carbonyl band (1695 cm⁻¹) and at the sulfoxide band (1030 cm⁻¹). (Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

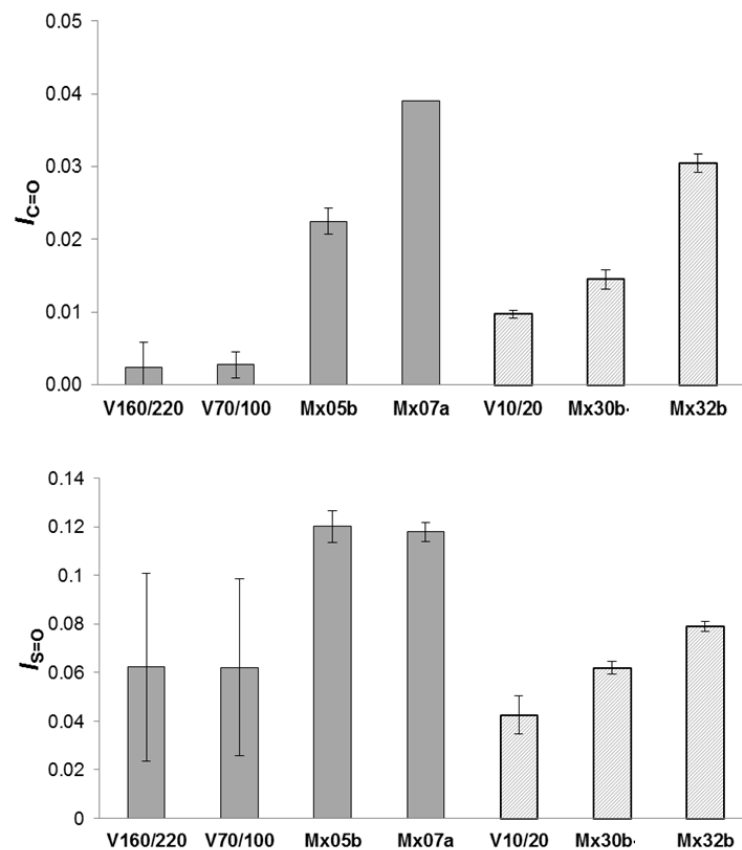


Figure 5. 8 Oxidation indexes for all the bitumens studied (from inner layers) measured at approximately 0 min. The error bars represent the standard deviation of the 4 or 5 measurements performed for each sample. (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RAP. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

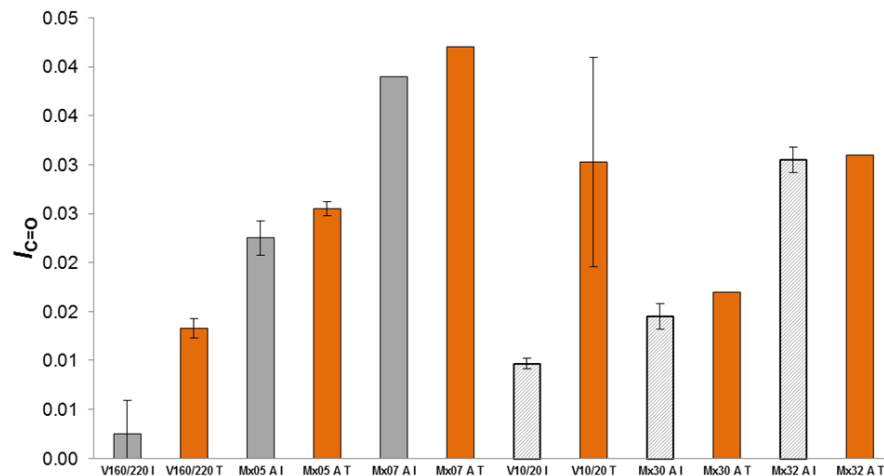


Figure 5. 9 Carbonyl oxidation index for different bitumens showing the effect of layer location. I – inner layers; T – top layers. The error bars represent the standard deviation of the measurements. (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RAP. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

5.4. Mechanical Tests

5.4.1. Marshall test

The Marshall test was performed on un-aged (only Mx05) and aged samples of all the investigated mixtures. The results shown in Figure 5. 10 for Marshall flow and Figure 5. 11 for Marshall stability are average of four samples and the dispersion is calculated using maximum and minimum values. The results show that the Marshall stability values are greater than the normative requirement of 7.5 kN for surface layers of type N. There are no requirements for Type S (heavy traffic) nor for base courses. With aging and the addition of RAP the stability value increased especially in the case of A EME 22 C2 (Mx30 and Mx32). The results for Marshall flow show that AC11 S values are also within normative limits for AC surface courses (2 to 4 mm), shown in green whereas AC EME 22 C2 values are outside these limits [SN 640 431-1b-NA].

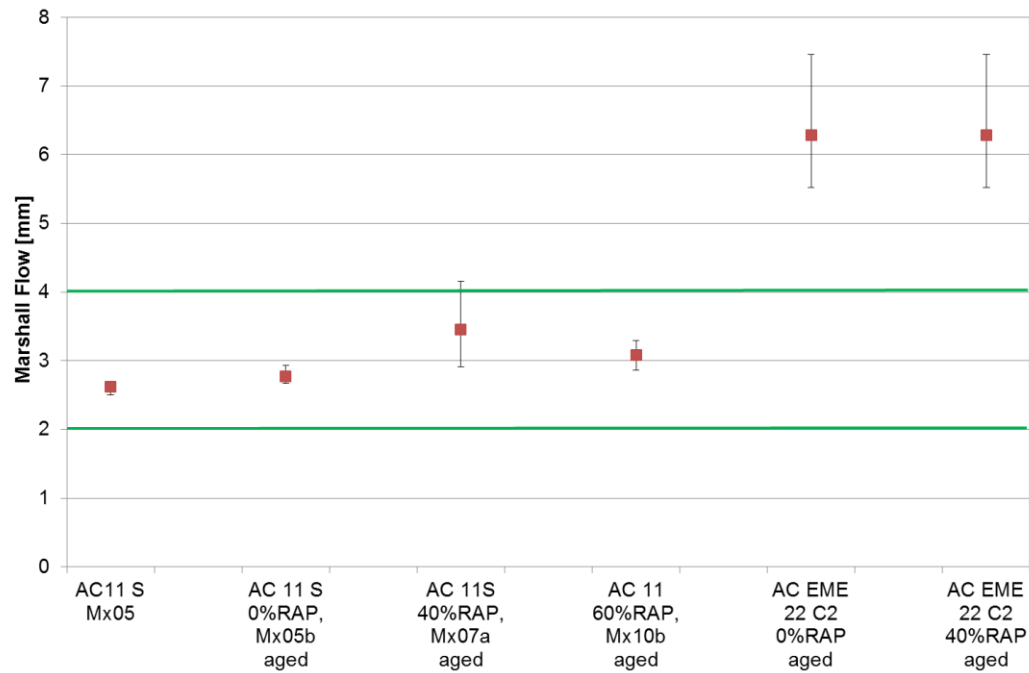


Figure 5. 10 Result of the Marshall test: flow (unaged Mx05 [Seeberger 2013] is included for comparison)

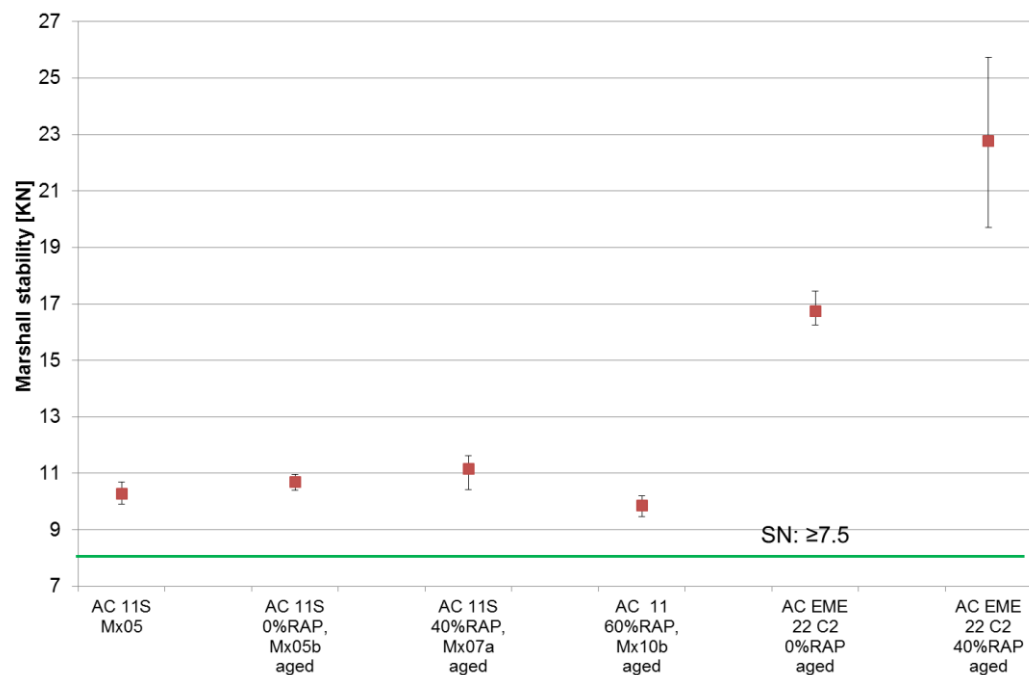


Figure 5. 11 Result of the Marshall test: Stability (unaged Mx05 [Seeberger 2013] is included for comparison)

