Alterungsbeständigkeit von Asphalten unter Verwendung von Asphaltgranulat insbesondere bei Einsatz von Rejuvenatoren

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Alterungsbeständigkeit von Asphalten unter Verwendung von Asphalt-granulat insbesondere bei Einsatz von Rejuvenatoren

von

Stefan Koppers

Mitwirkende:
Pahirangan Sivapatham, Hartmut Johannes Beckedahl, Tim Schrödter
Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Straßenentwurf und Straßenbau

Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 07.0292
Alterungsbeständigkeit von Asphalten unter Verwendung von Asphaltgranulat insbesondere bei Einsatz von Rejuvenatoren

Fachbetreuung:
Franz Bommert

Referat:
Asphaltbauweisen

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

https://doi.org/10.60850/fv-s6

Bergisch Gladbach, Oktober 2025

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

bast
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Kurzfassung - Abstract

Alterungsbeständigkeit von Asphalten unter Verwendung von Asphaltgranulat insbesondere bei Einsatz von Rejuvenatoren

Die Wiederverwendung von Asphalt, durch die Zugabe von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut, stellt die höchstwertige Verwendung von Ausbauasphalt dar. Das im Asphaltgranulat enthaltene Bitumen wird durch Alterungsvorgänge härter, macht sich als Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel bemerkbar und gilt als ein Kriterium für die generelle Verwendung bzw. die Zugabemenge von Asphaltgranulat. Gegen diese Auswirkungen der Alterung werden frische Bindemittel oder Rejuvenatoren (Verjüngungsmittel) eingesetzt.

Der Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt wurde währende der Bearbeitung dieses Forschungsprojektes mit den Hinweisen zur Anwendung von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt (H Re WA) in das straßenbautechnische Regelwerk aufgenommen. Das Forschungsprojekt FE 07.0250/2011/LRB hat dazu erste Ansätze und Rahmenbedingungen zum Einsatz von Rejuvenatoren an der Asphaltmischanlage geliefert. Außerdem hat es, in Bezug auf das Bindemittel, Unterschiede der rheologischen Eigenschaften und des Alterungsverhaltens von Gemischen aus rückgewonnenem Bindemittel aus Asphaltgranulat und unterschiedlichen Rejuvenatoren aufgezeigt. Auf Asphaltmischgutebene konnten vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Performance-Eigenschaften zwischen Asphalten mit Asphaltgranulat und lieferfrischem Bitumen sowie Asphalten mit Asphaltgranulat und Rejuvenatoren festgestellt werden.

Das Alterungsverhalten von Asphalten unter Verwendung von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren sowie der zeitliche Verlauf der Wirksamkeit von Rejuvenatoren wurden noch nicht untersucht und sind Bestandteil dieses Forschungsprojektes.

Dazu sind drei verschiedene Asphaltsorten (Asphaltdeckschicht, -binderschicht und -tragschicht) mit unterschiedlichen Asphaltgranulaten und verschiedenen Asphaltgranulatanteilen hergestellt worden. Für die Herstellung der Asphaltmischgüter sind jeweils arten- und sortenreine Asphaltgranulate verwendet worden. Die in den Mischgütern enthaltenen Bindemittel der Asphaltgranulate wurden zum einen mit einem weichen Bindemittel 160/220 (Referenzvariante R0) und zum anderen mit bis zu drei unterschiedlichen Rejuvenatoren (R1 bis R3) während der Herstellung verjüngt. So sollte die Leistungsfähigkeit der herzustellenden Asphalte verbessert werden.

Zur Bestimmung der Bindemitteleigenschaften wurden die resultierenden Bindemittel aus den Asphaltvarianten rückgewonnen und mit konventionellen (EP RuK, Nadelpenetration, Brechpunkt nach Fraaß) sowie dem Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren im DSR untersucht.

Für die Asphaltvarianten wurde mittels Spaltzug-Schwellversuch die Steifigkeit (alle Schichten) und das Ermüdungsverhalten (nur Asphalttragschicht) bestimmt. Das Kälteverhalten der verschiedenen Asphalte wurde mit dem Abkühlversuch (TSRST) und dem Einaxialen Zugversuch (UTST) ermittelt. An den Varianten der Asphaltdeckschicht und –binderschicht wurde der Einaxiale Druckschwellversuch zur Bestimmung der Standfestigkeit durchgeführt.

Die Asphalte mit Rejuvenatoren und Asphaltgranulat wurden nach einer Alterung erneut auf ihre Leistungsfähigkeit geprüft. Die Alterung erfolgte mit dem Wuppertaler Alterungsverfahren bei 135 °C in und ständiger Frischluftzufuhr in einem Wärmeschrank, wobei das Alterungsverfahren mit einfachen Labormitteln (Grundausstattung) durchgeführt wurde und somit in jeder Prüfstelle reproduzierbar ist.

Die Analyse der Ergebnisse der Performance-Prüfungen vor und nach der Alterung soll Aufschluss über die Alterungsbeständigkeit der eingesetzten Rejuvenatoren im Vergleich zur Referenzvariante geben. Für die Asphaltanalyse wurden die Alterungsindikatoren aus dem FGSV-Arbeitspapier Alterung von Asphalt im Laboratorium (AP AAL) eingesetzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass es deutliche Unterschiede zwischen der Referenzvarianten und Rejuvenatorvarianten gibt. Bei der Referenzvariante sind im Allgemeinen die günstigeren

Alterungsindikatoren festgestellt worden. Die ungealterten Rejuvenatorvarianten zeigten im Allgemeinen eine ähnliche oder gelegentlich bessere Performance als die Referenzvarianten, nach der Alterung weisen sie jedoch im Allgemeinen eine schlechtere Performance auf als die Referenzvarianten mit weichem Bindemittel als Verjüngungsmittel. Untereinander zeigen die Rejuvenatorvarianten ebenfalls signifikante Unterschiede. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist es notwendig die Leistungsfähigkeit nicht nur anhand von ungealterten Asphalten zu prüfen, sondern auch an gealterten Asphaltvarianten.

Unter bestimmten Abwägungen lassen sich jedoch Asphalte mit Rejuvenatoren mit adäquaten Eigenschaften der Referenzvarianten herstellen.

Ageing resistance of asphalts using reclaimed asphalt pavement, in particular with the use of rejuvenators

The reuse of asphalt through the addition of reclaimed asphalt pavement (RAP) in the production of asphalt mixtures represents the highest-quality use of reclaimed asphalt. The bitumen contained in the RAP becomes harder due to ageing processes, is noticeable as an increase in the softening point of the ring and ball and is considered a criterion for the general use or the amount of RAP to be added. Fresh binders or rejuvenators (rejuvenating agents) are used to counteract these effects of ageing.

However, the use of rejuvenators in the reuse of asphalt was included in the road construction regulations during the course of this research project in the form of the Guidelines for the Use of Rejuvenators in the Reuse of Asphalt (H Re WA) [1]. The research project FE 07.0250/2011/LRB [2] has provided initial approaches and framework conditions for the use of rejuvenators at the asphalt mixing plant. In addition, it has shown differences in the rheological properties and ageing behaviour of mixtures of recycled binder from RAP and different rejuvenators with regard to the binder. At the asphalt mix level, comparable results were found with regard to the performance properties between asphalts with RAP and freshly delivered bitumen as well as asphalts with RAP and rejuvenators.

The ageing behaviour of asphalts using RAP and rejuvenators as well as the time course of the effectiveness of rejuvenators have not yet been investigated and are part of this research project.

For this purpose, three different types of asphalt (asphalt wearing course, asphalt binder course and asphalt base course) are produced with different RAPs and different RAP proportions. The RAPs used for the production of the asphalt mixtures are of the same type and variety. The binders of the RAPs contained in the mixtures are rejuvenated on the one hand with a soft binder 160/220 (reference variant R0) and on the other hand with up to three different bio-based rejuvenators (R1 to R3) during production. This is intended to improve the performance of the asphalts to be produced.

To determine the binder properties, the resulting binders are recovered from the asphalt variants and investigated using conventional (softening point ring and ball, needle penetration, breaking point according to Fraaß) as well as the bitumen typing rapid method (BTSV) in the DSR.

For the asphalt variants, the stiffness (all layers) and the fatigue behaviour (asphalt base course only) were determined by means of indirect tensile tests. The low-temperature behaviour of the different asphalts was determined with the thermal stress restrained specimen test (TSRST) and the uniaxial tensile test (UTST). The uniaxial cyclic compression test was carried out on the asphalt surface course and binder course variants to determine the stability.

The performance of the asphalts with rejuvenators and RAP was tested again after ageing. The ageing was carried out using the Wuppertal ageing procedure (WAV) at 135 °C in a heating cabinet with a constant supply of fresh air. The ageing procedure was carried out using simple laboratory equipment (basic equipment) and is therefore reproducible in every test centre.

The analysis of the results of the performance tests before and after ageing should provide information on the ageing resistance of the rejuvenators used in comparison to the reference variant. The ageing indicators

from the FGSV working paper Ageing of Asphalt in the Laboratory (AP AAL) were used for the asphalt analysis.

The results show that there are significant differences between the reference and rejuvenator variants. In general, the more favourable ageing indicators were found for the reference variant. The unaged rejuvenator variants generally performed similarly or occasionally better than the reference variants, but after ageing they generally performed worse than the reference variants with soft binder as a rejuvenator. Among themselves, the rejuvenator variants also show significant differences. Based on these findings, it is necessary to test the performance not only on unaged asphalts, but also on aged asphalt variants.

However, under certain considerations, asphalts with rejuvenators with adequate properties of the reference variants can be produced.

Summary

Ageing resistance of asphalts using reclaimed asphalt pavement, in particular with the use of rejuvenators

Initial situation and objectives of the project

The use of rejuvenators in the reuse of asphalt was included in the road construction regulations during the course of this research project in the form of the Guidelines for the Use of Rejuvenators in the Reuse of Asphalt (H Re WA) [1]. The research project FE 07.0250/2011/LRB [2] has provided initial approaches and framework conditions for the use of rejuvenators at the asphalt mixing plant. In addition, it has shown differences in the rheological properties and aging behavior of mixtures of reclaimed binder from reclaimed asphalt pavement (RAP) and different rejuvenators with regard to the binder. At the asphalt mix level, comparable results were found with regard to the performance properties between asphalts with RAPs and freshly delivered bitumen and asphalts with RAPs and rejuvenators.

The ageing behaviour of asphalts using RAP and rejuvenators as well as the time course of the effectiveness of rejuvenators were not investigated in the research project FE 07.0250/2011/LRB [2] and are part of this research project. For this purpose, asphalt mixtures with different additions of RAP and different rejuvenators (bio-based raw materials) are designed, manufactured, aged in the laboratory and their performance properties determined before and after ageing.

This results in the following research objectives:

- Investigation of the ageing behaviour of asphalts using RAP and rejuvenators in comparison to asphalts using RAP and fresh bitumen.
- Presentation and quantification of the ageing behaviour of asphalts with rejuvenators and RAP by testing asphalt performance properties
- Derivation of recommendations for practice and development of proposals for implementation in road construction regulations for the use of RAP and rejuvenators

Within the scope of this research project, three different asphalt types with different RAPs and different RAP proportions were produced and subjected to performance tests. The performance of the asphalts to be produced with RAP is to be improved by three different rejuvenators and the resulting rejuvenation of the binders.

