



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Forschungspaket PLANET EP-4: Gebrauchsdauer und Alterung

Research package PLANET: EP-4 Durability and Ageing

**Paquet de recherche PLANET: EP-4: Durabilité et
vieillessement**

**Empa Dübendorf
Prof. Dr. Christiane Raab
Prof. Dr. Manfred N. Partl
Ingrid Camargo**

**Forschungsprojekt VSS 2010/544 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Dezember 2016

1583

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

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

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

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

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

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Forschungspaket PLANET EP-4: Gebrauchsdauer und Alterung

Research package PLANET: EP-4 Durability and Ageing

**Paquet de recherche PLANET: EP-4: Durabilité et
vieillessement**

**Empa Dübendorf
Prof. Dr. Christiane Raab
Prof. Dr. Manfred N. Partl
Ingrid Camargo**

**Forschungsprojekt VSS 2010/544 auf Antrag des Schweizerischen
Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. Dr. Christiane Raab

Mitglieder

Prof. Dr. Manfred N. Partl
Ingrid Camargo

Federführende Fachkommission

Fachkommission 3 Baustoffe

Begleitkommission

Präsident

Heinz Aeschlimann

Mitglieder

Hansruedi Eberhard
Hans-Peter Beyeler
Sandra Dünner
Martin Horat
Adrian Zippo
Felix Solcà

Gesamtprojektleitung

Dr. Thomas Arn

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Problemstellung/Auftrag	13
1.1 Ausgangslage.....	13
1.2 Ziele.....	14
1.3 Kenntnisstand/Literaturübersicht.....	15
2 Material	17
2.1 Mischgutkonzept	17
2.2 Kennwerte Mischgut AC B 16 S.....	17
2.3 Kennwerte Bindemittel	18
2.4 Mischguttypen Niedertemperaturasphalt	19
2.5 Mischgut und Bindemittelcharakterisierung	20
3 Alterungsmethode	21
3.1 Langzeitalterung in der Literatur	21
3.2 Alterungsmethode	21
4 Prüfmethode	23
4.1 Mechanische Prüfungen	23
4.1.1 Spurbildungstest bei 60°C (Warmtemperaturverhalten)	23
4.1.2 Steifigkeitsmodul IT-CY (Gebrauchstemperaturverhalten)	24
4.1.3 Spaltzug-Schwellversuch (Ermüdungsverhalten)	24
4.2 Prüfungsmethoden am Bindemittel.....	26
4.2.1 Modulbestimmung mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR)	26
4.3 Alterungsmethoden am Bindemittel	27
4.3.1 Rolling Thin Film Oven Test RTFOT (EN 12607-1)	27
4.3.2 Pressure Aging Vessel (EN 14769)	27
4.4 Prüfprogramm	28
5 Labormischungen	29
5.1 Herstellung der Labormischungen	29
6 Ergebnisse Labormischungen	31
6.1 Mischgut Charakterisierung der Labormischungen	31
6.2 Spurbildungstest der Labormischungen	34
6.3 Steifigkeitsmodul IT-CY der Labormischungen.....	35
6.4 Ermüdungsverhalten (Spaltzug-Schwellversuch) der Labormischungen	39
6.5 Bindemittel Charakterisierung des rückgewonnen Bindemittels aus den Labormischungen.....	48
6.5.1 Penetrationswerte	48
6.5.2 Erweichungspunkt Ring und Kugel	49
6.5.3 Penetrationsindex I_p	50
6.5.4 Modul mit dynamischem Scherrheometer (DSR)	51
7 Ergebnisse Mischungen der Aufbereitungs-anlage	55
7.1 Steifigkeitsmodul IT-CY der Mischungen der Aufbereitungsanlage	55
7.2 Ermüdungsverhalten (Spaltzug-Schwellversuch) der Mischungen der	

	Aufbereitungsanlage	57
8	Bindemitteluntersuchungen	63
8.1	Erweichungspunkt Ring und Kugel vor und nach Laboralterung.....	63
8.2	Modul mit dynamischem Scherrheometer (DSR)	64
9	Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Forschungsziele.....	67
9.1	Beurteilung des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfungen.....	67
9.2	Beurteilung des Alterungsverhaltens von Bindemittel im WAM mittels rheologischer Prüfungen.....	68
9.3	Vorhersage der Lebensdauer, der Evolution des Ermüdungsverhaltens und der Spurrinnenbildung von WAM-Belägen unter Anwendung klassischer Modelle	68
10	Empfehlungen für die Verwendung von WAM.....	69
11	Forschungsbedarf	71
	Anhänge.....	73
	Glossar	81
	Literaturverzeichnis.....	83
	Projektabschluss	85
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	89

Zusammenfassung

Straßenbeläge werden nach wie vor hauptsächlich bei Temperaturen zwischen 150°C und 160°C hergestellt und eingebaut. In den letzten Jahren hat sich aber der Druck auf die Asphaltindustrie zunehmend verstärkt, die Herstellungs- und Einbautemperaturen zu senken. Dies hat zum Ziel, einerseits die CO₂-Emissionen, die zur Bereitstellung der Energie für die Erhitzung der Asphaltkomponenten aufgewandt werden müssen, zu senken und andererseits die Emissionen aus dem Asphalt selbst zu reduzieren.

In den letzten fünf Jahren ist daher die Zahl der Verfahren zur Herstellung von Niedertemperaturasphalten stark gestiegen, und es wird für die Bauherren immer schwieriger, die verschiedenen Produkte hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften sowie ihrer energetischen und toxikologischen Belastung zu unterscheiden und bei Ausschreibungen aus unzähligen Varianten den optimalen Niedertemperaturasphalt auszuwählen, da klare und unabhängige Vergleiche zwischen den verschiedenen Varianten fehlen. Bei der Beurteilung verschiedener Konzepte ist neben der Energiebilanz das Langzeitverhalten, respektive die Lebensdauer eines Niedertemperaturasphaltes (WAM) von zentraler Bedeutung, wobei der Einfluss der Alterung auf dieselbe ebenfalls eine wichtige Rolle spielt.

Im vorliegenden Teilprojekt 4: „Gebrauchsdauer und Alterung“ des Forschungspakets PLANET sollte das Langzeitverhalten von verschiedenen Niedertemperaturasphalten (WAM) und den darin enthaltenen Bindemitteln untersucht und untereinander sowie mit einem klassischen Heißasphalt verglichen werden. Die Ziele des Projekts waren dabei:

- Beurteilung des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfmethode
- Beurteilung des Alterungsverhaltens von Bindemitteln im WAM mittels rheologischer Prüfmethode
- Vorhersage der Lebensdauer, der Evolution des Ermüdungsverhaltens und der Spurrinnenbildung von WAM-Belägen unter Anwendung klassischer Modelle
- Erarbeitung von Empfehlungen für die Verwendung von WAM

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde deshalb als erstes eine Alterungsmethode für verdichtete Laborprüfkörper unter Einbeziehung von Feuchtezyklen entwickelt. Vor und nach der Alterung wurden die Prüfkörper dann mit Hilfe von Steifigkeitsmodul IT-CY, Spaltzugschwellversuch und Spurbildungstest auf ihr Gebrauchs- und Ermüdungsverhalten untersucht. Insgesamt wurden neben einem heißen Referenzmischgut 7 mit unterschiedlichen Additiven und Verfahren hergestellte WAM Asphalte untersucht. Zusätzlich wurde auch das aus den Niedertemperaturasphalten rückgewonnene Bindemittel mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometers DSR analysiert.

Die Auswertungen zeigen, dass beim Ermüdungswiderstand, die Werte der meisten WAM Mischungen – vor allem im gealterten Zustand - im Bereich des heißen Referenzmischguts liegen. Beim Spurbildungstest liegt dagegen die Spurrinnentiefe bei mehr als der Hälfte der im Forschungsprojekt untersuchten WAM Asphalte bereits im nicht gealterten Zustand deutlich über derjenigen des heißen Referenzmischguts. Im gealterten Zustand nimmt bei den meisten WAM Asphalten die Spurrinnentiefe nochmal deutlich zu und damit der Widerstand gegen bleibende Verformungen ab.

Während also der Einbau von WAM Asphalten gerade im Hinblick auf ihr Ermüdungsverhalten als unbedenklich und daher sogar als empfehlenswert angesehen werden kann, ist im Hinblick auf den Widerstand gegen bleibende Verformung - mit Ausnahme der Mischungen mit Zeolith und mit Schaumasphalts und RAP - eindeutig von einer Verwendung von WAM Asphalten abzuraten.

Betrachtet man alle im Forschungsprojekt untersuchten Mischungen erweist sich die Mischung FR-WATER+RAP sowohl hinsichtlich ihres Verhaltens in Ermüdungs- und Spurbildungstest als auch hinsichtlich der in beiden Prüfungen festgestellten Alterungs-

eigenschaft als die eindeutig beste, d.h. als eine Mischung, die sich in ihren Eigenschaften sogar dem heißen Referenzmischgut überlegen erweist.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist eine Beurteilung und Vorhersage des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfungen problematisch, wenn nicht unmöglich, da die sich kontradiktierenden Aussagen aufgrund Ermüdungs- bzw. Spurbildungsversuchen eine einheitliche Beurteilung des Alterungsverhaltens nicht zulassen. Außerdem ermöglicht es die in der Schweiz erst relativ kurzzeitige bestehende Erfahrung mit Niedertemperaturbelägen nicht, Relationen zwischen den Ergebnissen des vorliegenden Forschungsprojekts und dem in situ Verhalten dieser Belagstypen zu ziehen.

Wichtig für das weitere Vorgehen ist daher die Langzeitbeobachtung der im Rahmen des Einzelprojektes 7: „Arbeitshygiene“ eingebauten Versuchsstrecke mit unterschiedlichen Niedertemperaturbelägen und ein Vergleich des Alterungsverhaltens in situ mit dem in den vorliegenden Laboruntersuchungen bestimmten Alterungsverhalten.

Die vorliegende Forschungsarbeit verweist erneut auf die Komplexität der sogenannten „Alterung“ von bitumenhaltigen Materialien und die Auswirkung dieser Alterung auf das Verhalten solchen Materialien. Es zeigt sich, dass in WAM Asphalte verwendete Zusätze Alterungsprozesse zusätzlich verändern können und somit die für Heißasphalt bekannten Phänomene (z.B. Versteifung und damit Abnahme der Spurrinnentiefe nach Alterung) nicht mehr gelten.

Résumé

Les chaussées routières sont principalement fabriquées et mises en œuvre à des températures comprises entre 150°C et 160°C. Au cours de ces dernières années, les industries ont subi une pression les poussant à réduire les températures de fabrication et de mise en œuvre. Ceci dans le but d'une part de diminuer les émissions de CO₂ émises lors du chauffage des constituants de l'enrobé et d'autre part de réduire les émissions provenant de l'enrobé lui-même.

Au cours de ces cinq dernières années, par conséquent, le nombre d'enrobé tiède a augmenté de manière significative. Il est de plus en plus difficile pour les maîtres d'ouvrage de distinguer les différents produits en fonction de leurs propriétés mécaniques et de leur bilan énergétique et toxicologique et donc de choisir l'enrobé tiède correspondant au mieux aux attentes des appels d'offre. En plus du bilan énergétique, le comportement à long terme des enrobés à basses températures joue un rôle central, tout comme son vieillissement.

Dans le présent projet 4 : Durabilité et vieillissement sont au centre des recherches PLANET, les différents enrobés tièdes ainsi que les liants contenus dans celui-ci devront être examinés et comparés les uns aux autres mais aussi avec les enrobés chauds classiques. Les objectifs du projet étaient les suivants :

- Evaluation du comportement au vieillissement des WAM au moyen d'essais mécaniques
- Evaluation du comportement au vieillissement des liants dans les WAM au moyen d'essais rhéologiques
- Prédiction de la durée de vie, de l'évolution du comportement à la fatigue et à l'orniérage au moyen de modèles classiques
- Elaboration de recommandations pour l'utilisation des WAM

Dans le cadre du projet de recherche, une méthode de vieillissement pour les échantillons de laboratoire impliquant des cycles d'humidité a été développée. Les échantillons sont examinés avant et après vieillissement en utilisant le module de rigidité IT-CY, Résistance à la fatigue: Essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques (Spaltzugschwellversuch) et le test d'orniérage. Au total sept WAM fabriqués avec des additifs différents ont été examinés et comparés à un mélange de référence à chaud. Les liants bitumineux récupérés sont analysés à l'aide du rhéomètre à cisaillement dynamique DSR.

Les évaluations montrent que les valeurs de la résistance en fatigue de la plupart des WAM sont dans la plage de référence des mélanges chauds. Au niveau de l'orniérage on observe l'effet inverse. Cela signifie que pour plus de la moitié des enrobés tièdes examinés dans le projet, la profondeur des ornières de l'état non-vieilli est supérieure à celle de l'enrobé chaud de référence. Dans l'état vieilli, la profondeur des ornières est largement supérieure à celle de référence, ce qui nous permet de conclure que la résistance aux déformations permanentes se dégrade avec vieillissement.

D'un point de vue de la fatigue, ces enrobés sont recommandés. Leur qualité permette une bonne mise en œuvre. Mais si l'on se base sur le test d'orniérage, alors ils sont déconseillés à l'exception de deux d'entre eux : Zeolith et RAP.

En considérant l'ensemble des enrobés étudiés, le mélange FR-WATER+RAP apparaît comme le plus recommandable non seulement d'un point de vue de la fatigue mais aussi de l'orniérage.

Sur la base des présents résultats de recherche, une évaluation et une prévision du comportement au vieillissement des WAM au moyen d'essais mécaniques est problématique, voire impossible. En effet les résultats des tests de fatigue et d'orniérage

sont contradictoires et ne permettent pas une évaluation uniforme du comportement à long terme des WAM. Les résultats de ce projet de recherche ne permettent pas d'établir des relations entre les revêtements existants à basses températures et de conclure sur le comportement in situ de ces types de revêtements de sol.

Dans le cadre du projet 7 : « Hygiène du travail », l'observation à long terme est importante tout comme l'étude du vieillissement in situ déterminée grâce à des essais de laboratoire.

La présente étude rappelle la complexité du terme « vieillissement » pour les matériaux bitumineux ainsi que de l'effet de ce vieillissement sur le comportement de tels matériaux. On constate que les additifs utilisés dans les WAM peuvent modifier ce processus de vieillissement et donc diminuer les phénomènes connus pour les enrobés chauds (par exemple, le raidissement et donc diminuer la profondeur des ornières).

Summary

Bituminous road pavements generally are constructed at temperatures between 150°C and 160°C. Nevertheless, for several years the asphalt industry has been under pressure to reduce production and construction temperatures. By reducing the temperatures, on the one hand CO₂-emissions from energy needed for the heating of the asphalt components and on the other hand hydrocarbon emissions from the manufacture and construction of asphalt pavements can be reduced.

As a result during recent years the amount of production methods of warm mix asphalt (WAM) has increased tremendously, making it more and more difficult for contracting authorities to differentiate between products and to select the optimum WAM concerning mechanical and energetical properties. Furthermore, since clear and unbiased comparisons between the different alternatives are missing. For the assessment of different concepts not only the energy balance is of importance but durability and lifespan have to be considered. Here, the influence of ageing plays an important role.

In the existing partial project 4 „Durability and Ageing“ of the research package PLANET the long-term performance of different WAM including their binders should be evaluated and compared among themselves and with a classical hot mix asphalt. The project aims in detail are:

- Evaluation of the ageing behaviour of WAM using mechanical testing methods
- Evaluation of the ageing behaviour of binders from WAM using rheological testing methods
- Prediction of life span, evolution of fatigue behaviour and rutting performance of WAM-pavements with the help of classical methods
- Elaboration of recommendations for the use of WAM

In the course of the project first of all an ageing method for compacted specimens including wetting cycles was developed. Then specimens were investigated regarding their application and fatigue behaviour before and after ageing using stiffness modulus IT-CY, cyclic indirect tension test-modulus CIT-CY as well as rutting test. Overall, apart from the hot mix reference mixture 7 WAM mixtures with different additives and production methods were evaluated. Additionally, the recovered binder from these WAM was analysed using the dynamic shear rheometer DSR.

The investigation shows that for the fatigue resistance, the measured values for most of the WAM types – especially in the aged state – are comparable to the hot reference mixture. By contrast already in the unaged state more than half of the WAM show rut depths which are clearly deeper than the reference mix one. After ageing the rut depth even increases and the resistance against permanent deformation is further reduced.

According to these findings the use of WAM with regard to fatigue resistance can be considered favorable and even recommendable, whereas the results for resistance against permanent deformation – except the mixtures with Zeolith and foam+RAP – advise against the application of WAM.

Taking all in the course of the project investigated mixtures into account the mixture FR-WATER+RAP turns out according to its ageing behaviour in fatigue and rutting testing to have the best performance amongst WAM mixtures, which is even superior to the hot mix reference.

On the basis of the results the assessment of the ageing performance and prediction of WAM using mechanical testing is difficult, if not impossible, since contradicting findings from fatigue and rutting testing do not permit consistent conclusions. Furthermore, due to limited short-time experiences in Switzerland it is not yet possible to determine a relationship between the results of the research project and the in situ behaviour of WAM.

Essential for further approaches is therefore, the long-term evaluation of in situ WAM mix test sections from the partial research project 7 „Working Hygiene“ and a comparison of in situ ageing with the results using the laboratory ageing protocol from this research.

The existing research once again refers to the complexity of the so-called „ageing“ of bituminous materials and the influence of this ageing on the performance of these materials. It was demonstrated that the additives used for the production of WAM can further change ageing processes so as the well-known phenomena of hot asphalt mixtures (e.g. stiffening and reduction of rut depth after ageing) are no longer valid.

1 Problemstellung/Auftrag

Das Forschungspaket PLANET (**P**otentiel et **A**nalyse des **E**nrobés **T**ièdes) des Bundesamtes für Strassen hat zum Ziel eine wissenschaftliche und technische Basis für die Förderung einer weitgehenden Nutzung von Asphaltbelägen mit niedriger energetischer und ökologischer Belastung in der Schweiz zu erreichen. Die verschiedenen Typen dieser sogenannten Niedertemperatur- oder Warmasphalte werden im Initialprojekt [3] eingehend beschrieben. In Abbildung 1 sind die acht verschiedenen Einzelprojekte mit ihren Interaktionen dargestellt. Das vorliegende Einzelprojekt EP-4 zur Gebrauchsdauer und Alterung hat hauptsächlich Bezüge zu den Projekten EP2 „Ökobilanz“ und EP-3 „Rezeptur und Optimierung des Leistungsumfangs“ ausserdem liefert es Input für das Projekt EP-5 „Umfassendes Auswertungsmodell“ liefern.

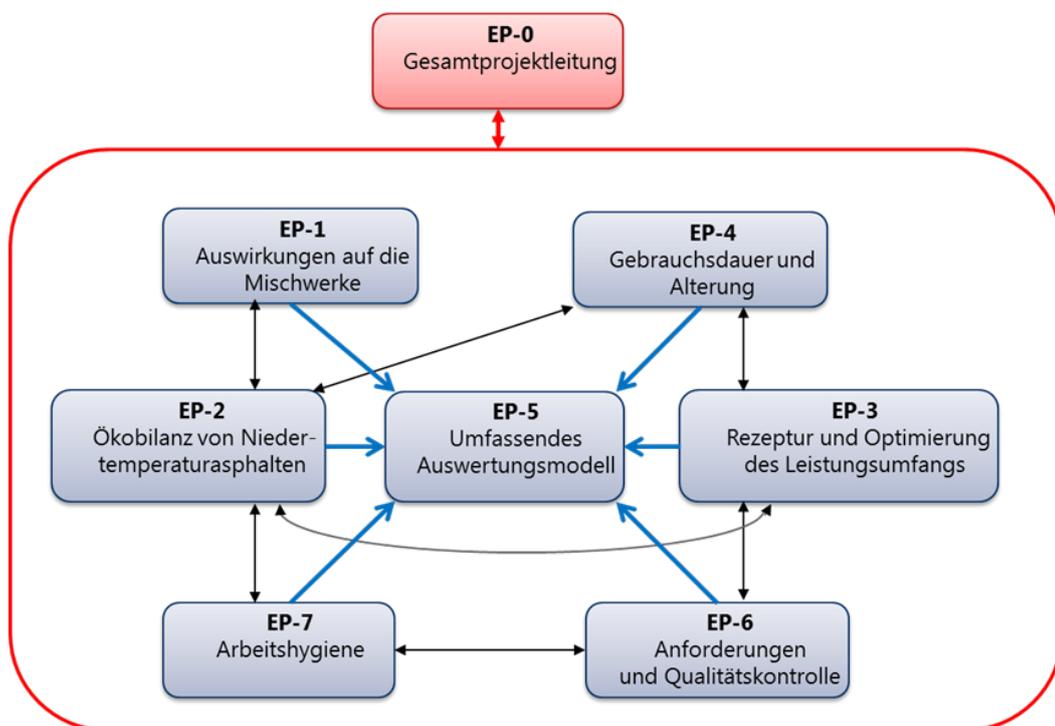


Abb. 1 Organigramm des Forschungsprojektes PLANET

1.1 Ausgangslage

Straßenbeläge werden nach wie vor hauptsächlich bei Temperaturen zwischen 150°C und 160°C hergestellt und eingebaut. Spezialbeläge wie Gussasphalt sogar bei Temperaturen über 200°C. In den letzten Jahren hat sich aber der Druck auf die Asphaltindustrie zunehmend verstärkt, die Herstellungs- und Einbautemperaturen zu senken. Dies hat zum Ziel, einerseits die CO₂-Emissionen, die zur Bereitstellung der Energie für die Erhitzung der Asphaltkomponenten aufgewandt werden müssen, zu senken und andererseits die Emissionen aus dem Asphalt selbst zu reduzieren [1]. Durch Reduktion der Asphalttemperatur beim Einbau kann eine starke Reduktion der Dämpfe und Aerosole erreicht werden, was sich positiv auf die Arbeitshygiene der Strassenarbeiter auswirkt. Aus ökologischen, aber auch ökonomischen Überlegungen wird der Bau von Straßenbelägen mit Niedertemperaturasphalten (WAM) zunehmend attraktiver.

In den letzten fünf Jahren ist daher die Zahl der Verfahren zur Herstellung von Niedertemperaturasphalten stark gestiegen [2], und es wird für die Bauherren immer schwieriger, die verschiedenen Produkte hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften sowie ihrer energetischen und toxikologischen Belastung zu unterscheiden und bei Ausschreibungen aus unzähligen Varianten den optimalen Niedertemperaturasphalt auszuwählen, da klare und unabhängige Vergleiche zwischen den verschiedenen Varianten fehlen. Bei der Beurteilung verschiedener Konzepte ist neben der Energiebilanz das Langzeitverhalten, respektive die Lebensdauer eines Niedertemperaturasphaltes (WAM) von zentraler Bedeutung, wobei der Einfluss der Alterung auf dieselbe ebenfalls eine wichtige Rolle spielt.

1.2 Ziele

Im vorliegenden Teilprojekt des Forschungspakets PLANET wird das Langzeitverhalten von verschiedenen Niedertemperaturasphalten (WAM) und den darin enthaltenen Bindemitteln untersucht und untereinander sowie mit einem klassischen Heissasphalt verglichen.

Dies beinhaltet im Einzelnen:

- Beurteilung des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfmethode
- Beurteilung des Alterungsverhaltens von Bindemitteln im WAM mittels rheologischer Prüfmethode
- Vorhersage der Lebensdauer, der Evolution des Ermüdungsverhaltens und der Spurrinnenbildung von WAM-Belägen unter Anwendung klassischer Modelle
- Erarbeitung von Empfehlungen für die Verwendung von WAM

Da befürchtet wird, dass gewisse Niedertemperaturbeläge sensibler auf Feuchtigkeit reagieren, wird die Langzeitalterung nicht nur durch eine konstante thermische Belastung simuliert, sondern durch zyklische Temperaturverläufe, die zudem mit Feuchtigkeitszyklen ergänzt werden.

Vor und nach der Alterung werden die Prüfkörper dann auf Ermüdung, Spurrinnenbildung und Steifigkeitsmodul untersucht. Aus den Resultaten wird die Entwicklung der Spurrinnenbildung, Ermüdung und Lebensdauer der Niedertemperaturbeläge mit klassischen Modellen abgeschätzt.

Zudem wird die Bindemittelalterung noch genauer untersucht, wozu das Bitumen aus den Prüfkörpern extrahiert und mit dem Ausgangszustand verglichen wird.

Im Rahmen des Forschungspakets werden verschiedene Aufbereitungsverfahren untersucht [3]. Im einzelnen sind die Mischguttypen in Tabelle 1 zusammengestellt:

- Roten Faden: verschiedene Niedertemperaturkonzepte (sequenzieller Mischprozess, Wasserbeigabe, Wachs, kombinierte Verfahren)
- Zusätzliche Verfahren (halbwarmes Verfahren, grünes Bindemittel, chemische Zusätze)
- Heißes Referenzmischgut

Tab. 1 Mischguttypen

Kategorie	Produktfamilie	Bezeichnung	Produkt
Roter Faden (FR)	Warm – Chemischer Zusatz oberflächenaktives Zusatzmittel zur Reduktion des Reibungswiderstands	FR-PACK	Cecabase
	Warm - Wasserhaltiger Zeolith (Aspha-min) als Zusatzmittel	FR-ZEO	Advera
	Warm - Wachs	FR-WAX	Sasobit
	Warm - Schaumbitumen (WAM-Foam- Methode) mit vorumhülltem Splitt	FR-WATER	WAM-Foam
	FR-Water + 50 % RAP, wie oben, aber mit 50% Recyclingasphalt (RAP)	FR-WATER+RAP	WAM-Foam+RP
Zusatzliste (PA)	Halbwarm - Fluxmittel	PA-HWAM	LEA
	Warm – Chemischer Zusatz	PA-PACK	Greenseal
Referenz (REF)	Heiß – klassisches Heißmischgut	REF-HOT	AC B 16 S

Für das Einzelprojektes EP4 werden dabei insgesamt 13 Mischungen ausgewählt und untersucht:

- Niedertemperaturasphalte des roten Fadens, im Labor hergestellt (5)
- Niedertemperaturasphalte des roten Fadens, im Mischwerk hergestellt (4)
- Niedertemperaturasphalte der Zusatzliste, im Labor hergestellt (2)
- Heißmischgut als Referenz im Mischwerk und Labor hergestellt (2)

1.3 Kenntnisstand/Literaturübersicht

Die Alterung von Mischgut an verdichteten Prüfkörpern wurde im Rahmen des SHRP-Projektes untersucht und im Feld überprüft [4], [5], [6]. Die vorgeschlagenen Alterungsmethoden beruhen aber ausschließlich auf einer Ofenlagerung bei erhöhter Temperatur und sind deshalb umstritten. Sie sind aus diesem Grunde in Europa auch nicht normiert. Die Vorhersage der Lebensdauer eines Belages ist komplex, da verschiedene Einflussparameter zu berücksichtigen sind. Nicht nur Belagsaufbau, Asphalteeigenschaften und Lasteinwirkung spielen eine Rolle, sondern auch Heilungseffekte, Dauer der Belastung, Belastungsgeschichte etc. sind einzubeziehen. Die Entwicklung von geeigneten Modellen ist deshalb ein aktuelles Forschungsthema und wird auch in der RILEM-Gruppe über Ermüdung untersucht [7]. In der Regel basieren diese Vorhersagen auf Ermüdungsversuchen, die für Heißmischgut schon seit längerer Zeit durchgeführt werden [8], [9].

Generell liegen keine umfassenden Vergleichsversuche zwischen verschiedenen WAM-Typen vor. Gewisse Verfahren für die Herstellung von Niedertemperaturasphalten sind relativ jung und entsprechende Langzeiterfahrungen fehlen dort grösstenteils. Für das LEA-Verfahren wurden in Frankreich Ermüdungsversuche durchgeführt, in denen die untersuchten Niedertemperaturasphalte durchwegs annähernd gleich gute Performance erreichten wie Heißasphalt [10], [11].

Das Alterungsverhalten des im Niedertemperaturasphalt enthaltenen Bitumens ist unterschiedlich erforscht. Mit Wachsen modifizierte Bindemittel sind relativ gut untersucht, da diese durch die Bitumenindustrie vermarktet werden [12], [13]. Bei vielen WAM-Verfahren kann das Bindemittel nicht alleine betrachtet werden, da zusätzliche Parameter ins Spiel kommen, wie die Mischsequenz oder kleine Mengen von Wasser (z. B. bei Verwendung von Zeolithen). In diesen Fällen ist wenig über die Bindemittelalterung im WAM bekannt.

Die Empa besitzt eine langjährige Erfahrung in den Spurrinnenprüfungen, die sie teilweise auch im VSS-Forschungsprojekt 2001/052 Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests erarbeitet hat [14]. Ebenfalls bei den Ermüdungsprüfungen war sie in verschiedenen Forschungsprojekten, unter anderem auch in einem Projekt mit dem

LAVOC stark engagiert [15], [16], [17].

2 Material

2.1 Mischgutkonzept

Alle im Forschungsprojekt untersuchten Asphaltmischgüter basieren auf einem Mischgutkonzept für eine Asphaltbinderschicht AC B 16 S mit einem Bindemittel 50/70 und einem Bindemittelgehalt von 4,6 Masse-%. Die Kennwerte der von der Anlage gelieferten Mischgüter (FR-HOT, FR-PACK, FR-ZEO und FR-WATER) sowie FR-WATER+RAP sind in Abbildungen 2 und 3 dargestellt. Die Angaben zum Bindemittel 50/70 finden sich in Tabelle 2.