5.4.2. Water Sensitivity Tests Using the Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR)

The results of water sensitivity tests in terms of the indirect tensile strength ratio (Figure 5. 12 and Table 5. 5) show that the mixtures with RAP and without RAP fulfill the normative requirements of $ITSR \geq 70\%$ both in un-aged and aged states [SN 640 431-1b-NA]. Furthermore, it was shown that aging can affect the ITSR as seen in the case of Mx05 in comparison to Mx07 and Mx10 but the increase of RAP from 40% to 60% does not affect the water susceptibility. This was demonstrated for AC11 S and AC EME 22 C2.

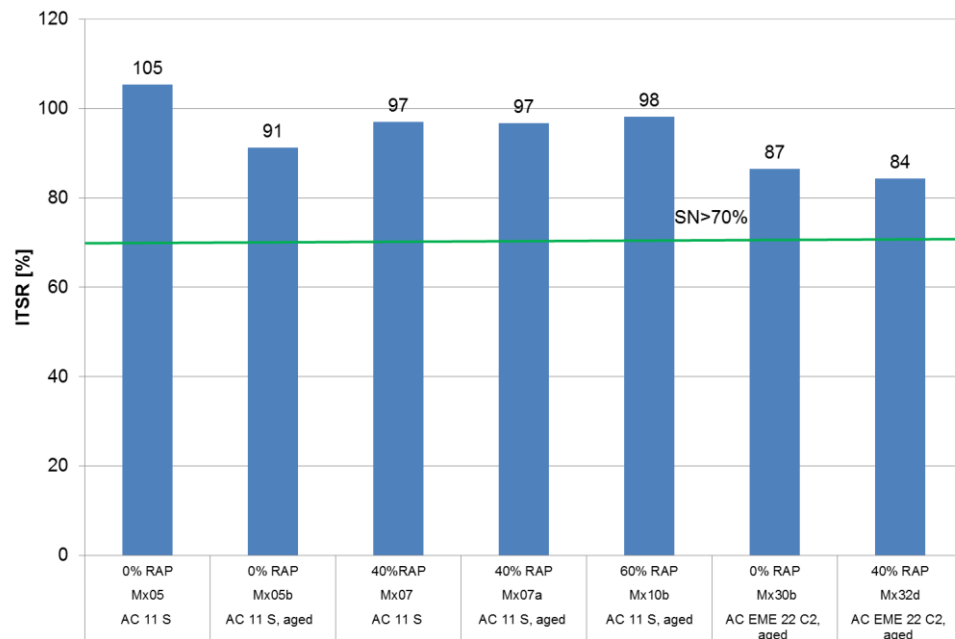


Figure 5. 12 Results of Water sensitivity tests using ITSR in percent (unaged Mx05 [Seeberger 2013] is included for comparison)

Table 5. 5 Results of ITSR				
Mix Type	Mix Des.	RAP	Aged	ITSR [%]
AC11	Mx05	0%	N	105
AC11	Mx05b	0%	Y	91
AC11	Mx07	40%	N	97
AC11	Mx07a	40%	Y	97
AC11	Mx10b	60%	Y	98
AC EME 22 C2	Mx30b	0%	Y	87
AC EME 22 C2	Mx32d	40%	Y	84

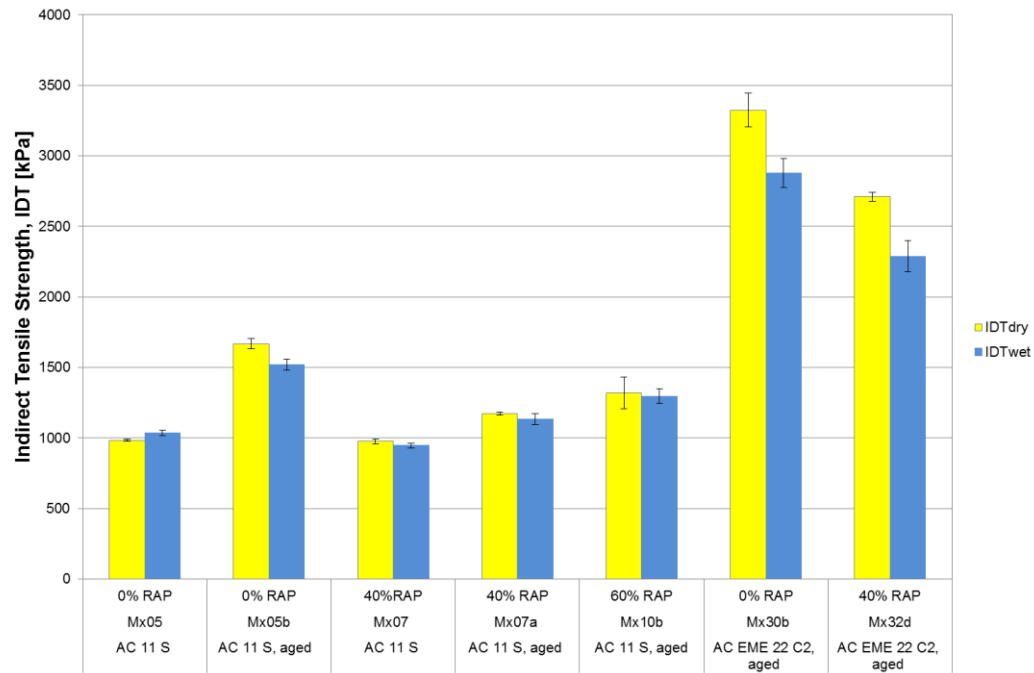


Figure 5. 13 Indirect Tensile Strength of the Mixtures, data on the unaged specimen are from EP1 [Seeberger 2013]

However, considering the indirect tensile strength (IDT) shown in Figure 5. 13, it can be seen that the aged AC 11 S samples had a higher indirect tensile strength than the mixtures with virgin materials at 22°C with 0% and 40% RAP both in water conditioned state and in dry state. This effect was reversed for the high modulus AC EME mixture.

5.4.3. Permanent Deformation Using French Wheel Tracking (Spurbildung)

Samples without RAP un-aged and aged and with 40% and 60% RAP aged were tested using the French wheel tracking device shown in Figure 5. 14 to Figure 5. 18. The mean value for two specimens for each mixture shown in Figure 5. 16 demonstrates that permanent deformation of samples with RAP and aged is less than those without RAP. All results are below the normative requirement of 10% maximum permanent deformation for AC 11 S. Additionally the permanent deformation of the high modulus base course, AC EME 22 C2 with 40% RAP was considerably below all forms of AC11 S as expected and below the requirements of 7.5% for this type of mix . Measurement of permanent deformation and a specimen after the test is shown in Figure 5. 17 and Figure 5. 18 respectively.