The asphalts with rejuvenators and RAP are tested again for their performance after ageing. Analysis of the results of the performance tests before and after ageing will provide information on the ageing resistance of the rejuvenators used. A variant with a soft paving grade bitumen (160/220) and RAP will serve as a reference to the asphalts with rejuvenators and RAP.

Research methodology and results

At the beginning of the research project, a material selection was carried out with regard to the reclaimed asphalt or RAP to be used and four RAPs were procured. As further complementary materials for the production of an asphalt mixture according to TL Asphalt-StB [5], suitable paving grade bitumen as an addition binder and aggregate mixtures for the asphalt base, asphalt binder and asphalt surface course were selected and procured. For the ageing of the asphalt mixtures to be produced, various ageing methods were evaluated, the advantages and disadvantages documented and a method selected for use in the research project.

Material selection

To ensure the highest possible homogeneity of the asphalt mixtures, it was considered necessary to use RAP that was as pure in type and variety as possible. In addition, the RAP should contain a paving grade

bitumen (StBBit) as a binder in order to minimize possible unpredictable influences or reactions of the rejuvenators to the polymers contained in the binder.

The asphalt types to be produced within the scope of this research project were successfully sourced from a single species or type. RAP from an asphalt surface course (AG D) was used for the AC 11 D S asphalt mix. For the asphalt mixture AC 16 B S, two RAPs (AG B1, AG B2) were selected, each of which was used with a proportion of 25 % in the mixture. For the asphalt mixture AC 22 T S, an RAP from an asphalt base course (AG T) was procured.

Complementary materials in this context are the building materials that supplement the RAP so that an asphalt can be produced in accordance with TL Asphalt-StB. Complementary materials include binders and aggregates; the rejuvenators to be used are not complementary materials.

Due to regional availability and suitability for the production of asphalts according to TL Asphalt -StB, limestone was used as complementary aggregate for the asphalt base course variants and diabase for the asphalt wearing course and asphalt binder course.

Only paving grade bitumen (StBBit) is used as an additive binder (complementary binder) in this research project. By not using polymer-modified binders (PmB), possible unpredictable influences or reactions of the rejuvenators to the polymers contained in the binder are to be minimized. In addition, the use of paving grade bitumen ensures a more reliable prediction of ageing (related to the EP RuK) based on empirical values.

Two different paving grade bitumens are used as complementary binders. A 50/70 (BM1) is used for the asphalt surface course and the asphalt base course, and a 30/45 (BM2) for the binder course.

Asphalt ageing

For the ageing of asphalt mixtures and asphalt test specimens, numerous ageing methods have been developed in the last decades. Most of these ageing processes are not covered by standards and are therefore rarely used or, in the case of specially required equipment, only locally.

Ageing is often achieved by high thermal stress and the access of various oxidising agents to the asphalt. Oxidizing agents are often gas or gas mixtures, e.g. atmospheric air mixture, pure or ozone-enriched oxygen or nitrogen oxides.

In the case of loose mixtures, the oxidant gains access via the large specific surface area. The access of the oxidant into a compacted asphalt specimen requires a higher technical effort, often higher gas pressures in pressure chambers are used for this purpose.

Some of the methods are aimed at direct ageing of test specimens. It should be noted that the ageing of test specimens and their subsequent use for performance tests appears to be completely unsuitable due to the dimensional stability that cannot be guaranteed (exception: Vienna ageing method). In addition, the methods for ageing asphalt test specimens are subject to certain requirements with regard to increased void contents, which cannot be met for every type of asphalt mixture.

The Wuppertal ageing process is used for the ageing of asphalt mixtures within the scope of this research project. The method requires only simple technical means and can age a reasonable amount of asphalt mix. Furthermore, it has been able to deliver very good results in the past.

The Wuppertal ageing method (WAV) is based on the ageing method SHRP A-390 and was developed within the framework of a DFG project. The method was verified on the basis of various test results of in-situ aged asphalts.

With the Wuppertal ageing method, several ageing stages simulating equivalent service lives of 3, 14, 42 and 54 years can be taken into account. In contrast to the ageing according to SHRP, the ageing of compacted test specimens is dispensed with here, so that a uniform ageing of the asphalt mix is guaranteed and the geometric change of test specimens due to temperature is meaningless.

For ageing, asphalt mix is stored in a heating cabinet at 135 °C for a period of 19 hours with constant air supply. After a two-hour heating phase, the mix is mixed and turned once for homogenization.

Asphalt and binder tests

In order to determine the influence of ageing on the effectiveness of the rejuvenators, a systematic determination of binder characteristics on comparative samples is necessary. The aim is to design a reference variant and two (AC B and AC T) or three (AC D) rejuvenated variants for each asphalt mixture type.

By comparing the test results of the asphalt performance tests of the different rejuvenated variants with the reference variant, the influences of ageing on the effectiveness of the rejuvenators with regard to the performance properties are to be depicted.

For the determination of these influences from ageing, it is crucial that all other factors (in this case asphalt properties: bulk density, void content, grain size distribution and binder content) are as equal as possible. This aspect was given special consideration in the asphalt mix design.

In order to determine the rejuvenation parameter (temperature difference of the softening points ring and ball (SP R&B) to be lowered), several test mixtures were carried out and their characteristic values (especially SP R&B) were determined on the recovered binders.

A so-called zero variant serves as a basic adjustment element for setting the binder characteristics to be achieved. This zero variant represents the asphalt mixture that consists without RAP and without rejuvenators and thus exclusively of the complementary binder and the complementary aggregate. The SP R&B resulting from the zero variant is the target value for the rejuvenation of the asphalt variants with RAP.

The initial value for rejuvenation can be determined by an initial (blended with RAP) asphalt mix variant. This variant contains the target proportion of RAP, the complementary binder and the complementary aggregate.

The difference between the target value and the initial value of the determined SP R&B is the temperature difference to be set or achieved with the rejuvenator.

Using the SP R&B of the zero variant and the initial variant, the specific addition quantity can be calculated for each rejuvenator. This results in the addition quantities of the soft paving grade bitumen 160/220 (reference variant) and the addition quantities of the rejuvenators R1 to R3 for the rejuvenated variants. The calculation was based on the manufacturer's specifications. The manufacturer's specifications were verified by means of test mixtures. For this purpose, asphalt mixtures were produced with three different dosage quantities of the respective rejuvenators and the bitumen properties were determined on the extracted bitumen.

With these steps, the boundary conditions for the binder characteristics were determined for the mix design. This is to ensure that all asphalt variants to be compared have the same mix properties for the asphalt performance tests and that only the changes in performance due to ageing effects are reflected in the results.

For the assessment of ageing resistance, the changes in binder properties due to rejuvenation and ageing are essential parameters. The presentation of these changes is based on the test results of the binder properties of the different binders in different project phases with conventional and performance-oriented test methods.

The binders of the reference variant R0 and the rejuvenator variants R1 to R3 of the different mixtures were tested. In addition, the fresh binders (BM 1 and BM 2) were tested before ageing and after ageing (BM 1a and BM 2a). It should be noted that all resulting binders were aged using the Wuppertal ageing method (WAV) and only the fresh binders (BM 1a and BM 2a) were aged using the RTFOT method and the PAV method.

As a basis for the design of the mixtures and for the analysis, all binders were tested with the conventional test methods softening point ring and ball (SP R&B) and needle penetration (PEN). In addition to the evaluation of the low-temperature behaviour, the binders were tested according to the procedure for the determination of the breaking point according to Fraaß. As a performance-oriented test method, the DSR

test according to the bitumen typing rapid method was selected, with which the BTSV temperature and the BTSV phase angle were determined.

The asphalt performance is to be determined on the basis of the test results of various performance-oriented test methods. For all asphalt types (AC D, AC B and AC T), the stiffness has been determined according to TP Asphalt-StB Part 26 as well as the low-temperature behaviour with the uniaxial tensile test (UTST) and the thermal stress restrained specimen test (TSRST) according to TP Asphalt-StB Part 46 A. Furthermore, for the assessment and comparison of the durability between the unaged and aged asphalt variants, the stability of the asphalt wearing course and binder course was tested using the uniaxial cyclic compression test according to TP Asphalt-StB Part 25 B1 and the fatigue resistance of the asphalt base course was tested according to TP Asphalt-StB Part 24.

Conclusion and outlook

The results show that there are clear differences between rejuvenation with soft paving grade bitumens and rejuvenation (with admixtures). Rejuvenation with soft paving grade bitumens has generally been found to have the more favourable ageing indicators. The unaged rejuvenator variants generally performed similarly or occasionally better than the reference variants, but after ageing they generally perform worse than the reference variants with soft paving grade bitumen as the rejuvenator. Among themselves, the rejuvenator variants also show significant differences.

Based on these findings, it is necessary to test the performance not only on unaged asphalts, but also after ageing. With the ageing procedure (WAV) used here, it could be shown that an ageing level above the PAV ageing could be achieved, whereby the ageing procedure was carried out with simple laboratory equipment (basic equipment) and is therefore reproducible in every test site.

For the assessment of rejuvenators, tests should be carried out both on the extracted binder and on asphalts. In principle, the bitumen typing rapid procedure with the determination of the BTSV temperature and the phase angle is suitable for this purpose; for paving grade bitumen, the softening point ring and ball can also be used as an alternative.

To determine the asphalt performance, tests of the stiffness development from the unaged to the aged state as well as the low-temperature behaviour are important parameters where significant differences could be observed. In particular, the tensile strength reserve at 10 °C (AC D, AC B) or 5 °C (AC T) provides meaningful results on the performance of the asphalts at critical temperatures.

The testing of the stability with the pressure swell test is classified as negligible according to the findings available here, since a significant stiffening of the binder takes place due to ageing and thus a fundamental improvement of the stability can be expected.

Finally, it can be stated that a sensible test system results from the testing and comparison of a reference variant (unaged and aged) with soft paving grade bitumen and a rejuvenated variant (unaged and aged). For this purpose, the test methods are the bitumen typing rapid method (or alternatively, for paving grade bitumen, the softening point ring and ball) and the simple low-temperature behaviour (determination of the tensile strength reserve) at 10 °C (AC D, AC B) or 5 °C (AC T). A technically simple and yet effective ageing procedure contributes to minimising the workload and increasing the acceptance of a testing system.

Since the results presented here are based solely on the use of paving grade bitumen, a verification or falsification should be carried out for modified binders. For this purpose, the proposed test system should first be considered.