2.2 Kennwerte Mischgut AC B 16 S

VALEURS NOMINALES
AC B 16 S
REF-HOT / FR-PAK / FR-ZEO / FR-WATER

CHANTIER	PLANET - Planches d'essais Wohlen - Uettligen		
MATERIAUX	Filler Sable concassé lavé 0.1/4 Gravillons concassés 4/8 - 11/16 (FR-ZEO: Zeolithe	FAMSA, Choëx Tuffière, Ecuwillens Daepp, Oppligen Tuffière, Ecuwillens Advera	et 2.6%)
RECYCLAGE	-		
LIANT	B 50/70 S (final)		soluble 4,6 %
AJOUTS	(FR-PAK: Ceoabase)	dosage	(0.184%)
TOTAL			4,6 %
M. VOLUMIQUE	des granulats	2.700 g/cm ³	du liant 1.03 g/cm ³
MARSHALL	Masse volumique app.	2.41 g/cm ³	Vides squelette min. (VMA) 14.8 %
	Masse volumique	2.51 g/cm ³	Stabilité (S) > 10 kN
	Vides résiduels (V _u)	4 %	Fluage (F) < 3.5 mm
	Vides comblés (VFB)	73 %	Quotient marshall (S/F) > 2.9
	Module de richesse	2.9	
	Sensibilité à l'eau (essai de traction indirecte selon EN 12697-12)	min. 70 %	
	Résistance à la déformation (essai d'ornièrage selon EN 12697-22)	<= 10 %	

COURBE GRANULOMETRIQUE
passant en % de la masse

0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5	45
8	11	15	19	26	37	51	60	69	82	98	100	100	100

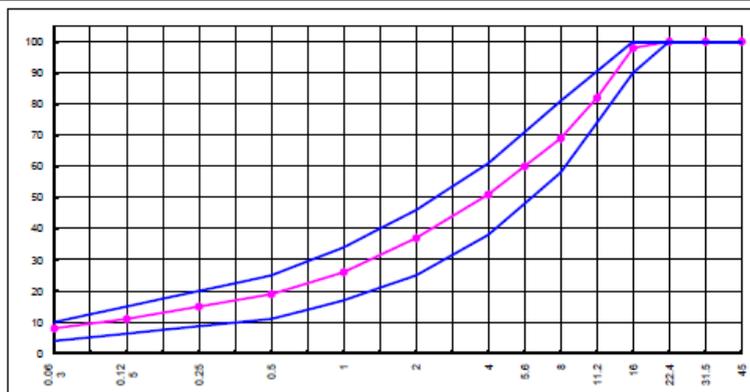


Abb. 2 AC B 16 S für FR-HOT, FR-PACK, FR-ZEO und FR-WATER der Aufbereitungsanlage Weibel, Oberwangen

VALEURS NOMINALES
AC B 16 S
 FR-WATER + RAP

CHANTIER	PLANET - Planches d'essais Wohlen - Uettligen				
MATERIAUX	Filler Sable concassé lavé 0.1/4 Gravillons concassés 4/8 - 11/16	FAMSA, Choëx Tuffière, Ecuwillens Daëpp, Oppligen Tuffière, Ecuwillens	et		
RECYCLAGE	Recycling 0/11	WEIBEL SA			50 %
LIANT	B 50/70 S (final)	dosage	2.3 %	soluble	4.6 %
AJOUTS		dosage			
	TOTAL				4.6 %
M. VOLUMIQUE	des granulats	2.700 g/cm ³		du liant	1.03 g/cm ³
MARSHALL	Masse volumique app.	2.41 g/cm ³	Vides squelette min. (VMA)	14.8 %	
	Masse volumique	2.51 g/cm ³	Stabilité (S)	> 10 kN	
	Vides résiduels (V _R)	4 %	Fluage (F)	< 3.5 mm	
	Vides comblés (VFB)	73 %	Quotient marshall (S/F)	> 2.9	
	Module de richesse			2.9	
	Sensibilité à l'eau (essai de traction indirecte selon EN 12697-12)			min. 70 %	
	Résistance à la déformation (essai d'ornièrage selon EN 12697-22)			<= 10 %	

COURBE GRANULOMETRIQUE
 passant en % de la masse

0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	11.2	16	22.4	31.5	45
8	11	15	19	26	37	51	60	69	82	98	100	100	100

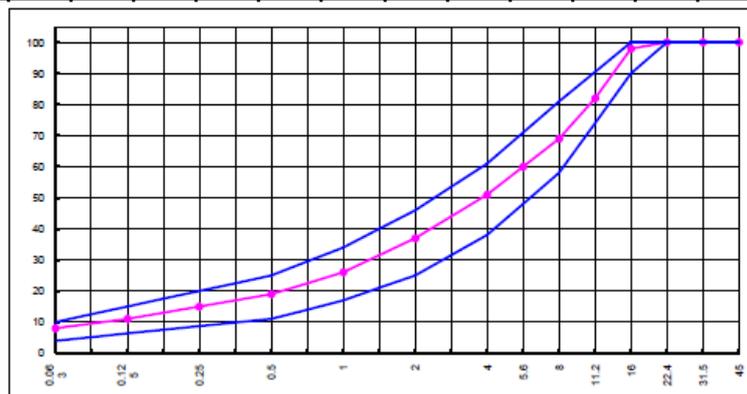


Abb. 3 AC B 16 S für FR-WATER+RAP der Aufbereitungsanlage Weibel, Oberwangen

2.3 Kennwerte Bindemittel

Tab. 2 Bindemittelkennwerte, Bitumen 50/70, Grisard, Basel

Prüfung	Norm	Kennwert
Penetration (25°C)	SN 670 511	59 1/10mm
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN 670 512	50.2°C
Penetrationsindex	SN 670 202-NA	-0.7
Brechpunkt nach Fraaß	SN 670 507	-19°C

2.4 Mischgutttypen Niedertemperaturasphalt

Mit dem Grundmischgut für die Asphaltbinderschicht AC B 16 S wurden dann die in Tabelle 3 dargestellten Niedertemperaturasphalttypen durch Zugabe von Zusätzen (z.B. Advera usw.) sowie Zugabe von anderen Bindemitteln (250/330, 35/50) hergestellt.

Tab. 3 Mischgutttypen sowie Aufbereitungs- und Verdichtungstemperaturen

Mischgutsorte	Kurzform	Zusätze	Dosierung	Bindemittel
WAM AC B 16 S	FR-PACK	Cecabase RT 945	0.4%/Bitumen	Bitumen 50/70
WAM AC B 16 S	FR-ZEO	Advera	0.25%/Mischgut	Bitumen 50/70
WAM AC B 16 S	FR-WAX	Sasobit	3%/Bitumen	Bitumen 50/70
WAM AC B 16 S	FR-Water	Schaumbitumen WAM-Foam	-	250/330, Bitumen 35/50 ¹
WAM AC B 16 S	FR-Water + 50 % RAP	wie oben + 50 % RAP	-	Bitumen 250/330, Bitumen 50/70*
WAM AC B 16 S	PA-HWAM	Fluxmittel (LEA1)	0.3%/Bitumen	Bitumen 250/330, Bitumen 50/70*
WAM AC B 16 S	PA-PACK	Greenseal	1%/Bitumen	

¹ Zugabe als Schaumbitumen

Ein Teil der Mischgüter REF-HOT, FR-PACK, FR-ZEO, FR-Water und FR-Water + RAP wurden auf einer Mischgutanlage für den Einbau in einer Versuchsstrecke (siehe auch [18]) produziert. Im vorliegenden Projekt wurden diese Mischgüter ebenfalls untersucht sowie aus angeliefertem Material im Labor hergestellt. Weiterhin wurden die Mischgüter FR-WAX, PA-HWAM und PA-PACK im Labor hergestellt. Tabelle 4 zeigt die verwendeten Misch- und Verdichtungstemperaturen.

Tab. 4 Mischgutttypen sowie Aufbereitungs- und Verdichtungstemperaturen

Mischgutsorte	Herstellung	Aufbereitungstemperatur [°C]		Verdichtungstemperatur [°C]
		Anlage	Labor	Labor
REF-HOT	Anlage/Labor	165	160	150
FR-PACK	Anlage/Labor	165	120	120
FR-ZEO	Anlage/Labor	130	130	120
FR-WAX	Labor	-----	130	120
FR-Water	Anlage/Labor	115	105	120
FR-Water + RAP	Anlage/Labor	115	105	105
PA-HWAM	Labor	-----	100	100
PA-PACK	Labor	-----	120	120

2.5 Mischgut und Bindemittelcharakterisierung

Zur Charakterisierung der im Labor hergestellten Mischgutttypen wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Mischguteigenschaften am im Labor hergestellten Mischgut bestimmt.

Für die Beurteilung des Alterungsverhaltens von Bindemitteln im WAM wurde das Bindemittel zurückgewonnen und wie in Tabelle 5 aufgeführt untersucht. Die in Tabelle 5 aufgeführten Bindemittelprüfungen wurden sowohl an Bindemittel aus ungealterten als auch aus gealterten Marshallprobekörpern durchgeführt.

Tab. 5 Prüfplan für die Mischguteigenschaften und Bindemittelleigenschaften

Prüfmethode	Normen	
Mischgut		
Löslicher Bindemittelanteil	SN 670 401	EN 12 697-1 [19]
Korngrößenverteilung	SN 670 402	EN 12 697-2 [20]
Rohdichte Mischgut	SN 670 405	EN 12 697-5] [21]
Bestimmen der Raumdichte, Berechnen des Hohlraumgehalts	SN 670 406	EN 12 697-6 [22], [23]
Marshall-Verdichtung	SN 670 430	EN 12697-30 [24]
Marshall-Versuch	SN 670 434	EN 12697-34 [25]
Bindemittel		
Rückgewinnung des Bindemittels aus Extraktionslösung	SN 670 403	EN 12 697-3 [26]
Penetration	SN 670 511	SN EN 1426 [27]
Erweichungspunkt Ring und Kugel	SN 670 512	SN EN 1427 [28]

3 Alterungsmethode

3.1 Langzeitalterung in der Literatur

Vor Beginn der Arbeiten am Forschungsprojekt wurde eine Literaturrecherche mit dem Ziel, eine geeignete Alterungsmethode zu finden, durchgeführt. Das Literaturstudium hat gezeigt, dass es unterschiedliche und z.T. widersprüchliche Erkenntnisse gibt. Die Zeitdauer der Langzeitalterung in der Literatur liegt dabei zwischen 1 und 63 Tagen, wobei die Alterung sowohl an verdichtetem als auch an unverdichtetem Mischgut durchgeführt wird [4], [5], [6], [29]-[36].

Im Hinblick auf Niedertemperaturbeläge betritt man hinsichtlich Alterung weitgehend Neuland. Nach wie vor wird die bereits im Antrag beschriebene Methode, das verdichtete Mischgut im Ofen bei 85°C zu erhitzen, favorisiert.

Entgegen der ursprünglichen Absicht die Prüfkörper aus Ornièreurprüfkörpern zu bohren, wird auch nach Rücksprache mit der Begleitkommission die Herstellung von Marshallprobekörpern für Steifigkeitsmodul und Ermüdungsverhalten und die Herstellung von Ornièreurprüfkörpern für den Spurbildungstest beschlossen.

3.2 Alterungsmethode

Im Projekt selbst wird vorgeschlagen, die Alterung an verdichteten Mischgutproben unter Einbeziehung von zyklischer Temperatur und Wasser durchzuführen. Die Bewitterung sollte dabei von oben erfolgen, um so die Witterungseinflüsse auf einen Deckbelag nach einem Platzregen im Sommer simulieren zu können. Bezüglich solcher Witterungs-Simulationen fanden sich in der Literatur keine Vorgaben.

Aufgrund der Entscheidung an der Kick-off Sitzung als Mischgut keine Deckschicht sondern eine Trag- oder Binderschicht mit 16 mm Größtkorn zu wählen, wurde aber beschlossen, die Prüfkörper nicht nur von oben „zu beregnen“ sondern ganz in Wasser einzutauchen.

Das verdichtete Mischgut (Marshallprobekörper verdichtet mit 50 Schlägen pro Seite) wird im Ofen bei 85°C erhitzt und zwischendurch 6 Stunden lang in kaltes Wasser (Wasserbad, Anfangstemperatur 18-20°C) eingetaucht. Das Wasserbad erwärmt sich dabei kurzfristig bis auf 28°C und hat nach ca. 2 Stunden wieder eine Temperatur von ca. 23°C. Im Anhang II ist ein beispielhafter Temperaturverlauf dargestellt.

Die gesamte Zyklusfolge der Alterungsmethode ist in Abb. 4 dargestellt. Abbildung 5 zeigt die Prüfkörper im Ofen bzw. im Wasserbad.

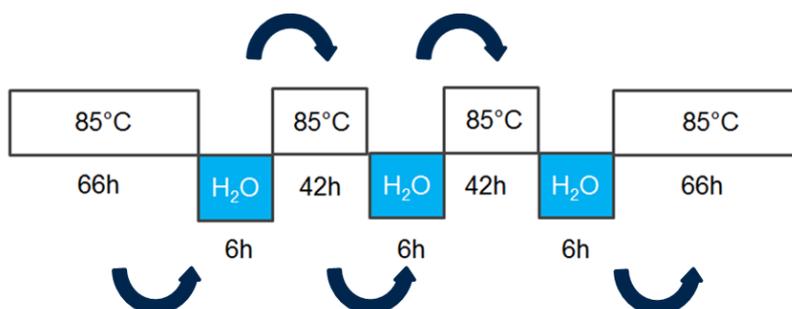


Abb. 4 Alterungsmethode



Abb. 5 Marshallprobekörper im Ofen (links) und im Wasserbad (rechts)

4 Prüfmethoden

4.1 Mechanische Prüfungen

Ein Forschungsziel war die Bestimmung des Alterungsverhaltens der Niedertemperaturasphalte WAM im Vergleich mit dem Referenzheißmischgut mit Hilfe mechanischer Prüfmethoden. Dabei wurden die im Folgenden beschriebenen mechanischen Prüfmethoden ausgewählt. Alle Prüfungen wurden an ungealterten und an gealterten Prüfkörpern (Marshallprobekörper und Spurbildungsprüfkörper) durchgeführt:

4.1.1 Spurbildungstest bei 60°C (Warmtemperaturverhalten)

Die Standfestigkeit in der Wärme wird durch den Widerstand gegen bleibende Verformung in der Prüfung des Spurbildungstest (Variante mit großem Rad) bei 60°C [28] bestimmt.

Für die Beurteilung der permanenten Verformung bei hohen Temperaturen wurde die Spurrinnenprüfung gemäß EN 12697-22 [37] durchgeführt (siehe Abb. 6). Für jede Spurbildungsprüfung werden jeweils parallel zwei Prüfkörper im Spurrinentester bei 60°C geprüft. Nach einer Nullmessung werden die relativen Spurbildungstiefen, das heißt die absolute Spurrinentiefe in Prozent der Prüfkörperdicke, zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen und grafisch dargestellt (vgl. Abb. 7). Maßgebend sind für AC B 16 S die Mittelwerte der Spurrinentiefen nach 10'000 Zyklen.



Abb. 6 Prüfeinrichtung für den Spurbildungstest mit großem Rad nach EN 12697-22 [28].

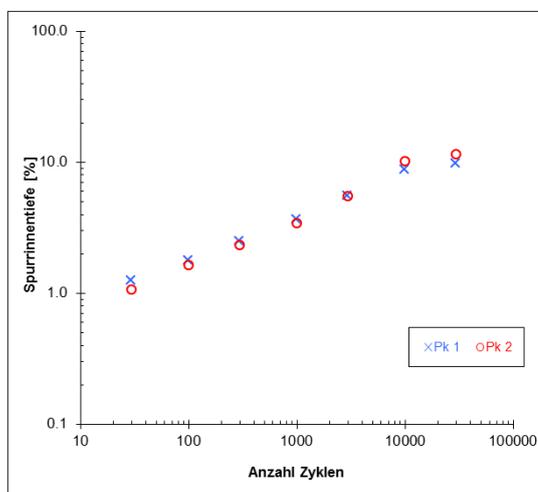


Abb. 7 Resultate des Spurbildungstests (Beispiel)

4.1.2 Steifigkeitsmodul IT-CY (Gebrauchstemperaturverhalten)

Der Steifigkeitsmodul wird bei 10°C, 20°C und 30°C mit dem dynamischem Spaltzugversuch IT-CY bestimmt.

Für die Bestimmung des Steifigkeitsmoduls sind verschiedene Methoden in der EN 12697-26 normiert [38]. Aufgrund der einfachen Durchführung wurde die Variante IT-CY ausgewählt (vgl. Abb. 8). Sie verwendet zylindrische Prüfkörper von 100 oder 150 mm Durchmesser, die zyklisch mit Impulsen von 0.25 s Länge gefolgt von Lastpausen von 2.75 s belastet werden. Da die Prüfung den Prüfkörper nicht beschädigen soll, sind die Belastungen klein und kurz. Der Mittelwert aus 5 Zyklen wird für die Berechnung des Steifigkeitsmoduls verwendet.

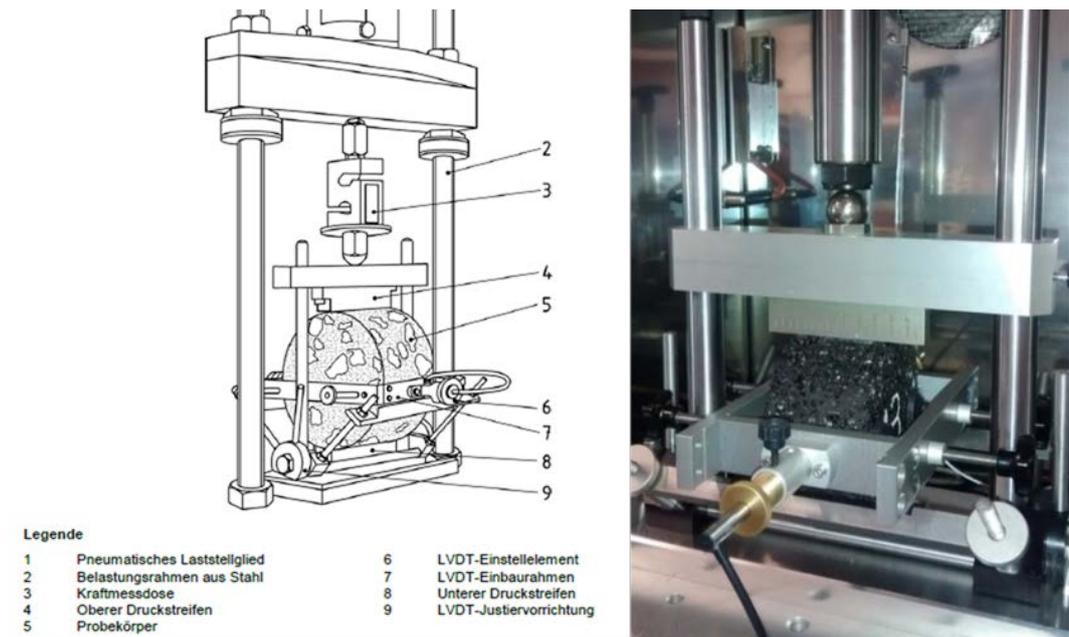


Abb. 8 Prüfeinrichtung für den indirekten Zugversuch IT-CY gemäss EN 12697-26 [21], links Schema, rechts Empa-Prüfeinrichtung.

Im Forschungsprojekt wurden Marshall-Prüfkörper verwendet, die bei 3 Temperaturen 10°C, 20°C und 30°C geprüft wurden. Der Temperaturbereich ist eingeschränkt, da bei höheren Temperaturen der Prüfkörper zu weich ist und plastische permanente Deformationen auftreten. Bei tiefen Temperaturen hingegen wird der Prüfkörper zu hart und die für die geforderte horizontale Verformung von mindestens 3 mm notwendigen Kräfte werden zu groß.

4.1.3 Spaltzug-Schwellversuch (Ermüdungsverhalten)

Die Ermüdung eines Straßenbelages spielt sich im mittleren Temperaturbereich von etwa 10°C bis 25°C ab. Als Prüfmethode wird der Spaltzug-Schwellversuch bei 20°C durchgeführt [39]. Die Ermüdungsprüfung simuliert die wiederholte Belastung des Verkehrs, die mit der Zeit durch die zahlreichen Belastungen zu einem Versagen führen. Die Bestimmung der Ermüdungsempfindlichkeit von Belagsschichten kann mit unterschiedlichen Prüfmethoden durchgeführt werden. Einige davon sind in der europäischen Prüfnorm 12697-24 [39] beschrieben, darunter die Zweipunktbiegung an trapezförmigen Prüfkörpern, Zwei-, Drei- und Vierpunktbiegung an prismatischen Prüfkörpern und die indirekte Zugprüfung an zylindrischen Prüfkörpern. Jede dieser Prüfungen hat ihre Vor- und Nachteile die beispielsweise in [40], [41] diskutiert wurden. Die erhaltenen Resultate können in der Regel nicht direkt verglichen werden, da die Ermüdung im Gegensatz zum Steifigkeitsmodul keine physikalische Eigenschaft des Materials darstellt. Durch die unterschiedlichen Formen der Prüfkörper und Belastungen ergeben sich unterschiedliche Arten des Versagens. Die Ermüdungsprüfungen sind sehr

anspruchsvoll, insbesondere stellt sie hohe Anforderungen an die Prüfeinrichtung, da sehr kleine Belastungen mit hoher Präzision aufgebracht und die resultierenden Verformungen gemessen werden müssen. Insbesondere die Vierpunktbiegung ist durch die vielen erforderlichen Lager, die auch bei höchster Qualität ein gewisses Spiel aufweisen, oft mit Fehlern behaftet.

Für dieses Projekt wurde der Spaltzugschwellversuch anstelle der ursprünglich vorgesehenen Vierpunktbiegung gewählt, da dieser Versuch inzwischen durch einen Ringversuch mit Deutschland validiert werden konnte [42]. Er ist inzwischen als Variante der indirekten Zugprüfung der EN 12697-24:2012 [39] zugelassen, mit dem Unterschied, dass für die Belastung eine kontinuierliche Sinusfunktion verwendet wird, anstelle eines Haversine-Impulses mit einer Ruhephase. Zudem bietet er bezüglich Probenherstellung und -vorbereitung verschiedene Vorteile, da zylindrische Prüfkörper verwendet werden können. Es hat sich gezeigt, dass durch die Einfachheit der Prüfeinrichtung gut reproduzierbare Resultate erhalten werden können. Da es sich nicht um eine Biegeprüfung handelt, sondern um eine indirekte Zugbelastung ohne Druckbelastung, sind die erhaltenen Resultate nicht direkt mit jenen der Biegeprüfung zu vergleichen. Allerdings liefern auch die klassischen Biegeprüfungen keine Versagensgrenzen, die direkt für die Dimensionierung übernommen werden können. Die Resultate müssen immer mit Felddaten kalibriert werden, woraus ein Schifffaktor für die jeweilige Prüfung berechnet werden kann, der die Resultate aus den Feldversuchen mit den Laborversuchen korreliert.

In der Regel werden mehrere Prüfkörper bei verschiedenen Laststufen geprüft. Dabei muss ein Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit gemacht werden. Deshalb werden oft drei unterschiedliche Laststufen mit 3-4 Prüfkörpern durchgeführt. Dabei wird die kleinste Belastung so gewählt, dass der Prüfkörper nach etwa einer Million Zyklen versagt und die größte Belastungsamplitude mindestens 1000 Zyklen durchhält. Auch die Auswertung ist nicht einheitlich geregelt, 50%-Verlust des Anfangsmoduls werden oft als Versagensgrenze gewählt. Allerdings ändert sich der Steifigkeitsmodul am Anfang sehr stark, was einen entsprechend großen Einfluss auf die Versagensgrenze hat. Ein anderer Ansatz wird in der deutschen Anleitung gewählt, wo das Maximum des Energy-Ratio (ER) als Produkt von Zyklenzahl und Steifigkeitsmodul verwendet wird (siehe auch Abb. 9). Dies hat den Vorteil, dass die Kurve am Anfang genau definiert ist, da sie durch den Nullpunkt verläuft. Durch eine Polynomfunktion 4. Grades kann diese Kurve in der Regel sehr gut angenähert werden und das Maximum entsprechend gut bestimmt werden. Die Prüfmethode ist sehr detailliert in der deutschen Arbeitsanleitung beschrieben [43].

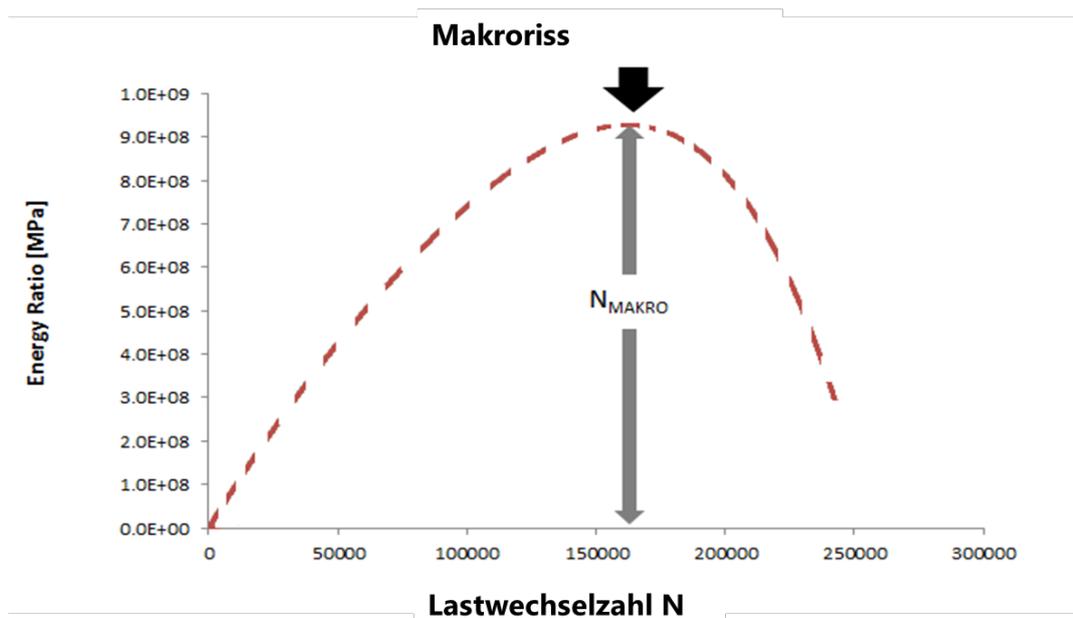


Abb. 9 Beispiel für die Bestimmung der Lastwechselzahl N_{makro} bis zum Kriterium Makroriss [23]

4.2 Prüfungsmethoden am Bindemittel

Ein weiteres Ziel des Forschungsprojekts war Beurteilung des Alterungsverhaltens des Bindemittels mit Hilfe rheologischer Prüfmethoden. Als Kennwert für das rheologische Verhalten wurde der komplexe Modul mittels DSR bestimmt [44].

4.2.1 Modulbestimmung mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR)

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

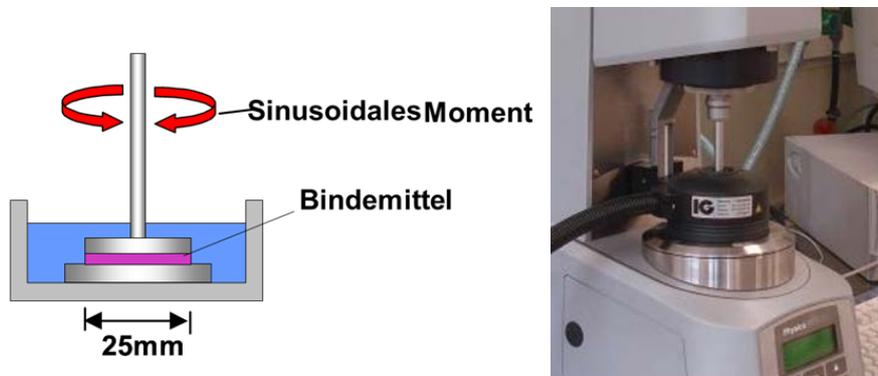


Abb. 10 Prinzip der Bestimmung rheologischer Kennwerte mittels Platte-Platte-System (links) mittels DSR (rechts)

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

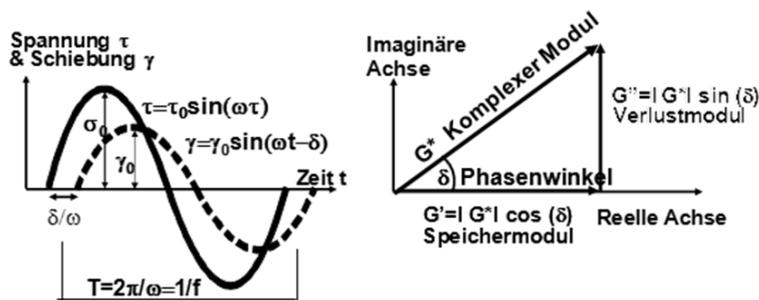


Abb. 11 Viskoelastische Kenngrößen bei schwingender Beanspruchung

Speichermodul (elastischer Modulanteil)
 Verlustmodul (viskoser Modulanteil)
 Komplexer Modul (absoluter Modul):
 Phasenwinkel
 Schwingungsviskosität

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

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

$$G^* =$$

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

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

4.3 Alterungsmethoden am Bindemittel

Die zeitliche Veränderung bzw. Schädigung von Struktur und Eigenschaften eines Bindemittels infolge thermischer, klimatischer und chemischer Einwirkung wird allgemein als „Alterung“ bezeichnet. Ein wichtiger Fall der Alterung bei Bitumen ist die oxidative und thermische Verhärtung. Eine solche Verhärtung kann bereits während der Produktion eines bitumenhaltigen Werkstoffs, also bei relativ hohen Temperaturen im Bereich von etwa über 135°C, oder erst später im Gebrauch bei tieferen Gebrauchstemperaturen etwa unter 60°C entstehen.

Im vorliegenden Forschungsprojekt wurde einerseits das Ausgangsbindemittel 50/70 und andererseits das Bitumen+FR-PACK, Bitumen+FR.WAX und das Bitumen+PA-PACK im Rolling Thin Film Oven Test RTFOT und im Pressure Aging Vessel PAV gealtert. Anschliessend wurden dann Erweichungspunkt Ring und Kugel und Modulbestimmung mittels Dynamischem Scherrheometer DSR bestimmt.

4.3.1 Rolling Thin Film Oven Test RTFOT (EN 12607-1)

Mit Hilfe des RTFOT [45] wird das Bindemittel künstlich gealtert, um die Auswirkungen der Alterung von Bitumen und Bitumenprodukten durch nachträgliche Destillation und Oxidation in der Zeit von der Herstellung bis zur Verarbeitung durch Einflüsse bei dem Transport, der Lagerung, dem Mischen, dem Silieren bis hin zum Mischguteinbau beurteilen zu können. Hierzu werden Bindemittelproben in Flaschen eingefüllt, die in einem Ofen bei 163°C langsam rotierend bewegt werden, so dass sich das Bindemittel als Film auf die Wandungen der Flaschen verteilt und ständig in Bewegung ist. Die Oberfläche des Bindemittelfilms wird mit ebenfalls 163°C heißer Luft beaufschlagt, indem diese durch eine Düse am Tiefpunkt der Rotationseinheit in die Flaschen eingeblasen wird. Das Erhitzen des Bindemittels führt zu einer zusätzlichen Destillation, während durch den Kontakt des Bindemittelfilms mit der vorhandenen Umgebungsluft und unter der verstärkten Wirkung der zusätzlich eingeblasenen Luft das Bindemittel oxidiert.

In Abweichung zu in der beschriebenen Prüfmethode wurde zur Alterung der WAM-Bindemittel eine Temperatur von 130°C verwendet.



Abb. 12 RTFOT, rechts: Gesamtansicht, link: Blick in den Ofen

4.3.2 Pressure Aging Vessel (EN 14769)

Das Verfahren [46] beinhaltet die Alterung von Bindemittel in Schalen bei erhöhten Temperaturen in einem Druckalterungsbehälter (PAV) unter Überdruck-Bedingungen. Diese Prüfmethode beschreibt die Alterung von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln nach dem Einbau, wobei die in situ Alterung (Alterung im Feld) in einem Zeitraum von 5-10 Jahren prognostiziert werden soll. Das Bindemittel wird in flache, ebene Metallschalen gefüllt und 20 Stunden lang einer Temperatur von 90°C und 110°C

und einem Druck von 2.1 MPa ausgesetzt.

Im vorliegenden Projekt wurde für alle Bindemittel eine Temperatur von 100°C gewählt.



Abb. 13 PAV, recht Gesamtansicht, links, Probenteller und Probentelereinsatz

4.4 Prüfprogramm

Tabelle 6 gibt einen Überblick über die an den einzelnen Mischgütern durchgeführten Prüfungen. Die im Labor hergestellten und untersuchten Mischungen sind mit _Lab bezeichnet (siehe Tabelle 6). Laut Prüfprogramm wurden keine Spurrinnenprüfungen an den aus der Anlage entnommenen Mischungen durchgeführt.

Tab. 6 Prüfprogramm WAM Asphalte

Mischgut	Mischgut/Bindemittel- rückgewinnung	Prüfungen		
		Spurbildung	Ermüdung	Steifigkeitsmodul
<i>Mischanlage</i>				
REF-HOT			x	x
FR-PACK			x	x
FR-ZEO			x	x
FR-Water			x	x
<i>Labor</i>				
REF-HOT_Lab	x	X	x	x
FR-ZEO_Lab	x	X	x	x
FR_WAX_Lab	x	X	x	x
FR_WATER_Lab	x	X	x	x
FR_WATER+RAP_Lab	x	X	x	x
PA-HWAM_Lab	x	X	x	x
PA-PACK_Lab	x	X	x	x

5 Labormischungen

5.1 Herstellung der Labormischungen

Die Labormischungen wurden aus den angelieferten Mineralstofffraktionen und Bindemitteln bzw. Zusatzstoffen zusammengesetzt und im Labormischer (Abb. 14) gemischt. Für die Schaumbitumenmischungen (FR-WATER und FR-WATER+RAP) wurde das Bitumen im in Abb.15 dargestellten Schaumbitumenmischer aufgeschäumt.



Abb. 14 Empa Labormischer (Inhalt ca. 150 kg)



Abb. 15 Empa Schaumbitumenmischer, Herstellung Mischgut

6 Ergebnisse Labormischungen

6.1 Mischgut Charakterisierung der Labormischungen

Um sicherzustellen, dass die Labormischungen der einzelnen Niedertemperaturasphalte derjenigen des Referenzmischguts entsprachen, wurde für alle im Labor hergestellten Mischungen Bindemittelgehalt und Korngrößenverteilung bestimmt. Zusätzlich wurde noch der Hohlraumgehalt Marshall ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildungen 16, 17 und 18 bzw. Tabellen 7 und 8 zusammengefasst. Die Einzelwerte der Labormischungen der einzelnen Niedertemperaturasphalte finden sich im Anhang I1.