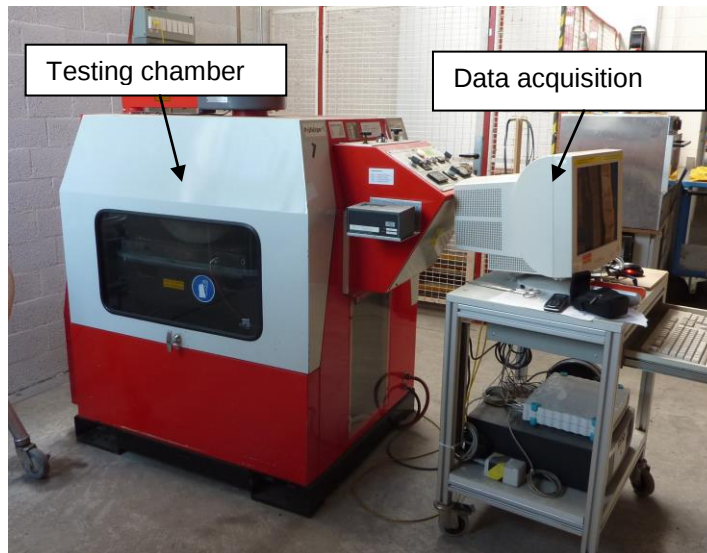


Figure 5. 14 The French wheel tracking tests set up at Empa



Figure 5. 15 Specimen in the French wheel tracking device

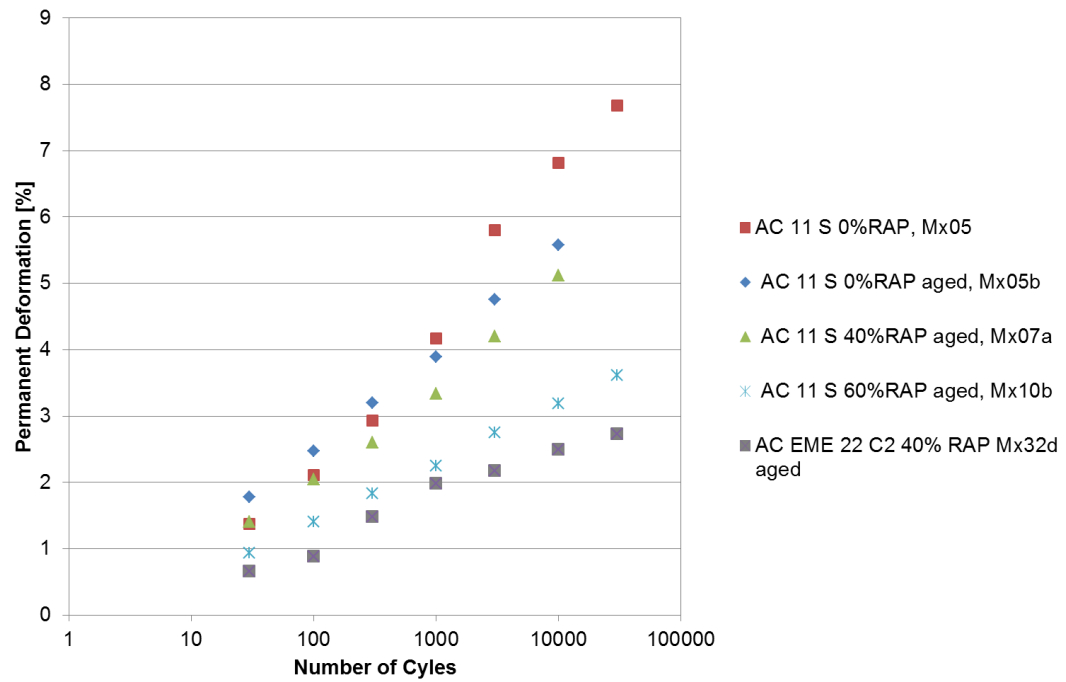


Figure 5. 16 Permanent deformation using the French wheel tracking tests



Figure 5. 17 Measurement of permanent deformation of the specimen

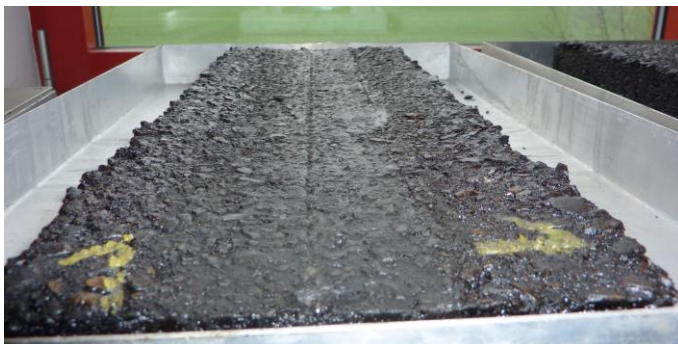


Figure 5. 18 Aged AC 11 S specimen after the rutting tests

5.4.4. Particle Loss Using the Cantabro Test

The particle loss evaluation using the Cantabro test was performed on AC 11 S mixtures without RAP, 40%RAP 1 and 60% RAP. A photograph of the samples before and after the tests is shown in Figure 5. 20. The results in Figure 5. 21 demonstrate that the addition of RAP did not increase the particle loss values. No standard requirements exist for this test. The particle loss test was not performed on the base courses (AC EME 22 C2) as these courses are not directly exposed to traffic and the resulting particle loss.



Figure 5. 19 Los Angeles drum used for the particle loss tests at Empa



Figure 5. 20 Mx05, AC 11 S with 0%RAP before and after PL Tests, left and Mx 07, AC 11 S with 40%RAP before and after PL Tests, right

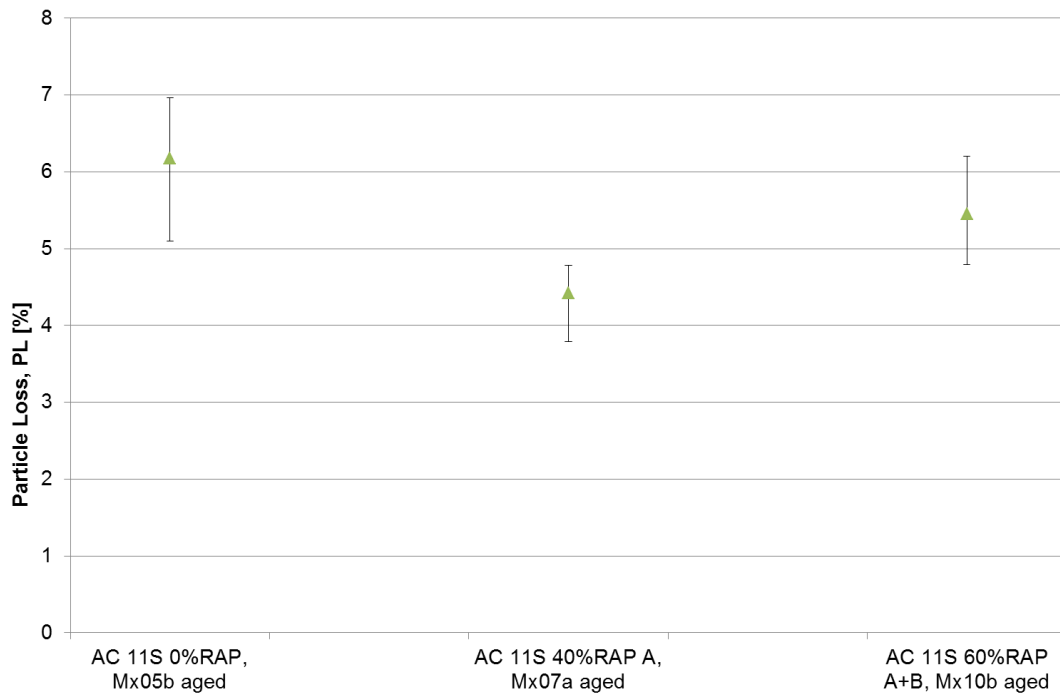


Figure 5.21 Particle loss using the Cantabro tests (rej=rejuvenator)

5.4.5. Complex Stiffness Modulus

Table 5.6 and Figure 5.22 show the elastic stiffness modulus as a function of temperature. It can be seen that the addition of RAP has not significantly affected the stiffness modulus of the materials investigated at lower temperatures (5 and 10 °C) where a change in stiffness modulus of the mix with 40% RAP and 0% RAP of less than 4% was measured, a decrease of 9% for the mixture with 60% RAP was measured. At higher temperatures for the AC 11 S mixtures with the addition of RAP a higher decrease in stiffness modulus was seen; especially significant was a decrease of 8% for the mixture with 60% RAP. For the high modulus AC EME 22 mixture at higher temperatures (20 and 30°C) a maximum increase in the stiffness modulus of 29% was measured. That is the addition of RAP increased the stiffness modulus of the high modulus mix AC EME 22 at higher temperatures much more than that of the AC 11 S mixture. The standard deviation of the results varied from 0.2 % for Mx30 at 20°C to a maximum of 33% for Mx32 at 30°C, this is shown graphically in Figure 5.22. The repeatability is affected by the inhomogeneity between the samples, amount of RAP and temperature. No pattern was observed in the tests performed here i.e. one type of mixture did not show systematically more scatter than the other however the scatter of the AC mixture with 60% RAP and EME mixture at 30°C was more than others.