Inhalt

1 Einleitung ... 12
2 Literaturstudie ... 12
3 Material- und Verfahrensauswahl ... 15
3.1 Auswahl Ausbauasphalt / Asphaltgranulat ... 15
3.1.1 AG-D - Asphaltgranulat 16 RA 0/8 ... 15
3.1.2 AG-B1 – Asphaltgranulat 16 RA 0/11 ... 15
3.1.3 AG-B2 – Asphaltgranulat 22 RA 0/16 ... 16
3.1.4 AG-T – Asphaltgranulat 32 RA 0/22 ... 16
3.2 Auswahl von Komplementärbaustoffen (Bindemittel und Gesteinskörnung) ... 16
3.3 Auswahl eines geeigneten Alterungsverfahrens ... 16
3.3.1 PAV-Verfahren für Asphalt ... 17
3.3.2 Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS-Verfahren) ... 17
3.3.3 Warmboldscher Alterungstisch ... 17
3.3.4 Modelltopf nach Potschka ... 17
3.3.5 Wiener Alterungsverfahren – Viennesse Aging Procedure (VAPro) ... 17
3.3.6 Braunschweiger Alterung (BSA) ... 18
3.3.7 Bochumer Alterungsverfahren (BAV) ... 18
3.3.8 Asphaltalterung nach SHRP A-390 ... 18
3.3.9 Wuppertal Alterungsverfahren (WAV) ... 18
3.3.10 Abschließende Bewertung und Verfahrensauswahl ... 19
4 Asphaltmischgutkonzeption ... 20
4.1 Nullvariante und Initialprobe – Ermittlung des Verjüngungsparameters ... 20
4.2 Bestimmung der Zugabemenge von Verjüngungsmitteln ... 21
4.3 Erstprüfungen – Referenzvariante und Rejuvenatorvarianten ... 23
4.3.1 Erstprüfung Asphaltdeckschichtmischgut AC 11 D S (AC D) ... 23
4.3.2 Erstprüfung Asphaltbindermischgut AC 16 B S (AC B) ... 24
4.3.3 Erstprüfung Asphalttragschichtmischgut AC 22 T S (AC T) ... 25
5 Prüfung der Bindemitteleigenschaften ... 27
5.1 Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetration (PEN) ... 27
5.1.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D ... 27
5.1.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B ... 30
5.1.3 Asphalttragschichtvarianten AC T ... 33
5.1.4 Zusammenfassung Erweichungspunkt Ring und Kugel / Nadelpenetration ... 35
5.2 Bitumen-Typisierung-Schnellverfahren ... 35
5.2.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D ... 35
5.2.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B ... 37
5.2.3 Asphalttragschichtvarianten AC T ... 39
5.2.4 Zusammenfassung Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren ... 40
5.3 Brechpunkt nach Fraaß (BPFra) ... 40
5.3.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D ... 41
5.3.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B ... 41
5.3.3 Asphalttragschichtvarianten AC T ... 43
5.3.4 Zusammenfassung Brechpunkt nach Fraaß ... 44
5.4 Zusammenfassung Bindemittelprüfungen ... 44

6 Prüfung der Asphaltperformance 45
6.1 Bestimmung der Asphalt-Steifigkeit 46
6.1.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D – Beurteilung der Steifigkeitszunahme 46
6.1.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B – Beurteilung der Steifigkeitszunahme 50
6.1.3 Asphalttragschichtvarianten AC T – Beurteilung der Steifigkeitszunahme 53
6.1.4 Zusammenfassung – Beurteilung der Steifigkeitszunahme 55
6.2 Kälteverhalten – Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch 57
6.2.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D 58
6.2.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B 61
6.2.3 Asphalttragschichtvarianten AC T 63
6.2.4 Zusammenfassung – Kälteverhalten 65
6.3 Bestimmung der Standfestigkeit – Einaxialer Druckschwellversuch 66
6.3.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D 67
6.3.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B 70
6.3.3 Zusammenfassung – Standfestigkeit 71
6.4 Ermüdungsbeständigkeit 71
6.4.1 Zusammenfassung – Ermüdungsbeständigkeit 75
7 Zusammenfassung und Fazit 75
Literaturverzeichnis 80
Bildverzeichnis 83
Tabellenverzeichnis 84

1 Einleitung

Der Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt wurde währende der Bearbeitung dieses Forschungsprojektes mit den Hinweisen zur Anwendung von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt (H Re WA) [1] in das straßenbautechnische Regelwerk aufgenommen. Das Forschungsprojekt FE 07.0250/2011/LRB [2] hat dazu erste Ansätze und Rahmenbedingungen zum Einsatz von Rejuvenatoren an der Asphaltmischanlage geliefert. Außerdem hat es, in Bezug auf das Bindemittel, Unterschiede der rheologischen Eigenschaften und des Alterungsverhaltens von Gemischen aus rückgewonnenem Bindemittel aus Asphaltgranulat und unterschiedlichen Rejuvenatoren aufgezeigt. Auf Asphaltmischgutebene konnten vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Performance-Eigenschaften zwischen Asphalten mit Asphaltgranulat und lieferfrischem Bitumen sowie Asphalten mit Asphaltgranulat und Rejuvenatoren festgestellt werden.

Das Alterungsverhalten von Asphalten unter Verwendung von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren sowie der zeitliche Verlauf der Wirksamkeit von Rejuvenatoren wurden im Forschungsprojekt FE 07.0250/2011/LRB [2] nicht untersucht und sind Bestandteil dieses Forschungsprojektes. Dazu sind Asphaltmischgüter mit unterschiedlichen Zugabemengen von Asphaltgranulat und unterschiedlichen Rejuvenatoren konzipiert, hergestellt, im Labor gealtert und deren Performance-Eigenschaften vor und nach der Alterung bestimmt worden.

Hieraus ergeben sich die nachfolgenden Forschungsziele:

- Untersuchung des Alterungsverhaltens von Asphalten unter Verwendung von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren im Vergleich zu Asphalten unter Verwendung von Asphaltgranulat und Frischbitumen
- Darstellung und Quantifizierung des Alterungsverhaltens von Asphalten mit Rejuvenatoren und Asphaltgranulat durch die Prüfung von Asphalt-Performance-Eigenschaften
- Ableitung von Empfehlungen für die Praxis und Erarbeitung von Vorschlägen für die Umsetzung im straßenbautechnischen Regelwerk zur Verwendung von Asphaltgranulat und Rejuvenatoren

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden drei verschiedene Asphaltsorten mit mindestens zwei unterschiedlichen Asphaltgranulaten und verschiedenen Asphaltgranulatanteilen hergestellt und Performance-Prüfungen unterzogen. Dabei sollte die Performance der herzustellenden Asphalte mit Asphaltgranulat durch drei verschiedene Rejuvenatoren und die daraus resultierende Verjüngung der Bindemittel verbessert werden.

Die Asphalte mit Rejuvenatoren und Asphaltgranulat wurden nach einer Alterung erneut auf ihre Performance geprüft. Die Analyse der Ergebnisse der Performance-Prüfungen vor und nach der Alterung soll Aufschluss über die Alterungsbeständigkeit der eingesetzten Rejuvenatoren geben. Als Referenz zu den Asphalten mit Rejuvenatoren und Asphaltgranulat dient eine Variante mit einem weicheren Zugabebindemittel und Asphaltgranulat.

2 Literaturstudie

Die Wiederverwendung von Ausbauasphalt bei der Herstellung von neuem Asphaltmischgut wird in Deutschland seit Anfang der 1980er Jahre betrieben. Die Wiederverwendungsrate hat sich in dieser Zeit kontinuierlich gesteigert und liegt seit etwa Mitte der 1990er Jahre bei über 80 Prozent. Anwendung findet der Ausbauasphalt dabei in allen Asphaltschichten, von der Asphalttragschicht bis zur Asphaltdeckschicht. [3]

Das Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) [4] fordert die Rückführung von Abfällen in den Stoffkreislauf und eine Verwertung dieser Stoffe auf höchst möglichem Niveau. In der Hierarche der Abfallbewirtschaftung steht die Wiederverwendung, also die wiederholte Benutzung von Stoffen für den gleichen Verwendungszweck, an erster Stelle. Die Wiederverwendung von Asphalt, durch Zugabe von Asphaltgranulat bei der Herstellung von Asphaltmischgut, erfüllt somit diese Forderung.

Begriffe für die Wiederverwendung von Asphalt sind in den Technischen Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB) [5] dokumentiert. Demnach kann Ausbauasphalt kleinstückig durch Fräsen

oder in Schollen durch Aufbrechen / Aufnehmen von Asphaltbefestigungen gewonnen werden und wird nach anschließender Zerkleinerung in Stücke als Asphaltgranulat (Reclaimed Asphalt - RA) bezeichnet. Vorangestellt an die Bezeichnung RA ist die maximale Stückgröße U des Asphaltgranulates und angehängt die Kornklasse der Gesteinskörnung im Asphaltgranulat d/D.

Die Zugabe bzw. die Zugabemenge von Asphaltgranulat zur Herstellung von Asphaltmischgut ist abhängig von der Asphaltmischgutart bzw. der Schicht, aus der das Asphaltgranulat gewonnen wurde, der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates und der herzustellenden Asphaltmischgutart. Durch schichtenweises Fräsen und die Berücksichtigung der Zugabemöglichkeiten von Asphaltgranulat zu den Asphaltmischgutarten, welche im Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA) [6] dargestellt sind, kann die höchste Wertschöpfungsstufe erreicht werden.

Eine Klassifizierung des Asphaltgranulates sowie seiner Bestandteile ist nach den TL AG-StB [5] durchzuführen. Für die hierfür erforderlichen Kennwerte können Ergebnisse aus früheren Eignungs-, Erst-, Eigenüberwachungs- oder Kontrollprüfungen sowie Ergebnisse von Prüfungen an Ausbauproben und am Asphaltgranulat selbst verwendet werden. Die Beurteilung der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates ist immer am Asphaltgranulat selbst und an mindestens fünf Proben je Halde bzw. einer Probe je angefangene 500 t durchzuführen. Daran sind die Merkmalsgrößen Erweichungspunkt Ring und Kugel, der Bindemittelgehalt sowie die Kornanteile < 0,063 mm, 0,063 bis 2 mm und > 2 mm zu bestimmen. Über die Spannweite und festgelegte Toleranzwerte zu den Merkmalsgrößen lässt sich die Gleichmäßigkeit bestimmen und daraus die mögliche Zugabemenge des Asphaltgranulats berechnen. [7]

Bitumen setzt sich aus verschiedenen Kohlenwasserstoffen zusammen, die ein kolloidales System aus Maltenen, einer kohärenten öligen Phase, und Asphaltenen, einer dispersen Phase, bilden [8]. Die Alterung des im Asphaltgranulat enthaltenen Bindemittels hat einen wesentlichen Einfluss auf die generelle Verwendung bzw. die Zugabemenge von Asphaltgranulat. Während des Mischens und des Einbaus erfährt das Bitumen eine Kurzzeitalterung, bei der thermische und oxidative Alterungsprozesse durch hohe Temperaturen und Sauerstoffeintrag beschleunigt ablaufen. Während der Liegedauer von Asphalt tritt eine Langzeitalterung ein, während der es zu Änderungen der kolloidalen Struktur kommt und eine Alterung durch Oxidation stattfindet [9].