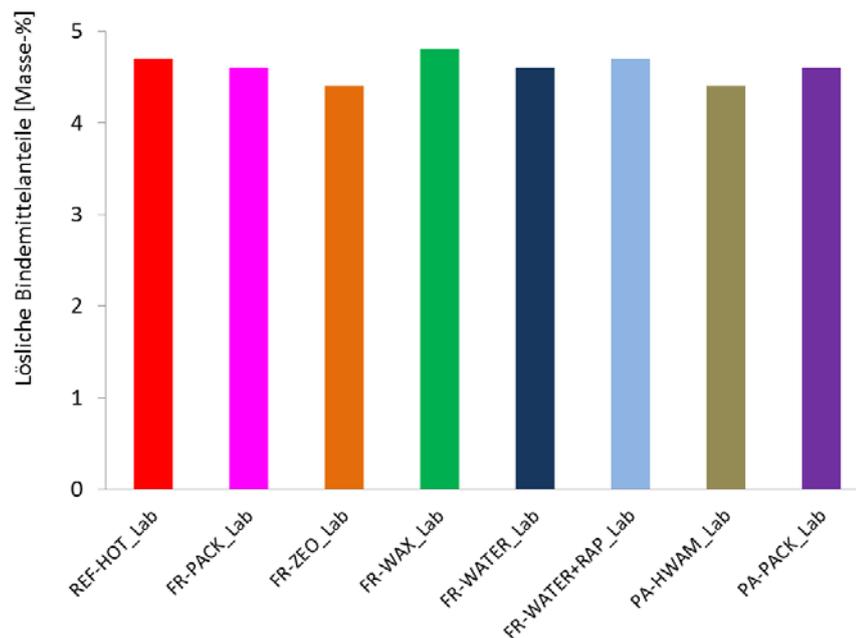


Abb. 16 Bindemittelgehalt der Labormischungen

Tab. 7 Bindemittelgehalt [Masse-%]

REF-HOT-Lab	4.4
FR-PACK_Lab	4.7
FR-ZEO_Lab	4.6
FR-WAX_Lab	4.6
FR-WATER_Lab	4.4
FR-WATER+RAP_Lab	4.8
PA-HWAM_Lab	4.7
PA-PACK_Lab	4.8

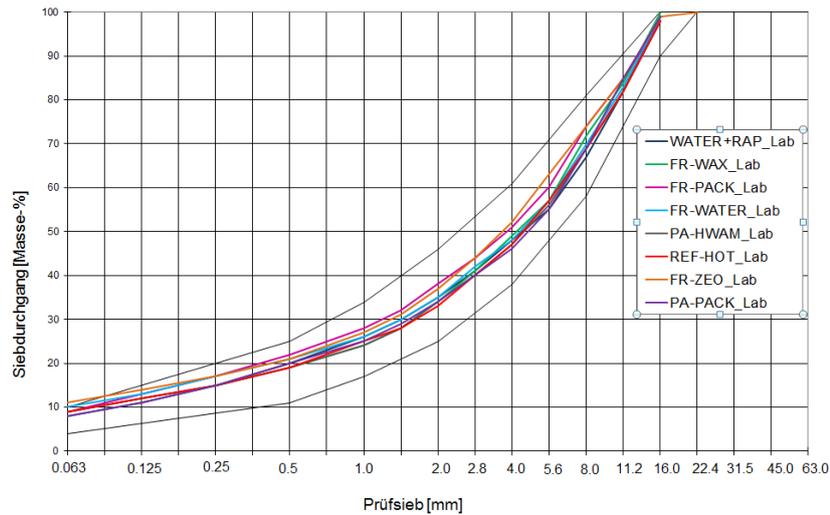


Abb. 17 Korngrößenverteilungen der Labormischungen

Tab. 8 Siebdurchgang [%]

Sieb [mm]	REF-HOT	FR-PACK	FR-ZEO	FR-WAX	FR-WATER	FR-WATER+RAP	PA-HWAM	PA-PACK
22.4	100	100	100	100	100	100	100	100
16.0	98	99	99	100	99	99	98	98
11.2	82	85	85	84	83	82	82	85
8.0	69	69	74	72	70	67	69	74
5.6	57	55	63	57	57	55	56	60
4.0	47	46	52	49	48	48	47	51
2.8	40	40	44	41	42	41	40	44
2.0	33	34	37	34	35	35	34	38
1.4	28	29	31	28	30	30	28	32
1.0	25	25	27	24	26	26	24	28
0.5	19	20	21	19	21	20	19	22
0.25	15	15	17	15	17	15	15	17
0.125	12	11	14	12	13	11	12	13
0063	9	8	11	9	10	8	9	9

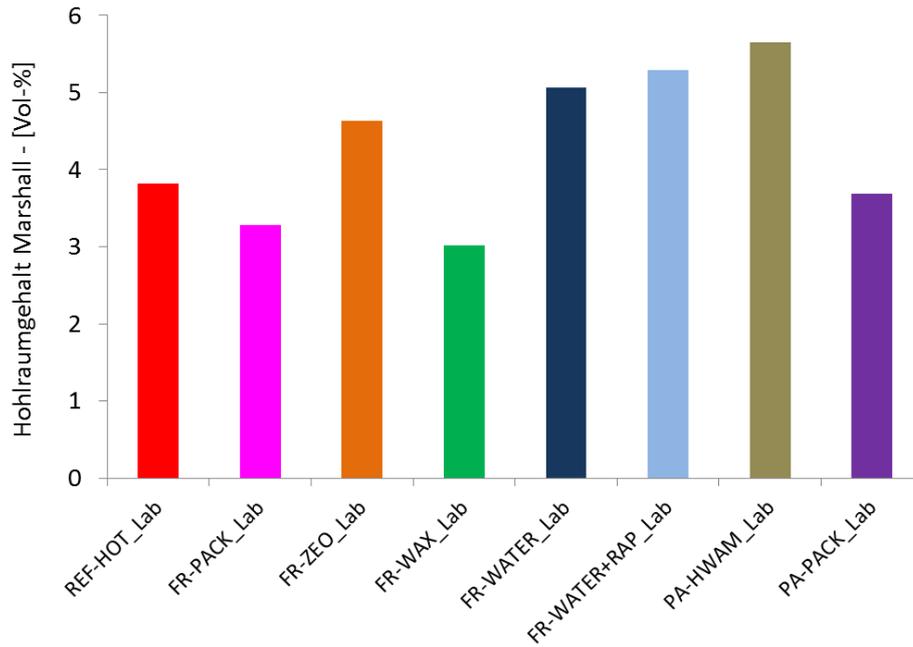


Abb. 18 Marshall Hohlraumgehalt der Labormischungen

Tab. 9 Hohlraumgehalt Marshall [Vol-%]

REF-HOT-Lab	3.8
FR-PACK_Lab	3.3
FR-ZEO_Lab	4.6
FR-WAX_Lab	3.0
FR-WATER_Lab	5.1
FR-WATER+RAP_Lab	5.3
PA-HWAM_Lab	5.6
PA-PACK_Lab	3.7

Wie Abbildung 16 und 17 bzw. Tabellen 8 und 9 zeigen, konnte bei allen Labormischung der angestrebte Bindemittelgehalt von 4.6 Masse-% relativ gut erreicht werden, ebenso entsprechen die Siebkurven aller Labormischungen derjenigen des Referenzmischguts.

Die Abweichungen im Hohlraumgehalt Marshall (siehe Tabelle 9) hängen nicht nur mit dem Bindemittelgehalt sondern auch mit der Verdichtungswilligkeit der unterschiedlichen Labormischungen zusammen, wie beispielsweise PA-HWAM mit einem Bindemittelgehalt von 4.7%, aber einen Hohlraumgehalt Marshall von 5.6 Vol-% deutlich zeigt.

6.2 Spurbildungstest der Labormischungen

Abbildung 19 und Tabelle 10 zeigen die Ergebnisse des Spurbildungstests für alle ungealterten und gealterten (strichlierte Säulen) Labormischungen.

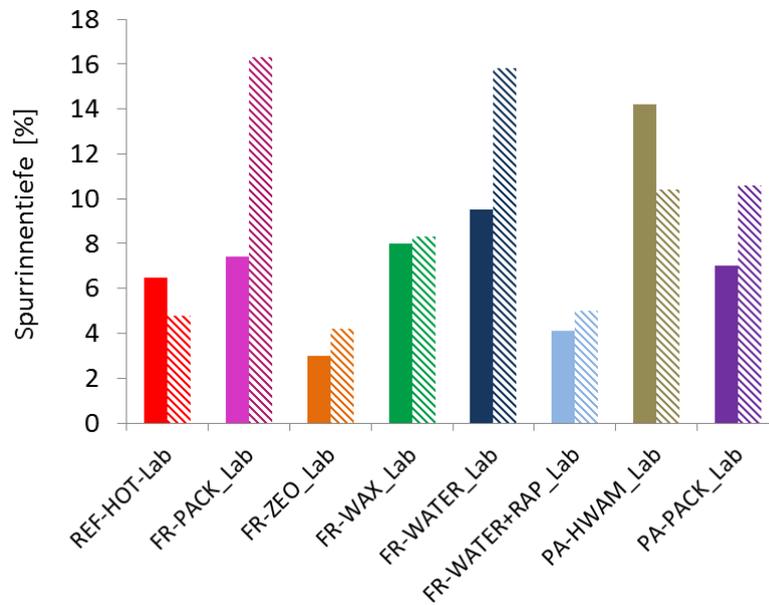


Abb. 19 Spurrinntiefe [%] der Labormischungen ungealtert/gealtert

Tab. 10 Spurrinntiefen

Spurrinntiefe [%]	ungealtert	gealtert
REF-HOT-Lab	6.5	4.8
FR-PACK_Lab	7.4	16.3
FR-ZEO_Lab	3.0	4.2
FR-WAX_Lab	8.0	8.3
FR-WATER_Lab	9.5	15.8
FR-WATER+RAP_Lab	4.1	5.0
PA-HWAM_Lab	14.2	10.4
PA-PACK_Lab	7	10.6

Die Auswertung der Spurbildungsprüfung in Abbildung 19 und Tabelle 10 zeigt für praktisch alle WAM Asphaltmischungen eine Zunahme der Spurrinntiefe nach Alterung. Ganz extrem hohe Spurrinntiefen am gealterten Mischgut - zwischen 15 und 17% - finden sich für die Mischungen FR-PACK und FR-WATER.

Einzig das Mischgut PA-HWAM zeigt - wie auch das Referenzmischgut - eine Abnahme der Spurrinntiefe beim gealterten Mischgut. Allerdings besitzt dieses Mischgut schon im ungealterten Zustand mit einem Wert von mehr als 14% extrem eine hohe Spurrinntiefe.

Auch das Mischgut FR-WAX erfährt nur eine sehr geringe Zunahme der bleibenden Verformung nach der Alterung, wobei bekannt ist, dass das Wachs im Bitumen auskristallisiert und es dadurch zu einer Versteifung und damit zu einer geringeren Anfälligkeit gegen bleibende Verformungen kommt.

6.3 Steifigkeitsmodul IT-CY der Labormischungen

Abbildungen 20 bis 27 zeigen die Ergebnisse des Steifigkeitsmoduls IT-CY für jede Labormischung im Vergleich ungealterte/gealterte Labormischung.

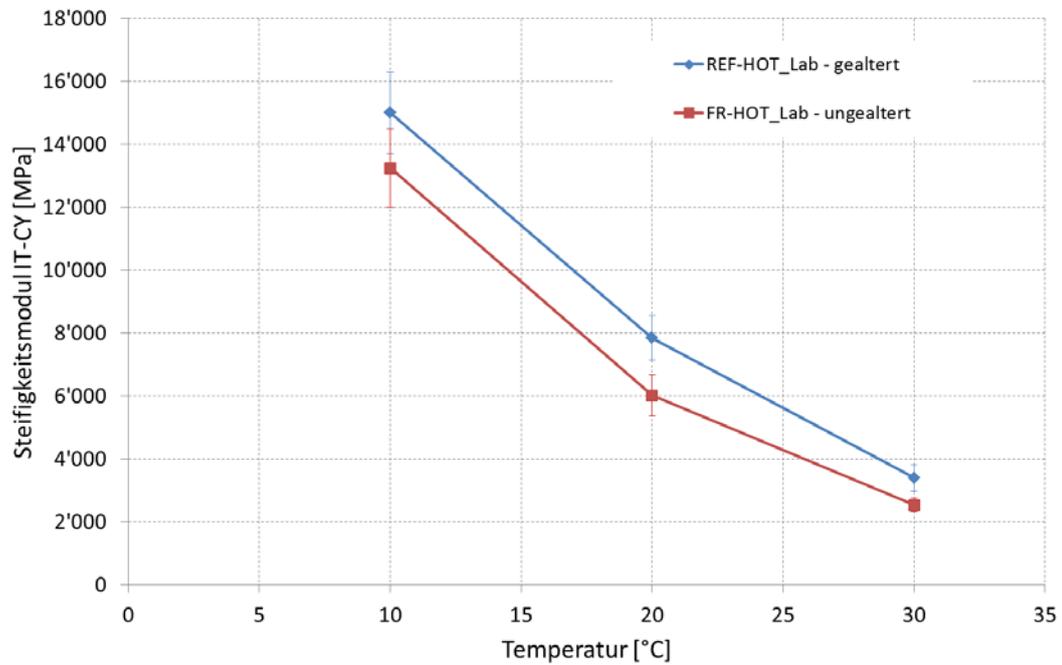


Abb. 20 Steifigkeitsmodul der Labormischung REF-HOT gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

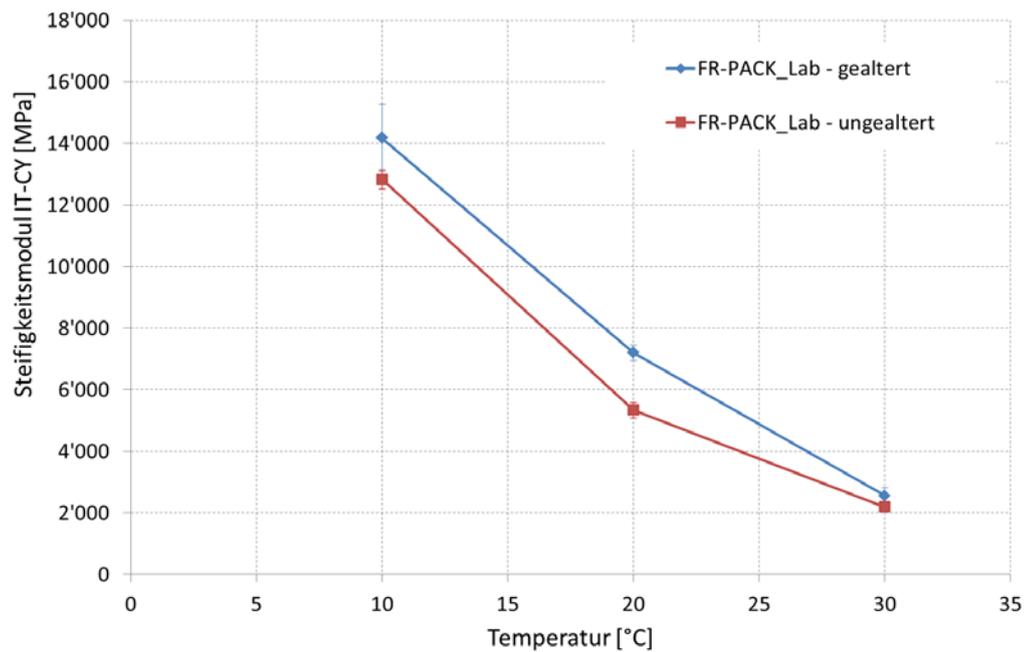


Abb. 21 Steifigkeitsmodul der Labormischung FR-PACK gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

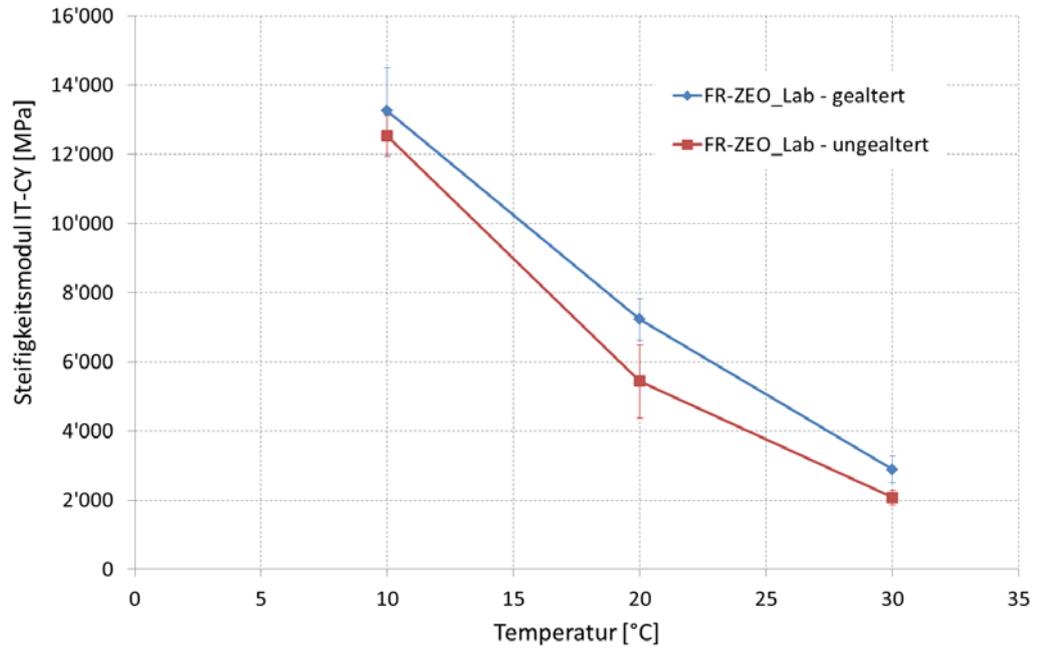


Abb. 22 Steifigkeitsmodul der Labormischung FR-ZEO gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

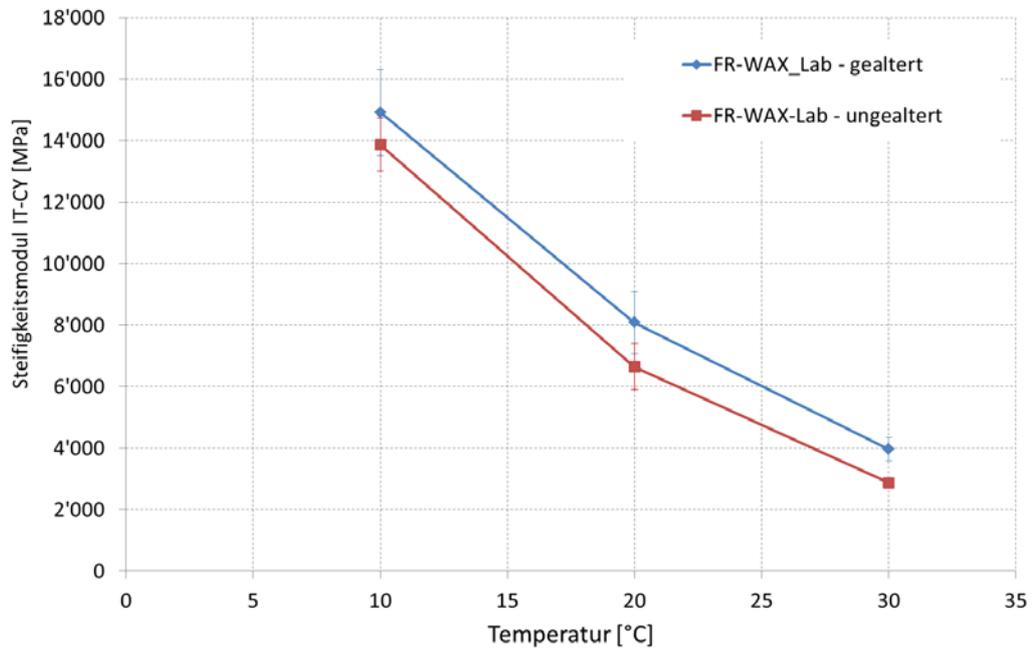


Abb. 23 Steifigkeitsmodul der Labormischung FR-WAX gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

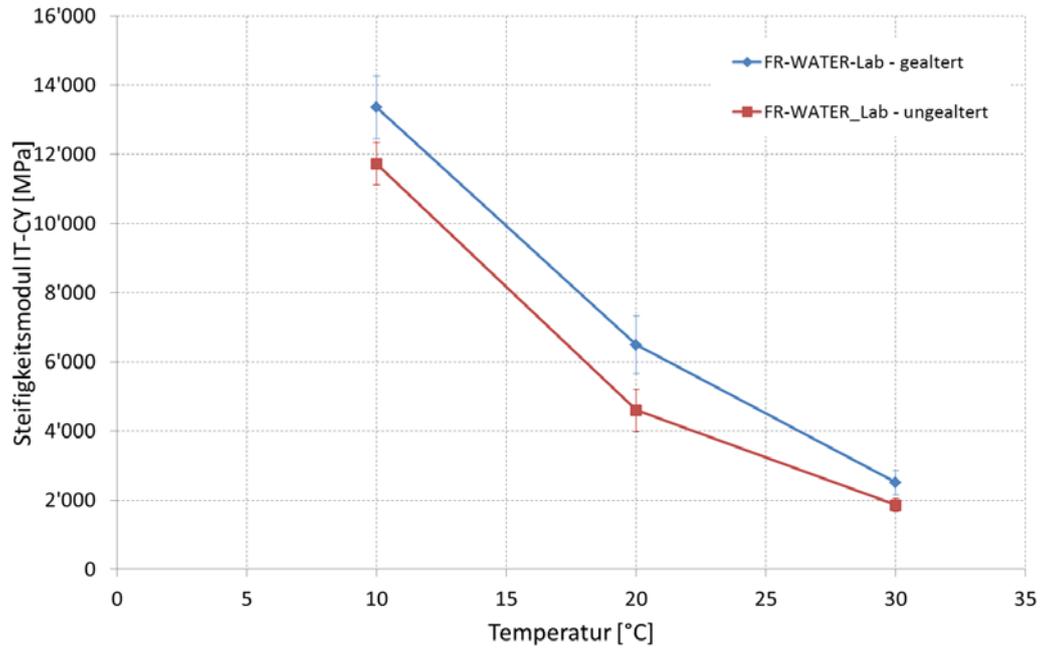


Abb. 24 Steifigkeitsmodul der Labormischung FR-WATER gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

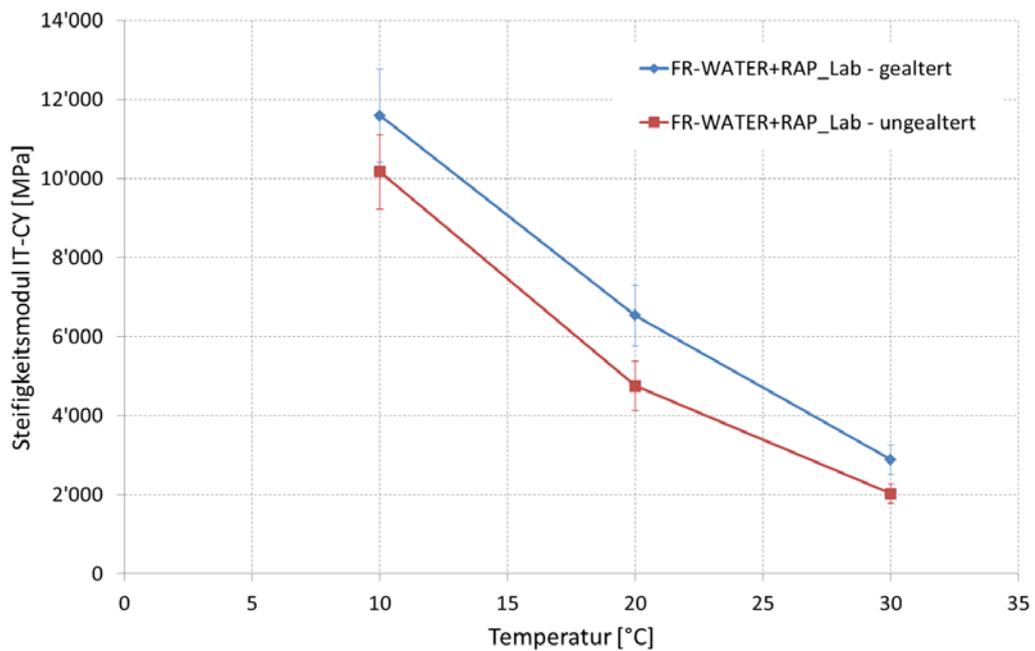


Abb. 25 Steifigkeitsmodul der Labormischung FR-WATER+RAP gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

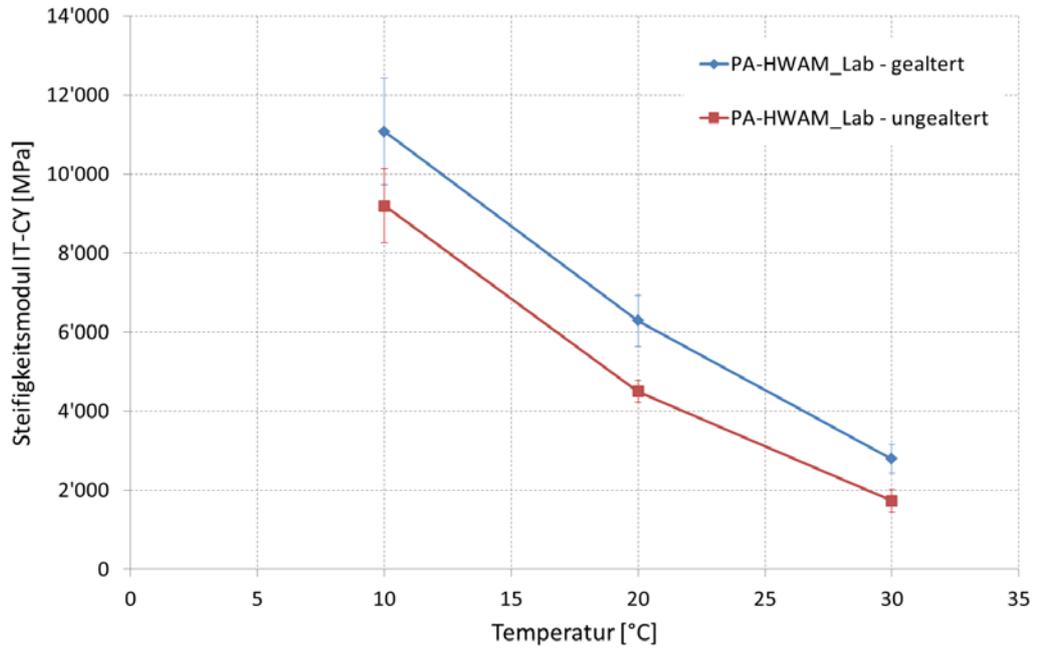


Abb. 26 Steifigkeitsmodul der Labormischung PA-HWAM gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

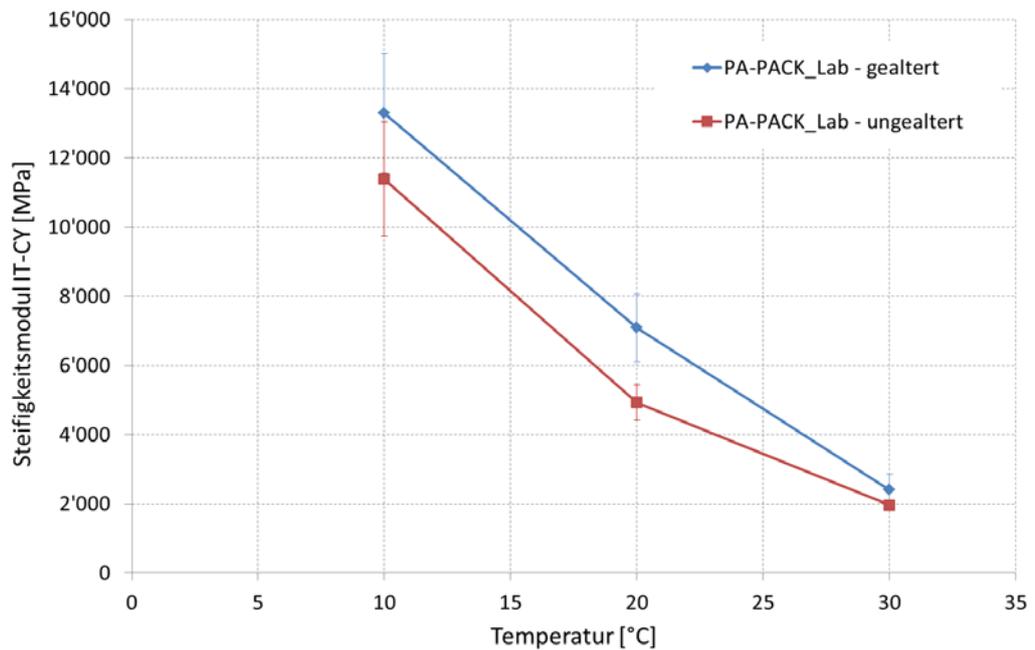


Abb. 27 Steifigkeitsmodul der Labormischung PA-PACK gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Auswertung des Steifigkeitsmoduls der Labormischungen, wie er in Abbildungen 20 bis 27 dargestellt ist, zeigt für alle für praktisch alle WAM Asphaltmischungen eine Zunahme der Steifigkeit nach Alterung, wobei die Zunahme der Steifigkeit vor allem bei tiefen und mittleren Temperaturen (10°C und 20°C) besonders ausgeprägt ist.

6.4 Ermüdungsverhalten (Spaltzug-Schwellversuch) der Labormischungen

Abbildungen 28 bis 43 zeigen die Ergebnisse des Ermüdungsverhaltens der Labormischung im Vergleich ungealterte/gealterte Labormischung.