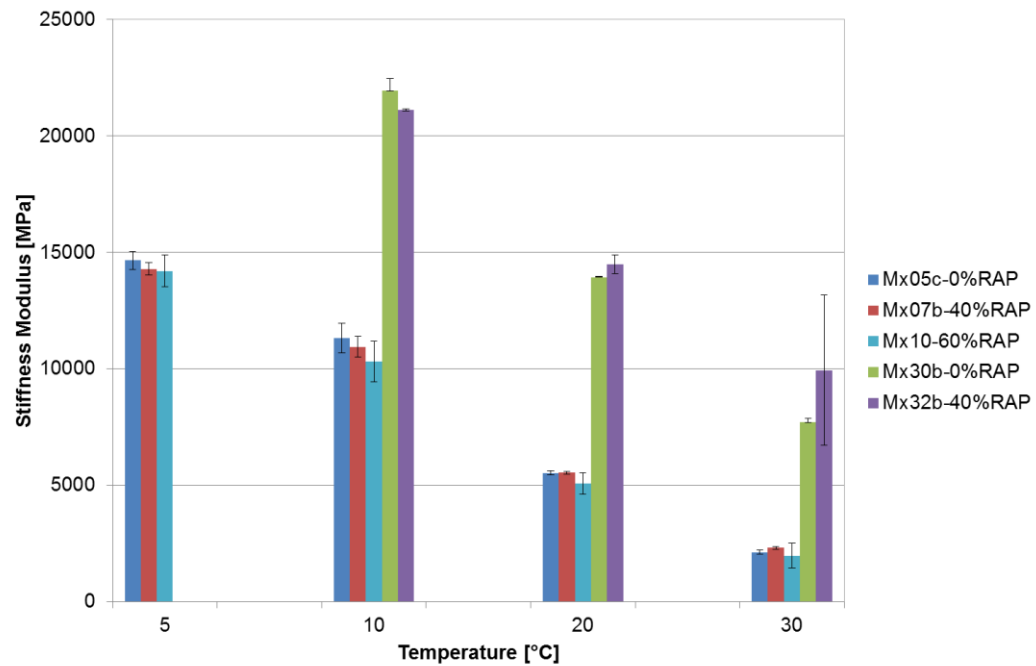


Figure 5.22 Complex stiffness modulus of aged mixes (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RAP. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

Table 5.6 Summary of the elastic stiffness modulus [MPa] using the IT-CY test

Temp (°C)	Stiffness Modulus [MPa]												
	AC 11 S								AC EME 22 C2				
							40%RAP 60%RAP						
	Mx05c-0%RAP/x07b-40%RAP		Mx10-60%RAP		% Change		% Change		Mx30b-0%RAP		Mx32b-40%RAP		% Change
	M	SD	M	SD	M	SD			M	SD	M	SD	
5	14655	385	14289	267	14203	678	-2.5	-3.1					
10	11318	640	10948	453	10304	875	-3.3	-9.0	21941	506	21120	49	-3.7
20	5529	85	5538	70	5086	454	0.2	-8.0	13933	40	14475	402	3.9
30	2128	82	2315	54	1980	539	8.8	-7.0	7704	175	9934	3221	29.0

M=mean, SD=standard deviation

5.4.6. Fatigue Behavior

The results of fatigue tests shown in Figure 5.23 indicate that good repeatability was achieved at each strain level for all materials tested. The fatigue line calculated with an exponential fit and the correlation coefficient R^2 are shown in Table 5.7. All R^2 values are greater than 0.9 indicating a good correlation which satisfies the requirement by the standard which is 0.9 for surface courses and 0.8 for base courses. From the fatigue line the classical parameter ϵ_6 defined as strain to reach one million cycles was also calculated for the sake of comparison and shown in Table 5.7. In this case however ϵ_6 is the initial elastic strain as defined already. The ϵ_6 values demonstrate that the resistance to fatigue was slightly better for the AC 11 S mixture with RAP (Mx07 and Mx10) and AC EME 22 without RAP (Mx30b). The results indicate that the fatigue performance of the high modulus mixture was negatively influenced by the added RAP whereas the effect was reversed for the softer AC mixture in that a better fatigue behavior was seen. The addition of aged bitumen from RAP in the mixture can potentially stiffen it and result in added brittleness and reduced fatigue resistance as seen in the results for Mx07 compared to Mx05. This difference is especially significant at lower strains.

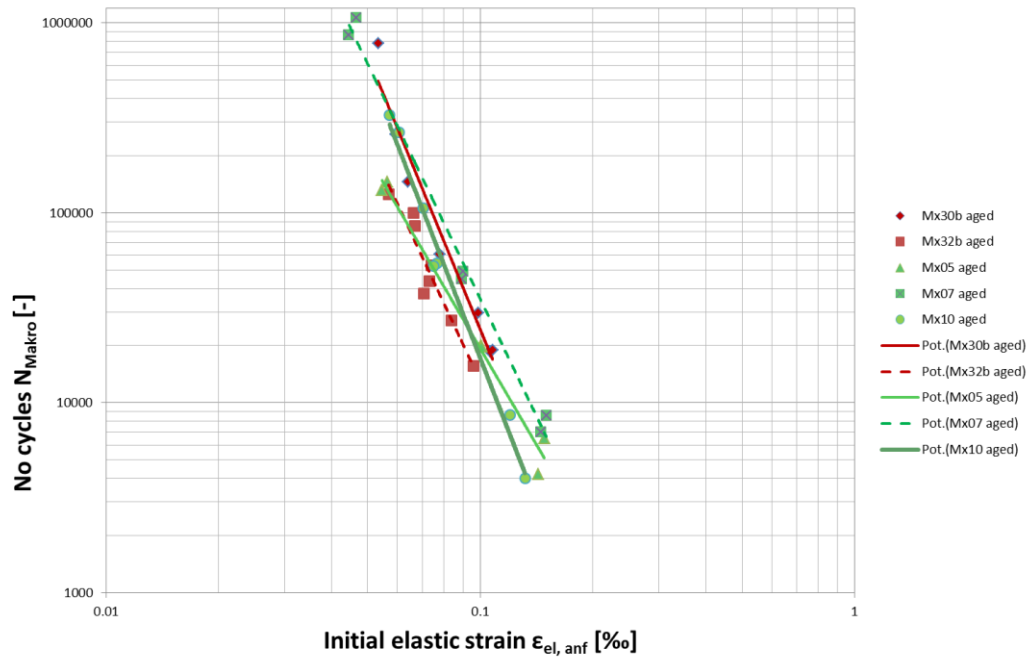


Figure 5. 23 Fatigue behavior of AC 11 S; Mx05 without RAP and Mx07 with 40%RAP, AC EME 22 C2; Mx30 without RAP and Mx32 with 40%RAP both aged

Table 5. 7 Fatigue line and fatigue resistance

Mix Type	Mixture ID	Fatigue line	R ²	ε ₆
AC 11 S; 0% RAP	Mx05c	$y = 8.2329x^{-3.3687}$	0.983	0.0309
AC 11 S; 40% RAP	Mx07b	$y = 2.7137x^{-4.112}$	0.991	0.0443
AC 11 S; 60% RAP	Mx10b	$y = 0.1426x^{-5.079}$	0.984	0.0449
AC EME C2; 0% RAP	Mx30b	$y = 0.3922x^{-4.7910}$	0.964	0.0460
AC EME C2; 40% RAP	Mx32b	$y = 0.7677x^{-4.226}$	0.903	0.0357

Y=N_{Makro}; x=initial elastic strain

5.4.7. Cyclic Compression Test (Druckschwellversuch)

Figure 5. 24 shows the cumulative strain at the turning point and at 10,000 loading cycles and Figure 5. 25 shows the number of cycles to the turning point for the two mixtures Mx05 with no RAP and Mx07 with 40% RAP and Mx10 with 60% RAP. The data is consistent with other results presented in this work in that the mixtures containing RAP had lower cumulative strain (creep) and strain rate than the mixtures without RAP although both mixtures were aged. However, in Figure 5. 25 we can see that the effect was more prominent for the softer mixture in that the number of cycles to the turning point for Mx07 (with RAP) had almost doubled in comparison to Mx05 (without RAP) and in comparison to Mx10 the average number of cycles to the turning point were four times more. As expected, permanent deformation was considerably lower for the high modulus mixture.