Allgemein lässt sich die Alterung von Bitumen nach der Verdunstungsalterung, der oxidativen Alterung und der Strukturalterung unterscheiden. Bei der Verdunstungsalterung (destillative Alterung) entweichen leichtflüchtige Bestandteile aus dem Bindemittel, wodurch eine Konzentrationserhöhung der Asphaltene stattfindet. Die oxidative Alterung ist durch eine Reaktion des Luftsauerstoffs mit den Kohlenwasserstoffen im Bindemittel bzw. mit den C-H-Bindungen gekennzeichnet. Diese Reaktion hat ebenfalls eine Erhöhung der Asphalten-Konzentration zur Folge. Bei der Strukturalterung werden Asphaltene und Erdöl-Harze durch Agglomeration vergrößert. [10–12]

Zur Kompensation der Alterung wird bei der Herstellung von Asphaltmischgut unter der Verwendung von Asphaltgranulat ein weicheres Bitumen zugegeben. Gemäß den Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB) [5] ist der Erweichungspunkt Ring und Kugel ($T_{R\&B}$) des Bindemittels im resultierenden Asphaltmischgut zu berechnen und muss innerhalb des Sortenspanne des geforderten Bindemittels liegen. Das Zugabebindemittel darf dabei nach den TL Asphalt-StB höchstens eine Sorte weicher als das geforderte Bitumen und nicht weicher als ein Straßenbaubitumen 70/100 sein.

Eine weitere Möglichkeit, die Alterung von Bindemitteln weitgehend rückgängig zu machen, bietet der Einsatz von Rejuvenatoren. Diese, auch als Verjüngungsmittel bezeichneten Additive, können die chemische Zusammensetzung gealterter Bindemittel wiederherstellen und somit zu einer Herabsetzung des Erweichungspunktes Ring und Kugel führen [13]. Rejuvenatoren werden als Öle mit einer ausgewählten Mischung von Malten-Komponenten bezeichnet, welche die durch Alterung abnehmende maltene Phase des Bitumens wieder auffüllen [14].

In den Vereinigten Staaten von Amerika wurden Rejuvenatoren bereits in der Mitte des vergangenen Jahrhunderts zur Oberflächenbehandlung und -versiegelung eingesetzt, um der Versprödung und anderen Änderungen der Eigenschaften von Asphaltdeckschichten während des Alterungsprozesses entgegenzuwirken [15]. Seit den 1960er Jahren fanden weitergehende Untersuchungen statt, die zu den Ergebnissen kamen, dass durch den Einsatz von Rejuvenatoren bei der Oberflächenbehandlung die

Viskosität des Bitumens gesenkt, der Kornverlust an der Fahrbahnoberfläche reduziert und die Nutzungsdauer von Asphaltstraßen verlängert werden konnten [16–21].

Forschungsarbeiten zur Wirkungsweise von Rejuvenatoren auf die aus Ausbauasphalt stammenden gealterten Bindemittel und auf Mischgüter unter Verwendung von Ausbauasphalt wurden seit den späten 1970er Jahren durchgeführt. So konnte ein positiver Einfluss von Rejuvenatoren auf die Viskosität des aus Ausbauasphalt zurückgewonnenen Bindemittels bestätigt werden [22]. In weiteren Forschungsarbeiten konnten positive Einflüsse auf die Performance-Eigenschaften, insbesondere die Rissbildung, von Asphaltmischgütern unter Verwendung von Ausbauasphalt und Rejuvenatoren festgestellt werden [13, 23, 24]. Auch konnten durch den Einsatz von Rejuvenatoren die Zugabemengen von Ausbauasphalt auf 80 % und mehr, bezogen auf das fertige Asphaltmischgut, gesteigert werden [25, 26].

Durch den Einsatz von Rejuvenatoren können einerseits maximale Zugabemengen von Asphaltgranulat erhöht und andererseits Asphaltgranulate mit stark oxidierten Bitumen, etwa bei wiederholten Wiederverwendungszyklen, bei der Herstellung berücksichtigt werden. In Deutschland wird der Einsatz von Rejuvenatoren in Asphaltmischgut unter Verwendung von Asphaltgranulat aktuell nur im Rahmen von Erprobungsstrecken (z. B. Pollhornweg, Hamburg [27]) durchgeführt, da hierzu positive Erfahrungen noch nicht in ausreichendem Umfang vorliegen, wie es nach Abschnitt 2.3 der TL Asphalt-StB [7] für Zusätze zum Asphaltmischgut gefordert wird. [28]

Das Bundesland Baden-Württemberg hat mit den Ergänzungen zu den Technischen Vertragsbedingungen im Straßenbau Baden-Württemberg (ETV-StB-BW) [29] das technische Regelwerk abweichend von den TL Asphalt-StB [7] um z. B. den Einsatz von Rejuvenatoren und die Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel des resultierenden Bindemittels erweitert. Auch werden verschiedene Verfahren für das Maximalrecycling von bis zu 90 % Asphaltgranulat in Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten beschrieben, welche im Jahr 2014 bei Pilotprojekten in Baden-Württemberg ausgeführt und untersucht wurden [30].

Die rheologische Wirkung von Rejuvenatoren in Abhängigkeit vom Alterungsgrad der Bindemittel im Asphaltgranulat wurde im Forschungsprojekt FE 07.0250/2011/LRB [2] untersucht. Im ersten Teil stellten sich qualitative Unterschiede bei den ausgewählten Rejuvenatoren heraus. So konnte zwar durch den Einsatz verschiedener Rejuvenatoren ein Erweichungspunkt Ring und Kugel im Anforderungsbereich eines Straßenbaubitumens 50/70 erreicht werden, allerdings veränderte sich das rheologische Verhältnis aus elastischen und viskosen Verformungsanteilen nicht immer günstig, wie Bindemittelprüfungen mit dem DSR zeigten. Außerdem zeigten sich bei den Gemischen aus rückgewonnenen Bindemitteln und Rejuvenatoren unterschiedliche Alterungsverhalten. [2]

Im zweiten Teil des Forschungsprojektes wurden vier Asphalte mit unterschiedlichen Rejuvenatoren und Zugabemengen des Asphaltgranulats hergestellt und deren Performance-Eigenschaften am verdichteten Asphaltgemisch bewertet. Dabei zeigte sich, dass die Performance-Eigenschaften von Asphalt mit Asphaltgranulat und lieferfrischem Bitumen von denen mit Asphaltgranulat und Rejuvenatoren weitgehend vergleichbar sind. Nachteile einer Verjüngung durch Rejuvenatoren gegenüber einer durch Frischbindemittel konnten nicht festgestellt werden. Zur Bestimmung der optimalen Zugabemenge von Rejuvenatoren wird das Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren (BTSV) empfohlen. [2]

Die notwendige Zugabemenge bei Verwendung eines Rejuvenators zur Erweichung eines gealterten Bitumens aus Asphaltgranulat kann mit der BTSV-Prüfung an Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln nach DIN 52050 [31] experimentell bestimmt werden. Die Bindemittelerweichung durch Zugabe eines weichen Straßenbaubitumens kann in Anlehnung an die TL Asphalt-StB [7] berechnet werden. Vergleiche der BTSV-Kennwerte von polymermodifizierten Bitumen, die aus Asphaltgranulat zurückgewonnen wurden, haben gezeigt, dass durch die geringere Zugabemenge von Rejuvenatoren, im Vergleich zur Zugabe von weichem Straßenbaubitumen, die Wirkung der Polymere erhalten bleibt das resultierende Bindemittel rheologisch einem polymermodifizierten Bitumen zugeordnet werden kann. [32]

3 Material- und Verfahrensauswahl

Zu Beginn des Forschungsprojektes wurde eine Materialauswahl bezüglich des zu verwendenden Ausbauasphaltes bzw. Asphaltgranulates durchgeführt und vier Asphaltgranulate beschafft. Als weitere Komplementärstoffe, zur Herstellung eines Asphaltmischgutes nach TL Asphalt-StB [7], wurden geeignete Straßenbaubitumen als Zugabebindemittel und Gesteinskörnungsgemische für die Asphalttrag-, Asphaltbinder- und Asphaltdeckschicht ausgewählt und bezogen. Für die Alterung der herzustellenden Asphaltmischgüter wurden verschiedene Alterungsverfahren evaluiert, die Vor- und Nachteile dokumentiert und ein Verfahren zur Verwendung im Forschungsprojekt ausgewählt.

3.1 Auswahl Ausbauasphalt / Asphaltgranulat

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes war es notwendig, verschiedene Asphaltgranulate zu beschaffen, die sich hinsichtlich des Erweichungspunktes Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels unterscheiden. Darüber hinaus musste das zu verwendende Asphaltgranulat nach den gültigen Regelwerken [5, 33] für die Wiederverwendung geeignet sein.

Zur Gewährleistung einer möglichst hohen Homogenität der Asphaltmischgüter wurde es als erforderlich angesehen, möglichst arten- und sortenreines Asphaltgranulat zu verwenden. Zudem sollte das Asphaltgranulat ein Straßenbaubitumen (StBBit) als Bindemittel enthalten, um mögliche unvorhersehbaren Einflüsse oder Reaktionen der Rejuvenatoren auf im Bindemittel enthaltenen Polymere ausschließen zu können.

Nach eigenen Erfahrungen des Antragstellers [34, 35] ist die Beschaffung von arten- bzw. sortenreinem Asphaltgranulat extrem schwierig, da Ausbauasphalt in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen nicht getrennt nach den Asphaltschichtarten (Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschicht) gewonnen, sondern in möglichst großen Dicken gefräst bzw. ausgebrochen wird. Die an den Mischwerken verfügbaren Halden aus Ausbauasphalt bzw. Asphaltgranulat bestehen meistens aus Gemischen aller Asphaltschichtarten.

Eine arten- bzw. sortenreine Beschaffung, war für die im Rahmen dieses Forschungsprojektes herzustellenden Asphaltsorten jedoch erfolgreich. Es wurde ein Asphaltgranulat aus einer Asphaltdeckschicht (AG-D) bezogen, welches für das Asphaltmischgut AC 11 D S verwendet wurde. Für das Asphaltmischgut AC 16 B S wurden zwei Asphaltgranulate (AG-B1, AG-B2) ausgewählt, die jeweils mit einem Anteil von 25 %, aufgrund ihrer Korngrößenverteilungen, im Mischgut verwendet werden. Für das Asphaltmischgut AC 22 T S wurde ein Asphaltgranulat (AG-T) aus einer Asphalttragschicht beschafft.

3.1.1 AG-D - Asphaltgranulat 16 RA 0/8

Das Asphaltgranulat AG D wurde durch Fräsen einer 5 cm dicken Asphaltdeckschicht AC 11 DS und anschließender Zerkleinerung gewonnen. Für die Asphaltdeckschicht war ein Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 verwendet worden. Nach Angaben in der Online-Auskunft der Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen (NWSIB) [36], wurde die Asphaltdeckschicht im Jahr 2009 eingebaut.

Das aus dem Asphaltgranulat zurückgewonnene Bindemittel weist einen Erweichungspunkt von 66,1 °C auf, die Klassifizierung des Asphaltgranulates AG-D gemäß TL AG-StB [5] befindet sich in den Anlagen.