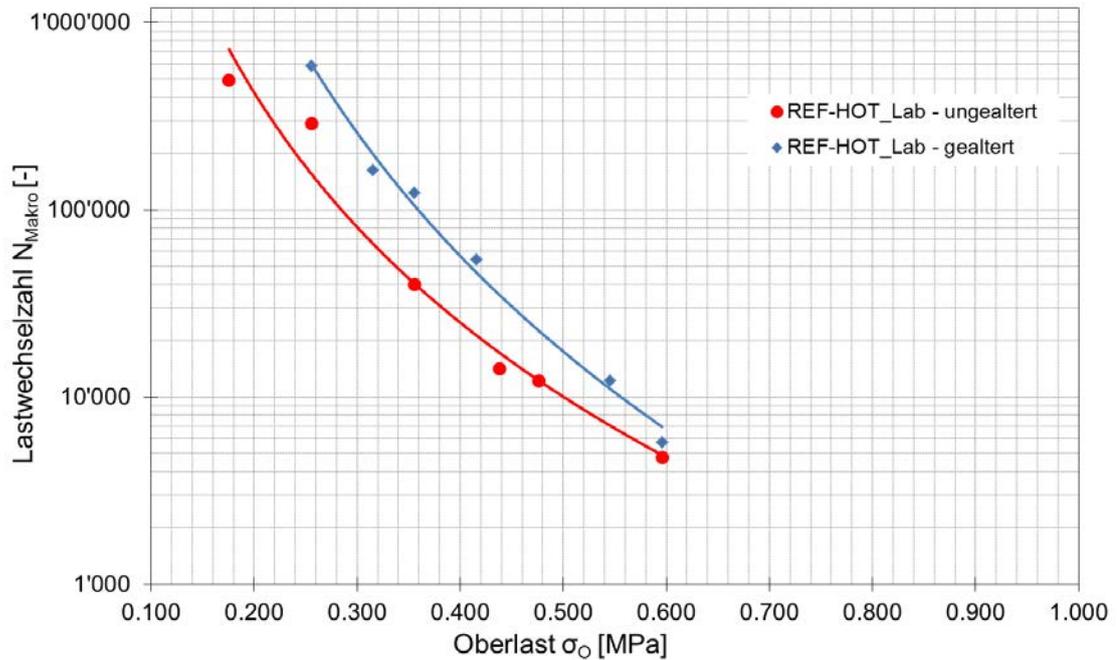


Abb. 28 Ermüdungsverhalten der Labormischung REF-HOT gealtert/ungealtert

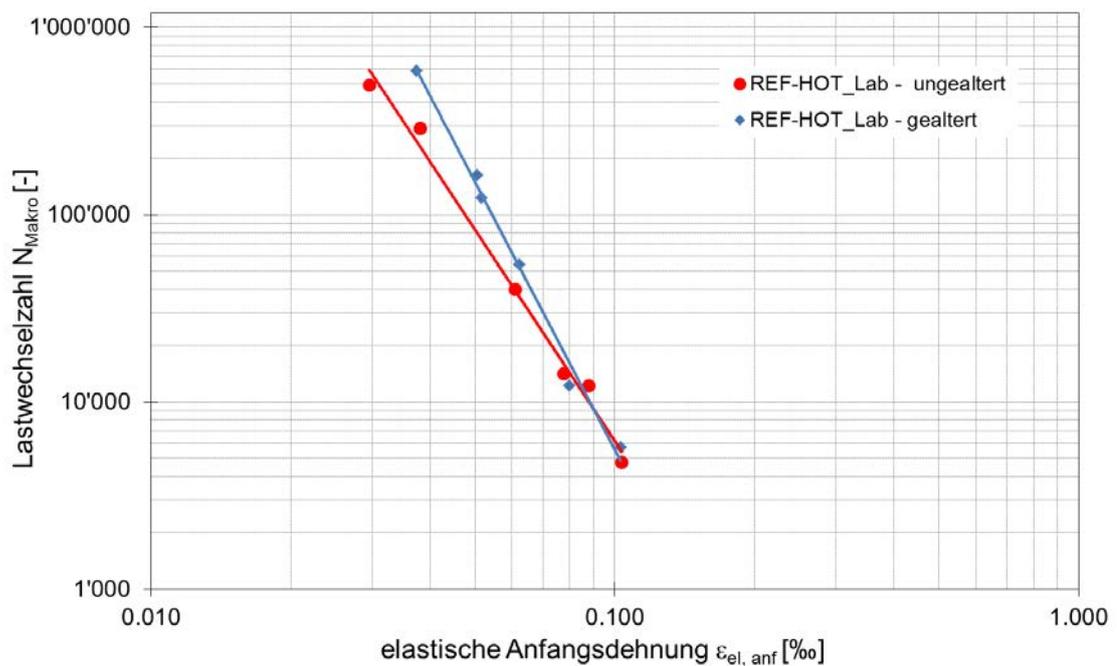


Abb. 29 Ermüdungsverhalten der Labormischung REF-HOT gealtert/ungealtert

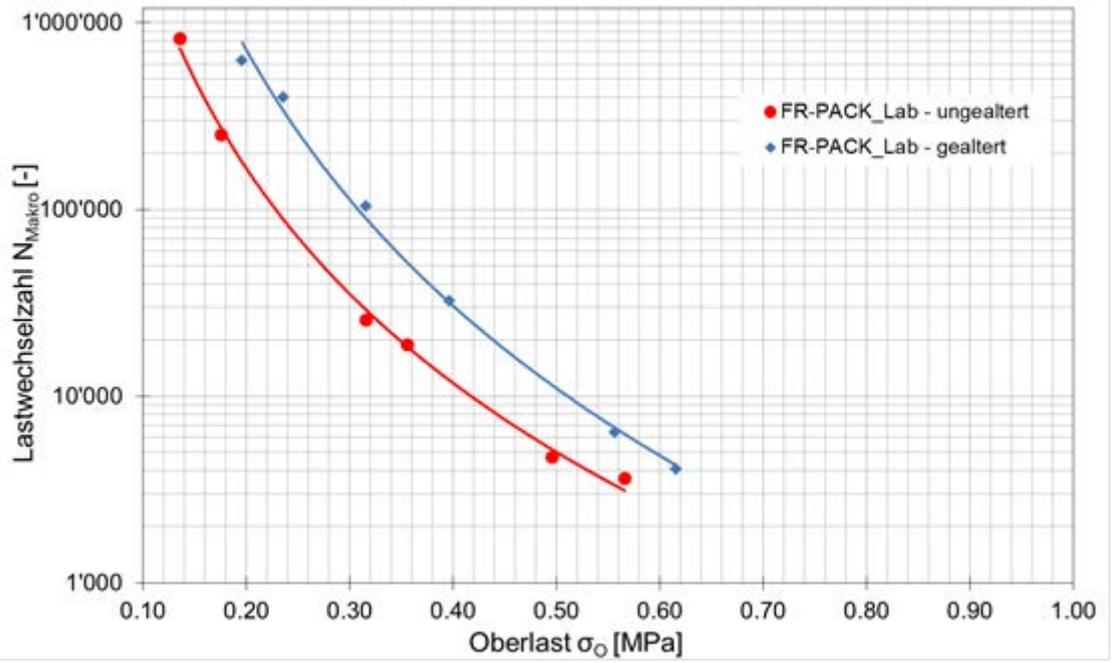


Abb. 30 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-PACK gealtert/ungealtert

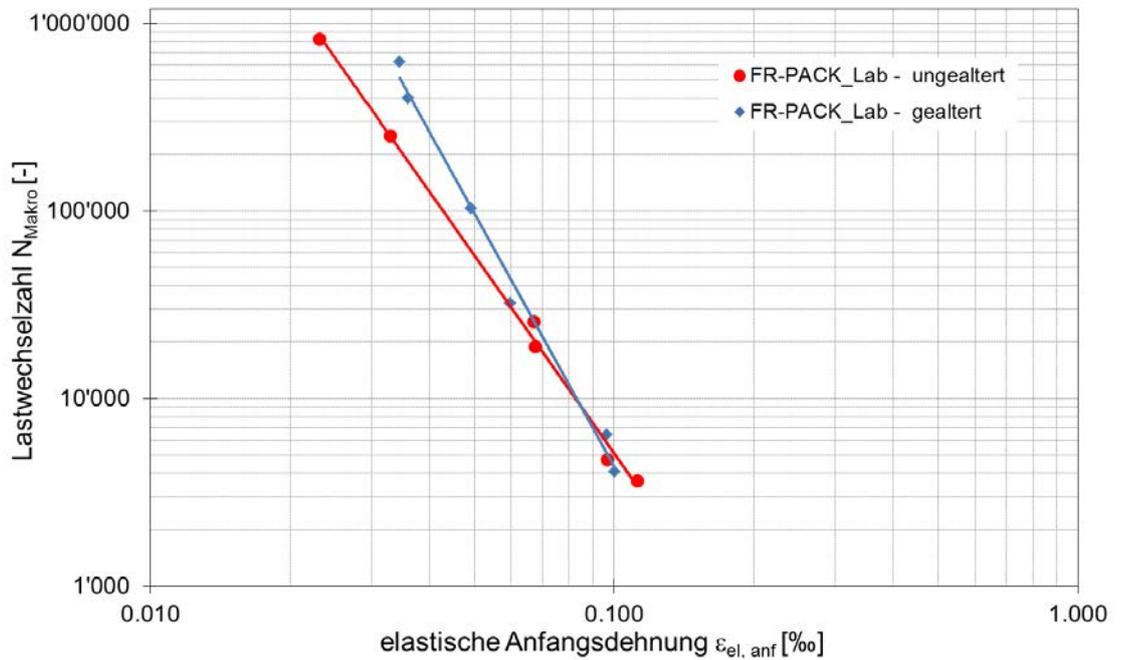


Abb. 31 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-PACK gealtert/ungealtert

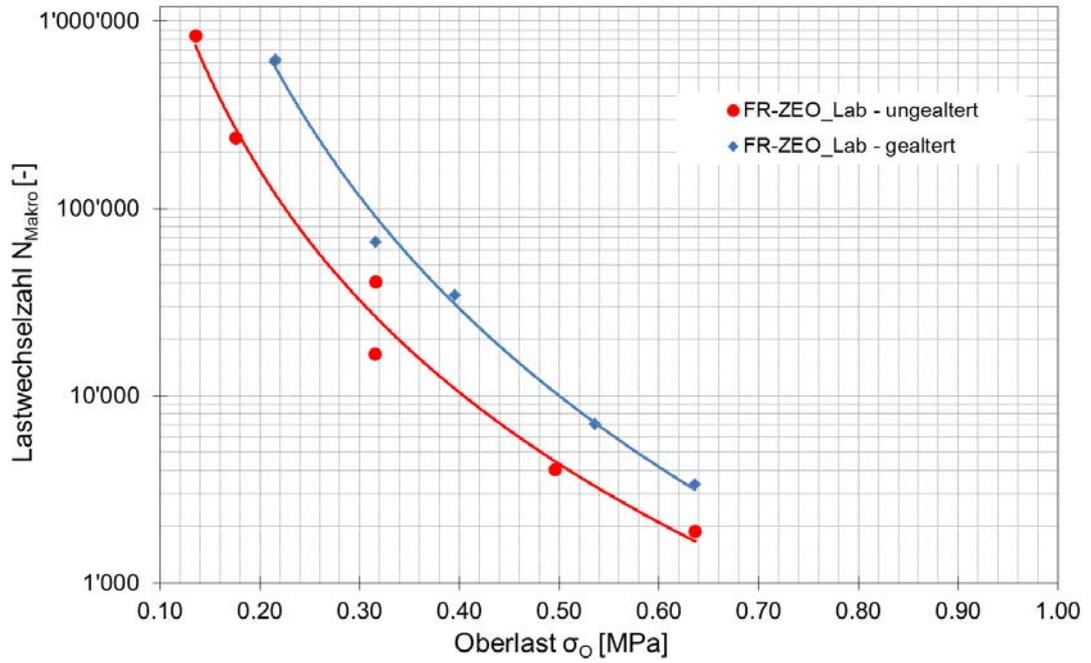


Abb. 32 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-ZEO gealtert/ungealtert

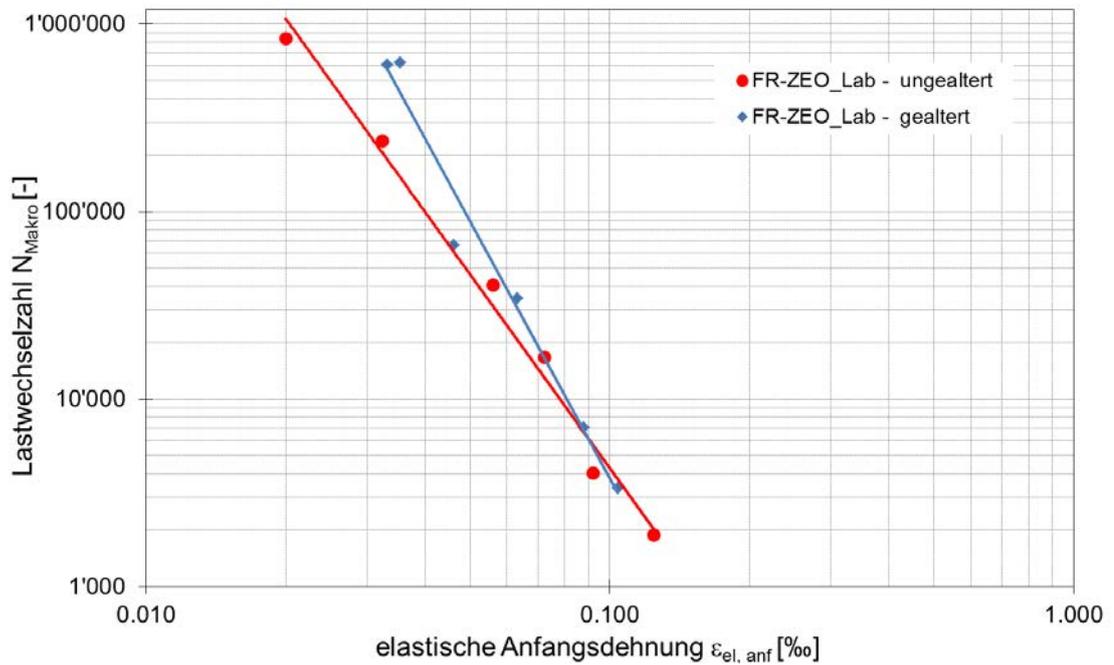


Abb. 33 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-ZEO gealtert/ungealtert

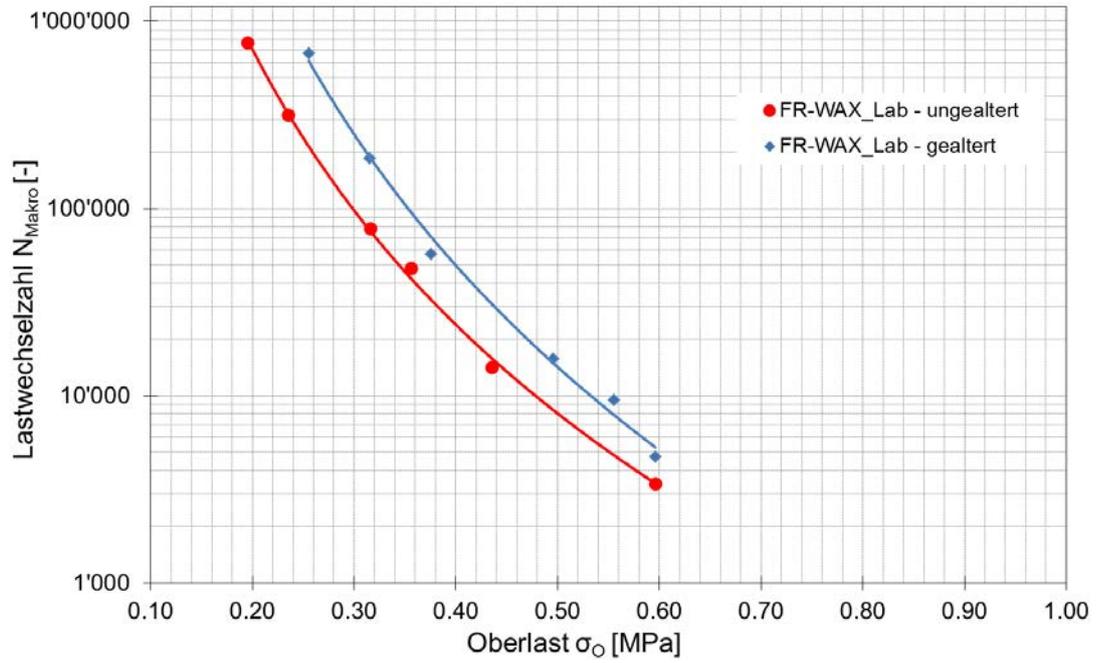


Abb. 34 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-WAX gealtert/ungealtert

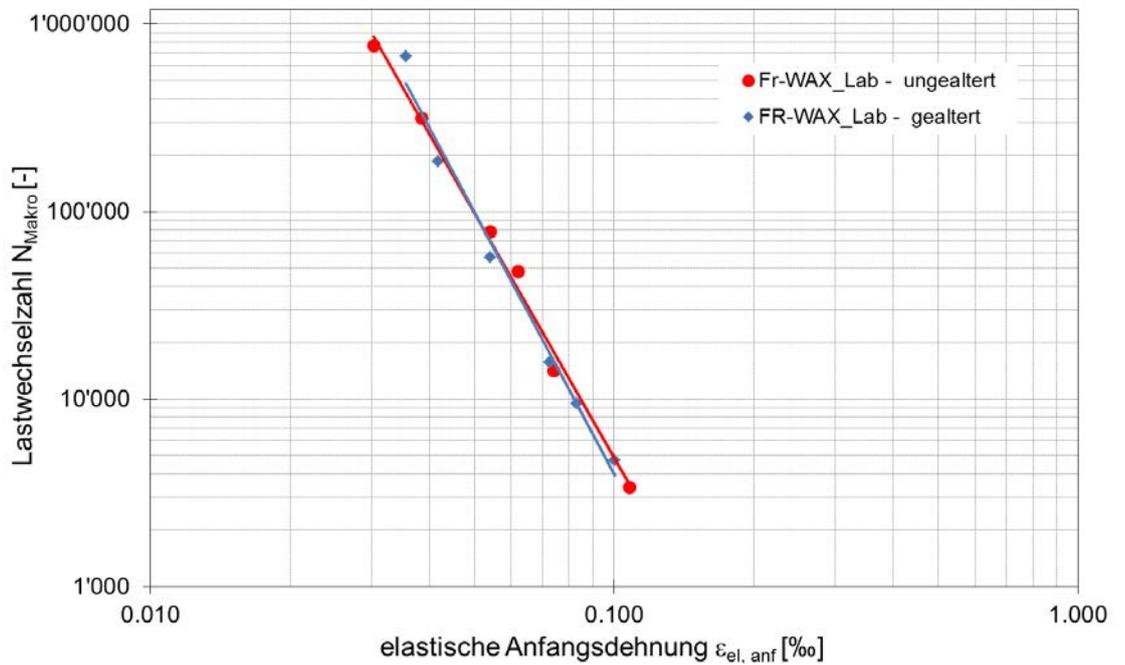


Abb. 35 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-WAX gealtert/ungealtert

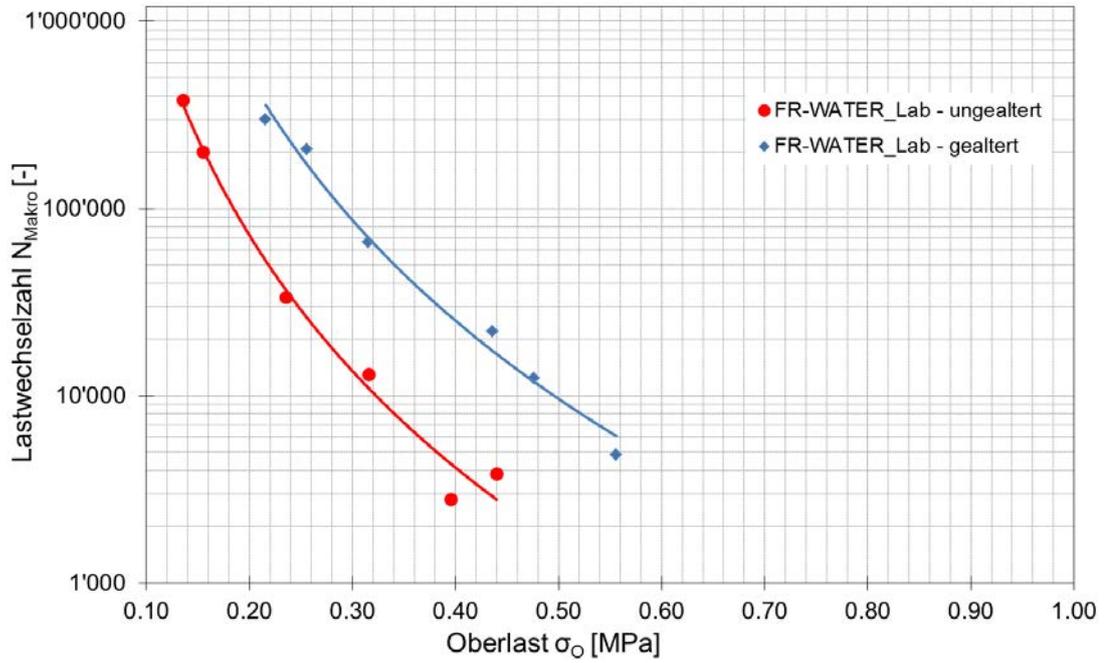


Abb. 36 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-WATER gealtert/ungealtert

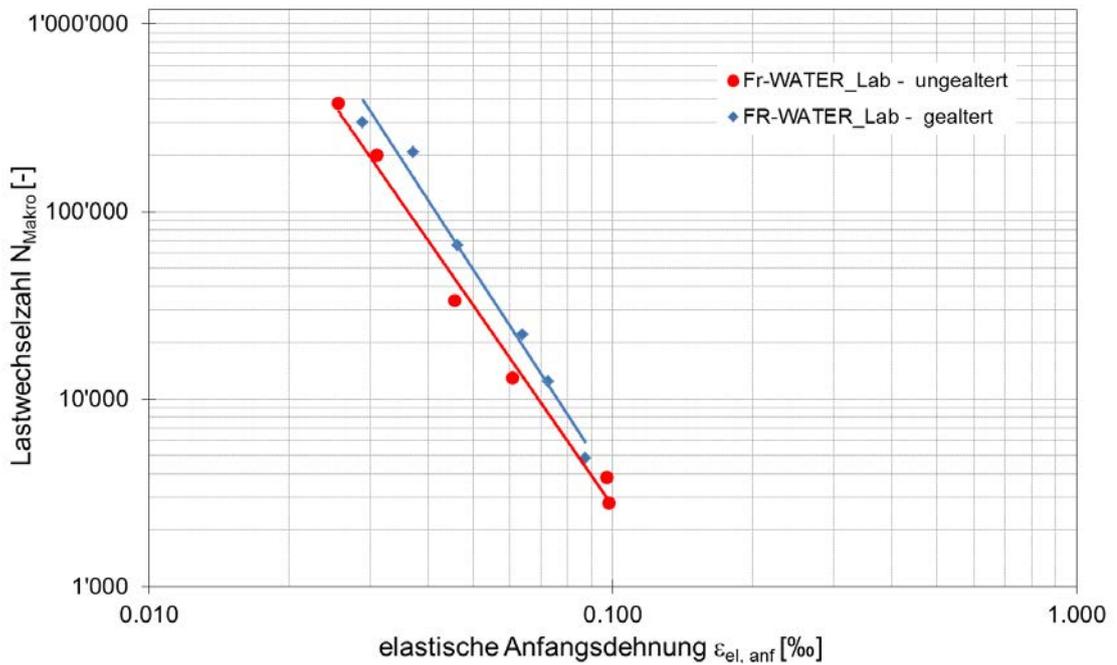


Abb. 37 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-WATER gealtert/ungealtert

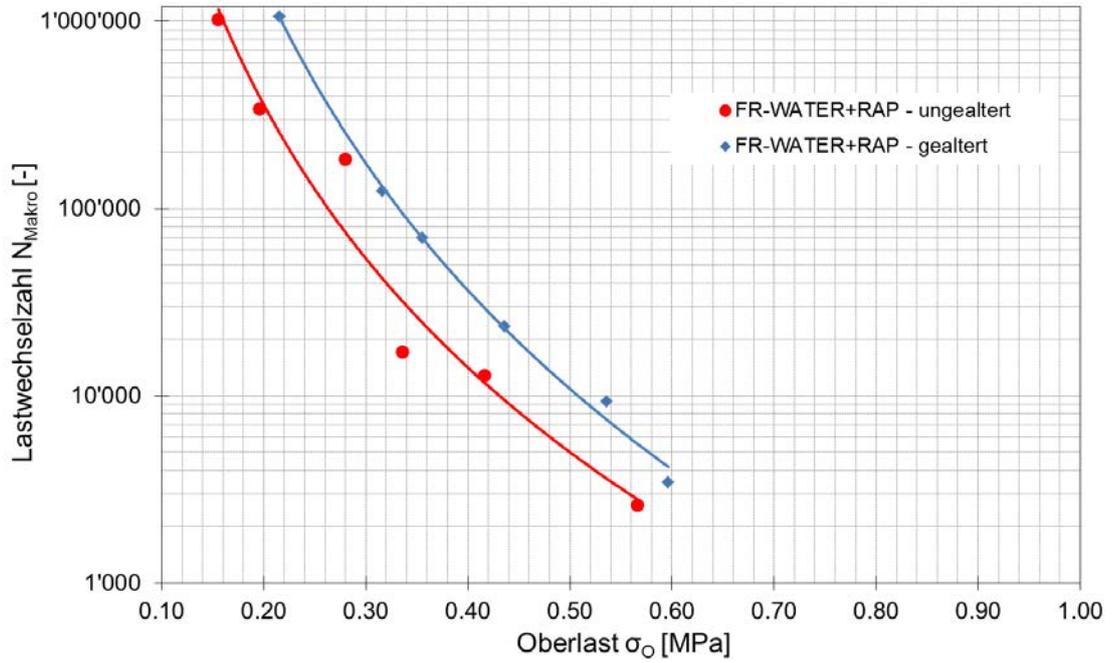


Abb. 38 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-WATER+RAP gealtert/ungealtert

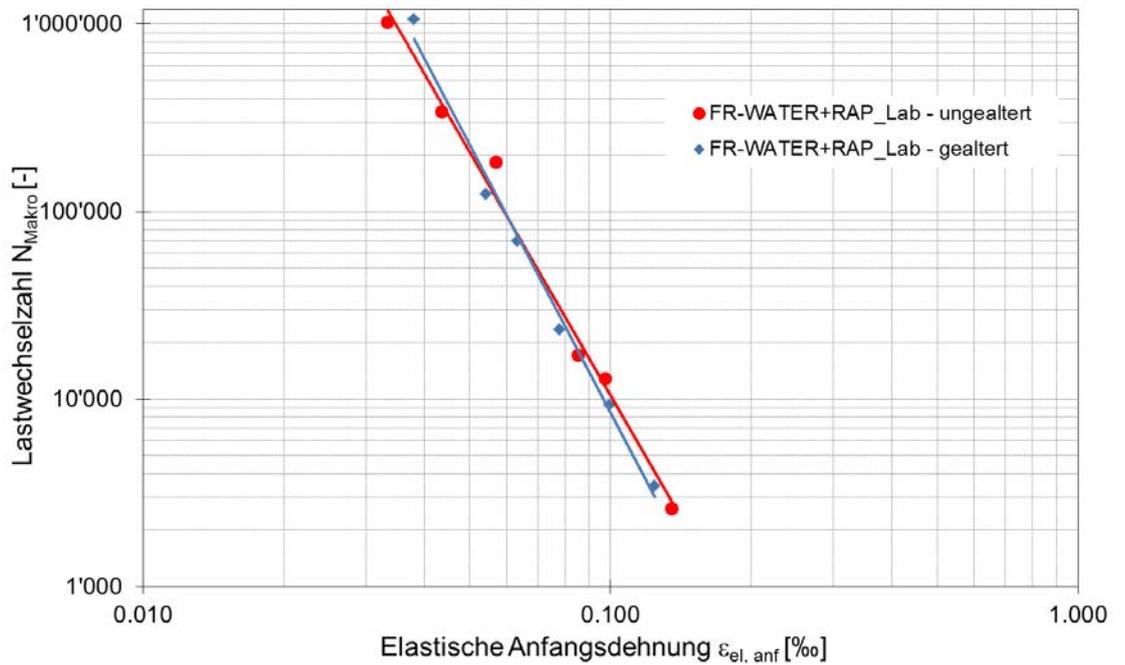


Abb. 39 Ermüdungsverhalten der Labormischung FR-WATER+RAP gealtert/ungealtert

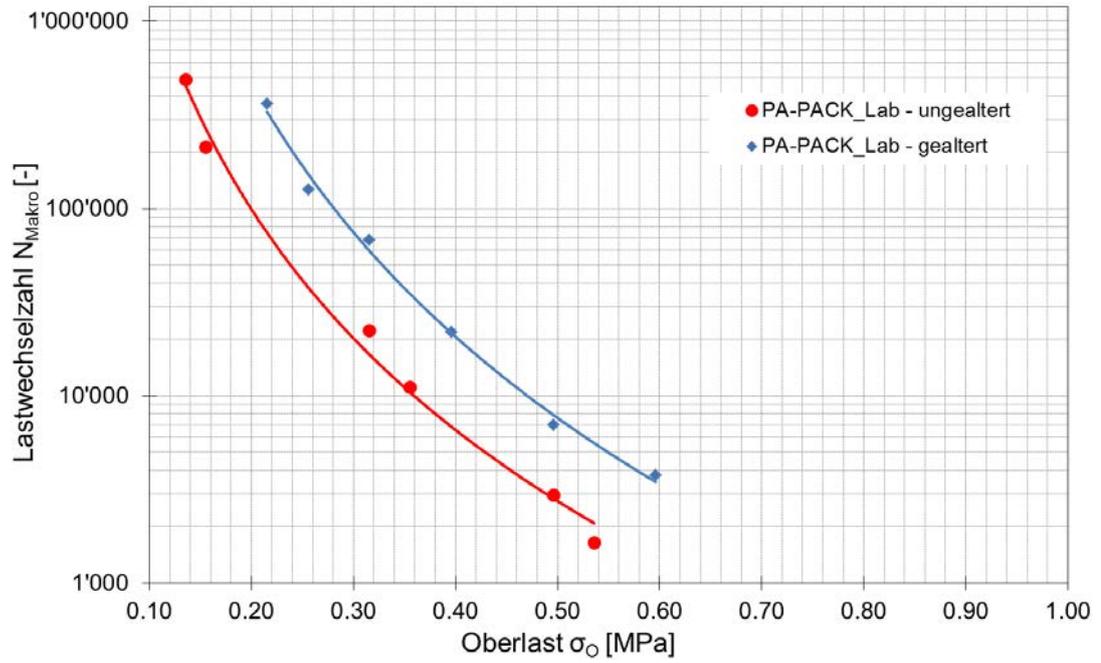


Abb. 40 Ermüdungsverhalten der Labormischung PA-PACK gealtert/ungealtert

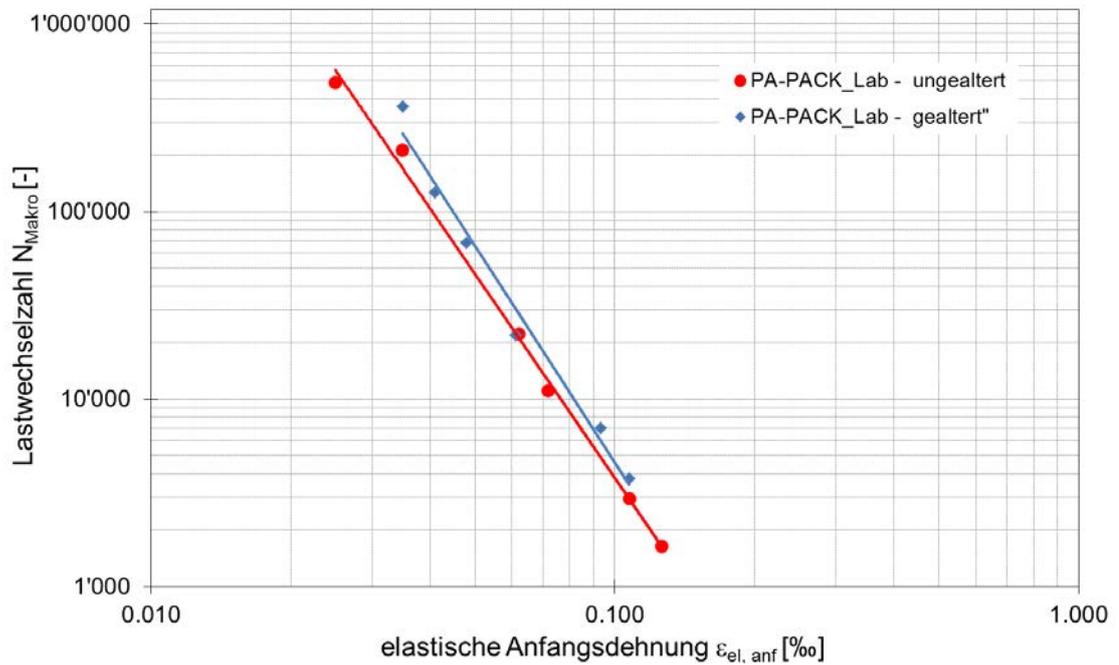


Abb. 41 Ermüdungsverhalten der Labormischung PA-PACK gealtert/ungealtert

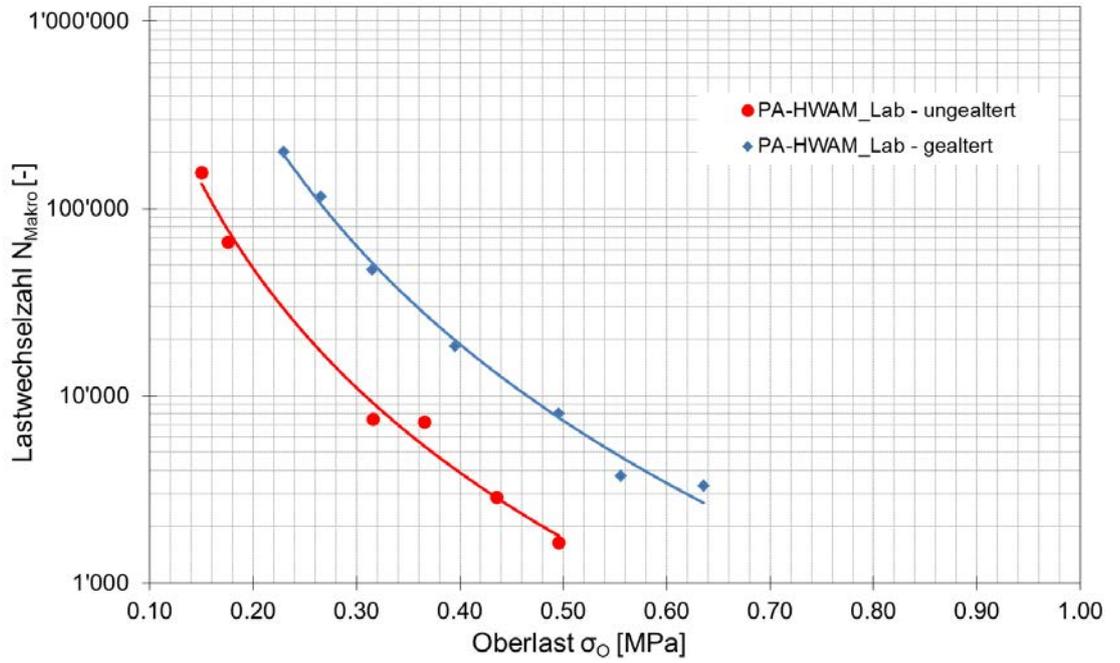


Abb. 42 Ermüdungsverhalten der Labormischung PA-HWAM gealtert/ungealtert

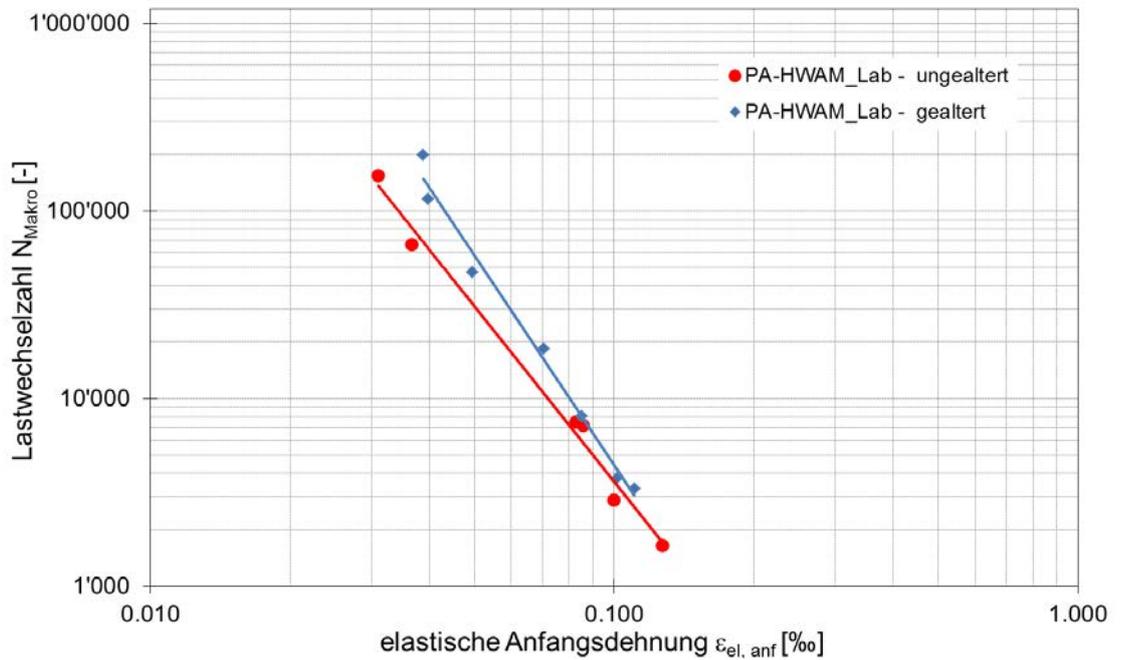


Abb. 43 Ermüdungsverhalten der Labormischung PA-HWAM gealtert/ungealtert

Einen wichtigen Kennwert für den Ermüdungswiderstand stellt die Abbildung 44 dargestellte elastische Anfangsdehnung $\epsilon_{el, anf}$ für 1'000'000 Zyklen dar.