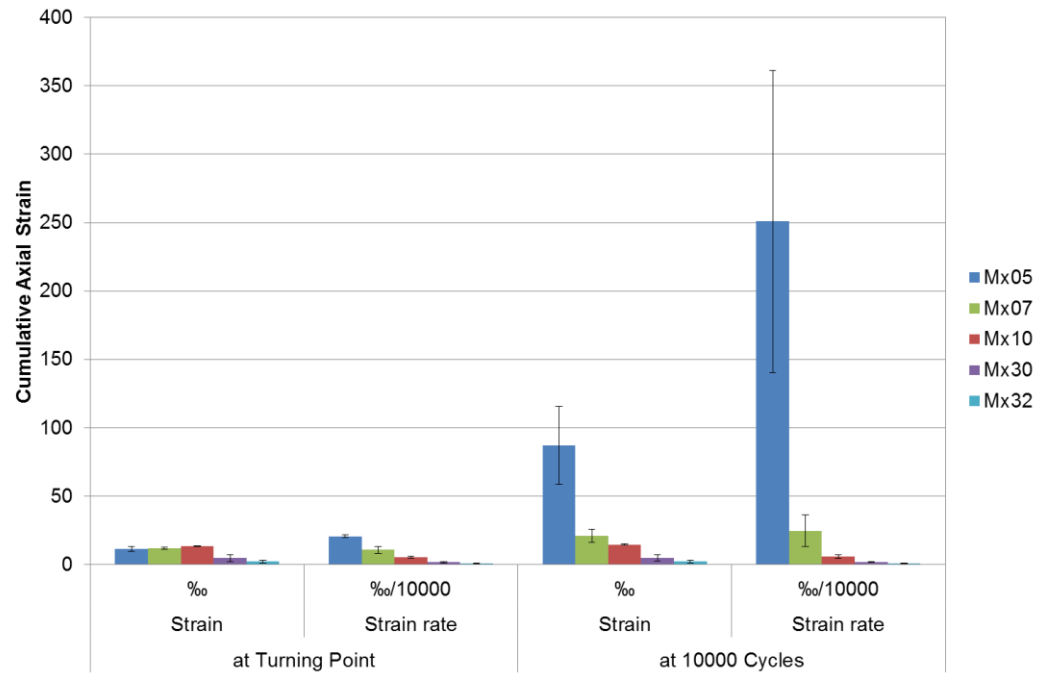


Figure 5. 24 Cumulative strain at turning point and at 10,000 cycles. (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RAP. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

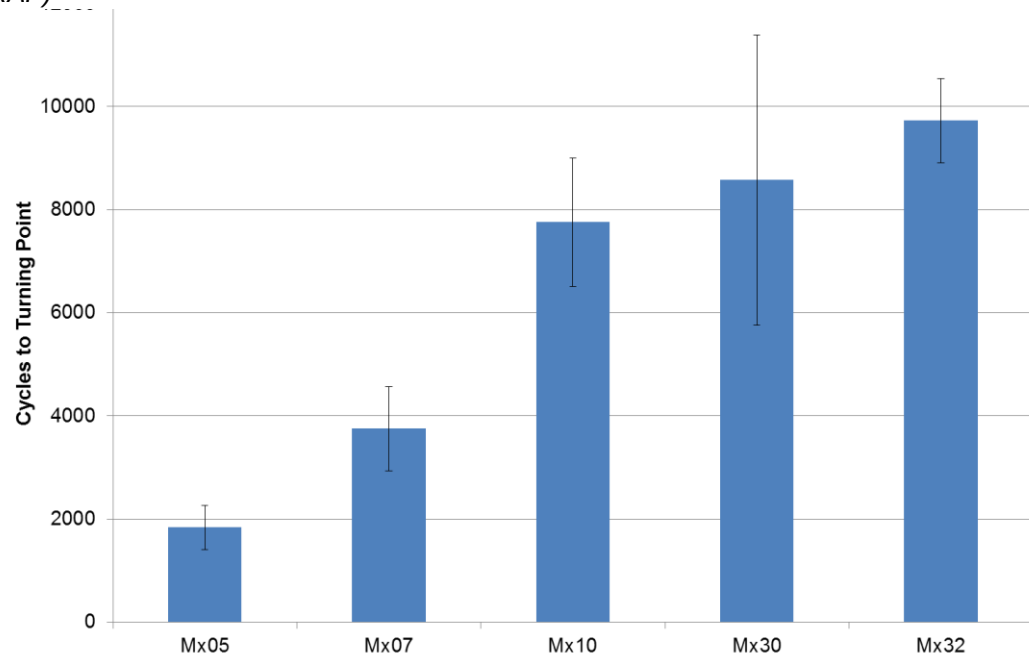


Figure 5. 25 Number of cycles at turning point. (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RAP. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

5.4.8. Indirect Tensile Strength at Low Temperature

The low temperature behavior was assessed using the indirect tensile test (IDT) at -10°C in accordance with EN 12697-23. For each mixture type, four 100 mm diameter by 65 mm height cylindrical specimens were compacted with the Marshall hammer. The specimens were conditioned in an air chamber for 4 hours at -10°C and thereafter tested at a speed of 55mm/min until failure in order to obtain a representative indirect tensile strength of the different mixtures at low temperature.

The IDT tests results calculated using equation (3.6) at -10°C shown in Figure 5. 26 indi-

cate that the low temperature strength of the materials investigated increased slightly, but not statistically significant, with the added RAP as shown by the low standard deviation indicated in the diagram. However the high modulus EME mixtures (Mx30 and Mx32) had lower strength at cold temperature than the AC mixtures Mx05, Mx07 and Mx10 which is the opposite trend observed with the stiffness modulus discussed in the previous section.

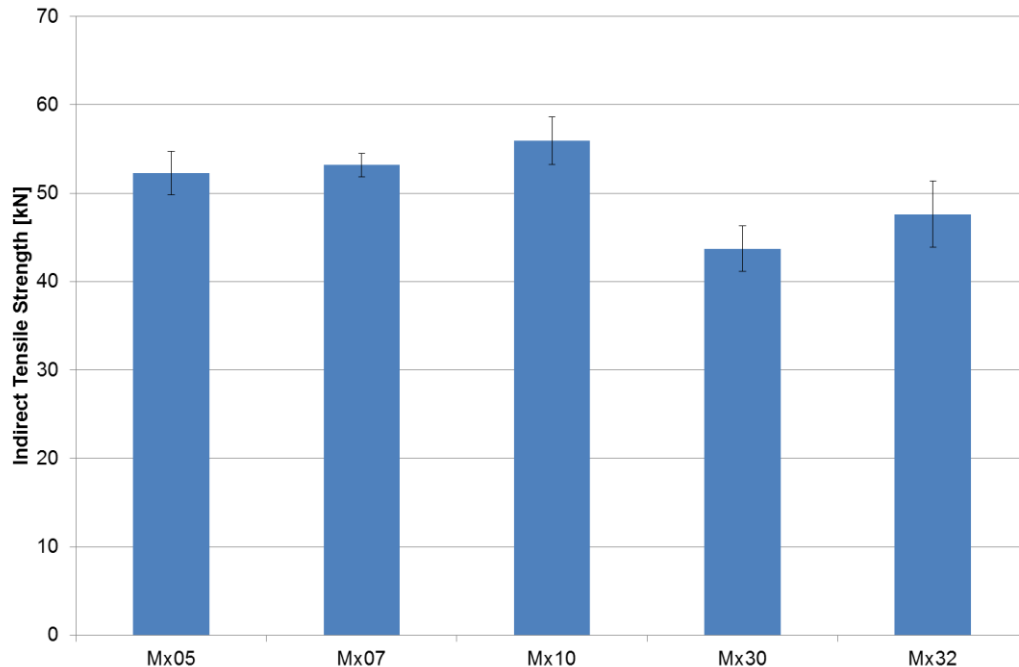


Figure 5. 26 Indirect tensile strength (IDT) at -10°C. (Mx05, Mx07, Mx10=AC 11 S with 0%,40%, 60% RAP. Mx30, Mx32 =AC EME 22 C2 with 0%,40% RAP)

5.4.9. Water Susceptibility Using the Coaxial Shear Test (CAST)

Figure 5. 27 shows the results for four representative specimens for Mx05 and Mx07 (with 40% RAP) in dry and totally submerged under water using CAST. It can be seen that at the beginning of the fatigue test during the first temperature cycle, the modulus drops considerably, Firstly, due to an initial settling effect in the material the internal stresses redistribute and secondly, due to the initial thermal state in the material in the first temperature cycle which is significantly different from the later cycles. The thermal history can clarify this phenomenon as before the beginning of the test the specimens are kept for at least four hours at 25 °C to ensure thermal equilibrium which is not the case at the beginning of later cycles in spite of the comparatively slow temperature cycles. Since the test protocol is the same for all specimens the maximum and minimum modulus values could be compared. Not considering the first thermal cycle, the maximum modulus E^*_{max} , occurs at the end of the first thermal cycle and E^*_{final} is the maximum modulus occurring at the end of the last thermal cycle. Figure 5. 27 shows the development of the complex modulus as a function of loading cycles or time and temperature cycles. The reduction in complex modulus in percent comparing E^*_{max} at the first and last thermal cycles shown in

Table 5. 8 was as follows: Mx05dry= 5.45%, Mx05wet=3.46%, Mx07dry=3.14%, Mx07wet=2.88%. The water sensitivity calculated as the ratio of wet complex modulus to dry at the last thermal cycle was: Mx05=95% and Mx07=103%. These results show that the samples with RAP were less water sensitive than the ones without. Mx05 dry had the largest reduction in complex modulus with 5.45%. The ratio of complex modulus of wet sample to the dry sample ranks Mx07 higher with 103% vs. 93% for Mx05.