3.1.2 AG-B1 – Asphaltgranulat 16 RA 0/11

Das Asphaltgranulat AG B1 stammt von einer Baumaßnahme in Düsseldorf auf der Eupener Straße/Kevelaer Straße. Das aus dem Asphaltgranulat zurückgewonnene Bindemittel hat einen Erweichungspunkt von 70,1 °C. Das Baujahr der Straße aus dem das Asphaltgranulat gewonnen wurde sowie das ursprünglich eingesetzte Bindemittel, konnte nicht ermittelt werden. Die Klassifizierung des Asphaltgranulates AG-B1 gemäß TL AG-StB [5] befindet sich in den Anlagen.

3.1.3 AG-B2 – Asphaltgranulat 22 RA 0/16

Da mit dem Asphaltgranulat AG B1, aufgrund der Korngrößenverteilung der geforderte Asphaltgranulatanteil von 50% der Asphaltzusammensetzung nicht erreicht werden konnte, musste kurzfristig eine Alternative beschafft werden. Das Asphaltgranulat AG B2 wurde von einem Mischwerk in Köln-Porz geliefert, die ursprüngliche Herkunft ist nicht dokumentiert. Das aus dem Asphaltgranulat zurückgewonnene Bindemittel weist einen Erweichungspunkt von 68,5 °C auf. Das Baujahr der Straße aus dem das Asphaltgranulat gewonnen wurde sowie das ursprünglich eingesetzte Bindemittel, konnte nicht ermittelt werden. Die Klassifizierung des Asphaltgranulates AG-B2 gemäß TL AG-StB [5] befindet sich in den Anlagen.

3.1.4 AG-T – Asphaltgranulat 32 RA 0/22

Das Asphaltgranulat AG-T1 stammt von einer Baumaßnahme auf der BAB 24 bei Hamburg und hat mit 86,2 °C einen sehr hohen Erweichungspunkt Ring und Kugel. Nach Angaben der Ausbaufirma beträgt das Alter des Asphaltes ca. 40 Jahre. Das ursprünglich eingesetzte Bindemittel konnte nicht ermittelt werden. Die Klassifizierung des Asphaltgranulates AG-T gemäß TL AG-StB [5] befindet sich in den Anlagen.

3.2 Auswahl von Komplementärbaustoffen (Bindemittel und Gesteinskörnung)

Als Komplementärstoffe sind in diesem Zusammenhang die Baustoffe zu verstehen, die das Asphaltgranulat ergänzen, damit ein Asphalt entsprechend den TL Asphalt-StB [7] hergestellt werden kann. Zu den Komplementärstoffen zählen Bindemittel und Gesteinskörnung; die einzusetzenden Rejuvenatoren sind keine Komplementärstoffe.

Aufgrund der regionalen Verfügbarkeit und der Eignung zur Herstellung von Asphalten nach TL Asphalt - StB [7] wurden für die Varianten der Asphalttragschicht Kalkstein und für die Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht Diabas als ergänzende Gesteinskörnung eingesetzt.

Als Zugabebindemittel (komplementäre Bindemittel) werden in diesem Forschungsprojekt ausschließlich Straßenbaubitumen (StBBit) verwendet. Mit dem Verzicht auf den Einsatz von polymermodifizierten Bindemitteln (PmB) sollen mögliche unvorhersehbare Einflüsse oder Reaktionen der Rejuvenatoren auf die im Bindemittel enthaltenen Polymere ausgeschlossen werden. Zudem gewährleistet der Einsatz von Straßenbaubitumen eine zuverlässigere Prognose der Alterung (bezogen auf EP RuK) aufgrund von Erfahrungswerten.

Als Komplementärbindemittel werden zwei verschiedene Straßenbaubitumen verwendet. Für die Asphaltdeckschicht und die Asphalttragschicht kommt ein 50/70 (BM1) und für die Binderschicht ein 30/45 (BM2) zum Einsatz.

3.3 Auswahl eines geeigneten Alterungsverfahrens

Für die Alterung von Asphaltmischgut und Asphaltprobekörpern sind in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Alterungsverfahren entwickelt worden. Die meisten dieser Alterungsverfahren waren zum Zeitpunkt der Auswahl nicht normativ erfasst; im Jahr 2022 erschien mit dem Arbeitspapier Alterung von Asphalt im Laboratorium (AP AAL) [37] ein Regelwerk in dem viele Alterungsverfahren beschrieben werden.

Die Alterung wird dabei häufig durch eine hohe Wärmebeanspruchung und den Zugang verschiedener Oxidationsmittel zum Asphalt erreicht. Als Oxidationsmittel werden häufig Gas oder Gasgemische verwendet, z.B. atmosphärisches Luftgemisch, reiner oder ozonangereicherter Sauerstoff oder Stickoxide.

Bei losem Mischgut erfolgt der Zugang des Oxidationsmittels über die große spezifische Oberfläche. Der Zugang des Oxidationsmittels in einen verdichteten Asphaltprobekörper bedarf eines höheren technischen Aufwandes, häufig werden hierzu höhere Gasdrücke in Druckkammern verwendet.

Nachfolgend sind einige bekanntere Verfahren beschrieben:

3.3.1 PAV-Verfahren für Asphalt

Die Alterung von Asphaltprobekörpern mit dem PAV-Verfahren (Pressure Ageing Vessel) soll in Anlehnung an das mit der DIN EN 14769 [38] genormte Verfahren erfolgen. Das Verfahren unterscheidet sich lediglich durch die Abmessungen der Druckkammer, so können Asphaltprobekörper mit einem Durchmesser bis zu 150 mm gealtert werden.

Bei der PAV-Alterung für Asphaltprobekörper soll die Lagerung des Probekörpers über 65 Stunden bei einer Temperatur von 85 °C und einem Druck von 2,1 MPa erfolgen. Dem Forschungsnehmer sind nur theoretische Konzeptionen des Verfahrens bekannt, jedoch kein Anwendungsfall.

Des Weiteren wurde Asphaltmischgut im PAV in Anlehnung an die DIN EN 14769 [38] gealtert [39]. Allerdings sind die Mischgutmengen sehr gering und daher nur für wenige Bindemitteluntersuchungen geeignet. [37]

3.3.2 Saturation Ageing Tensile Stiffness (SATS-Verfahren)

Das SATS-Verfahren ist ein Prüfverfahren zur Bewertung der Dauerhaftigkeit des Verbundes in Asphaltmischgütern für Trag- und Binderschichten, das mit der DIN EN 12697-45 [40] genormt ist. Hierzu existiert ein Entwurf aus dem Jahr 2018. Beim SATS-Verfahren erfolgt die Alterung durch Wärme, Luft (hoher Druck) und Feuchtigkeit. [41]

Bei der SATS-Alterung werden Probekörper mit Hilfe eines Vakuumsystems mit Wasser gesättigt und anschließend in einen mit Druck beaufschlagten und teilweise mit Wasser gefüllten Behälter gelagert. Die Lagerung erfolgt über 65 Stunden bei einer Temperatur von 85 °C und einem Druck von 2,1 MPa.

Die SATS-Alterung ist lt. DIN EN 12697-45 [40] auf Probekörper mit einem Hohlraumgehalt von 6 bis 10 % und einem Bindemittelgehalt von 3,5 bis 5,5 % beschränkt.

Zum Prüfverfahren gehört die Prüfung der Steifigkeit durch indirekte Zugbeanspruchung, der gesamte Prozess wird als SATS-Prüfung bezeichnet. [40]

3.3.3 Warmboldscher Alterungstisch

Bei der Alterung mit dem Warmboldschen Alterungstisch werden Asphaltprobekörper unter UV-Strahlung bei einer Temperatur 40 °C gealtert. Da es sich hierbei um keine geschlossene Konstruktion handelt, ist ein ungehinderter Luftzugang möglich. Die UV-Strahlung stellt dabei die Energie für die Oxidationsvorgänge bereit. Den Probekörpern wird von der Unterseite warmer Luft zugeführt. Die, Öffnungen im Tisch bedingen eine Zwangsdurchströmung der Probekörper [37]. Somit werden sowohl oxidative als auch destillative Alterungsvorgänge angesprochen. Eine exakte Simulation der In-Situ-Alterung ist allerdings nicht möglich, da die Alterung vorwiegend an der Asphaltoberfläche stattfindet. [42]

3.3.4 Modelltopf nach Potschka

In dem Modelltopf nach Potschka [43] wird Mischgut auf einem gelochten Blechboden, der mit Filterpapier ausgelegt ist, gelagert. Es erfolgt eine thermische Beanspruchung zur destillativen Alterung und eine Durchströmung des Mischgutes mit synthetischer Luft (20,5 % Sauerstoff und 79,5 % Stickstoff) zur oxidativen Alterung. [43]

3.3.5 Wiener Alterungsverfahren – Viennesse Aging Procedure (VAPro)

Mit dem Wiener Alterungsverfahren [9] ist es möglich, Asphaltprobekörper innerhalb von wenigen Tagen einer Langzeitalterung hinsichtlich der oxidativen Alterung zu unterziehen.

Dazu wird ein Asphaltprobekörper in einer Triaxialzelle unter leichtem Überdruck mit reinem Sauerstoff oder ozonangereichertem Sauerstoff durchströmt (erzwungene Durchströmung). Zur Erhöhung der Oxidationsrate wird die Triaxialzelle dazu in einem Wärmeschrank bei Temperaturen bis zu 85 °C gelagert.

Für das Verfahren ist ein Probekörper mit einem minimalen Hohlraumgehalt von 5 Vol.-% erforderlich. [9, 37]

3.3.6 Braunschweiger Alterung (BSA)

Bei der Braunschweiger Alterung wird granuliertes Asphaltmischgut auf einem Drahtblech ausgebreitet und in einem Wärmeschrank einer thermischen Beanspruchung unterzogen. Die Alterungstemperatur liegt bei 80 °C. Während der Lagerung erfolgt eine umfassende Luftzirkulation im Wärmeschrank mit Frischluftzufuhr. Die Alterungsdauer beträgt 96 Stunden und ist so gewählt, dass sie ungefähr dem Abstand von zwei Bitumenklassifikationen entspricht. [37]

3.3.7 Bochumer Alterungsverfahren (BAV)

Ziel des Bochumer Alterungsverfahrens (BAV) ist die Alterung von im Walzsektorverdichter (WSV) hergestellten Asphaltplatten. Die Alterung erfolgt an hohlraumreichen Asphaltplatten (Hohlraumgehalt von > 20 %) bei Lagerung im Wärmeschrank mit einer Temperatur von 100 °C. Während der 72- bzw. 120-stündigen Lagerung werden die Asphaltplatten mit erhitzter Druckluft durchströmt. Dadurch wird eine Alterung von 10 Jahren in der Straßenbefestigung simuliert. [37, 44]

3.3.8 Asphaltalterung nach SHRP A-390

Die Asphaltalterung nach SHRP A-390 [45] wurde im Rahmen des amerikanischen Strategic Highway Research Program (SHRP) an der Oregon State University und der University of California entwickelt. Mit dem Verfahren kann sowohl die destillative als auch die oxidative Alterung von Asphaltmischgut und Asphaltprobekörpern erzielt werden.

Bei der Asphaltalterung nach SHRP sind zwei Alterungsstufen vorgesehen, die Kurzzeitalterung und die Langzeitalterung.