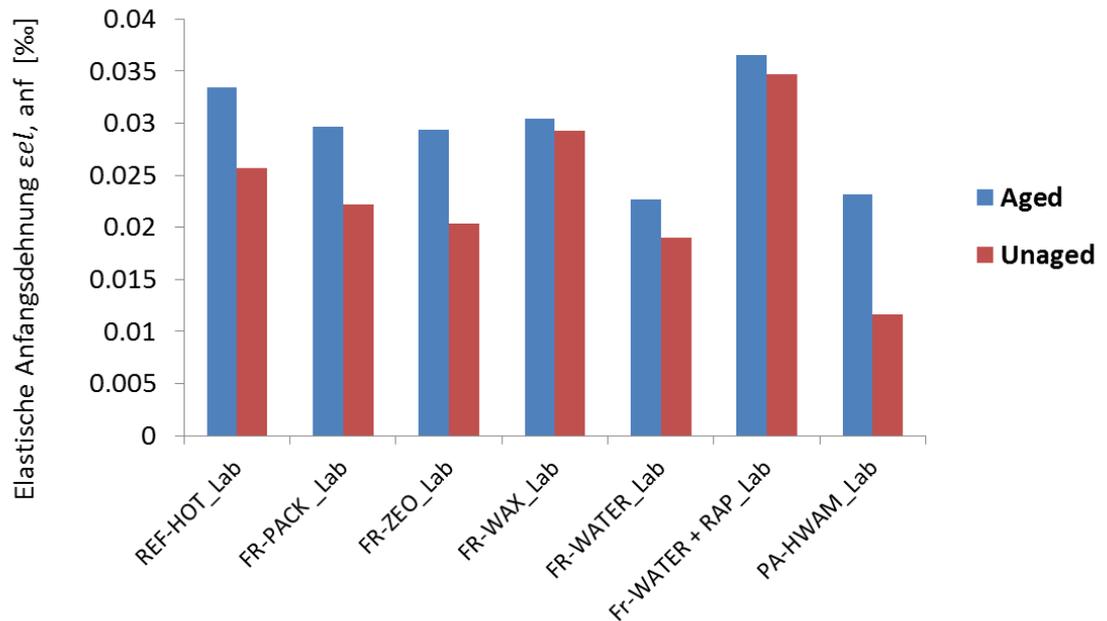


Abb. 44 Elastische Anfangsdehnung bei 1'000'000 Lastwechseln für alle Labormischungen im Vergleich gealtert/ungealtert

Die Auswertung des Ermüdungsverhaltens, wie in Abbildungen 28 bis 43 dargestellt, zeigt für alle WAM Asphaltlabormischungen eine Zunahme der Steifigkeit nach Alterung, wobei die Zunahme der Steifigkeit vor allem bei tiefen und mittleren Temperaturen (10°C und 20°C) besonders ausgeprägt ist.

Auch Abbildung 44, in der Ermüdungswiderstand der Labormischungen im ungealterten und im gealterten Zustand anhand der elastischen Anfangsdehnung bei einer Lastwechselzahl von 1'000'000 dargestellt ist, zeigt deutlich, dass für alle Labormischungen von einer Zunahme der elastischen Dehnung nach Alterung und daher verbesserten Ermüdungseigenschaften ausgegangen werden kann.

6.5 Bindemittel Charakterisierung des rückgewonnen Bindemittels aus den Labormischungen

6.5.1 Penetrationswerte

Abbildung 45 und Tabelle 11 zeigen eine Zusammenfassung der Penetrationswerte aller ungealterten und gealterten (strichlierte Säulen) Labormischungen im Vergleich.

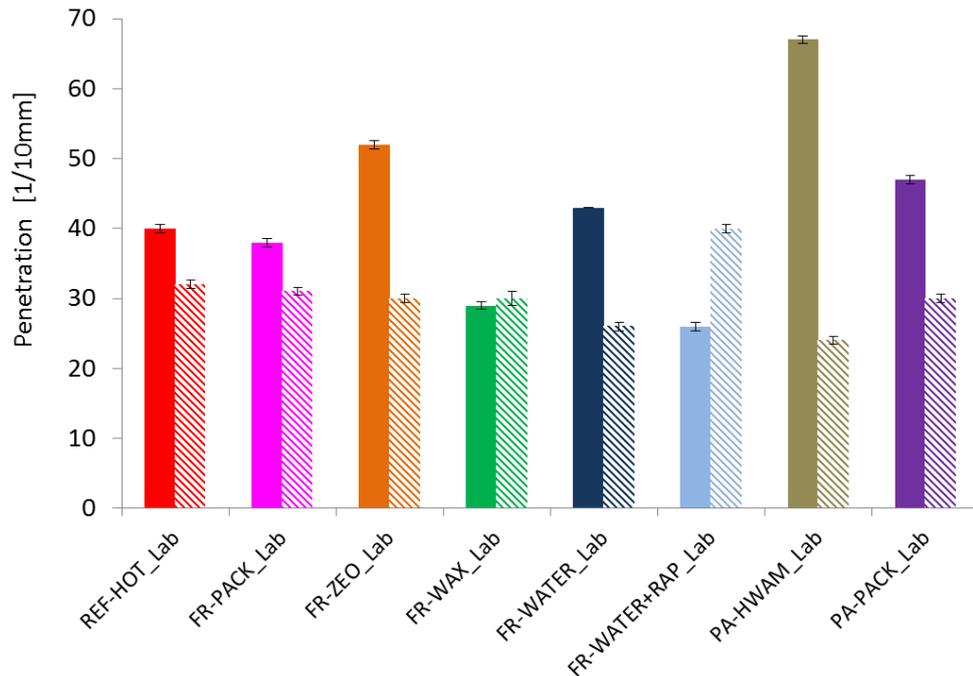


Abb. 45 Penetration des Bindemittel aus den Labormischungen ungealtert/gealtert

Tab. 11 Penetration

Penetration [mm-1]	ungealtert	gealtert
REF-HOT-Lab	40	28
FR-PACK_Lab	38	31
FR-ZEO_Lab	52	30
FR-WAX_Lab	29	30
FR-WATER_Lab	43	26
FR-WATER+RAP_Lab	26	40
PA-HWAM_Lab	67	24
PA-PACK_Lab	47	30

Die Penetrationswerte zeigen mit Ausnahme der der Labormischung FR-WATER+RAP_Lab eine alterungsbedingte Abnahme. Bei der Labormischung FR-WATER+RAP_Lab steigt der Penetrationswert durch die Alterung deutlich an. Praktisch unverändert bleibt der Penetrationswert nach Alterung dagegen für das Labormischgut FR-WAX_Lab.

6.5.2 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Abbildung 46 und Tabelle 12 zeigen eine Zusammenfassung der Erweichungspunkte Ring und Kugel aller ungealterten und gealterten (strichlierte Säulen) Labormischungen im Vergleich.

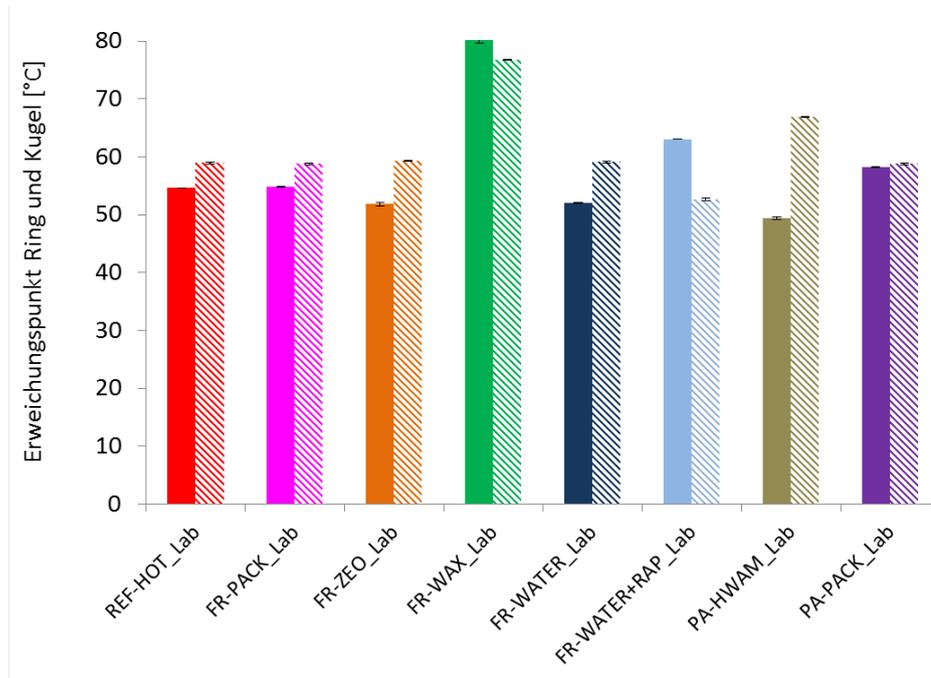


Abb. 46 Erweichungspunkt Ring und Kugel des Bindemittel aus den Labormischungen, ungealtert/gealtert

Tab. 12 Erweichungspunkt Ring und Kugel

Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]	ungealtert	gealtert
REF-HOT-Lab	54.6	60.2
FR-PACK_Lab	54.8	58.2
FR-ZEO_Lab	51.8	59.2
FR-WAX_Lab	80.5	76.8
FR-WATER_Lab	52.0	59.0
FR-WATER+RAP_Lab	63.0	52.6
PA-HWAM_Lab	49.4	66.8
PA-PACK_Lab	49.2	58.8

Der Erweichungspunkt Ring und Kugel zeigt für alle untersuchten Labormischungen mit Ausnahme der Labormischungen FR-WATER+RAP und FR-WAX_Lab eine Zunahme. Wie bei der Penetration ändert sich der Erweichungspunkt für FR-WAX_Lab nur geringfügig.

6.5.3 Penetrationsindex I_p

In Tabelle 13 sind die Penetrationsindices des nicht gealterten und des gealterten Bitumens aller Labormischungen aufgeführt. Zusätzlich ist noch die Differenz zwischen dem Penetrationsindex gealtert/ungealtert angegeben.

Tab. 13 Penetrationsindex I_p

Penetrationsindex I_p	ungealtert	gealtert	ΔI_p
REF-HOT-Lab	-0.6	-0.2	+0.4
FR-PACK_Lab	-0.7	-0.4	+0.3
FR-ZEO_Lab	-0.6	-0.3	+0.3
FR-WAX_Lab	+3.1	+2.6	-0.5
FR-WATER_Lab	-1.0	-0.6	+0.4
FR-WATER+RAP_Lab	+0.1	-1.1	-1.2
PA-HWAM_Lab	-0.6	+0.6	+1.2
PA-PACK_Lab	-1.5	-0.4	+1.1

Der Penetrationsindex I_p beschreibt das Verhalten eines Bitumens bei Temperaturvariation und gibt so Hinweise auf sein Alterungsverhalten. Der Penetrationsindex variiert dabei zwischen -3 für sehr temperaturempfindliche Bitumen und +7 für wenig temperaturempfindliche Bitumen. Durch die Alterung nimmt der Penetrationsindex und damit die Temperaturempfindlichkeit des Bitumens ab.

Die meisten der Niedertemperaturvarianten wie FR-PACK_Lab, FR-ZEO_Lab und FR-WATER_Lab zeigen ein ähnliches Alterungsverhalten wie das heiße Referenzmischgut, d.h. eine Abnahme der Temperaturempfindlichkeit. Die Abnahme der Temperaturempfindlichkeit gilt auch für PA-HWAM_Lab und PA-PACK_Lab, wobei die in diesen Mischungen verwendeten Additive (Fluxmittel und Greenseal) den größten Einfluss auf die Temperaturempfindlichkeit des Bitumens haben.

Ein diametral anderes Alterungsverhalten und eine Zunahme der Temperaturempfindlichkeit stellt man dagegen beim der RAP-Variante FR-WATER+RAP_Lab fest.

Die Verwendung von Wachs hat besonders im ungealterten Zustand einen starken Einfluss auf das Alterungsverhalten des Bitumens.

6.5.4 Modul mit dynamischem Scherrheometer (DSR)

Abbildungen 47 bis 53 zeigen die Ergebnisse des komplexen Moduls aus DSR Messungen der Labormischung im Vergleich ungealterte/gealterte Labormischung.

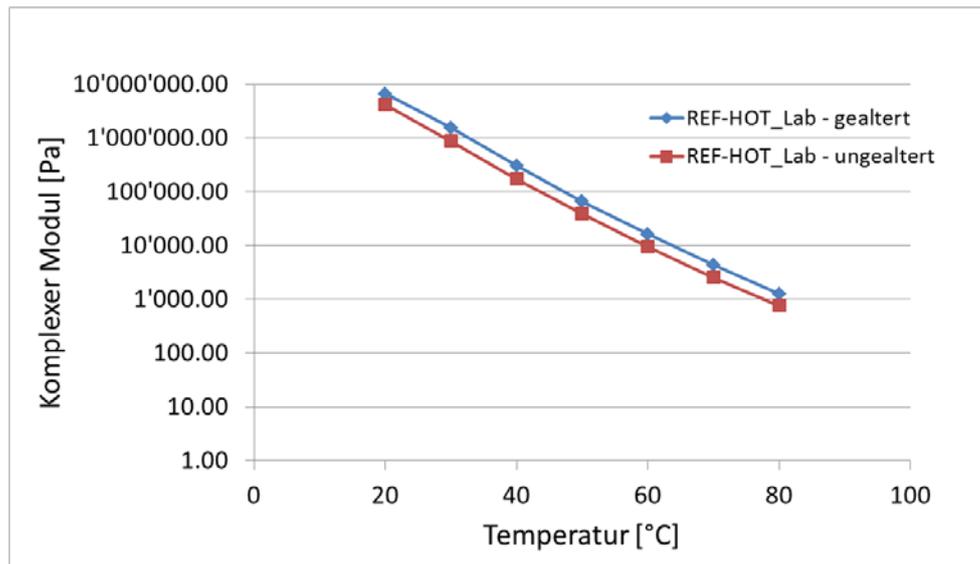


Abb. 47 Komplexer Modul (DSR) der Labormischung REF-HOT_Lab gealtert/ungealtert bei einer Frequenz von 1.6 Hz und unterschiedlichen Temperaturen

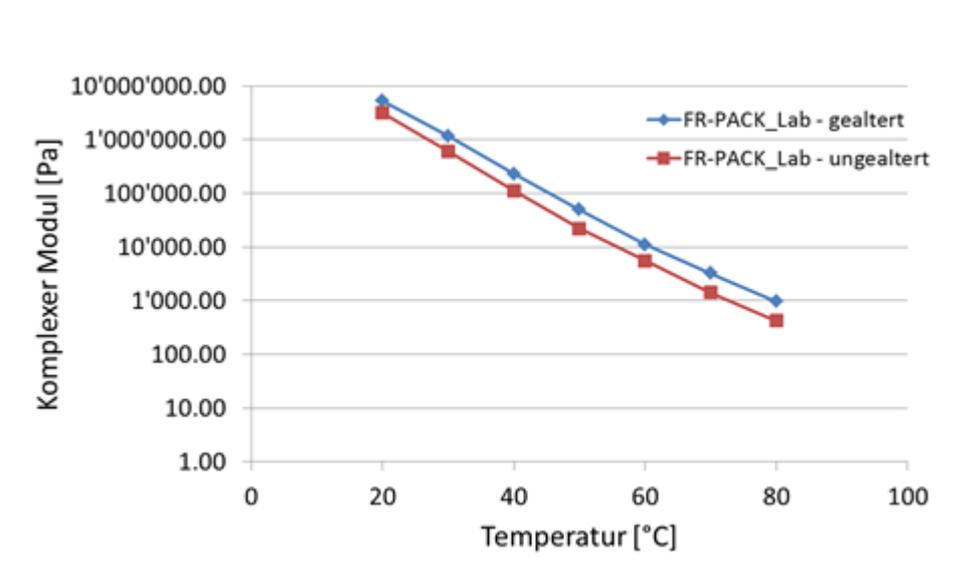


Abb. 48 Komplexer Modul (DSR) der Labormischung FR-PACK gealtert/ungealtert bei einer Frequenz von 1.6 Hz und unterschiedlichen Temperaturen

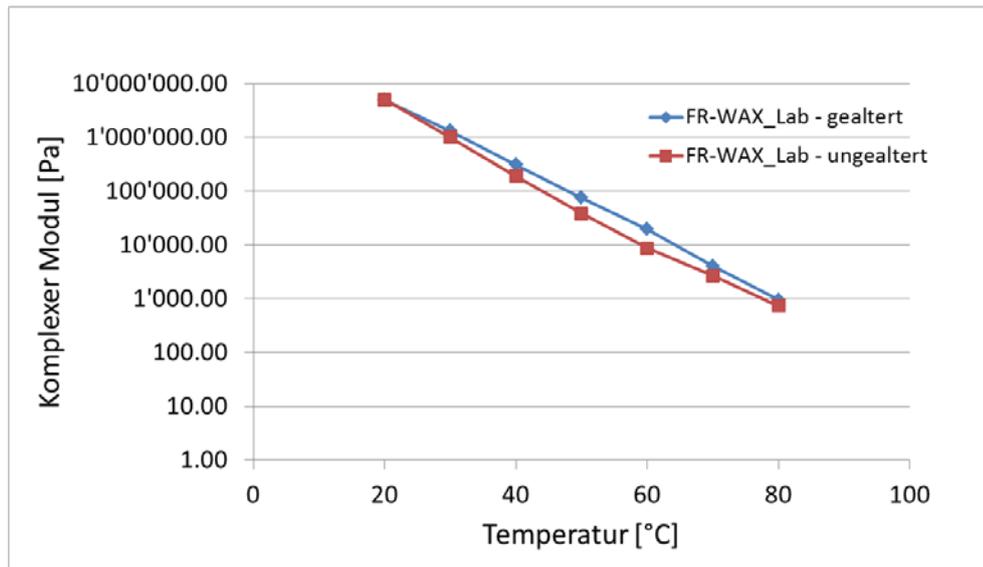


Abb. 49 Komplexer Modul (DSR) der Labormischung FR-WAX gealtert/ungealtert bei einer Frequenz von 1.6 Hz und unterschiedlichen Temperaturen

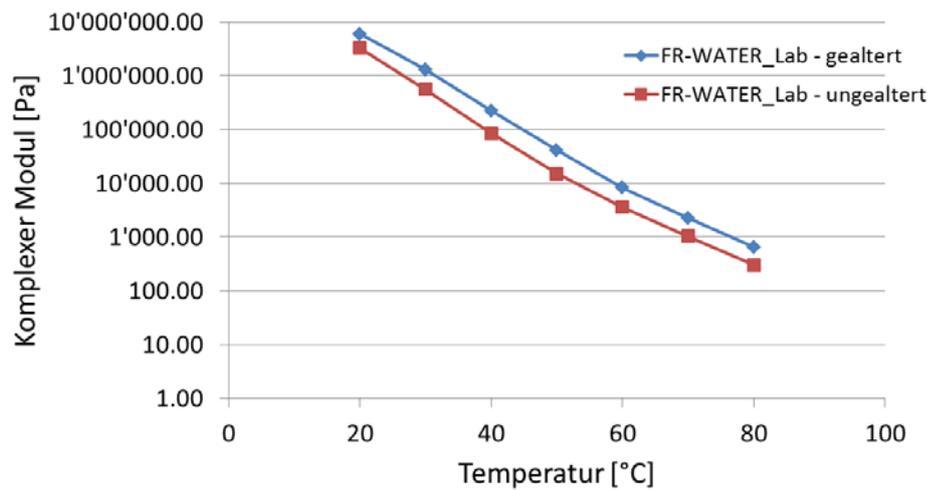


Abb. 50 Komplexer Modul (DSR) der Labormischung FR-WATER gealtert/ungealtert bei einer Frequenz von 1.6 Hz und unterschiedlichen Temperaturen

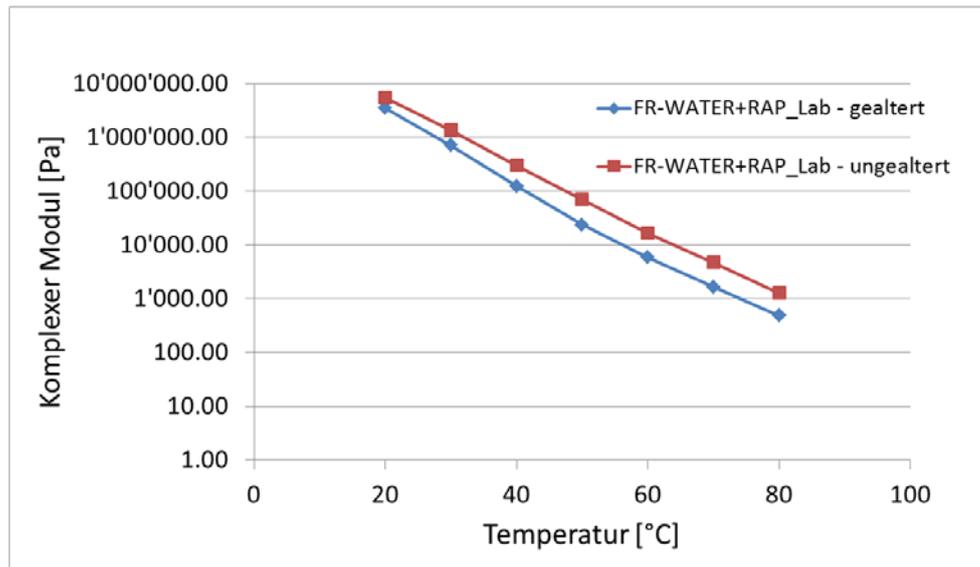


Abb. 51 Komplexer Modul (DSR) der Labormischung FR-WATER+RAP gealtert/ungealtert bei einer Frequenz von 1.6 Hz und unterschiedlichen Temperaturen

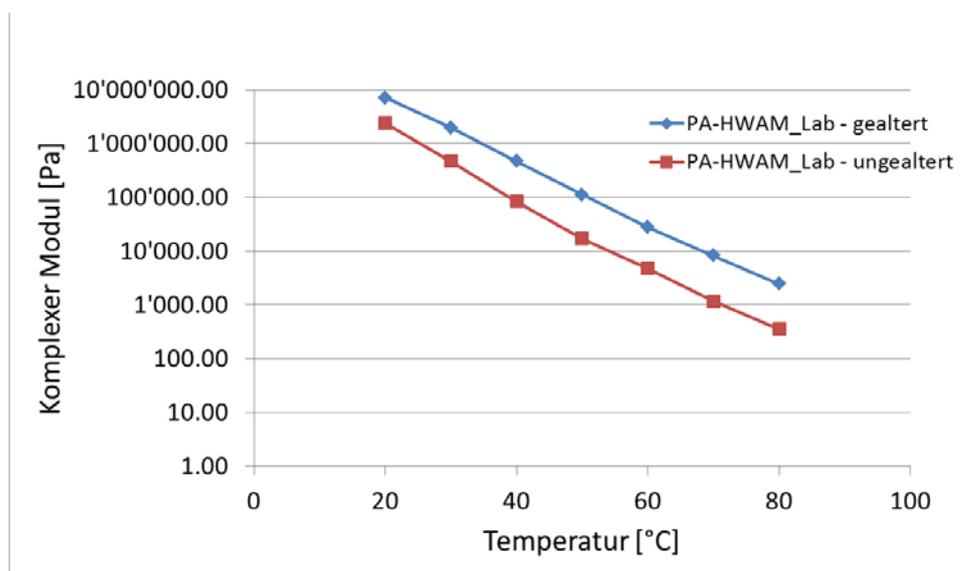


Abb. 52 Komplexer Modul (DSR) der Labormischung PA-HWAM gealtert/ungealtert bei einer Frequenz von 1.6 Hz und unterschiedlichen Temperaturen

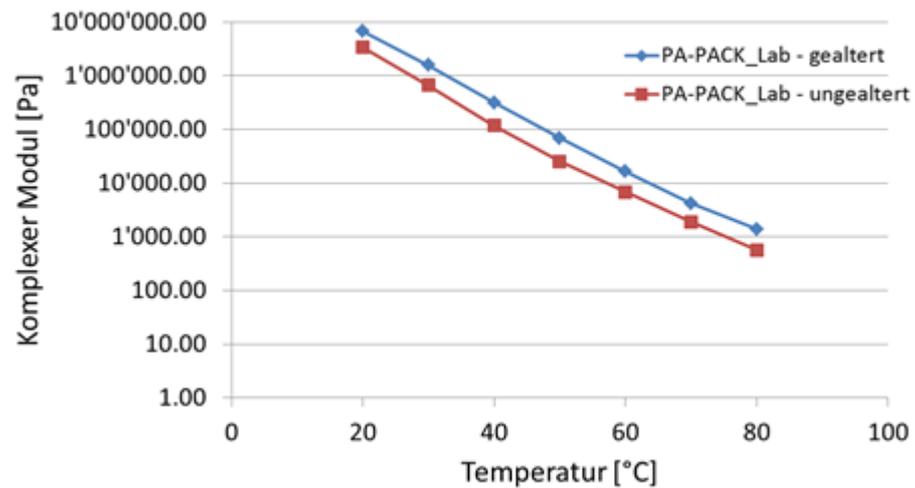


Abb. 53 Komplexer Modul (DSR) der Labormischung PA-PACK gealtert/ungealtert bei einer Frequenz von 1.6 Hz und unterschiedlichen Temperaturen

Die Auswertung des komplexen Moduls aus DSR Messungen, wie er in Abbildungen 47 bis 53 dargestellt, zeigt für alle für alle WAM Asphaltmischungen mit Ausnahme der Labormischung FR-WATER+RAP eine Zunahme nach Alterung. Die Labormischung FR-WATER+RAP zeigt dagegen wie bereits bei den Prüfungen Penetration und bei der Prüfung Erweichungspunkt Ring und Kugel ersichtlich, eine Zunahme bzw. eine Abnahme nach Alterung. Für die Labormischung FR-WAX_Lab ist die Änderung des komplexen Moduls durch die Alterung, wie auch im Penetrationswert ersichtlich, gering.

7 Ergebnisse Mischungen der Aufbereitungsanlage

Neben den Labormischungen wurden auch die von der Aufbereitungsanlage entnommenen Mischungen. Für diese Mischungen wurden Steifigkeitsmodul IT-CY und das Ermüdungsverhalten mit dem Spaltzug-Schwell-Versuch ermittelt. Die Ergebnisse Steifigkeitsmodul IT-CY sind in Abbildungen 54 bis 57 dargestellt.