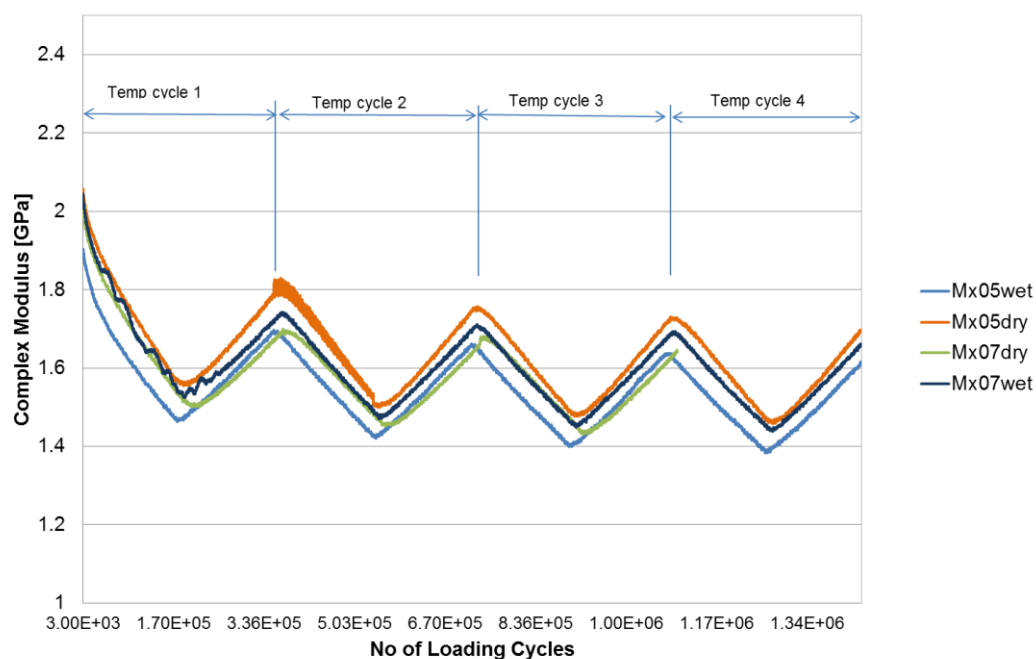


Figure 5. 27 Evolution of complex modulus in dry and wet state. (Mx05, Mx07=AC 11 S with 0%,40% RAP.)

Table 5. 8 Results of CAST tests

Max Complex Modulus [GPa]				
Mx05dry	Mx05wet	Mx07dry	Mx07wet	
1.83	1.70	1.70	1.74	max first thermal cycle excluding initial state
1.73	1.64	1.65	1.69	max last thermal cycle excluding initial state
Reduction in Complex Modulus [%]				
Mx05 dry	Mx05 wet	Mx07 dry	Mx07 wet	
5.45	3.46	3.14	2.88	
wet/dry				
Mx05	Mx07			
93	103	First thermal cycle		
95	103	Last thermal cycle		

6 Conclusions

This project is part of the research package on recycled asphalt concrete materials with five sub projects. This sub-project addresses the long term performance and durability of specific recycled asphalt concrete materials. To this end, a Swiss standard surface course AC 11 S and a high modulus base course AC EME 22 were investigated regarding their chemical and mechanical characteristics. Both types of mixtures were artificially short and long term aged as long term performance was of interest. The results can be summarized as follows:

- Chemical analysis of the binders using ATR-FTIR showed clear evidence of oxidation (aging) of the binders exemplified by the increase in the carbonyl and sulfoxide indexes. Both indexes increased when virgin binder was compared to the extracted binders from the mixture without RAP and from the aged mixture containing 40 % RAP and 60% RAP, as it was expected since the aging procedure and the presence of bitumen from RAP increase the amount of oxidized molecules.
- Aging and addition of RAP decreased the penetration and increased the softening point of the binders; however, the effect of aging was more significant than the addition of RAP.
- The rheological investigation using the DSR showed an increase in the modulus at higher temperatures (lower frequencies) for both types of materials with the addition of RAP compared to virgin materials with the difference being more in case of the harder binder of AC EME. However, the difference in Modulus between 40% RAP and 60% was negligible.
- The properties of the binder extracted from the AC11 S mix with 40% RAP did not show a significant difference with the binder with 60% RAP indicating that the rejuvenator added was able to compensate for the additional RAP.
- The results show that the Marshall Stability values are greater than the normative requirement of 7.5 kN for surface layers type L and N. With aging and the addition of RAP the stability value increased especially in the case of AC EME 22.
- The aged AC 11 S samples with 0% and 40% RAP had a higher indirect tensile strength than the mixtures with virgin materials at 22°C both in water conditioned state and in dry state. This effect was reversed for the high modulus AC EME mixture.
- Low temperature behavior was not significantly affected by the addition of RAP. An increase in the indirect tensile strength of the AC mixture and decrease of the EME mixture was measured. However low temperature strength of the high modulus mixture was lower than the asphalt concrete mixture.
- Use of RAP did not significantly affect the stiffness modulus of the materials investigated at lower temperatures. The addition of RAP increased the modulus of the AC EME 22 at high temperature much more than AC11 S.
- Resistance to fatigue was slightly better for the AC11 S mixture with RAP than without and better for AC EME 22 without RAP than with.
- Permanent deformation or rutting of samples measure with the French wheel tracking test shows that samples with RAP and aged had less rutting than those without RAP. All results are below the normative requirement of 10% maximum permanent deformation for AC 11 S/H. Additionally the permanent deformation of the high modulus base course, AC EME 22 C2 with 40% RAP was considerably below all forms of AC11 S as expected and below normative requirement of 7.5%.
- Water susceptibility was evaluated using the ITSR and CAST. ITSR values show that the mixtures with RAP and without RAP fulfill the normative requirements of $ITSR \geq 70\%$ both in un-aged and aged states. Furthermore, it was shown that aging can affect the ITSR but the increase of RAP from 40% to 60% does not affect the water susceptibility. Both types of tests showed either statistically insignificant changes in the values or comparatively less water susceptibility of the mixtures with RAP.
- The addition of RAP did not statistically increase the particle loss values of the surface courses measured with the Cantabro test. A value of 5% particle loss was measured for 0%, 40% and 60% RAP mixtures.

- Under cyclic compressive load resistance to creep was measured. It was shown that the mixture with RAP, in particular the AC mixture had lower cumulative strain and strain rate than the mixture without RAP although both mixtures were aged. The effect was more prominent for the softer mixture in that the number of cycles to the turning point for AC 11 S (with RAP) had almost doubled in comparison to the mixture without RAP. As expected, permanent deformation was considerably lower for the high modulus mixture.

It was shown that mixtures with 40% and 60% RAP in aged state can perform in laboratory tests as well as the mixtures produced with virgin materials (not including recycled materials). This is in general in agreement with previously reported results and that a mixture containing RAP materials (binder and aggregates) and virgin materials can form a new “composite” system that can perform at least as well as the mixtures prepared from virgin materials. It was shown that the addition of RAP had a negative effect on fatigue performance of the high modulus mixture whereas the effect was positive in the asphalt concrete mixture. The natural next step would be:

- To obtain long term performance results from field data or from accelerated pavement testing with a heavy vehicle simulator on a test site.
- Investigate the effect of RAP on interlayer shear
- Investigate higher percentages of RAP in the mixture

A summary of the results and comparison with the Swiss standards are shown in Table 6. 1 indicating that the required limits have been met. Furthermore, various mechanical tests on aged specimen show that the durability of the mixtures with RAP have been as satisfactory as the ones without RAP.

Furthermore, the results indicate that the use of high amounts of RAP in surface AC courses and EME base courses should be expanded especially as current standards do not allow the use of RAP in the AC 11 S and only 15% and 30% for AC EME 22 C2 for cold and hot mixes respectively.