Wie auch bei anderen Verfahren simuliert die Kurzzeitalterung die Zeitspanne zwischen Mischvorgang und Einbau des Mischgutes. Hierzu erfolgte eine hohe thermische Beanspruchung (135 °C) des Mischgutes in einem Wärmeschrank unter ständiger Luftzufuhr über 4 Stunden. Während der Lagerung im Wärmeschrank wird das Mischgut mehrfach gewendet, dadurch kann eine gleichmäßige Alterung gewährleistet werden.

Die Langezeitalterung soll eine Liegezeit von bis zu 9 Jahren simulieren. Hierzu werden die verdichteten Asphaltprobekörper bei 85 °C und ständiger Luftzufuhr für bis zu 4 Tage gelagert.

3.3.9 Wuppertal Alterungsverfahren (WAV)

Das Wuppertaler Alterungsverfahren (WAV) basiert auf dem Alterungsverfahren SHRP A-390 und wurde im Rahmen eines DFG-Projektes [46] entwickelt. Das Verfahren wurde anhand von verschiedenen Untersuchungsergebnissen in-situ gealterter Asphalte verifiziert. [46, 47]

Das Wuppertaler Alterungsverfahren berücksichtigt mehrere Alterungsstufen, die äquivalenten Liegezeiten von 3, 14, 42 und 54 Jahren simulieren [47]. Im Gegensatz zur Alterung nach SHRP wird hierbei auf die Alterung von verdichteten Probekörpern verzichtet, so dass eine gleichmäßige Alterung des Asphaltmischgutes gewährleistet und die während der Alterung unvermeidbare geometrische Veränderung der Probekörper durch Temperatur bedeutungslos ist.

Zur Alterung wird Asphaltmischgut in einem Wärmeschrank bei 135 °C für unterschiedliche Dauern (je nach Alterungsstufe) bei ständiger Luftzufuhr gelagert. Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Alterung wird das Asphaltmischgut, abhängig von der Expositionsdauer, in bestimmten zeitlichen Abständen, gewendet.

3.3.10 Abschließende Bewertung und Verfahrensauswahl

Für die Alterung des Asphaltmischgutes im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird das Wuppertaler Alterungsverfahren verwendet. Das Verfahren kommt mit einfachen technischen Mitteln aus und kann eine angemessene Menge an Asphaltmischgut altern. Darüber hinaus konnte es bereits in der Vergangenheit sehr gute Ergebnisse liefern.

Einige der Verfahren zielen auf eine direkte Alterung von Probekörpern ab. Hierbei ist anzumerken, dass die Alterung von Probekörpern und deren anschließende Verwendung für Performance-Prüfungen aufgrund der nicht zu gewährleistenden Formstabilität (Ausnahme Wiener Alterungsverfahren) gänzlich ungeeignet erscheint. Zudem werden bei den Verfahren zur Alterung von Asphaltprobekörpern bestimmten Anforderungen hinsichtlich erhöhter Hohlraumgehalte gestellt, die nicht für jede Asphaltmischgutart eingehalten werden können.

4 Asphaltmischgutkonzeption

Zur Ermittlung der Einflüsse der Alterung auf die Wirksamkeit der Rejuvenatoren ist eine systematische Ermittlung von Bindemittelkennwerten an Vergleichsproben erforderlich. Ziel ist es, für jede Asphaltmischgutart eine Referenzvariante und zwei (AC B und AC T) bzw. drei (AC D) rejuvenierte Varianten zu konzipieren.

Durch den Vergleich von Prüfergebnissen der Asphalt-Performance-Prüfungen der verschiedenen rejuvenierten Varianten mit der Referenzvariante, sollen die Einflüsse der Alterung auf die Wirksamkeit der Rejuvenatoren hinsichtlich der Performance-Eigenschaften darstellbar werden.

Für die Ermittlung dieser Einflüsse aus der Alterung ist es entscheidend, dass alle sonstigen Faktoren (hier Asphalteigenschaften: Raumdichte, Hohlraumgehalt, Korngrößenverteilung und Bindemittelgehalt) möglichst gleich sind. Dieser Aspekt wurde bei der Asphaltmischgutkonzeption besonders berücksichtigt.

Zur Bestimmung des Verjüngungsparameters (abzusenkende Temperaturdifferenz der Erweichungspunkte Ring und Kugel) wurden einige Probemischungen durchgeführt und an den rückgewonnenen Bindemitteln deren Kennwerte (insbesondere EP RuK) ermittelt.

Als grundlegendes Justierelement für die Einstellung der zu erzielenden Bindemittelkennwerte dient eine sogenannte Nullvariante. Diese Nullvariante repräsentiert das Asphalt-Mischgut, das ohne Asphaltgranulat und ohne Rejuvenatoren und somit ausschließlich aus dem komplementären Bindemittel und der komplementären Gesteinskörnung besteht. Durch die Rückgewinnung dieses Bindemittels mittels Asphaltextraktion und anschließender umfangreicher Analyse des rückgewonnenen Bindemittels, erhält man Bindemittelkennwerte eines originären Bindemittels, wie es in einem unverschnittenen Asphaltmischgut vorkommt. Im Vergleich zu den ermittelten Bindemittelkennwerten des Frischbindemittels zeigt die Analyse des rückgewonnenen Bindemittels aus der Nullvariante die Veränderung der Bindemittelkennwerte durch die Kurzzeitalterung während der Asphaltmischgutherstellung und Bindemittelrückgewinnung auf.

Der aus der Nullvariante resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) ist der Zielwert für die Rejuvenierung der Asphaltvarianten mit Asphaltgranulat.

Der Ausgangswert für die Rejuvenierung lässt sich durch eine initiale (mit Asphaltgranulat verschnittene) Asphalt-Mischgutvariante ermitteln. Diese Variante enthält den angestrebten Anteil Asphaltgranulat, das Komplementärbindemittel sowie die Komplementärgesteinskörnung.

Die Differenz zwischen Zielwert und Ausgangswert der ermittelten Erweichungspunkte RuK ist die mit dem Rejuvenator einzustellende bzw. zu erzielende Temperaturdifferenz.

Unter Verwendung der Erweichungspunkte RuK der Nullvariante und der initialen Variante kann für jeden Rejuvenator die spezifische Zugabemenge berechnet werden. Hieraus ergeben sich die Zugabemengen des weichen Straßenbaubitumens 160/220 (Referenzvariante) und die Zugabemengen der Rejuvenatoren R1 bis R3 für die rejuvenierten Varianten. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage der Herstellerangaben. Die Herstellerangaben wurden mittels Probemischungen verifiziert. Hierzu wurden Asphaltmischgüter mit drei unterschiedlichen Dosiermengen der jeweiligen Rejuvenatoren hergestellt und die Bitumeneigenschaften am extrahierten Bindemittel bestimmt.

Mit diesen Schritten wurden die Randbedingungen für die Bindemittelkennwerte bei der Mischgutkonzeption festgelegt. Damit soll gewährleistet sein, dass alle zu vergleichende Asphaltvarianten die gleichen Mischguteigenschaften für die Asphalt-Performance-Prüfungen aufweisen und nur die Veränderungen der Performance durch die Alterungseffekte in den Ergebnissen abgebildet werden.

4.1 Nullvariante und Initialprobe – Ermittlung des Verjüngungsparameters

Als Verjüngungsparameter ist die Temperaturdifferenz zwischen dem EP RuK eines aus einem Asphaltmischgut ohne Asphaltgranulat und eines aus einem verschnittenen Asphaltmischgutes mit Asphaltgranulat zurückgewonnen Bindemittels zu verstehen. Diese Temperaturdifferenz dient zur Bestimmung der Menge bzw. Masse des einzusetzenden Rejuvenators, damit das rejuvenierte

Berechung der Bindemitteleinwaagen

Einwaage	[g]	7500,0		
AG-Masse	[g]	3142,5	41,9%	
BM-Gehalt im AG		6,1		
BM-Masse im AG	[g]	191,7		
BM Zugabe-Gehalte		**5,4**	**5,8**	**6,2**
BMz-Masse	[g]	225,5	258,3	291,4
Asphalt-Massen		7725,5	7758,3	7791,4
Bindemittel-Massen	[g]	417,2	450,0	483,1
Anteil BM_{Kom}	[%]	33	43	50
Anteil 160/220	[%]	67	57	50
Erweichungspunkte				
AG-D	[°C]	66,1		
50/70	[°C]	49,3		
160/220	[°C]	39		
EP RuK_{Mix}		50,4	50,4	50,4

Einwaage BM:		**Mischung 1**	**Mischung 2**	**Mischung 3**
BM Gehalte	[%]	5,4	5,8	6,2
50/70	**[g]**	**74,4**	**111,1**	**145,7**
160/220	**[g]**	**151,1**	**147,2**	**145,7**
Summe		225,5	258,3	291,4
Bindemittelanteile				
AG-D	[%]	46,0	**42,6**	39,7
50/70	[%]	17,8	**24,7**	30,2
160/220	[%]	36,2	**32,7**	30,2
Summe	[%]	100,0	**100,0**	100,0

Berechung der Bindemitteleinwaagen (für Rejuvenatoren)

Einwaage	[g]	7500,0		
AG-Masse	[g]	3142,5	41,9%	
BM-Gehalt im AG		6,1		
BM-Masse im AG	[g]	191,7		
BM Zugabe-Gehalte		**5,4**	**5,8**	**6,2**
BMz-Masse	[g]	225,5	258,3	291,4
Asphalt-Massen		7725,5	7758,3	7791,4
Bindemittel-Massen	[g]	417,2	450,0	483,1
Anteil BM_{Kom}	[%]	100	100	100
Anteil Rejuvenator R1	[%]	8,3	8,3	8,3
Erweichungspunkte				
AG-D	[°C]	66,1		
50/70	[°C]	49,3		
EP RuK_{Mix}		55,8	55,3	54,8

Einwaage BM:		**Mischung 1**	**Mischung 2**	**Mischung 3**
BM Gehalte	[%]	5,4	5,8	6,2
50/70	**[g]**	**209,6**	**242,4**	**275,5**
Rejuvenator R1	**[g]**	**15,9**	**15,9**	**15,9**
Summe		225,5	258,3	291,4
Bindemittelanteile				
AG-D	[%]	46,0	**42,6**	39,7
50/70	[%]	50,2	**53,9**	57,0
Rejuvenator	[%]	3,8	**3,5**	3,3
Summe	[%]	100,0	**100,0**	100,0

Bild 4-1: Berechnungen der Einwaage für Erstprüfungen der Referenzvarianten (links) und der Rejuvenatorvarianten (rechts) (hier: exemplarische Darstellungen für die AC D R0 und AC D R1)

Asphaltmischgut ungefähr den gleichen EP RuK aufweist wie die Nullvariante. Die Nullvariante wird hierzu ausschließlich aus den frischen Mischgutkomponenten (Komplementärstoffe: Bindemittel und Gesteinskörnung) hergestellt. Für die Asphaltdeckschicht (AC D) und die Asphalttragschicht (AC T) wird ein StBBit 50/70 und für die Asphaltbinderschicht (AC B) ein StBBit 30/45 verwendet; als Gesteinskörnung enthalten die AC D und die AC B Diabas und die AC T Kalkstein. Durch die Herstellung des Mischgutes und die anschließende Rückgewinnung des Bindemittels mittels Asphaltextraktion, werden bei der Bestimmung des EP RuK die Alterungseinflüsse aus Mischgutherstellung und Bindemittelrückgewinnung auf den EP RuK und damit bei der Zielwertbestimmung berücksichtigt.