7.1 Steifigkeitsmodul IT-CY der Mischungen der Aufbereitungsanlage

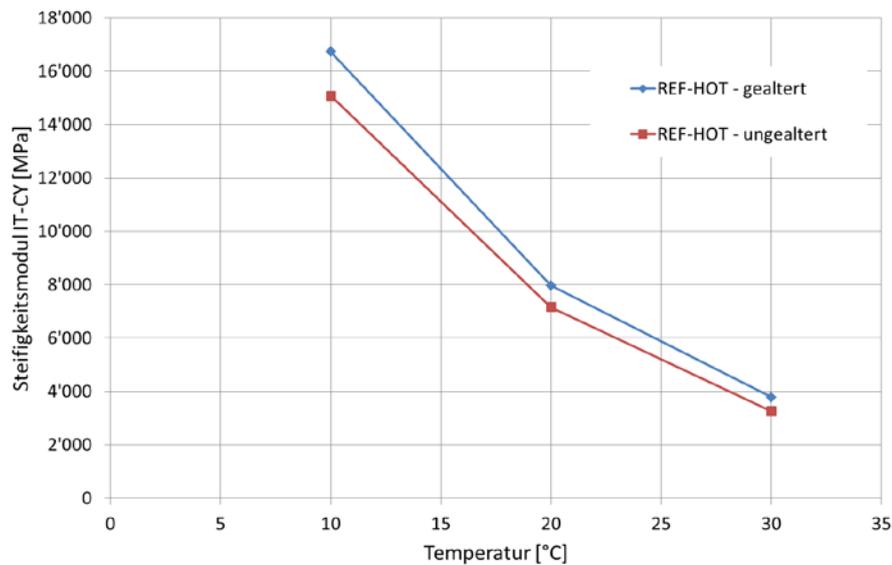


Abb. 54 Steifigkeitsmodul der Mischung REF-HOT gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

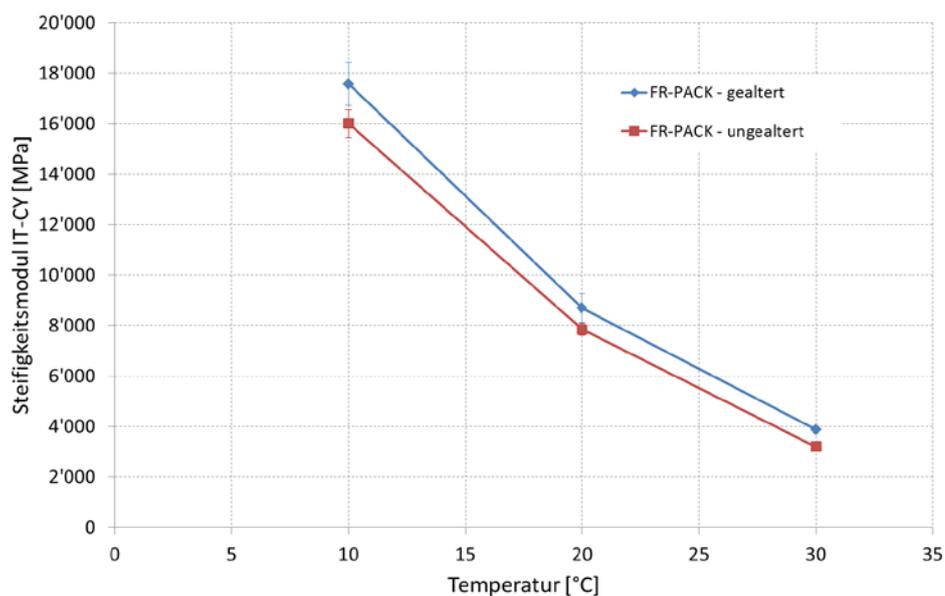


Abb. 55 Steifigkeitsmodul der Mischung FR-PACK gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

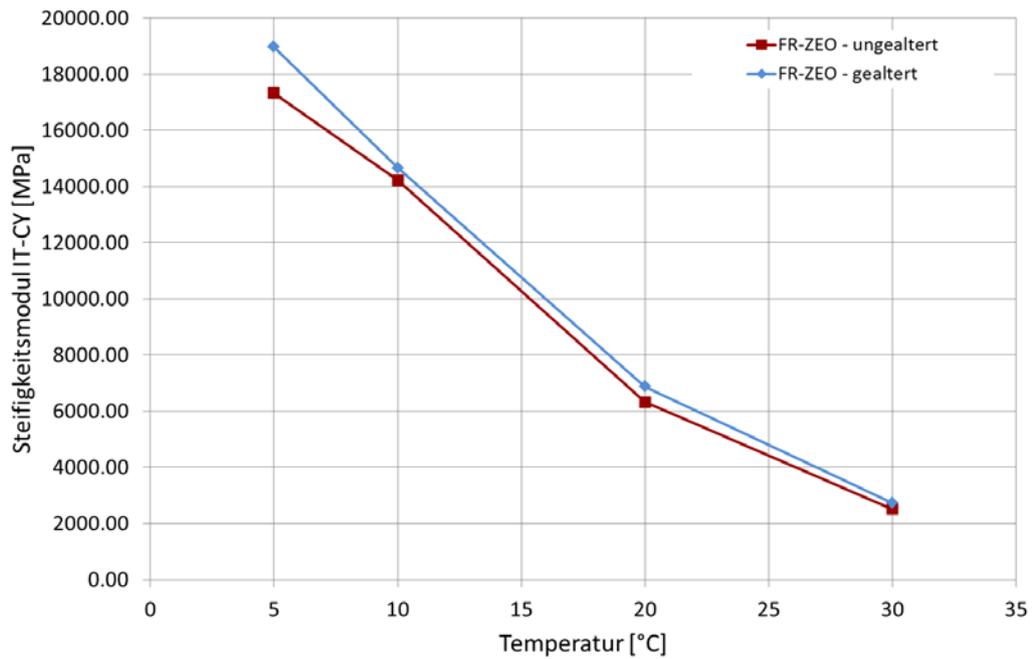


Abb. 56 Steifigkeitsmodul der Mischung FR-ZEO gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

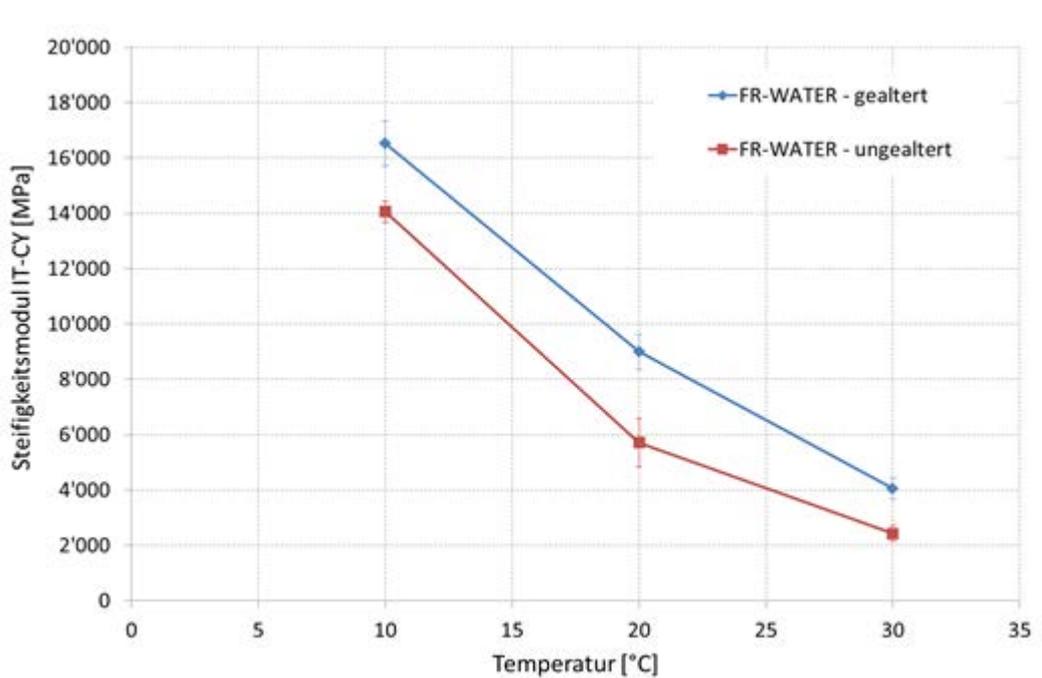


Abb. 57 Steifigkeitsmodul der Mischung FR-WATER gealtert/ungealtert bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Auswertung des Steifigkeitsmoduls IT-CY, wie in Abbildungen 54 bis 57 dargestellt, zeigt auch für alle in der Aufbereitungsanlage hergestellten WAM Asphaltmischungen eine Zunahme der Steifigkeit nach Alterung, wobei die Zunahme der Steifigkeit vor allem bei tiefen und mittleren Temperaturen (10°C und 20°C) besonders ausgeprägt ist.

7.2 Ermüdungsverhalten (Spaltzug-Schwellversuch) der Mischungen der Aufbereitungsanlage

Abbildungen 58 bis 65 zeigen das Ermüdungsverhalten bestimmt im Spaltzug-Schwellversuch der auf der Mischanlage hergestellten Niedertemperaturasphalte.

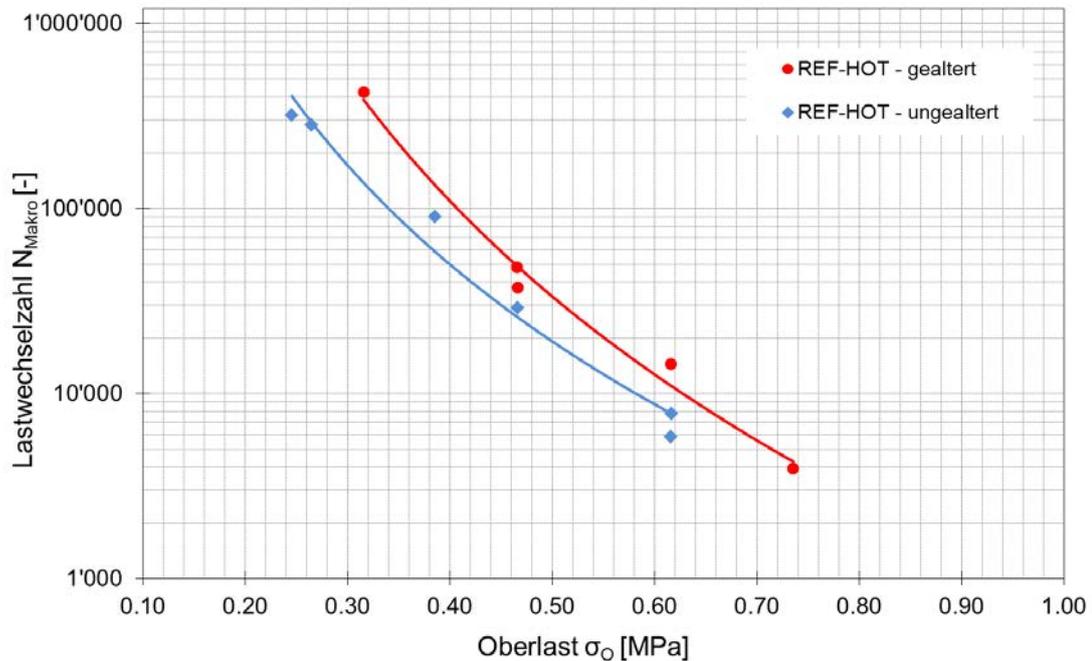


Abb. 58 Ermüdungsverhalten der Mischung REF-HOT gealtert/ungealtert

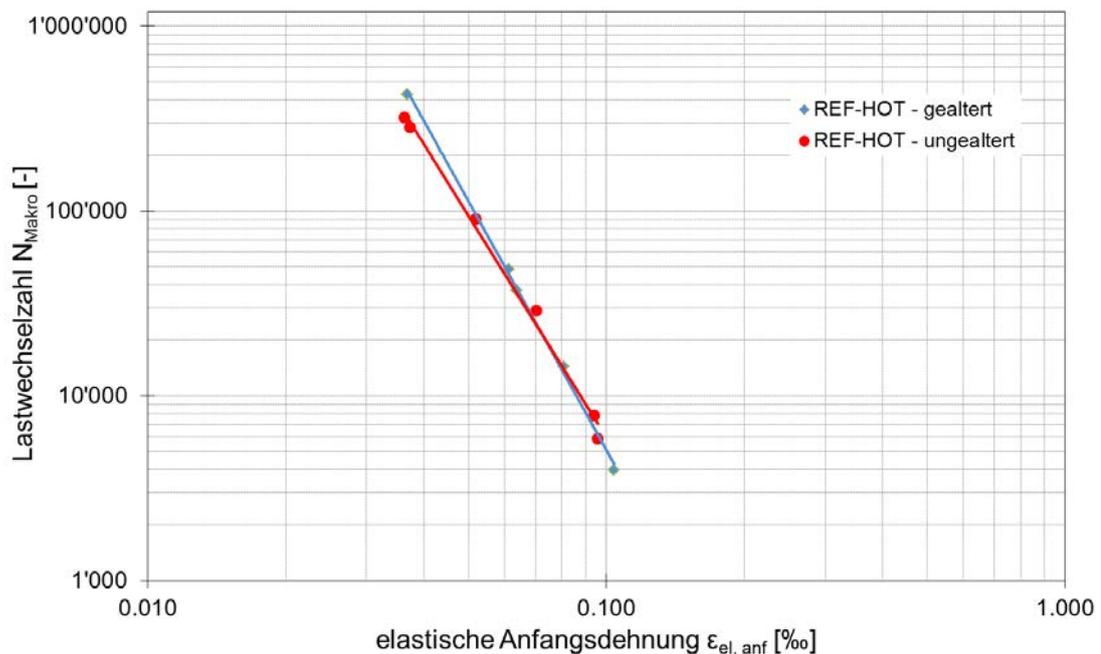


Abb. 59 Ermüdungsverhalten der Mischung REF-HOT gealtert/ungealtert

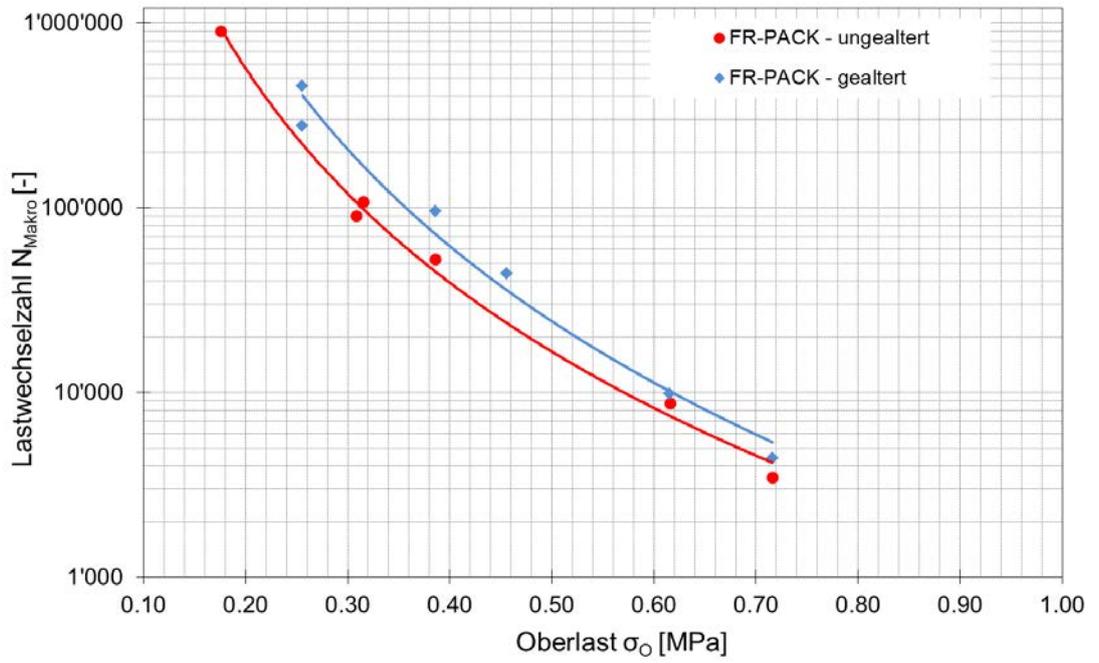


Abb. 60 Ermüdungsverhalten der Mischung FR-PACK gealtert/ungealtert

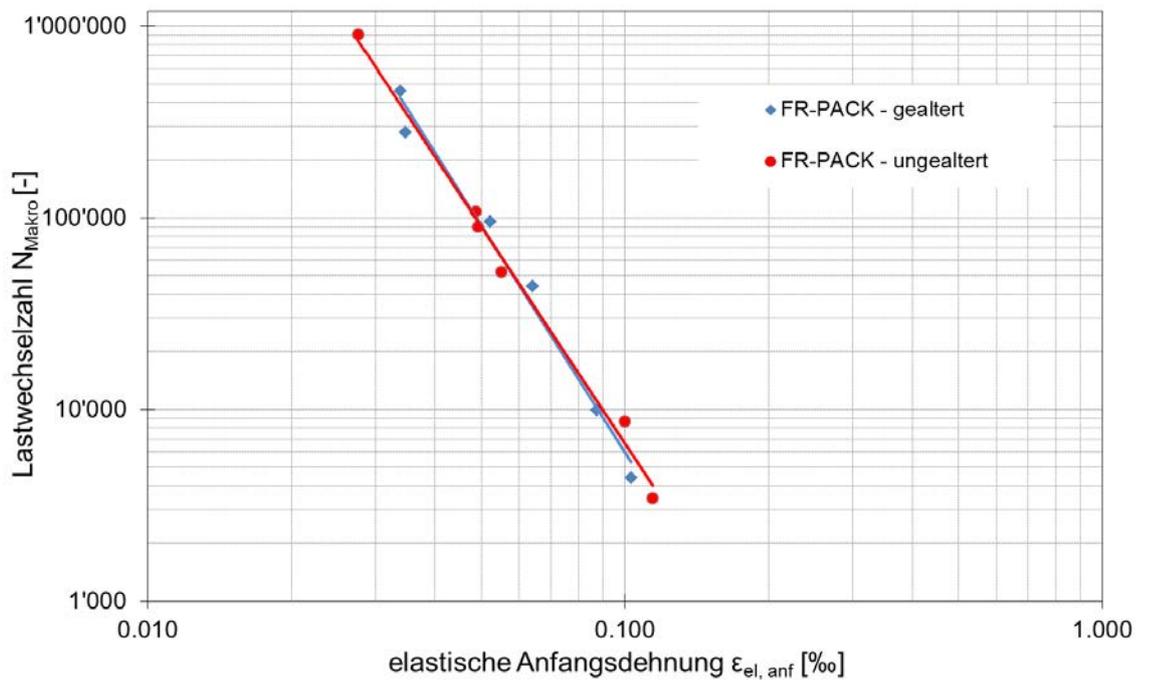


Abb. 61 Ermüdungsverhalten der Mischung FR-PACK gealtert/ungealtert

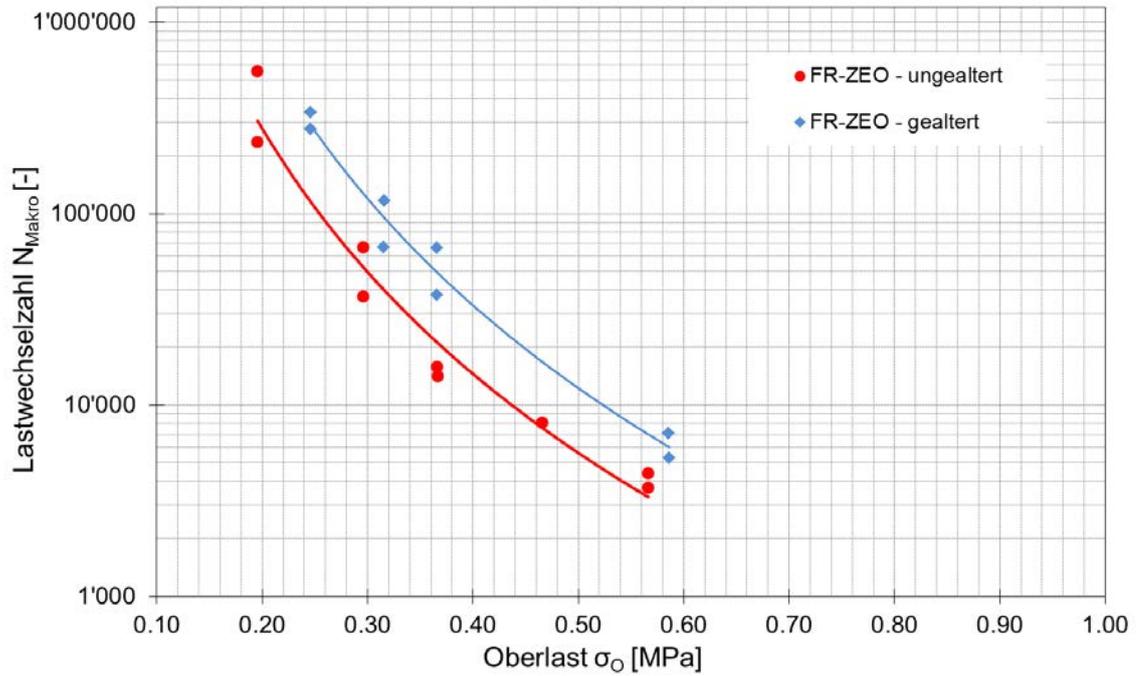


Abb. 62 Ermüdungsverhalten der Mischung FR-ZEO gealtert/ungealtert

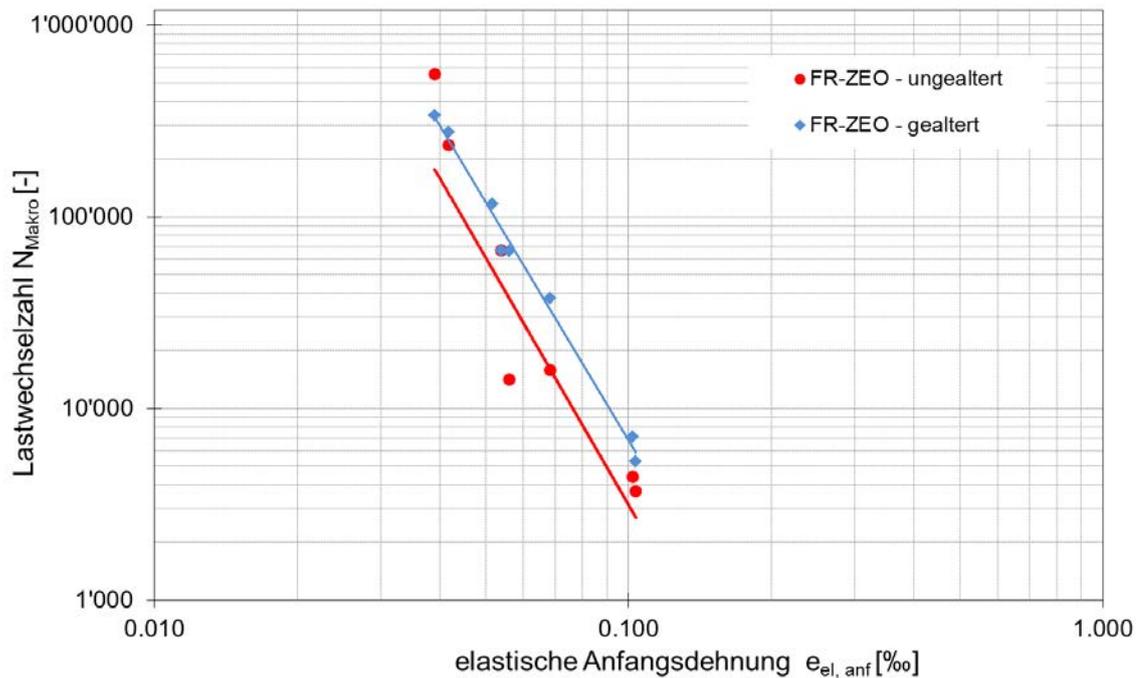


Abb. 63 Ermüdungsverhalten der Mischung FR-ZEO gealtert/ungealtert

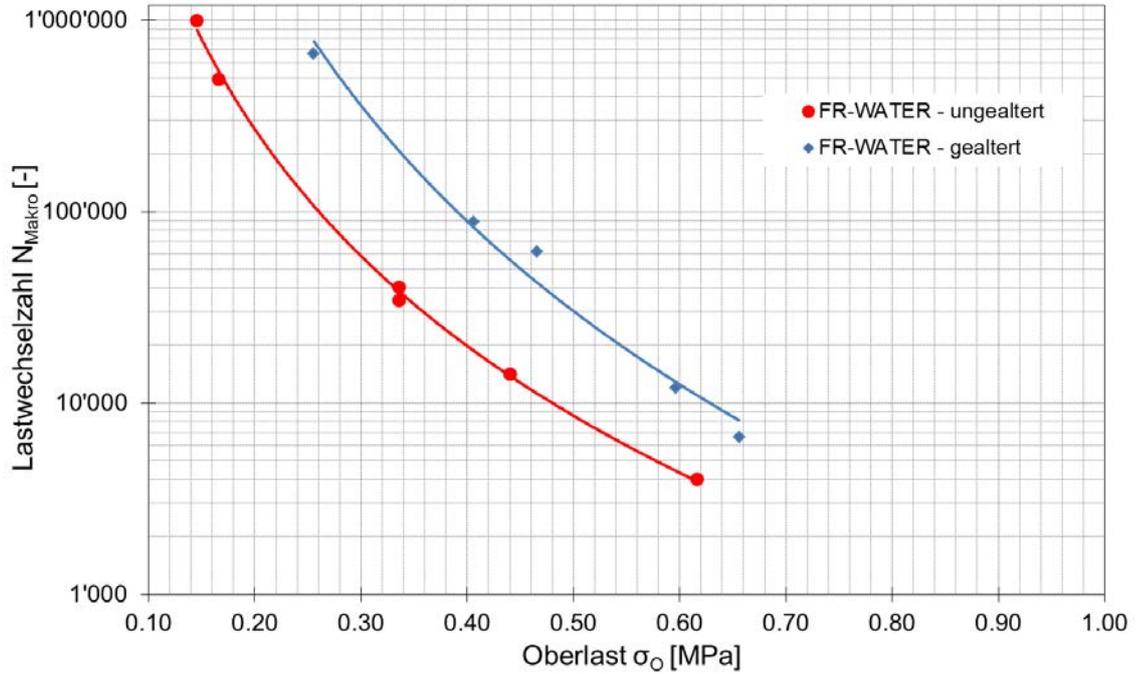


Abb. 64 Ermüdungsverhalten der Mischung FR-WATER gealtert/ungealtert

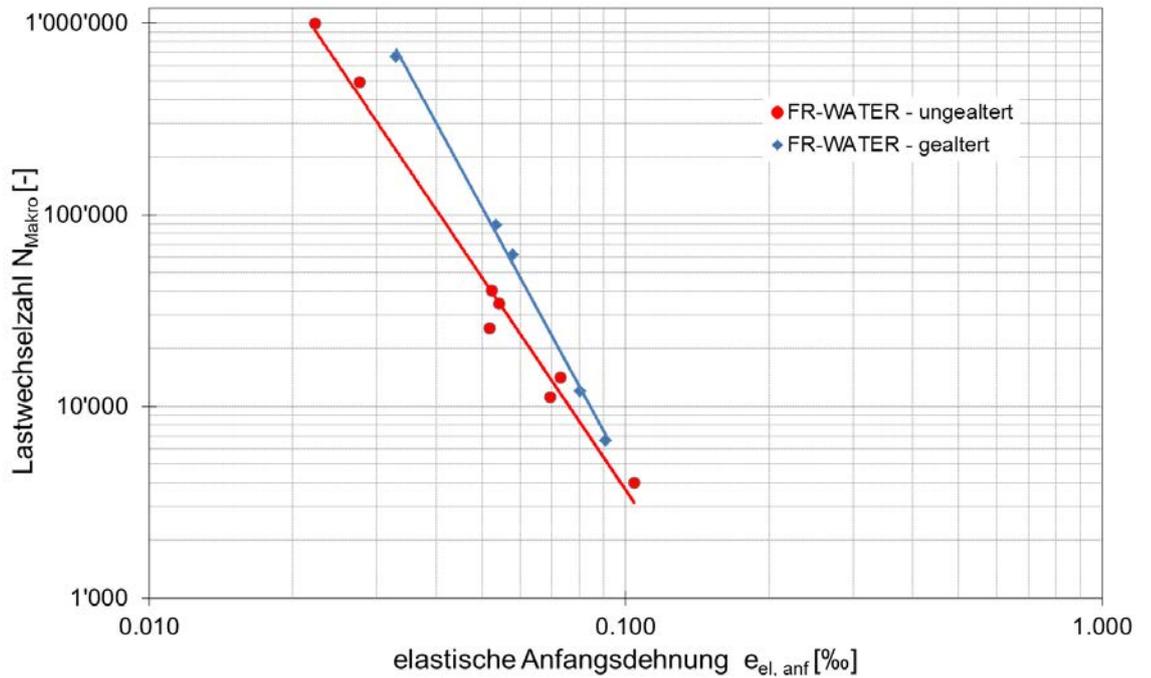


Abb. 65 Ermüdungsverhalten der Mischung FR-WATER gealtert/ungealtert

Abbildung 66 zeigt den Ermüdungswiderstand der auf der Mischanlage hergestellten Niedertemperaturasphalte im ungealterten und im gealterten Zustand anhand der elastischen Anfangsdehnung bei einer Lastwechselzahl von 1'000000.

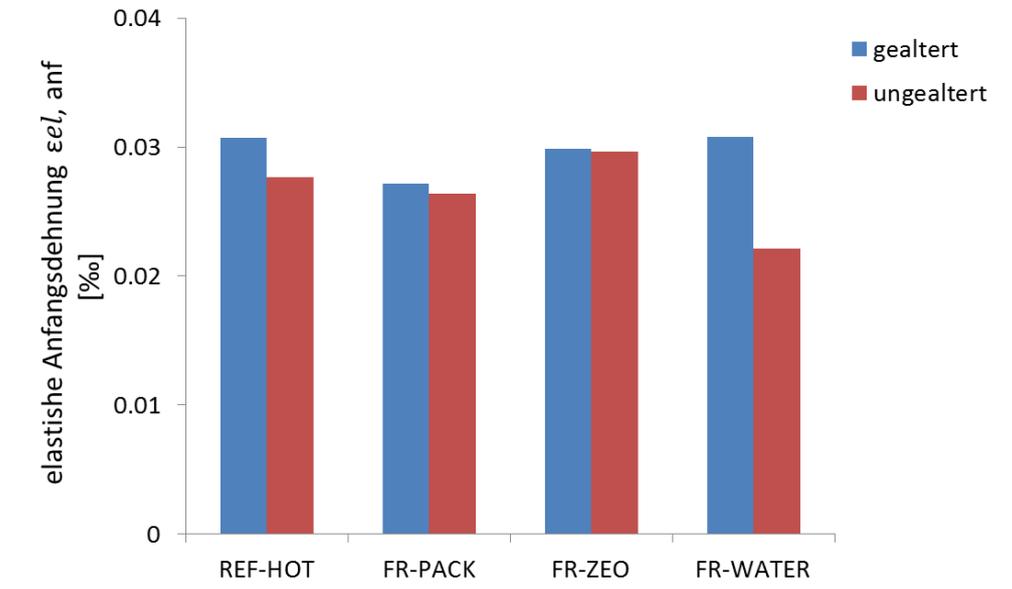


Abb. 66 Elastische Anfangsdehnung bei 1'000000 Lastwechseln für alle auf der Aufbereitungsanlage hergestellten Mischungen im Vergleich gealtert/ungealtert

Die Auswertung des Ermüdungsverhaltens, wie in Abbildungen 58 bis 65 dargestellt, zeigt auch für alle in der Aufbereitungsanlage hergestellten Niedertemperaturasphalte eine Zunahme der Ermüdungseigenschaften im gealterten Zustand.

Auch Abbildung 66, in der die elastische Anfangsdehnung bei einer Lastwechselzahl von 1'000000 dargestellt ist, macht deutlich, dass für alle Anlagenmischungen von einer Zunahme der elastischen Dehnung nach Alterung und daher verbesserten Ermüdungseigenschaften ausgegangen werden kann. Während bei mit Zeolith hergestellter Mischung die Zunahme relativ gering ist, ist sie für die Schaumbitumenmischung signifikant.

8 Bindemitteluntersuchungen

Neben den Untersuchungen des rückgewonnenen Bindemittels aus den Labor-mischungen wurden auch Bindemitteluntersuchungen an den Ausgangsbindemitteln der Niedertemperaturasphalte durchgeführt.

So wurden das Ursprungsbitumen 50/70, das Bitumen+FR-PACK, Bitumen+FR-WAX und das Bitumen+PA-PACK im Ausgangszustand sowie nach Kurzzeit Laboralterung mit Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) und Langzeit Laboralterung mit dem Pressure Aging Vessel (PAV) untersucht. Die Ergebnisse dieser Laboralterung sind in Abbildung 67 dargestellt.

Abbildung 68 zeigt dagegen nochmal die Erweichungspunkte Ring und Kugel für das rückgewonnene Bindemittel aus den entsprechenden Niedertemperaturasphalten ohne und mit der im Forschungsprojekt gewählten Alterungsmethode.