Table 6. 1 Normative requirements [SN 640 431-1b-NA]

Type/Mix	RAP	ITSR [%]	Perm def [%] (Spurbildung)	Complex Modulus E* [MPa] (15°C)
Prescribed value	0%	≥70	≤10	(note 1)
AC 11 S/Mx05			6.82	
AC 11 S/Mx05b aged	0%	91	5.57	8000
AC 11 S/Mx07a aged	40%	97	5.12	8000
AC 11 S/Mx10b aged	60%	98	3.60	
	15%/30%			
Prescribed value	(3)		≤7.5	≥14000
AC EME 22 C2/ Mx30b aged	0%	87	(note 2)	17000
AC EME 22 C2/ Mx32b aged	40%	85	2.73	17000

(1)= not applicable

(2)= not available

(3)=cold/hot mix

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the financial support of the Federal Roads Office (FEDRO/ASTRA); grant Nr. VSS 2005/455. The contributions of Dr. Salomé Dos Santos, Dr. Moises Bueno visiting intern Jaehong Lee, Dr. Martin Hugener and technicians Simon Kuentzel, Hans Kienast, Christian Meierhofer, Roland Takacs of the laboratory for Road Engineering/Sealing Components are gratefully acknowledged.

Furthermore, the contributions of the Begleitkommission and their input is greatly appreciated. For assistance in the German translation, Ms. Michèle Koehli is acknowledged.

Abbreviations

Abbreviation	Description
μ	Poisson's ratio
A	Peak areas of the functional groups of interest
b	Height of specimen respectively [mm]
ASTRA	Bundesamt für Strassen
d	Diameter of specimen respectively [mm],
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
E	Stiffness modulus [MPa]
E(N)	Stiffness modulus at the particular cycle N [MPa]
Empa	Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology
F	Force [N]
FTIR	Fourier Transform Infrared Spectrometer
G, G', G''	Complex Shear modulus, real part of G, imaginary part of G [MPa]
h	Height of specimen respectively [mm]
h_0	Specimen height after initial loading [mm]
h_n	Specimen height after n cycles of loading [mm]
IDT_d	Average indirect tensile strength of the dry group, [kPa]
IDT_w	Average indirect tensile strength of the wet group [kPa]
ITSR	Indirect tensile strength ratio, in percent [%]
LTPP	Long-Term Pavement Performance
M	Mean
N	Number of cycles
N_{Makro}	Number of cycles where micro cracks begin to form and where ER(N) reaches maximum value
RAC	Recycled asphalt concrete
RAP	Reclaimed asphalt pavement
SD	Standard deviation
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
ϵ_{el}	Elastic horizontal strain [%],
ϵ_n	Strain after n cycles [%]
σ	Horizontal stress in the middle of the specimen [MPa]
EN	European Standards
SN	Swiss standards
CAST	Coaxial shear tests

References

[AASHTO R30]	AASHTO Standard Practice R30. Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt
[AL Sp-Asphalt 09]	Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeitsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgrösse in die Dimensionierung, 2009
[Arshad 2012]	Arshad H., Qiu Y. Evaluation of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement Applied Mechanics and Materials Vols. 178-181; 2012, pp 1522-1525
[Bueche 2014]	Recycling von Ausbauasphalt EP5
[Dorrence 1974]	Dorrence, S.M., Barbour, F.A., Petersen, J.C. Direct evidence of ketones in oxidized asphalts Analytical Chemistry 46 (14) , pp. 2242-2244; 1974
[Doyle 2011]	Doyle, J.D., Mejias-Santiago, M., Brown, E.R., Howard, I.L. Performance of high RAP-WMA surface mixtures Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists- Proceedings of the Technical Sessions; 2011, 80 , pp. 419-453
[Dünner 2013]	Recycling von Ausbauasphalt EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung
[EN 12697-12]	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens: EN 12697-12:2008 (E)
[EN 12697-17:2004+A1]	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 17: Particle loss of porous asphalt specimen, July 2007
[EN 12697-22]	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking EN 12697-22:2003+A1
[EN 12697-23]	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens, July 2003
[EN 12697-24 :2004+A1]	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 24: Resistance to fatigue (July 2007)
[EN 12697-25]	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 25: Cyclic compression test, April 2005
[EN 12697-26]	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness (July 2004)
[EN 13108-1: 2006 / AC: 2008]	Bituminous mixtures - Material specifications - Part 1: Asphalt Concrete and 640 431-1b-NA : Asphaltmischgut Mischgutanforderungen –Teil 1: Asphaltbeton 2008
[EN 14770]	Bitumen and bituminous binders - Determination of complex shear modulus and phase angle - Dynamic Shear Rheometer (DSR)
[Gubler 2005]	R. Gubler, M.N. Partl, F. Canestrari , A. Grilli. "Influence of water and temperature on mechanical properties of selected asphalt pavements", Materials and Structures, , v. 38, 2005
[Halles 2009]	Halles, F.A., Thenoux, G.Z. (2009). Degree of influence of active fillers on properties of recycled mixtures with foamed asphalt Transportation Research Record (2095), pp. 127-135
[Hong 2010]	Hong, F., Chen, D.-H., Mikhail, M.M. (2010). Long-term performance evaluation of recycled asphalt pavement results from Texas: Pavement studies category 5 sections from the long-term pavement performance program. Transportation Research Record(2180), pp. 58-66
[Huang 2005]	Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, X., Egan, B.K. Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement Transportation Research Record (1929) , pp. 37-45, 2005
[Hugener 2014]	Recycling von Ausbauasphalt EP2
[Karlsson 2003]	Karlsson, R., Isacson, U. Application of FTIR-ATR to characterization of bitumen rejuvenator diffusion Journal of Materials in Civil Engineering 15 (2) , pp. 157-165, 2003
[Mukhopadhyay 2010]	Mukhopadhyay, A.K., Geiger, B.J., Button, J. (2010). Use of alkali-silica reaction-affected recycled concrete aggregate in hot-mix asphalt. Transportation Research Record(2179), pp. 1-9
[Nahar 2013]	Nahar, S.N., Mohajeri, M., Schmets, A.J.M., Scarpas, A., van de Ven, M. F. C. and Schitter, G.. First observation of the blending zone morphology at the interface of reclaimed asphalt binder and virgin bitumen TRB 2013 Annual Meeting
[Nazzal 2013]	Nazzal, M. D., Mogawer, W.; Kaya, S.; Bennert, T. Nano-Scale Evaluation of the Effect of RAP

	on Virgin Asphalt Binder Properties. TRB 2013 Annual Meeting.
[Partl 2001]	Partl, M.N., Sokolov, K.: Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. ASTRA 2001/052, Report Nr 1241, FRAPuar(2009)
[Partl 2010]	Partl, M.N., Pasquini, E., Canestrari, F., Virgili, A.: Analysis of Water and Thermal Sensitivity of Open Graded Asphalt Rubber Mixtures, Construction and Building Materials, Vol 24, pp 283..291 (2010).
[Petersen 1998]	Petersen, J.C. A dual, sequential mechanism for the oxidation of petroleum asphalts Petroleum Science and Technology 16 (9-10) , pp. 1023-1059; 1998
[Petersen 2011]	Petersen, J. C & Glaser, R. Asphalt Oxidation Mechanisms and the Role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited, Road Materials and Pavement Design, 12:4, 795-819; 2011
[Poulikakos 2009]	Poulikakos, L. D., Partl, M.N. Evaluation of Moisture Susceptibility of Porous Asphalt Concrete Using Water Submersion Fatigue Tests. Construction and Building materials nr23, pp 3475-3484, 2009.
[Seeberger 2014] Recycling von Ausbauasphalt EP1	
[SN 640 431-1b-NA]	Anforderungen an den Asphaltbeton EN 13108-1:2006/AC:2008
[Sokolov 2005]	K. Sokolov, R. Gubler, M.N Partl. "Extended Numerical Modeling and Application of the Coaxial Shear Test for Asphalt Pavements", J. of Materials & Structures Nr 279, June2005, pp 515-522.
[Sun 2011]	Sun, Y., Wu, S., Zhu, J., Zhong, J. Investigation on Properties of Granite Asphalt Mixtures Prepared Using Fine Recycled Concrete Aggregate. Advanced Materials Research Vols. 211-212 (2011) pp 1066-1071
[TP Asphalt-StB-25 B 1]	Einaxialer Druckschwellversuch-Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme. TP Asphalt-StB teil 25 B 1.Ausgabe 2010

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: 03.04.2014

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2005/455
Projekttitel: Recycling von Ausbaupasphalt in Heissmischgut - Einzelprojekt EP4: Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Strassenbelägen mit Ausbaupasphalt
Enddatum: 1.4.2014

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Dieses Projekt ist ein Teilprojekt des Recycling Forschungspakets mit fünf Teilprojekten. Dieses Teilprojekt untersucht das Langzeitverhalten und die Performance des Ausbaupasphalts. Es wurden eine Deckschicht AC 11 S und eine Hochmodul-Binderschicht AC EME 22 nach Schweizernormen chemisch und mechanisch mit Verwendung von 40% und 60% Ausbaupasphalt (RAP) charakterisiert. Die hier präsentierten Ergebnisse beziehen sich exklusiv auf gealtertes Mischgut. Andere Teilprojekte im Recycling Paket haben gleiche Mischgüter in ungealtertem Zustand untersucht. In Einzelfällen wurden diese Ergebnisse auch hier präsentiert. Die künstliche Alterung wurde gemäss der AASHTO R30 Methode durchgeführt, da Langzeit Performance von Interesse war.