Die Initialprobe bezeichnet eine unverjüngte, mit entsprechendem Asphaltgranulatanteil verschnittene Asphaltvariante. Dabei enthalten die Initialproben der einzelnen Asphaltmischgüter spezifische Mindestanteile an Asphaltgranulat. Ergänzt werden die Korngrößenverteilungen und Bindemittelgehalte mit den jeweils vorgesehenen Komplementärstoffen. Auch hierbei erfolgt die Bestimmung des EP RuK als Ausgangswert für die Ermittlung des Verjüngungsparameters am rückgewonnenen Bindemittel, damit die Alterungseinflüsse aus Mischgutherstellung und Bindemittelrückgewinnung auf den EP RuK angemessen berücksichtigt werden können.

4.2 Bestimmung der Zugabemenge von Verjüngungsmitteln

Für die Referenzvariante und damit für das weiche Bindemittel StBBit 160/220 wurde der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP-RuK_{Mix}) unmittelbar aus den Erweichungspunkten des im Asphaltgranulat enthaltenen, des Komplementärbindemittels und des Verjüngungsmittels R0 berechnet. Bei der Berechnung mittels Tabellenkalkulationsprogramm (Bild 4-1) werden die Anteile des Komplementärbindemittels und des Verjüngungsmittels solange iterativ angepasst, bis der resultierende

Erweichungspunkt dem Erweichungspunkt des Zielwertes (Nullvariante) entspricht. Damit erhält man für jeden der drei Bindemittelgehalte einer Erstprüfung den gleichen resultierenden Erweichungspunkt. Unberücksichtigt bleiben bei dieser Berechnung die Einflüsse aus Herstellung und Asphaltextraktion auf den Erweichungspunkt. Im Vergleich zu den Erweichungspunkten der rückgewonnenen Bindemittel der Referenzvarianten ergeben sich dadurch rechnerisch kleinere EP-RuK$_{Mix}$-Werte.

Für die Rejuvenatoren R1, R2 und R3 wurden zur Verifizierung der Wirksamkeit Vorversuche mit den Dosierempfehlungen der Hersteller durchgeführt.

Ein Hersteller gab an, dass mit je 1,0 M.-% Rejuvenator bezogen auf den Bindemittelgehalt des Asphaltgranulates der Erweichungspunkt um ca. 2 K gesenkt wird. Ein weiterer Hersteller gab ungefähre Spannweiten von Massen-Prozenten, bezogen auf das gealterte Bindemittel an, die bei leicht gealterten Bindemitteln (3 bis 7 %) und für stark gealterte Bindemittel (5 bis 10 %) eingesetzt werden sollen. Innerhalb dieser Spannweiten sind Probemischungen durchgeführt worden und die Absenkung anhand der Erweichungspunkte festgestellt worden. Da diese Methode eine objektivere Verfahrensweise zur Ermittlung der Verjüngunsmittelanteile darstellt, sind für jedes Asphaltmischgut und jede verjüngte Variante mindestens drei Probemischungen mit unterschiedlichen Rejuvenatoranteilen hergestellt worden.

In Anlehnung an die Herstellerangaben wurden jeweils drei unterschiedlichen Zugabemengen (z.B., AC D: 5 %, 7 %, 9 %) für die Rejuvenatoren R1, R2 und R3 systematisch gewählt und verwendet. Von diesen verjüngten Varianten wurde der EP RuK, PEN und BTSV ermittelt. Anhand der Ergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel wurden die erforderlichen Dosiermengen der einzelnen Rejuvenatoren für die drei unterschiedlichen Asphaltmischgüter (AC D, AC B und AC T) bestimmt. Zur Analyse der Ergebnisse wurden Diagramme erstellt, aus denen die einzusetzenden Anteile abzulesen sind (Bild 4-2). Der prozentuale Anteil des Rejuvenators kann am Schnittpunkt der interpolierten Kennlinie mit der Kennlinie der Nullvariante abgelesen werden.

Für die Rejuvenatoren R1, R2 und R3 ergibt sich bei den Berechnungen der Zugabemengen ein konstanter Anteil bezogen auf die Bindemittelmasse des Asphaltgranulates. Da bei der Erstprüfung die drei unterschiedlichen Bindemittelgehalte allein über die Komplementärbindemittel gesteuert werden können, ergeben sich hierbei unterschiedliche resultierende Erweichungspunkte. Aufgrund der geringen Zugabemengen der Rejuvenatoren sind Abweichungen für die Abschätzung des Verjüngungsparameters aber vernachlässigbar.

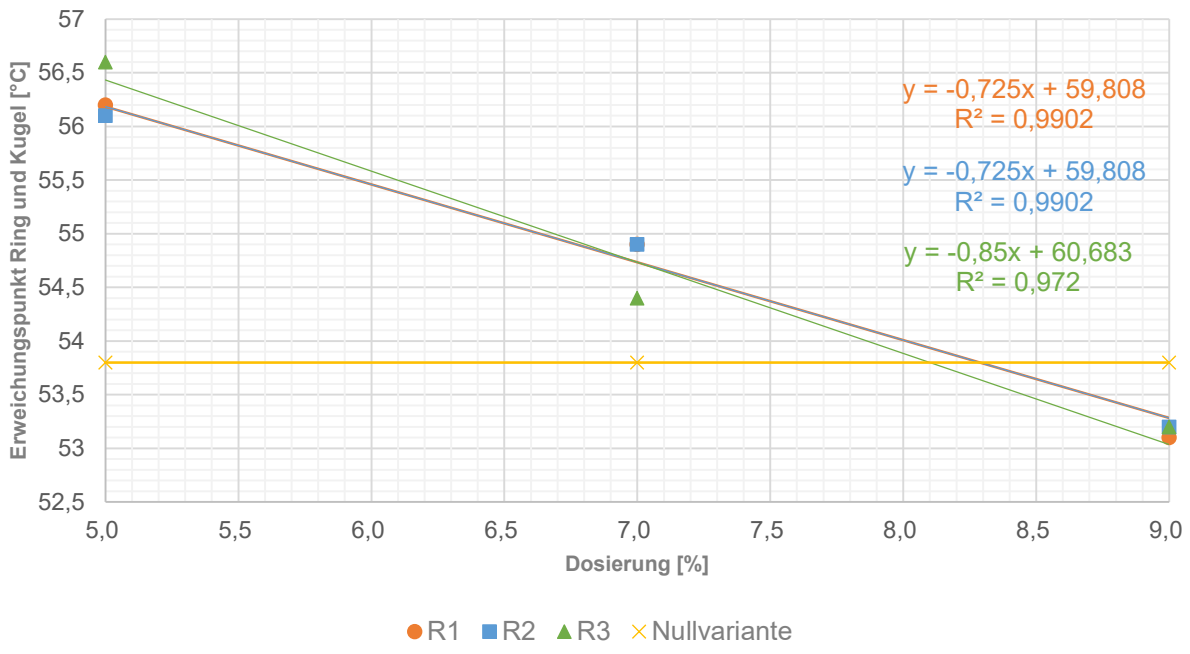

Bild 4-2: Diagramm zur Ermittlung des prozentualen Anteils der Rejuvenatoren (hier: AC D; exemplarische Darstellung)

4.3 Erstprüfungen – Referenzvariante und Rejuvenatorvarianten

4.3.1 Erstprüfung Asphaltdeckschichtmischgut AC 11 D S (AC D)

Für das Asphaltdeckschichtmischgut AC D wurde die Erstprüfung der Referenzvarianten (EP D R0) und die Erstprüfungen für die drei Rejuvenatorvarianten (EP D R1, EP D R2 und EP D R3) erstellt. Die Erstprüfungen dienen als Mischrezeptur für die herzustellenden Asphalte.

Das Bindemittel des eingesetzten Asphaltgranulats AG-D hat einen Erweichungspunkt von 64,3 °C und kann aufgrund der Zusammensetzung mit über 40 M.% im Asphaltmischgut eingesetzt werden.

Der EP RuK des resultierenden Bindemittels der Nullvariante liegt bei 53,8 °C und stellt den Zielwert für die Rejuvenierung dar; die Anteile der Rejuvenatoren R1, R2 und R3 am gesamten resultierenden Bindemittels betragen jeweils 3,5 M.%. Die Referenzvariante beinhaltet das Bindemittel 160/220 (R0) mit 32,7 M.% bezogen auf das resultierende Bindemittel. Damit wird für die rückgewonnenen Bindemittel der Varianten AC D R0, AC D R2 und AC D R3 ein resultierender Erweichungspunkt von 53,4 °C erzielt. Der Erweichungspunkt der Variante AC D R1 liegt mit 52,7 °C etwa 1,1 K unter dem Erweichungspunkt der Nullvariante und 0,7 K unter dem Erweichungspunkt der Referenzvariante. Eine Zusammenfassung der Prüfergebnisse ist in Tab. 4-1 dargestellt.

Asphaltbezeichnung		AC _D _0	AC _D _X	**AC _D _R0**	**AC _D _R1**	**AC _D _R2**	**AC _D _R3**
Name		Nullvariante	Initialvariante	Referenz	Rejuvenator 1	Rejuvenator 2	Rejuvenator 3
EP-Bezeichnung		EP_D_0	EP_D_X	EP_D_R0	EP_D_R1	EP_D_R2	EP_D_R3
Asphaltkomponenten							
Gesteinskörnungsart		Diabas	Diabas	Diabas	Diabas	Diabas	Diabas
Bindemittel, komplementär		50/70	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70
Anteil	M.-%[1)]	100	57,4	24,7	53,9	53,9	53,9
Asphaltgranulat		-	AG-D	AG-D	AG-D	AG-D	AG-D
Anteil	M.-%[2)]	0	**41,9**	**41,9**	**41,9**	**41,9**	**41,9**
Rejuvenator		-	-	R0	R1	R2	R3
Anteil	M.-%[1)]	0	0	32,7	3,5	3,5	3,5
Bindemittelparameter							
Bindemittelgehalt, soll	M.-%[2)]	6,0	**5,8**	**5,8**	**5,8**	**5,8**	**5,8**
Bindemittelgehalt,extrahiert	M.-%[2)]	6,0	5,7	5,5	5,9	5,8	5,8
EP Ruk	°C	53,8	59,5	53,4	52,7	53,4	53,4
PEN	1/10mm	40	28	42	48	47	47
BTSV	°C	54,6	59,7	55,0	53,5	54,3	54,3
Phasenwinkel	°C	79,2	78,0	77,1	77,4	77,0	77,0
Asphaltparameter							
Verdichtungstemperatur	°C	135	135	135	135	135	135
Rohdichte	g/cm3	2,561	2,539	2,548	2,549	2,544	2,544
Raumdichte	g/cm3	2,479	2,469	2,456	2,475	2,468	2,468
Hohlraumgehalt	Vol.-%	3,2	2,8	3,6	2,9	3,0	3,0
Korngrößenverteilung, extrahiert							
Siebe	*Soll*	*Ist*	*Ist*	*Ist*	*Ist*	*Ist*	*Ist*
0,063	7,9	7,9	8,2	8,6	8,7	8,5	8,5
0,125	10,3	10,5	10,3	10,3	10,8	10,5	10,5
0,25	16,3	16,5	16,0	15,7	16,6	16,2	16,2
1	36,2	36,2	34,1	33,5	35,8	34,9	34,9
2	47,3	46,7	42,9	42,2	46,6	44,4	44,4
5,6	69,1	62,8	63,2	62,9	69,3	65,9	65,9
8	81,2	77,7	76,8	72,9	78,4	76,8	76,8
11,2	99,1	100,0	98,9	97,8	99,6	99,1	99,1
16	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1) bezogen auf die Gesamtmasse des resultierenden Bindemittels 2) bezogen auf die Gesamtmasse des Asphaltes							