8.1 Erweichungspunkt Ring und Kugel vor und nach Laboralterung

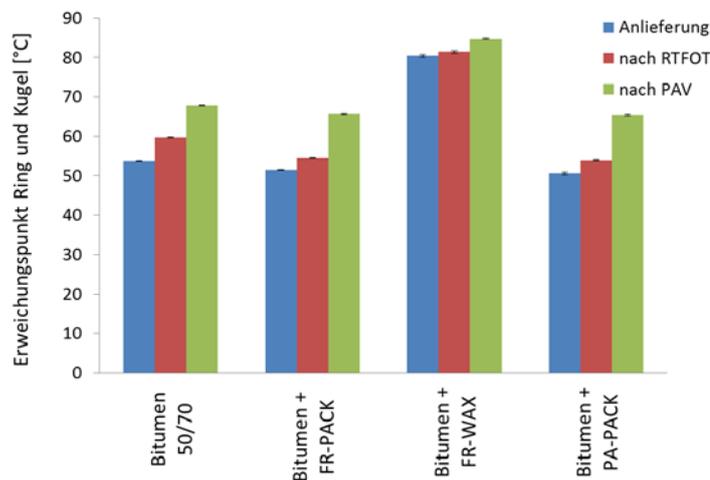


Abb. 67 Erweichungspunkt Ring und Kugel

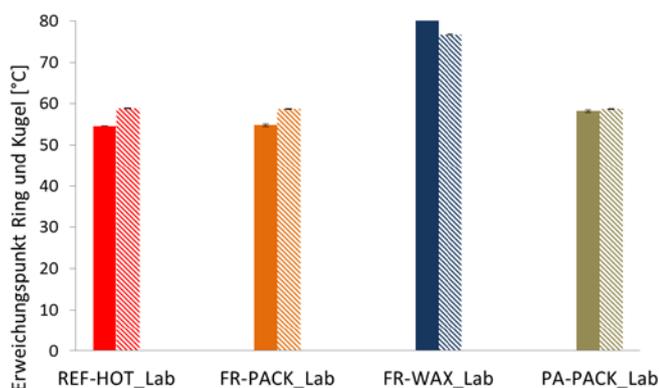


Abb. 68 Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels aus den Labormischungen unagealtert/gealtert (strichlierte Säulen)

Die in Abbildungen 67 dargestellten Erweichungspunkte zeigen in allen Fällen – wenn für das Bitumen mit Wachszugabe auch nur eine sehr leichte – eine Zunahme mit der Laboralterung, wobei die Zunahme nach PAV deutlich höher ausfällt.

Wie ein Vergleich der Erweichungspunkt Werte mit denjenigen der gleichen aus Mischgut zurückgewonnenen Bindemittel (Abb. 68) zeigt, entspricht die gewählte Laboralterungsmethode in Bezug auf die Änderung des Erweichungspunktes in etwa dem Verhalten nach RTFOT Alterung.

8.2 Modul mit dynamischem Scherrheometer (DSR)

Abbildung 69 bis 72 zeigt den mit dem dynamischem Scherrheometer DSR bestimmten komplexen Modul für die untersuchten Bindemittel.

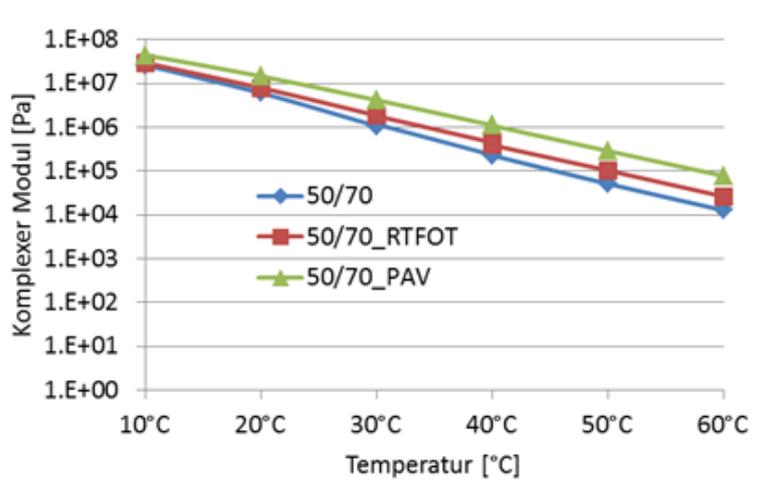


Abb. 69 Komplexer Modul (DSR) des Bitumens 50/70 im Ausgangszustand und nach Laboralterung in RTFOT und PAV bei unterschiedlichen Temperaturen

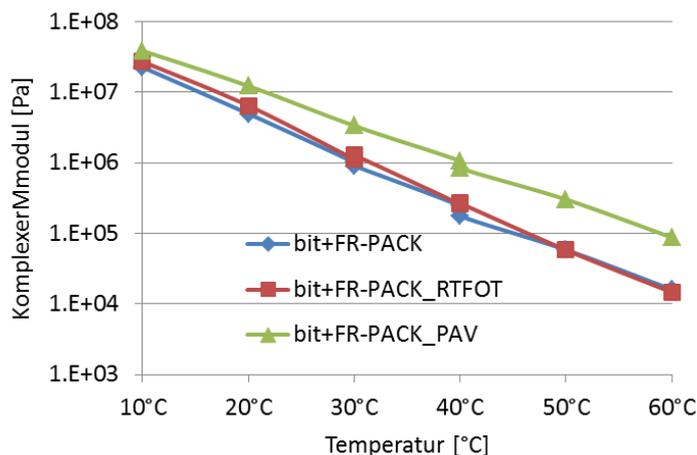


Abb. 70 Komplexer Modul (DSR) des Bitumens 50/70+FR-PACK im Ausgangszustand und nach Laboralterung in RTFOT und PAV bei unterschiedlichen Temperaturen

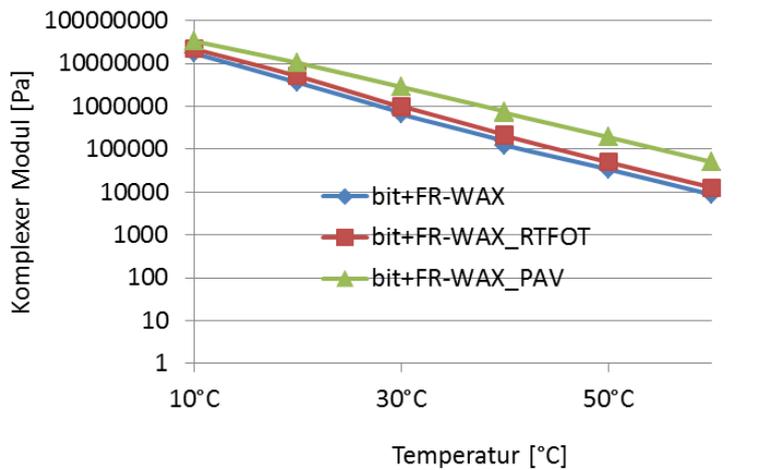


Abb. 71 Komplexer Modul (DSR) des Bitumens 50/70+FR-WAX im Ausgangszustand und nach Laboralterung in RTFOT und PAV bei unterschiedlichen Temperaturen

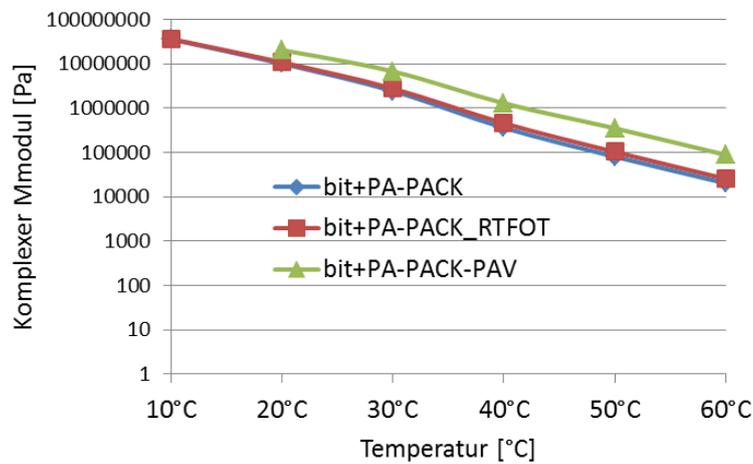


Abb. 72 Komplexer Modul (DSR) des Bitumens 50/70+PA-PACK im Ausgangszustand und nach Laboralterung in RTFOT und PAV bei unterschiedlichen Temperaturen

Die in Abbildungen 69 bis 72 dargestellten komplexen Module aus DSR Prüfungen zeigen für die WAM-Bindemittel praktisch keine Veränderung nach der RTFOT Alterung, aber eine Zunahme des Moduls nach PAV Alterung.

Das Ausgangsbindemittel 50/70 zeigt dagegen auch für die RTFOT Alterung eine Zunahme.

9 Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Forschungsziele

9.1 Beurteilung des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfungen

Aus der Auswertung der Untersuchungsergebnisse der mechanischen Prüfungen des Steifigkeitsmodul IT-CY und des im Spaltzug-Schwell-Versuch bestimmten Ermüdungsverhaltens geht hervor, dass die im Projekt angewendete und in Kapitel 3 beschriebene Laboralterung zu einem Anstieg des Steifigkeitsmoduls einerseits und einer Zunahme der Ermüdung andererseits, d.h. insgesamt zu verbesserten Ermüdungseigenschaften führt.

Die Zunahme der Steifigkeit nach Alterung ist bei tiefen und mittleren Temperaturen (10°C und 20°C) besonders ausgeprägt.

Der anhand der elastischen Anfangsdehnung bei einer Lastwechselzahl von 1'000'000 Lastwechseln dargestellte Ermüdungswiderstand im Vergleich der Mischungen im nicht gealterten und im gealterten Zustand, zeigt eindeutig eine Zunahme der elastischen Dehnung nach Alterung und somit verbesserte Ermüdungseigenschaften für alle gealterten Niedertemperaturasphalte.

Diese Aussage gilt für alle untersuchten Niedertemperaturasphalte, d.h. sowohl für im Labor aus den Ausgangsstoffen hergestellten als auch für die von der Aufbereitungsanlage entnommenen Mischungen.

Die Auswertung der Spurbildungsprüfung zeigt dagegen für praktisch alle Niedertemperaturasphaltemischungen einen Anstieg der Spurrinnentiefe nach Durchführung der Alterung und damit eine Abnahme des Widerstands gegen bleibende Verformungen im gealterten Zustand. Die Spurrinnenprüfung wurde dabei im Projekt ausschließlich für die Labormischungen durchgeführt.

Ganz extrem hohe Spurrinnentiefen am gealterten Mischgut bis 17% finden sich für die Mischungen FR-PACK und FR-WATER. Einzig das Mischgut PA-HWAM zeigt - wie auch das Referenzmischgut - eine Abnahme der Spurrinnentiefe beim gealterten Mischgut. Allerdings besitzt dieses Mischgut schon im nicht gealterten Zustand mit einem Wert von mehr als 14% extrem eine hohe Spurrinnentiefe. Auch das Mischgut FR-WAX erfährt nur eine sehr geringe Zunahme der bleibenden Verformung nach der Alterung, wobei bekannt ist, dass das Wachs im Bitumen auskristallisiert und es dadurch zu einer Versteifung und damit zu einer geringeren Anfälligkeit gegen bleibende Verformungen kommt.

In Bezug auf den Widerstand gegen bleibende Verformung muss generell von einem ungünstigeren Verhalten der Niedertemperaturasphalte im gealterten Zustand ausgegangen werden.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse erweist sich eine Beurteilung und Vorhersage des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfungen als problematisch, wenn nicht unmöglich. Die sich kontradiktierenden Aussagen aufgrund Ermüdungs- bzw. Spurbildungsversuchen lassen eine einheitliche Beurteilung des Alterungsverhaltens nicht zu. Außerdem ermöglicht es die in der Schweiz erst relativ kurzzeitig bestehende Erfahrung mit Niedertemperaturbelägen nicht, Relationen zwischen den Ergebnissen des vorliegenden Forschungsprojekts und dem in situ Verhalten dieser Belagstypen zu ziehen.

Empfehlenswert ist daher sicherlich die Langzeitbeobachtung der im Rahmen des Einzelprojektes 7: „Arbeitshygiene“ eingebauten Versuchsstrecke mit unterschiedlichen Niedertemperaturbelägen und ein Vergleich des Alterungsverhaltens in situ mit demjenigen der vorliegenden Laboruntersuchungen.

9.2 Beurteilung des Alterungsverhaltens von Bindemittel im WAM mittels rheologischer Prüfungen

Es wurde festgestellt, dass die gewählte Alterungsmethode ungefähr der RFTOT Alterung entspricht.

Die Auswertung des komplexen Moduls aus DSR Messungen zeigt für das aus den Niedertemperatur Asphaltmischungen zurückgewonnene Bindemittel mit Ausnahme der Labormischung FR-WATER+RAP eine Zunahme des Moduls nach Alterung. Diese zeigt, wie bereits bei den Prüfungen Penetration und bei der Prüfung Erweichungspunkt Ring und Kugel ersichtlich, eine Anomalie bei den Eigenschaften des zurückgewonnenen Bindemittels: Das gealterte Bindemittel des Mischguts ist weicher als das ursprüngliche. Für die Labormischung FR-WAX_Lab ist die Änderung des komplexen Moduls durch die Alterung, wie auch im Penetrationswert ersichtlich, gering.

Insgesamt stimmt das mit Hilfe der herkömmlichen Prüfungen wie Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel vorhergesagte Verhalten der Niedertemperaturbindemittel mit dem in der rheologischen Prüfung bestimmten Verhalten gut überein.

Auch die am Ursprungsbindemittel 50/70 und an einigen Ausgangsbindemitteln der Niedertemperaturasphalte (Bitumen+FR-PACK, Bitumen+FR-WAX, Bitumen+PA-PACK) durchgeführten Laboralterungen zeigen einerseits eine gute Korrelation mit den am rückgewonnenen Bindemittel durchgeführten Prüfungen und bestätigen andererseits die Brauchbarkeit der gewählten Alterungsmethode.

Insgesamt zeigt der Vergleich zwischen den Bindemittelprüfungen einerseits und den Prüfungen Niedertemperaturmischungen andererseits, dass es nicht einfach möglich ist, von der Untersuchung des Alterungsverhaltens des Bindemittels auf das Alterungsverhalten der Asphaltmischungen zu schließen.

9.3 Vorhersage der Lebensdauer, der Evolution des Ermüdungsverhaltens und der Spurrinnenbildung von WAM-Belägen unter Anwendung klassischer Modelle

Die im Projekt ursprünglich angestrebte Vorhersage der Lebensdauer von WAM-Belägen aus der Evolution des Ermüdungsverhaltens und der Spurrinnenbildung erweist sich als äußerst problematisch.

Da die Vorhersage des Alterungsverhaltens aufgrund Ermüdungseigenschaften und Widerstand gegen bleibende Verformungen größtenteils zu unterschiedlichen, ja widersprüchlichen Aussagen führt, wird die Vorhersage der Lebensdauer unter Anwendung klassischer Modelle nicht als zielführend erachtet.

Weiterhin erscheint aufgrund der im vorliegenden Projekt ermittelten Ergebnisse zur Beurteilung des Alterungsverhaltens, wie bereits in Abschnitt 9.1 angesprochen, eine Korrelation zwischen Laborergebnissen und in-situ Verhalten von Niedertemperaturbelägen unabdingbar.

10 Empfehlungen für die Verwendung von WAM

Die Ergebnisse der im vorliegenden Projekt durchgeführten Laboruntersuchungen sind nicht eindeutig. Während sich die WAM Asphalte bezüglich ihres Alterungsverhaltens in den Ermüdungsversuchen als dauerhaft und ermüdungsbeständig erweisen, ist das Alterungsverhalten aufgrund des Spurbildungstests, d.h. im Hinblick auf bleibende Verformungen als sehr kritisch einzustufen, da die Ergebnisse der Spurrinnenprüfung nach Alterung tendenziell schlechter sind als beim neuen, d.h. ungealterten Mischgut.

Liegen beim Ermüdungswiderstand, beispielhaft dargestellt an der elastischen Anfangsdehnung für 1 Million Lastwechsel (siehe auch Abb. 43 und Abb. 64) die Werte der meisten WAM Mischungen - zumindest im gealterten Zustand - im Bereich des heißen Referenzmischguts, so ist es im Spurbildungstest umgekehrt. Das bedeutet, dass bei mehr als der Hälfte der im Forschungsprojekt untersuchten WAM Asphalte die Spurrinnentiefe bereits im nicht gealterten Zustand deutlich über derjenigen des heißen Referenzmischguts liegt. Im gealterten Zustand wiederum nimmt bei 3 dieser 4 WAM Asphalte die Spurrinnentiefe noch deutlich zu und damit der Widerstand gegen bleibende Verformungen deutlich ab.

Während der Einbau von WAM Asphalten gerade im Hinblick auf ihr Ermüdungsverhalten als unbedenklich und daher sogar als empfehlenswert angesehen werden kann, ist im Hinblick auf den Widerstand gegen bleibende Verformung - mit Ausnahme der Mischungen mit Zeolith und mit Schaumasphalts und RAP - eindeutig von einer Verwendung von WAM Asphalten abzuraten.

Betrachtet man alle im Forschungsprojekt untersuchten Mischungen erweist sich die Mischung FR-WATER+RAP sowohl hinsichtlich ihres Verhaltens in Ermüdungs- und Spurbildungstest als auch hinsichtlich der in beiden Prüfungen festgestellten Alterungseigenschaften als die eindeutig beste, ja als eine Mischung, die sich in ihren Eigenschaften sogar dem heißen Referenzmischgut überlegen erweist.

Auch an dieser Stelle muss wieder auf den fehlenden Performancebezug, d.h. die fehlende Korrelation zwischen Labor- und Felduntersuchungen hingewiesen werden, die gerade bei noch wenig erprobten Mischgutsorten, eine unverzichtbare Möglichkeit zur Verifizierung von Laborergebnissen darstellt.

11 Forschungsbedarf

Die Ergebnisse der Untersuchung beweisen die Notwendigkeit weiterer Forschungen zur Gebrauchsdauer und zum Alterungsverhalten von Niedertemperaturbelägen.

Die im vorliegenden Forschungsprojekt erarbeiteten Ergebnisse müssen dabei einerseits im Hilfe von Langzeitbeobachtungen und Felduntersuchungen validiert bzw. verifiziert oder falsifiziert werden. Hier bieten die im Rahmen des Einzelprojekts 7 eingebauten Teststrecken und deren Langzeitbeobachtung eine gute Möglichkeit.

Die vorliegende Forschungsarbeit verweist erneut auf die Komplexität der sogenannten „Alterung“ von bitumenhaltigen Materialien und die Auswirkung dieser Alterung auf das Verhalten solchen Materialien. Es zeigt sich, dass in WAM Asphalte verwendeten Zusätze Alterungsprozesse zusätzlich verändern können und somit die für Heißasphalt bekannten Phänomene (z.B. Versteifung und damit Abnahme der Spurrinnentiefe nach Alterung) nicht mehr gelten.

Anhänge

I	Kennwerte der Labormischungen Anhang I	75
I.1	Korngrößenverteilung und Bindemittelgehalt	75
II	Alterungsverhalten	79
II.1	Temperaturverlauf im Wasserbad	79

I Kennwerte der Labormischungen Anhang I

I.1 Korngrößenverteilung und Bindemittelgehalt

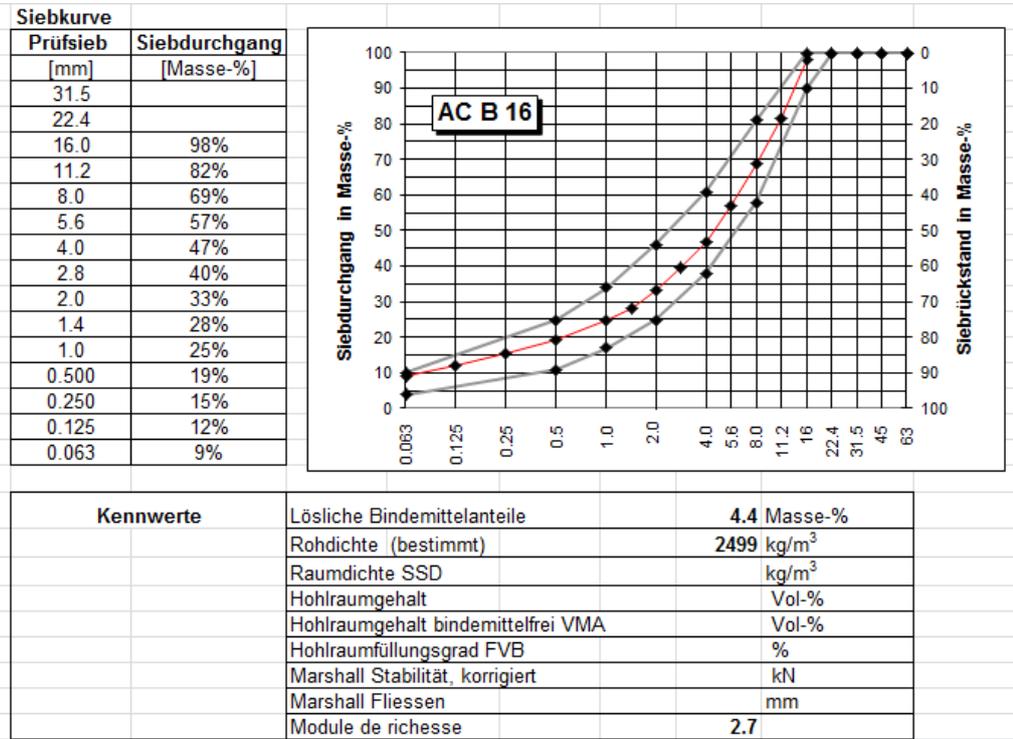


Abb. 1 Ref-Hot_Lab.

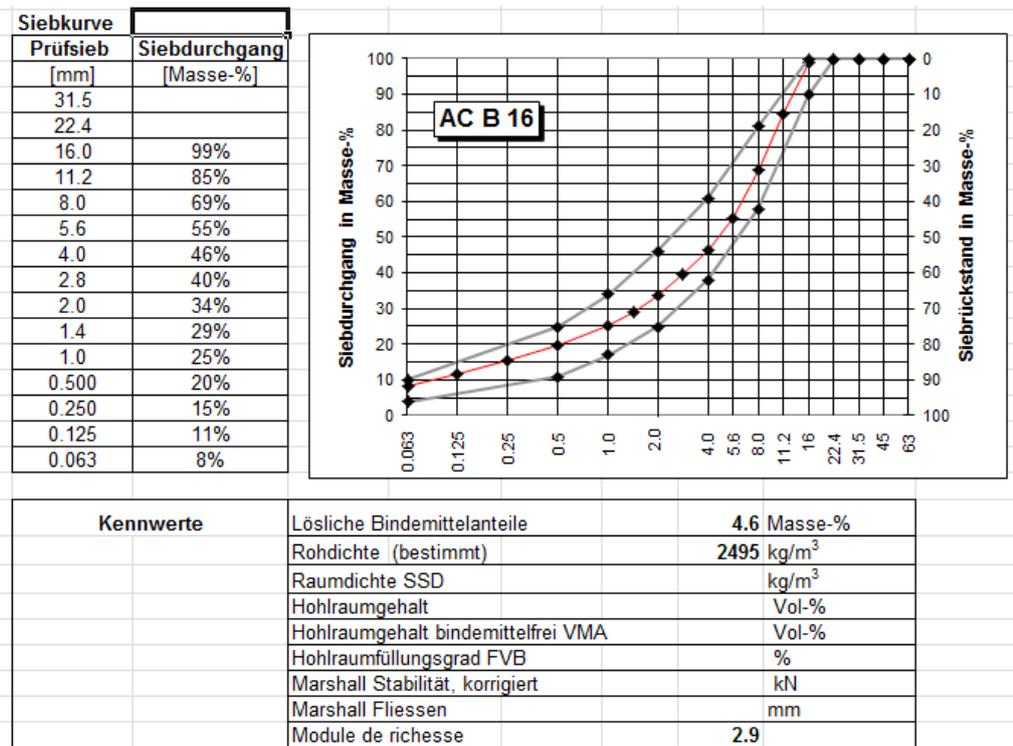


Abb. 2 FR-PACK_Lab.

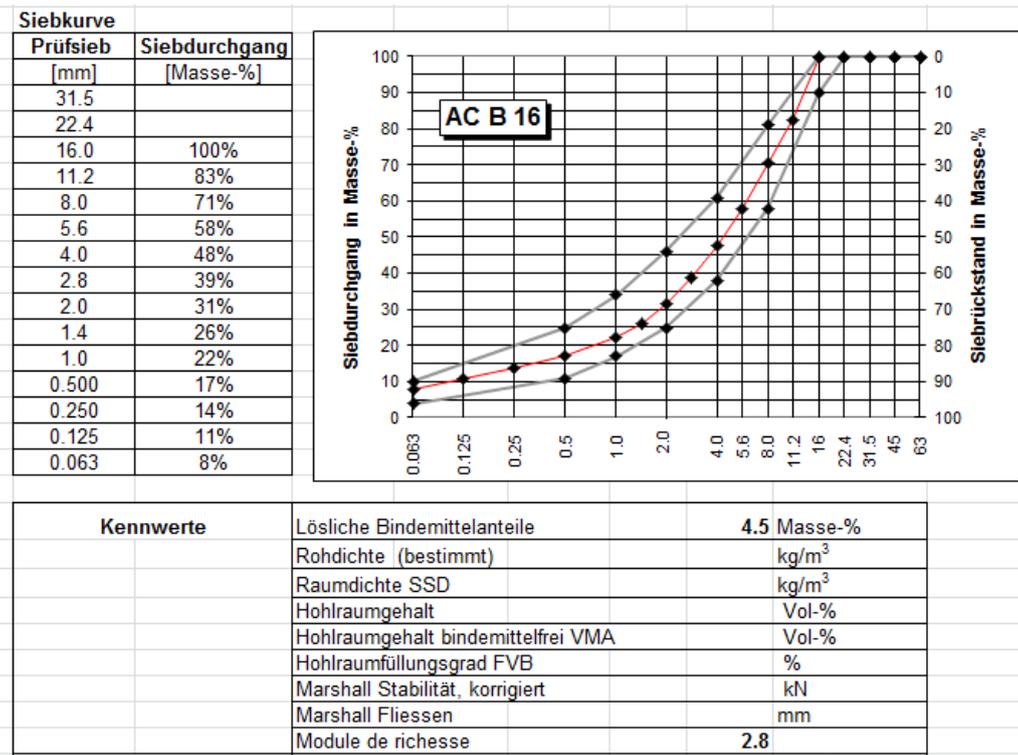


Abb. 3 FR-Zeo_Lab.

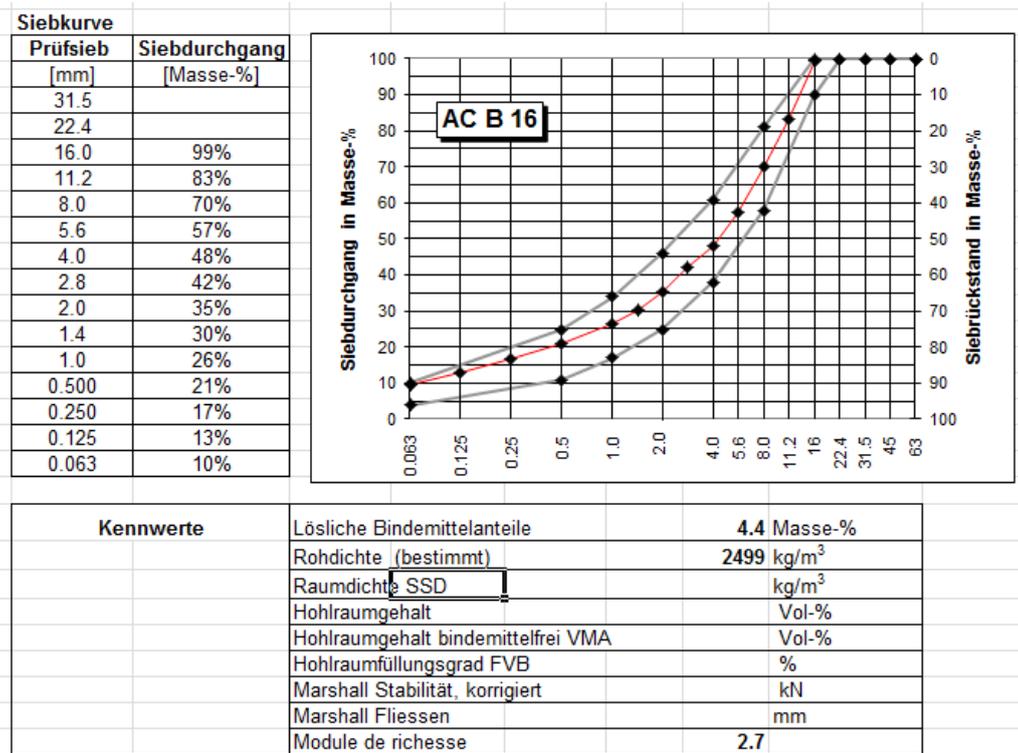


Abb. 4 FR-WATER_Lab.

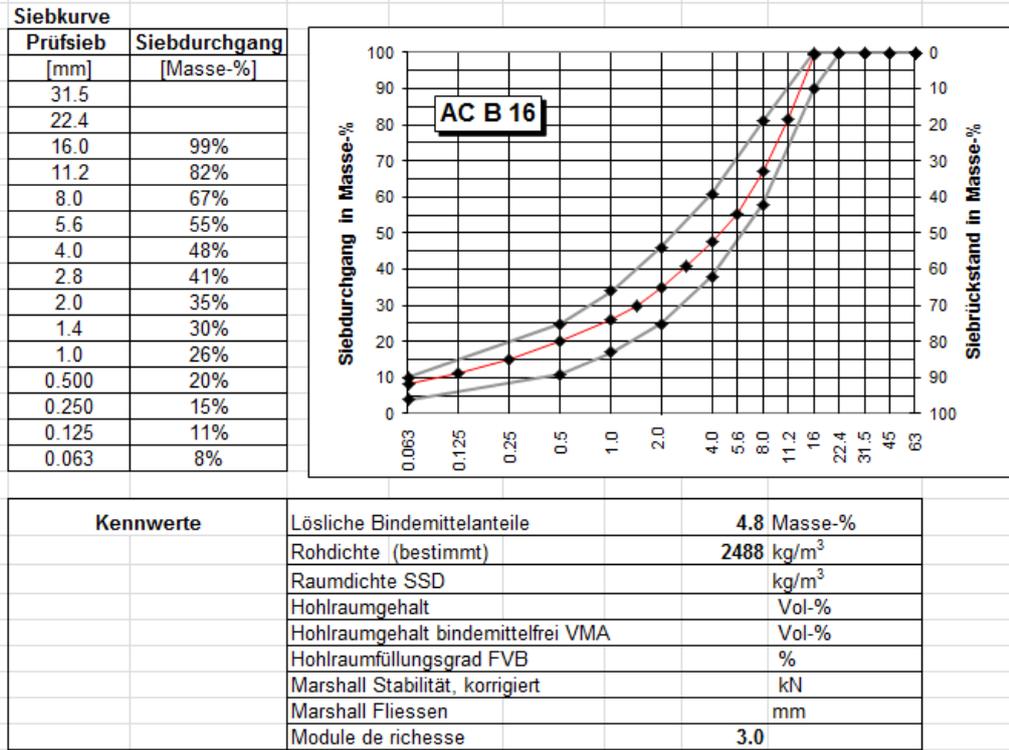


Abb. 5 FR-WATER+RAP_Lab.

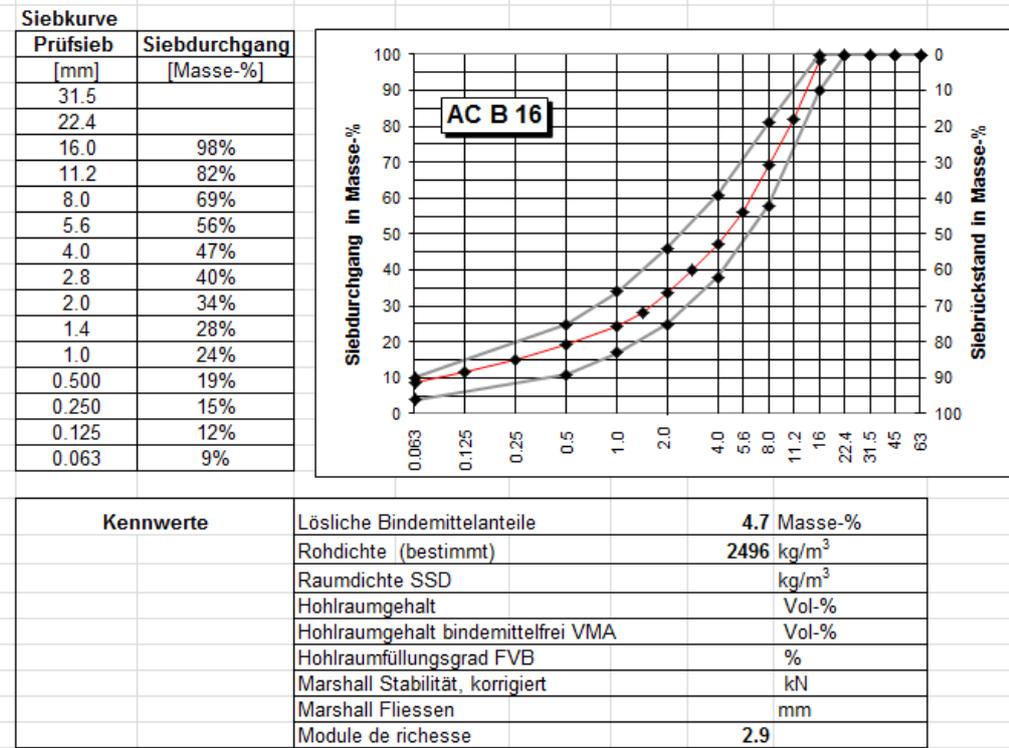


Abb. 6 PA-HWAM_Lab.