Es wurden chemische und mechanische Untersuchungen an Bindemitteln durchgeführt. Die chemischen Untersuchungen mit ATR-FTIR zeigten klare Zeichen einer Oxidation (Alterung) des Bindemittels mit Erhöhung des Karbonyl und Sulfoxid Indexes. Rheologische Untersuchungen mit DSR zeigten die Erhöhung des Modulwertes der Mischgüter für beide Materialien mit RAP, wobei bei hohen Temperaturen eine grössere Erhöhung der Modulwerte des Hochmodulmischguts festgestellt wurde. Ein grosser Unterschied zwischen den Eigenschaften dem Mischgut mit 40% RAP und 60% RAP wurde nicht festgestellt. Offensichtlich hat das Verjüngungsmittel die Erhöhung des RAP Anteils gut kompensieren können. Alterung und RAP haben die Penetrationswerte reduziert und den Erweichungspunktwert erhöht, wobei der Einfluss der Alterung grösser war als die Zugabe von RAP.

Da Asphaltbeläge hauptsächlich in drei Punkten versagen, Ermüdungsrisse, Thermalrisse und Spurbildung, wurden verschiedene Prüfmethode benutzt, um das Langzeitverhalten des Materials festzustellen. Diese mechanischen Prüfungen haben gezeigt, dass die Zugabe von RAP das Langzeitverhalten und die Dauerhaftigkeit der Mischgüter nicht komprimiert hat. Beispielsweise wurde eine Erhöhung der Indirekten Zugwerte für AC 11 S und der Reduktion des Wertes für das Hochmodulmischgut festgestellt. Die Marshallwerte für das AC 11 S Mischgut mit RAP haben für die Stabilität und das Fließen die normierten Anforderungen für Typ N erfüllt. Die Zugabe von RAP hat den Steifigkeitsmodul bei niedrigen Temperaturen nicht signifikant beeinflusst, obwohl bei hohen Temperaturen eine Erhöhung der EME Modulwerte festgestellt wurde. Widerstand gegen Ermüdung war besser für AC 11 S mit RAP als ohne und schlechter für AC EME ohne RAP als mit. Die Spurbildung, untersucht mit der Französischen Methode, hat gezeigt, dass die Prüfkörper mit RAP weniger Spuren bilden als solche ohne; mit allen Ergebnissen unter der normierten Anforderungen von 10% beziehungsweise 7.5%. Wie erwartet war die Spurbildung der AC EME erheblich geringer als beim AC 11 S. Unter Druckschwellversuche zeigten die Mischgüter mit RAP vor allem beim AC 11 S viel weniger permanente Deformationen und Dehnungsraten. Das Niedrigtemperaturverhalten der Mischgüter mit RAP wurde nicht signifikant beeinflusst, wobei die indirekten Zugwerte des Hochmodulmischguts niedriger waren als derjenige des AC 11 S. Die durch den Cantabro Test ermittelten Kornverlustwerte der Mischgüter mit RAP waren nicht erhöht. Zwei Methoden wurden für die Ermittlung der Wasserempfindlichkeit benutzt: KAST und ITSr. Beide Prüfungen zeigten keine statistisch signifikanten Veränderungen der Wasserempfindlichkeitswerte der Mischgüter mit RAP im Vergleich zu denjenigen ohne RAP.

Ein Vergleich mit den Anforderungen der Schweizernormen zeigt, dass die hier untersuchten Materialien die Anforderungen erfüllen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein hoher Anteil an RAP für Deckschicht AC und Binderschicht AC EME möglich ist und die Schweizernormen überarbeitet werden sollten, um diesen höheren Anteil zu ermöglichen.

Die Zugabe des gealterten Bindemittels des RAP im Mischgut kann das Mischgut verhärten und es spröder und weniger ermüdungsresistent machen. Die hier präsentierten Ergebnisse zeigen, dass ein gealtertes Mischgut mit 40% und 60% RAP sich wie ein Originalmischgut (ohne RAP) verhalten kann.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Die Ziele des Projektes die Dauerhaftigkeit von Ausbauasphalt mit erhöhten Anteil an RAP zu untersuchen, wurden erreicht.

Folgerungen und Empfehlungen:

Ein Vergleich mit den Anforderungen der der Schweizernormen zeigt, dass die hier untersuchten Materialien die Anforderungen erfüllen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass ein hoher Anteil an RAP für Deckschicht AC und Binderschicht AC EME möglich ist und die Schweizernormen überarbeitet werden sollten, um diesen höheren Anteil zu ermöglichen.

Publikationen:

1. Poulikakos, L.D., dos Santos, S., Bueno, M., Kuentzel, S., Hugener, M., Partl, M. N. Influence of short and long term aging on chemical, microstructural and macro-mechanical properties of recycled asphalt mixtures. Construction and Building Materials 51 (2014) 414–423
2. Poulikakos, L.D., dos Santos, S., Lee, J., Partl, M. N. Moisture Susceptibility of Recycled Asphalt Concrete: A Multi-Scale Approach, Transportation Research Board, TRB (2014), Washington.
3. Poulikakos, L.D., dos Santos, S., Lee, J., Partl, M. N. Moisture Susceptibility of Recycled Asphalt Concrete, submitted

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Poulikakos

Vorname: Lily

Amt, Firma, Institut: Empa

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

Lily Poulikakos



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

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Für die untersuchten Mischgutsorten wurden die Ziele dieses Forschungsauftrages erreicht und es konnten die angestrebten Erkenntnisse über die Dauerhaftigkeit von Asphalten mit Ausbauasphalt gewonnen werden. Bei den zahlreichen angewandten Untersuchungsmethoden zeigten die Resultate keine signifikanten Unterschiede zwischen den Prüfkörpern mit und ohne RAP. Das deutet darauf hin, dass sowohl beim untersuchten AC 11 S wie auch beim ebenfalls geprüften AC EME 22 C2 höhere RAP-Anteile als heute normiert möglich sein könnten.

Der ebenfalls in der Begleitkommission diskutierte AC T 22 S mit RAP und Verjüngungsmittel wurde nicht untersucht.

Umsetzung:

Mit den Ergebnisse des vorliegenden Einzelprojektes EP4 "Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Strassenbelägen mit Ausbauasphalt" kann das angestrebte Ziel des Forschungspaketes „Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut“ die Wiederverwendung von Ausbauasphalt in bituminösen Strassenbelägen zu fördern klar unterstützt werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Mittels Feldversuchen können die Resultate dieser Forschungsarbeit verifiziert werden. Aussagen über die Dauerhaftigkeit von Asphalten mit RAP könnten allenfalls auch mit einem Untersuchungsprogramm an bereits seit längeren bestehenden Strassenabschnitten, welche RAP enthalten, gewonnen werden.

Über die Anwendung und Auswirkung von Verjüngungsmitteln bestehen noch Wissenslücken. Nicht untersucht in dieser Arbeit wurden Bindemittel mit PmB oder Niedertemperaturasphalte mit RAP. Auch hier besteht noch Forschungsbedarf.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Resultate des Einzelpaketes EP4 können zusammen mit Resultaten aus anderen Einzelpaketten und dem Validierungsprojekt verwendet werden, um die SN 640431-1 zu revidieren.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Horat

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Stadt Zürich Tiefbauamt

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Horat Martin

Digital unterschrieben von Horat Martin
DN: cn=Horat Martin, email=horat.martin@zuerich.ch
Datum: 2014.06.19 12:09:53 +0200

FK4: M. Hugener

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3

D. Sendorf. 25.6.14

Seite 3 / 3

List of Road Research Federal Reports

Stand: 15.06.2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbauasphalt mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdruckverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labor-massstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffbarkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebsparkeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des ponts dalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlag-schutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009