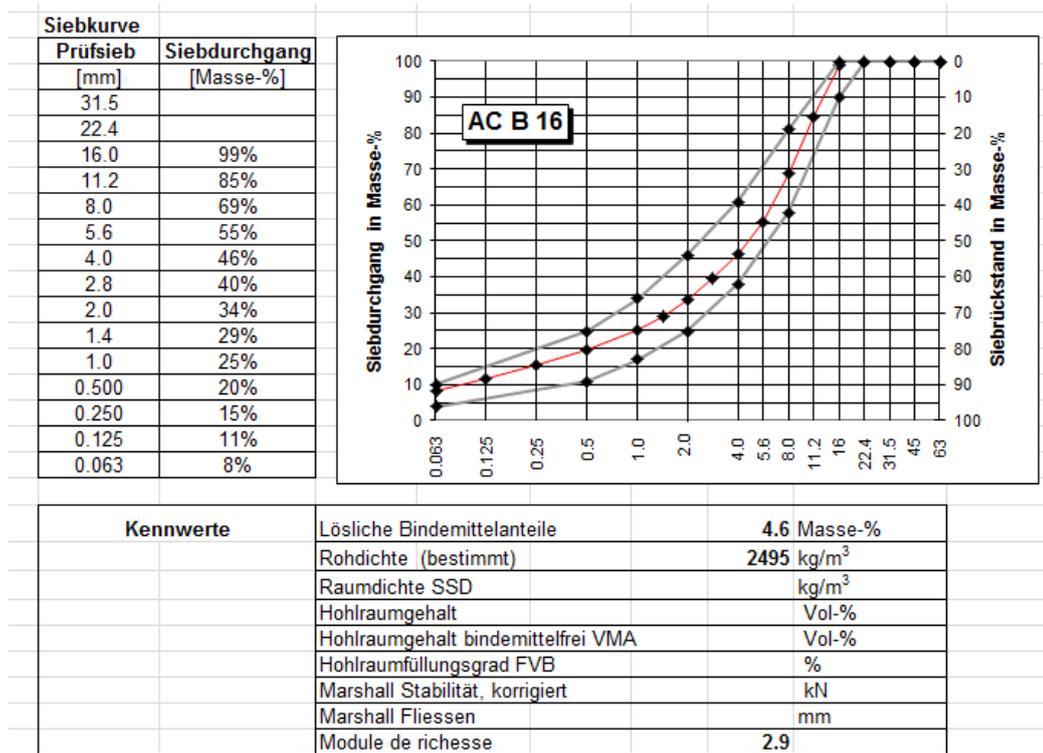


Abb. 7 PA-PACK_Lab.

II Alterungsverhalten

II.1 Temperaturverlauf im Wasserbad

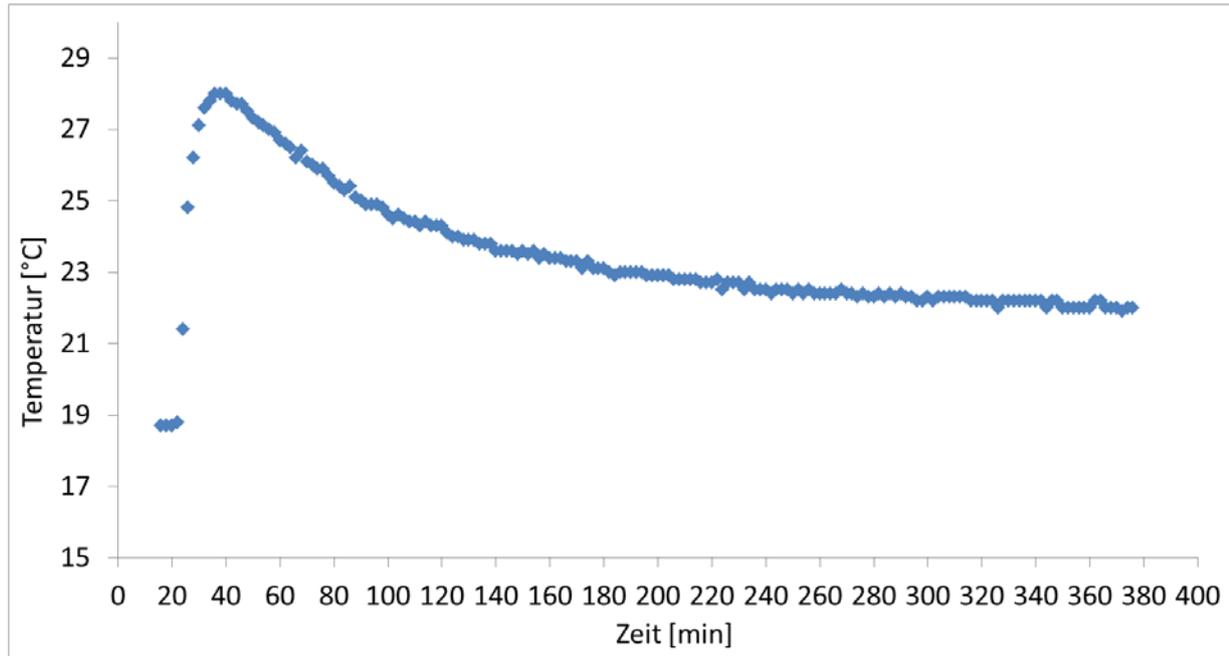


Abb. 1 Temperaturverlauf im Wasserbad

Glossar

Begriff	Bedeutung
AASHTO	American Association of State and Highway Transportation Officials, US.
AC	Asphaltbeton (Asphalt concrete)
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
DSR	Dynamisches Scherrheometer
DSV	Druckschwellversuch
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
EP1 ... EP5	Einzelprojekt 1 ... 5 des Forschungspaketes PLANET
ERK	Erweichungspunkt Ring und Kugel
FR	Roter Faden
ITSR	Indirect tensile strength ratio, Kennwert für die Wasserempfindlichkeit
ITT	Indirekter Zugversuch
LAVOC	Laboratoire des voies de circulation der ETH Lausanne
MLS10	Mobiler Verkehrslastsimulator
PA	Zusatzliste
PACK	Chemischer Zusatz
PK	Prüfkörper
PmB	Polymerhaltiges Bitumen
RAP	Ausbauasphalt oft auch Recyclingasphaltgranulat (Reclaimed Asphalt Pavement)
RILEM	International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures
SN	Schweizer Norm
Stabw.	Standardabweichung
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
WAM	Niedertemperaturasphalte
WATER	Schaumbitumen
WAX	Wachsbitumenzusatz
ZEO	Zeolith Zusatz

Literaturverzeichnis

-
- [1] Hugener, M., L. Emmenegger, and P. Mattrel, Zusammenhang zwischen PAK-Gehalt in teerhaltigem Recyclinggranulat und in den emittierten Dämpfen beim Wiedereinbau. 2007, EMPA, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf. p. 93.
-
- [2] Kheradmand, B., et al., An overview of the emerging warm mix asphalt technology. International Journal of Pavement Engineering, 2013.
-
- [3] Bueche, N., A.G. Dumont, and C. Angst, Projet initial – Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques, Editor V. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire des voies de circulation (LAVOC), 2010.
-
- [4] Bell, C.A., Summery Report on Aging of Asphalt-Aggregate Systems, SHRP Publicaton, 1989.
-
- [5] Kliewer, J.E., C.A. Bell, and D.A. Sosnovske, Investigation of the Relationship between field performance and laboratory aging properties of asphalt mixtures, in Engineering properties of asphalt mixtures and the relationship to their performance, D.S.D. Gerald A. Huber, 1995, American Society for Testing and Materials ASTM: Philadelphia.
-
- [6] Harvey, J., et al., Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and Its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California, Editor 1995.
-
- [7] Di Benedetto, H. et al., Fatigue of bituminous mixtures. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 37(267), 2004, p. 202-216.
-
- [8] Prowell, B.D., et al. Validating the Fatigue Endurance Limit for Hot Mix Asphalt, Report 646, Transportation Research Board, 2010, p. 128.
-
- [9] Di Benedetto, H., Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution, M.N. Partl, RILEM Publications SARL. 1993, p. 15-38.
-
- [10] Nguyen, M. L., C. Sauzéat and H. Di Benedetto, "Comportement en fatigue d'enrobés bitumineux semi-tièdes". Rapport Final du contrat: ENTPE - Eiffage Travaux Publics. (2007) 145p.
-
- [11] Sauzéat, C., et al. Fatigue behaviour of half-warm mix asphalts ISAP, Zürich 2008, p. 231-241.
-
- [12] Nättorp, A., Vorteile bei Verwendung von Wachsb bitumen im Strassenbau. Strasse und Verkehr, (6), 2009, p. 23-26.
-
- [13] Soenen, H., et al., A laboratory study on the use of waxes to reduce paving temperatures, Eurasphalt & Eurobitumen congress, Copenhagen 2008, p. 12.
-
- [14] M. N. Partl, K. Sokolov, Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests, Forschungsauftrag ASTRA 2001/052, Forschungsbericht 1241, 2009.
-
- [15] Poulikakos, L.D., Pittet, M., Partl, M.N., Dumont A.-G.: Performance –orientierte Mischgutanforderungen. Strasse & Verkehr, Nr. 6, pp30-33, Juni (2014)
-
- [16] Raab, C., Partl, M. N. Forschungspaket Brücken: EP1 - Standfester Gesamtaufbau, Prüfung und Bewertung, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. VSS 2006/511 Bericht Nr.1463, Mai (2014)
-
- [17] Seeberger, M., Hugener, M.: Forschungspaket Recycling von Ausbaupasphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbaupasphalt. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen VSS 2008/503, Report Nr. 1483, September (2014)
-
- [18] Hugener, M., Mohn, J., Zeyer, K., Seiler, C., Haag, R., Emmenegger, L. Forschungspaket PLANET EP-7: Arbeitshygiene, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen. VSS in press.
-
- [19] EN 12697-1:2005 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 1: Löslicher Bindemittelgehalt, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [20] EN 12697-2:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 2: Korngrößenverteilung, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [21] EN 12697-5:2009Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 5: Bestimmung der Rohdichte, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [22] EN 12697-6:2003+A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [23] EN 12697-8:2003 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [24] EN 12697-30:2004+A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-

-
- [25] EN 12697-34:2004+A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 34: Marshall-Prüfung, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [26] EN 12697-3:2005 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [27] EN 1426:2007 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [28] EN 1427:2007 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Erweichungspunktes - Ring und Kugel-Verfahren, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [29] AASHTO PP2-00 Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt (HMA), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)
-
- [30] Huang, S.C., Tia, M. and Ruth, B.E.: Laboratory aging methods for simulation field ageing of asphalts. Journal Material Civil Engineering ASCE, 1996, pp.147-152.
-
- [31] Goode, J.F. and Lufsey, L.A. Voids, permeability, film thickness vs asphalt hardening. Proc. Assn. Asphalt Paving Technol., 1965, Volume 34, pp. 430-463. The Association of Asphalt Paving Technologists, Minnesota, USA.
-
- [32] Kumar, A. and W.H. Goetz. "Asphalt Hardening as Affected by Film thickness, Voids, and Permeability in Asphaltic Mixtures". Proc. Assn. Asphalt Paving Technol., Vol. 46, 1977, pp. 571-605.
-
- [33] Hugo, F. and T.W. Kennedy. "Surface Cracking of Asphalt Mixtures in Southern Africa," Proc. Assn. Asphalt Paving Technol., Vol. 54, 1985, pp. 454-501.
-
- [34] Tia, M., Ruth, B.E., Charai, C.T., Shiao, J.M., Richardson, D. and Williams, J. Investigation of original and in-service asphalt properties for the development of improved specifications-final phase of testing and analysis. Final Report Engineering and Industrial Experiment Station, University of Florida, 1988.
-
- [35] Von Quintas, H., J. Scherocman, T. Kennedy, and C.S. Hughes. "Asphalt Aggregate Mixture Analysis System". Final Report to NCHRP, 1988
-
- [36] De la Roche, C. et al. "Development of a Laboratory Bituminous Mixtures Ageing Protocol". Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, 2009, pp. 331-345
-
- [37] EN 12697-22:2003+A1:2007 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 22: Spurbildungstest, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [38] EN 12697-26:2012 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit, Anhang C, Indirekte Zugprüfung an zylindrischen Probekörpern (IT-CY), CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [39] EN 12697-24:2012 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung, CEN (Europäisches Komitee für Normung).
-
- [40] Arand, W. (2004). Zur prüftechnischen Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten – Teil1. Bitumen, 66(1), 2-7.
-
- [41] Di Benedetto, H., de la Roche, C., Baaj, H., & Pronk, A. (2003). Fatigue of bituminous mixtures: different approaches and RILEM group contribution. In M. N. Partl (Ed.), Proceedings pro028: 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials (PTEBM'03) (pp. 15-38): RILEM Publications SARL.
-
- [42] Dragon, I., Wellner, F., Ringversuch zum Spaltzug-Schwellversuch an Asphaltprobekörpern (2012), Forschungsbericht, Professur für Straßenbau, Technische Universität Dresden.
-
- [43] AL-Sp-Asphalt 09 (2009) Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV, Köln.
-
- [44] EN14770:2010 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), CEN (Europäisches Komitee für Normung)
-
- [45] EN 12607-1:2007 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft Teil 1: RTFOT-Verfahren, CEN (Europäisches Komitee für Normung)
-
- [46] EN 14769:2012 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel Beschleunigte Langzeitalterung mit einem Druckbehälter PAV, CEN (Europäisches Komitee für Normung)
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 16. Februar 2016

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2010/544

Projekttitel: Forschungspaket PLANET EP-4: Gebrauchsdauer und Alterung

Enddatum:

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde als erstes eine Alterungsmethode für verdichtete Laborprüfkörper unter Einbeziehung von Feuchtezyklen entwickelt. Vor und nach der Alterung wurden die Prüfkörper dann mit Hilfe von Steifigkeitsmodul IT-CY, Spaltzugschwellversuch und Spurbildungstest auf ihr Gebrauchs- und Ermüdungsverhalten untersucht. Insgesamt wurden neben einem heißen Referenzmischgut 7 mit unterschiedlichen Additiven und Verfahren hergestellte WAM Asphalte untersucht. Zusätzlich wurde auch das aus den Niedertemperaturasphalten rückgewonnene Bindemittel mit Hilfe des Dynamischen Scherrheometers DSR analysiert.

Die Auswertungen zeigen, dass während beim Ermüdungswiderstand, die Werte der meisten WAM Mischungen - zumindest im gealterten Zustand - im Bereich des heißen Referenzmischguts liegen, es im Spurbildungstest gerade umgekehrt ist. Das bedeutet, dass bei mehr als der Hälfte der im Forschungsprojekt untersuchten WAM Asphalte die Spurrinnentiefe bereits im nicht gealterten Zustand deutlich über derjenigen des heißen Referenzmischguts liegt. Im gealterten Zustand wiederum nimmt bei 3 dieser 4 WAM Asphalte die Spurrinnentiefe nochmal deutlich zu und damit der Widerstand gegen bleibende Verformungen ab.

Während also der Einbau von WAM Asphalten gerade im Hinblick auf ihr Ermüdungsverhalten als unbedenklich und daher sogar als empfehlenswert angesehen werden kann, ist im Hinblick auf den Widerstand gegen bleibende Verformung - mit Ausnahme der Mischungen mit Zeolith und mit Schaumasphalten und RAP - eindeutig von einer Verwendung von WAM Asphalten abzuraten.

Betrachtet man alle im Forschungsprojekt untersuchten Mischungen erweist sich die Mischung FR-WATER+RAP sowohl hinsichtlich ihres Verhaltens in Ermüdungs- und Spurbildungstest als auch hinsichtlich der in beiden Prüfungen festgestellten Alterungseigenschaft als die eindeutig beste, d.h. als eine Mischung, die sich in ihren Eigenschaften sogar dem heißen Referenzmischgut überlegen erweist.

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse ist eine Beurteilung und Vorhersage des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfungen problematisch, wenn nicht unmöglich, da die sich widersprechenden Aussagen aufgrund Ermüdungs- bzw. Spurbildungsversuchen eine einheitliche Beurteilung des Alterungsverhaltens nicht zulassen. Außerdem ermöglicht es die in der Schweiz erst relativ kurzzeitige bestehende Erfahrung mit Niedertemperaturbelägen nicht, Relationen zwischen den Ergebnissen des vorliegenden Forschungsprojektes und dem in situ Verhalten dieser Belagstypen zu ziehen.

Die vorliegende Forschungsarbeit verweist erneut auf die Komplexität der sogenannten „Alterung“ von bitumenhaltigen Materialien und die Auswirkung dieser Alterung auf das Verhalten solchen Materialien. Es zeigt sich, dass in WAM Asphalten verwendete Zusätze Alterungsprozesse zusätzlich verändern können und somit die für Heißasphalt bekannten Phänomene (z.B. Versteifung und damit Abnahme der Spurrinnentiefe nach Alterung) nicht mehr gelten.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

1. Beurteilung des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfungen

Eine Beurteilung und Vorhersage des Alterungsverhaltens von WAM mittels mechanischer Prüfungen erweist sich als problematisch, wenn nicht unmöglich. Die sich widersprechenden Aussagen aufgrund Ermüdungs- bzw. Spurbildungsversuchen lassen eine einheitliche Beurteilung des Alterungsverhaltens nicht zu.

2. Beurteilung des Alterungsverhaltens von Bindemittel im WAM mittels rheologischer Prüfungen

Insgesamt zeigt der Vergleich zwischen den Bindemittelprüfungen einerseits und den Prüfungen Niedertemperaturmischungen andererseits, dass es nicht einfach möglich ist, von der Untersuchung des Alterungsverhaltens des Bindemittels auf das Alterungsverhalten der Asphaltmischungen zu schließen.

3. Vorhersage der Lebensdauer, der Evolution des Ermüdungsverhaltens und der Spurrinnenbildung von WAM-Belägen unter Anwendung klassischer Modelle

Die im Projekt ursprünglich angestrebte Vorhersage der Lebensdauer von WAM-Belägen aus der Evolution des Ermüdungsverhaltens und der Spurrinnenbildung erweist sich als äußerst problematisch. Da die Vorhersage des Alterungsverhaltens aufgrund Ermüdungseigenschaften und Widerstand gegen bleibende Verformungen größtenteils zu unterschiedlichen, ja widersprüchlichen Aussagen führt, wird die Vorhersage der Lebensdauer unter Anwendung klassischer Modelle nicht als zielführend erachtet. Weiterhin erscheint aufgrund der im vorliegenden Projekt ermittelten Ergebnisse zur Beurteilung des Alterungsverhaltens, eine Korrelation zwischen Laborergebnissen und in-situ Verhalten von Niedertemperaturbelägen unabdingbar.

Folgerungen und Empfehlungen:

In den im vorliegenden Projekt durchgeführten Laboruntersuchungen erweisen sich WAM Asphalte bezüglich ihres Alterungsverhaltens in Ermüdungsversuchen als dauerhaft und ermüdungsbeständig, während das Alterungsverhalten aufgrund des Spurbildungstests, d.h. im Hinblick auf bleibende Verformungen als sehr kritisch einzustufen ist. Liegen beim Ermüdungswiderstand, beispielhaft dargestellt an der elastischen Anfangsdehnung für 1 Million Lastwechsel, die Werte der meisten WAM Mischungen - zumindest im gealterten Zustand - im Bereich des heißen Referenzmischguts, so ist es im Spurbildungstest umgekehrt. Das bedeutet, dass bei mehr als der Hälfte der im Forschungsprojekt untersuchten WAM Asphalte die Spurrinnentiefe bereits im nicht gealterten Zustand deutlich über derjenigen des heißen Referenzmischguts liegt und im gealterten Zustand noch zunimmt.

Während der Einbau von WAM Asphalten gerade im Hinblick auf ihr Ermüdungsverhalten als unbedenklich und daher sogar als empfehlenswert angesehen werden kann, ist im Hinblick auf den Widerstand gegen bleibende Verformung - mit Ausnahme der Mischungen mit Zeolith und mit Schaumasphalts und RAP - eindeutig von einer Verwendung von WAM Asphalten abzuraten.

Betrachtet man alle im Forschungsprojekt untersuchten Mischungen erweist sich die Mischung FR-WATER+RAP sowohl hinsichtlich ihres Verhaltens in Ermüdungs- und Spurbildungstest als auch hinsichtlich der in beiden Prüfungen festgestellten Alterungseigenschaften als die eindeutig beste, ja als eine Mischung, die sich in ihren Eigenschaften sogar dem heißen Referenzmischgut überlegen erweist. Allerdings muss wieder auf den fehlenden Performancebezug, d.h. die fehlende Korrelation zwischen Labor- und Felduntersuchungen hingewiesen werden, die gerade bei noch wenig erprobten Mischgutsorten, eine unverzichtbare Möglichkeit zur Verifizierung von Laborergebnissen darstellt.

Publikationen:

Eingereicht: Vortrag für 5. Mairepav Conference, Singapore, 2016

• Raab, C., Do Nascimento Camargo, I., Partl, M.N.: Ageing Behavior of Energy Reduced Pavements. Mairepav 17-29 July 2016

Vorgesehen: Publikation in Strasse und Verkehr

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Raab

Vorname: Christiane

Amt, Firma, Institut: Empa, Dübendorf

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:

C. Raab



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:

Die im vorliegenden Forschungsprojekt dargestellten Schwierigkeiten in der Bestimmung der Alterung unter Laborbedingungen lässt eine wichtige Lücke in der gesamtheitliche Beurteilung der Niedertemperaturasphalte offen. Dies wirkt sich in der ökologischen Gesamtbilanz aber auch in den langfristigen finanziellen Analysen der Bauherrschaft. Die aufgrund der Ergebnisse dieses Forschungsprojektes EP 4 festgehaltene Folgerung wonach "im Hinblick auf den Widerstand gegen bleibende Verformung - mit Ausnahme der Mischungen mit Zeolith und mit Schaumasphalts und RAP - eindeutig von einer Verwendung von WAM Asphalten abzuraten ist", ist in der gesamtheitlichen Betrachtung des Forschungspaketes mit Vorsicht zu interpretieren.

Umsetzung:

Die z.T. widersprüchliche Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften nach Alterung unter Laborbedingungen lassen Fragen offen, die beantwortet werden müssen, damit man an die Antwort zur Fragestellung der Gebrauchsdauer näher kommen kann.

weitergehender Forschungsbedarf:

Ein erster wichtiger Schritt ist der Vergleich der Alterung unter Laborbedingungen mit der Alterung in Situ des gleichen Mischgutes. In dieser Hinsicht liegt eine Untersuchung des natürlich gealterten Mischgutes der Teststrecke in Wohlen / BE auf der Hand.

Einfluss auf Normenwerk:

Die Fragestellungen dieses Forschungsprojektes sowie die ungeklärten Antworten bewirken im Moment kein Handlungsbedarf in Bezug auf die Normierung.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Aeschlimann

Vorname: Heinz

Amt, Firma, Institut: Aeschlimann - Asphalt Engineering AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:



VSS FK3: 

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 15.11.2016

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1574	ASTRA 2009/007	Lärmarme Oberflächen bei Gussasphalt-Deckschichten auf Brücken	2016
1572	VSS 2011/507	Anwendung genormter Feldversuche in heterogenen (alpinen) Lockergesteinen	2016
1571	VSS 2010/204	Veloverkehr im Bereich von Knoten	2016
1570	FGU 2012/005_ENG	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Pilotversuch	2016
1569	VSS 2011/203	Geometrie des Fahrzeugparks der Schweiz	2016
1568	VSS 2011/602	Gestaltung von Wildtierunterführungen	2016
1567	VSS 2010/207	Grundlagen für die Dimensionierung von sicheren Veloverkehrsanlagen	2016
1566	ASTRA 2010/014	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 5: Verbesserung der Genauigkeit akustischer Messmethoden	2016
1565	VSS 2009/502	Formulation et comportement des enrobés de surface macrorougeux	2016
1564	ASTRA 2010/013	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 4: Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge	2016
1563	SVI 2004/032	NetCap: Intermodale Strecken-/Linien und Netzleistungsfähigkeit	2016
1562	VSS 2013/602	Winterdienstkonzept auf Basis des Managementprozesses	2016
1561	ASTRA 2013/002	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP7: Innovative, lärmarme Beläge für den Potenziellen Einsatz in der Schweiz	2016
1560	ASTRA 2013/003	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP8: Akustische Wirkung betrieblicher Reinigungsmassnahmen bei lärmarmen Belägen	2016
1559	ASTRA 2010/011	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP 2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge	2016
1558	ASTRA 2011/014_OBF	Vergleich verschiedenen starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T4 Norm-Belages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10	2016
1557	SVI 2010/001	Reklame im Strassenverkehr	2016
1556	VSS 2011/303	Höhengleiche Kreuzungen Strasse - Schiene, Anforderungen an die Signalsteuerung	2016
1555	SVI 2004/049	Sichere Schulwege – Gefahrenanalyse und Massnahmenplanung	2016
1554	VSS 2011/501	Evaluation des Frosttaumittelwiderstands von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren	2016
1553	VSS 2008/702	Réception de l'adhérence de nouveaux revêtements sur la base de la macrotexture	2016
1552	ASTRA 2010/010	Paquet de recherche : Revêtements peu bruyants EP1: Formulation des revêtements peu bruyants	2016
1551	VSS 2012/207	Akustische Installationen im Strassentunnel	2016
1550	VSS 2012/311	SERFOR: Voranalyse "Self Explaining and Forgiving Roads"	2016
1549	SVI 2011/015	Anforderungen an zukünftige Mobilitätshebungen	2016
1548	VSS 2010/404	Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden	2016
1547	ASTRA 2011/012_OBF	Development of a self-healing asphalt road via induction heating	2015
1546	FGU 2010/005_OBF	Langzeitverhalten von Kunststoffasfaserbeton im Untertagebau	2016
1545	ASTRA 2011/013_OBF	Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T3-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10	2015
1544	VSS 2007/302	Rampenbewirtschaftung: Anforderungen an Regelungsverfahren	2015
1543	VSS 2012/402	Machbarkeitsstudie zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase mittels spezieller Strassenbeläge	2015
1542	VSS 2011/713	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP3: Transformationskonzepte zwischen Bezugssystemen	2015
1541	VSS 2010/301	Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisell	2015

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1540	AGE 2013/001_ENG	TOSA - Transport par bus avec Optimisation du Système d'Alimentation	2015
1539	FGU 2010/007	Modelling of anhydritic swelling claystones	2015
1538	SVI 2011/021	Forschungspaket Verkehr der Zukunft (2060): Initialprojekt	2015
1537	FGU 2010/007	Geotechnischer Indexwert für die Beurteilung des Potentials zur Quarzstaubbelastung	2015
1536	VSS 2012/201	Wirkungskontrolle von Strassenprojekten	2015
1535	VSS 2012/403	Einfluss der Gesteinskörnung auf den Chloridwiderstand von Beton	2015
1534	VSS 2009/102	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 2: Methoden der Verkehrsbeobachtung	2015
1533	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Synthesebericht	2015
1532	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 1: Systematik und Glossar	2015
1531	VSS 2011/906	Datenaustausch zwischen Strasseninformationssystemen und Verkehrsmodellen	2015
1530	VSS 2010/402	Einfluss biogener Öle auf die Ökobilanz von Strassenbaubindemittel	2015
1529	VSS 2005/404	Beschleunigte Alterungsmethode von heiss verarbeitbaren Fugenmassen zur Simulation des Einbaus	2015
1528	VSS 2011/308	Verkehrsablauf an ungesteuerten Knoten innerorts unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten; Ermittlung repräsentativer Richtwerte und Zusammenhänge	2015
1527	VSS 2006/510	Forschungspaket Brückenabdichtungen: Synthesebericht	2015
1526	VSS 2005/456	Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : EP5: Formulation des enrobés avec matériaux recyclés	2015
1525	SVI 2004/058	Verträglichkeitskriterien für den Strassenraum innerorts	2015
1524	ASTRA 2012/003	Erarbeitung von Grundlagen zur Bemessung von Steinschlagschutzdämmen	2015
1523	VSS 2011/104	Monetarisierung des statistischen Lebens im Strassenverkehr	2015
1522	VSS 2011/106	Normierte gesamtverkehrliche Erschliessungsqualitäten - Grundlagenbericht	2015
1521	VSS 2006/514_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP4 - Zerstörungsfreie Prüfungen von Verbund und Oberflächen	2015
1520	ASTRA 2008/013_OBF	Nächtliche Immissionsprognosen von Strassenlärm (Hochleistungsstrassen)	2015
1519	VSS 2009/201	Lärmimmissionen bei Knoten und Kreiseln	2015
1518	SVI 2011/024	Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen	2015
1517	VSS 2011/103	Bemessungsverkehrsstärken: Ein neuer Ansatz	2015
1516	VSS 2011/711	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP1: Zeitaspekte und Historisierung	2015
1515	SVI 2011/034	Längere Umsteigezeiten und Haltestellenaufenthaltszeiten - Auswirkungen und Massnahmen	2015
1514	VSS 2006/513_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 - Langzeitverhalten des Verbundes	2015
1513	VSS 2005/403	Fliesskoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz	2015
1512	SVI 2004/069	Veloverkehr in den Agglomerationen - Einflussfaktoren, Massnahmen und Potenziale	2015
1511	VSS 2012/601	Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen	2015
1510	VSS 2005/453	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen	2015
1509	ASTRA 2010/022	Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)	2015
1508	VSS 2011/716	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP6: Schnittstellen aus den Auswertungssystemen SIS (SIS-DWH)	2015
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1506	VSS 2006/512_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1504	VSS 2005/504	Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		Strassenverkehrsanlagen	
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbausphalt in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbausphalt	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflasterungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1464	VSS 2002/403	Récupération de liants modifiés aux polymères issus d'échantillons d'enrobés	2014
1463	VSS 2006/511_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP1 – Standfester Gesamtaufbau, Prüfung und Bewertung	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1461	VSS 2001/506	Einfluss der Verdichtungstemperatur auf die Ergebnisse der Marshall-Prüfung und der Einbaukontrolle	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

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarter 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

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

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologietransfer 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 Labormassstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
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

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	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 Parkierungsanlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und 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

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und 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 Ganmlinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln 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

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von 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 Ausbaupasphalt 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
679	AGB 2009/001	Erfahrungen mit langen integralen und semi-integralen Brücken	2016
678	AGB 2009/003	Querkraftverstärkung einseitig zugänglicher Stahlbetonplatten mit eingemörtelten Bewehrungsstäben	2016
677	AGB 2012/010	Methode zur Bestimmung des kritischen Chloridgehalts an bestehenden Stahlbetonbauwerken	2016
676	AGB 2011/002	Modelling the corrosion initiation of reinforced concrete exposed to deicing salts	2016
675	AGB 2008/005	Fatigue of bridge deck slabs in reinforced concrete strengthened with UHPFRC	2016
674	AGB 2010/006	Einfluss des Asphaltbelages auf die Dynamik von Fussgängerbrücken aus Beton und Stahl	2015
673	AGB 2006/017	Dynamic structural capacity of reinforced concrete slabs due to rockfall	2015
672	AGB 2011/016	Ermittlung und Kartierung des Chloridgehalts in Brückenfahrbahnplatten mittels	2016

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		Georadaruntersuchungen	
671	AGB 2009/008	Résistance à l'effort tranchant de dalles de roulement sous actions statiques et de fatigue	2015
670	AGB 2012/013	Optimierung und Validierung von Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit in Stahlbeton	2015
669	AGB 2008/007	Zentrale Dokumentation der mechanischen Eigenschaften alter Bewehrungen	2015
668	AGB 2009/004_OBF	Multifunktionaler HochleistungsOberflächenschutz für Kunstbauten	2015
667	AGB 2008/004	Résistance au déversement des poutres métalliques de pont	2015
666	AGB 2012/015	Structural Identification for Condition Assessment of Swiss Bridges	2015
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlagschutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
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