Tab. 4-1: Zusammenfassung der Laborergebnisse aus den Erstprüfungen der Asphaltmischgüter für die Deckschichtvarianten

Asphaltbezeichnung		AC _B _0	AC _B _X	**AC _B _R0**	**AC _B _R1**	**AC _B _R3**
Name		Nullvariante	Initialvariante	Referenz	Rejuvenator 1	Rejuvenator 3
EP-Bezeichnung		EP_B_0	EP_B_X	EP_B_R0	EP_B_R1	EP_B_R3
Asphaltkomponenten						
Gesteinskörnungsart		Diabas	Diabas	Diabas	Diabas	Diabas
Bindemittel, komplementär		30/45	30/45	30/45	30/45	30/45
Anteil	M.-%[1)]	100	52	20,3	48,2	
Asphaltgranulat		-	AG-B1/B2	AG-B1/B2	AG-B1/B2	AG-B1/B2
Anteil	M.-%[2)]	0	**52,0**	**52,0**	**52,0**	**52,0**
Rejuvenator		-	-	R0	R1	R3
Anteil	M.-%[1)]	0	0	31,7	3,8	3,8
Bindemittelparameter						
Bindemittelgehalt, soll	M.-%[2)]	4,6	**4,6**	**4,6**	**4,6**	**4,6**
Bindemittelgehalt,extrahiert	M.-%[2)]	4,7	4,4	4,4	4,5	4,5
EP Ruk	°C	59,1	65,7	59,7	57,9	58,5
PEN	1/10mm	26	19	27	36	36
BTSV	°C	59,4	66,0	59,9	58,9	59,3
Phasenwinkel	°C	78,7	75,7	74,9	75,0	75,0
Asphaltparameter						
Verdichtungstemperatur	°C	135	135	135	135	135
Rohdichte	g/cm3	2,603	2,639	2,637	2,642	2,641
Raumdichte	g/cm3	2,440	2,482	2,512	2,498	2,489
Hohlraumgehalt	Vol.-%	6,3	6,0	4,7	5,5	5,8
Korngrößenverteilung, extrahiert						
Siebe	*Soll*	*Ist**	*Ist*	*Ist*	*Ist*	*Ist*
0,063		8,0	6,6	6,7	6,6	6,9
0,125		9,6	7,9	8,0	7,9	8,1
0,25		12,1	10,8	11,0	10,8	11,1
1		19,7	21,3	22,0	21,3	21,9
2		25,0	27,7	28,2	27,7	28,5
5,6		44,5	43,3	43,7	43,3	45,7
8		57,2	55,5	56,6	55,5	58,5
11,2		76,8	70,4	73,1	70,4	72,8
16		98,2	97,0	97,2	97,0	97,8
22,4		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1) bezogen auf die Gesamtmasse des resultierenden Bindemittels 2) bezogen auf die Gesamtmasse des Asphaltes						

Tab. 4-2: Zusammenfassung der Laborergebnisse aus den Erstprüfungen der Asphaltmischgüter für die Binderschichtvarianten

4.3.2 Erstprüfung Asphaltbindermischgut AC 16 B S (AC B)

Für das Asphaltbindermischgut AC B wurde eine Erstprüfung für die Referenzvariante (EP B R0) und zwei Erstprüfungen für die Rejuvenatorvarianten (EP B R1) und (EP B R3) erstellt.

Die beiden Asphaltgranulate AG-B1 und AG-B2 könnten aufgrund des im Asphaltgranulat vorhandenen Bindemittels rechnerisch mit über 50 M.-% in der Asphaltbinderschicht eingesetzt werden. Trotzdem konnte aufgrund der jeweiligen Korngrößenverteilungen keines der beiden Asphaltgranulate alleine eingesetzt werden. Daher wurde entschieden, die beiden Asphaltgranulate jeweils zu gleichen Teilen in der Asphaltmischgutvariante AC 16 B S einzusetzen. Damit konnten Mischgutrezepturen erstellt werden, die akzeptable Hohlraumgehalte liefern.

Der zur Nullvariante gehörende Erweichungspunkt beträgt 59,1 °C, die Initialvariante weist einen Erweichungspunkt von 65,7 °C auf und der zur Referenzvariante gehörende beträgt 59,7 °C und liegt etwa 0,6 K über dem der Nullvariante. Die zu den Rejuvenatorvarianten R1 (57,9 °C) und R2 (58,5 °C) gehörenden Erweichungspunkte liegen 1,8 K bzw. 1,2 K niedriger als bei der Referenzvariante. Die Tab. 4-2 enthält eine Zusammenfassung der Prüfergebnisse.

4.3.3 Erstprüfung Asphalttragschichtmischgut AC 22 T S (AC T)

Für das Asphalttragschichtmischgut AC T wurde eine Erstprüfung für die Referenzvariante (EP T R0) und zwei Erstprüfungen für die Rejuvenatorvarianten (EP T R2 und EP T R3) erstellt.

Asphaltbezeichnung		AC _T_0	AC _T_X	**AC _T_R0**	**AC _T_R2**	**AC _T_R3**
Name		Nullvariante	Initialvariante	Referenz	Rejuvenator 2	Rejuvenator 3
EP-Bezeichnung		EP_T_0	EP_T_X	EP_T_R0	EP_T_R2	EP_T_R3
Asphaltkomponenten						
Gesteinskörnungsart		Kalkstein	Kalkstein	Kalkstein	Kalkstein	Kalkstein
Bindemittel, komplementär		50/70	50/70	50/70	50/70	50/70
Anteil	M.-%[1)]	100	40,2	0	0	0
Asphaltgranulat		-	AG-T	AG-T	AG-T	AG-T
Anteil	M.-%[2)]	0	**62,3**	**62,3**	**62,3**	**62,3**
Rejuvenator		-	-	R0	R2	R3
Anteil	M.-%[1)]	0	0	40,2	5,8	5,8
Bindemittelparameter						
Bindemittelgehalt, soll	M.-%[2)]	4,0	**3,9**	**3,9**	**3,9**	**3,9**
Bindemittelgehalt,extrahiert	M.-%[2)]	4,2	3,9	3,9	3,7	3,8
EP Ruk	°C	55,8	73,8	67,2	64,4	64,9
PEN	1/10mm	35	10	18	27	25
BTSV	°C	56,6	78,3	67,0	65,1	64,8
Phasenwinkel	°C	78,6	73,0	74,3	73,2	73,4
Asphaltparameter						
Verdichtungstemperatur	°C	135	135	135	135	135
Rohdichte	g/cm3	2,540	2,525	2,527	2,518	2,520
Raumdichte	g/cm3	2,465	2,389	2,398	2,385	2,390
Hohlraumgehalt	Vol.-%	3,0	5,4	5,1	5,3	5,2
Korngrößenverteilung, extrahiert						
Siebe	*Soll*	*Ist**	*Ist*	*Ist*	*Ist*	*Ist*
0,063		7,9	6,0	6,0	5,9	6,0
0,125		9,4	7,6	7,6	7,3	7,7
0,25		14,1	12,7	12,8	12,2	13,0
1		28,5	29,2	29,9	27,8	29,9
2		33,4	34,2	35,0	32,1	34,6
5,6		48,5	50,4	51,6	46,0	49,8
8		58,7	59,3	59,2	53,3	57,7
11,2		72,9	69,9	70,5	63,6	68,2
16		82,5	82,7	80,5	74,6	79,1
22,4		100,0	97,6	98,5	97,7	98,3
31,5		100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

1) bezogen auf die Gesamtmasse des resultierenden Bindemittels 2) bezogen auf die Gesamtmasse des Asphaltes

Tab. 4-3: Zusammenfassung der Laborergebnisse aus den Erstprüfungen der Asphaltmischgüter für die Tragschichtvarianten

Das im Asphaltgranulat AG-T enthaltene Bindemittel weist mit einem Erweichungspunkt von 86,2 °C einen sehr hohen Erweichungspunkt auf und kann aufgrund der Gleichmäßigkeit seiner Asphaltgranulatmerkmale [6] zu über 60 M.-% in der Asphalttragschicht verwendet werden.

Aufgrund des sehr hohen Erweichungspunktes wurde bei der Referenzvariante kein komplementäres Bindemittel 50/70 eingesetzt, damit liegt der Anteil des weichen Bindemittels R0 bei 100 M.-% bezogen auf das zugegebene Bindemittel und führt zu einem Erweichungspunkt des Bindemittels der Referenzvariante von 67,2 °C. Der Erweichungspunkt des Bindemittels der Nullvariante (55,8 °C) konnte folglich nicht erreicht werden. Daher wurde als Zielwert für die Bestimmung der Rejuvenatorzugabemenge der Erweichungspunkt aus der Referenzvariante verwendet, statt des Erweichungspunktes aus der Nullvariante.

Mit den Rejuvenatorvarianten konnten Erweichungspunkte der resultierenden Bindemittel von 64,4 °C (AC T R2) bzw. 64,9 °C (AC T R3) erzielt werden. Die zusammengefassten Prüfergebnisse sind in Tab. 4-3 dargestellt.

5 Prüfung der Bindemitteleigenschaften

Zur Beurteilung der Alterungsbeständigkeit sind die Veränderungen der Bindemitteleigenschaften durch die Rejuvenierung und Alterung wesentliche Parameter. Die Darstellung dieser Veränderungen erfolgt auf Grundlage der Prüfergebnisse der Bindemitteleigenschaften der unterschiedlichen Bindemittel in verschieden Projektphase mit konventionellen und performance-orientierten Prüfverfahren.

Dabei wurden die Bindemittel der Referenzvariante R0 sowie die Rejuvenatorvarianten R1 bis R3 der verschiedenen Mischgüter geprüft. Zudem wurden die Frischbindemittel (BM 1 und BM 2) vor Alterung und nach Alterung (BM 1a und BM 2a) untersucht. Hierbei ist zu beachten, dass alle resultierenden Bindemittel mit dem Wuppertaler Alterungsverfahren (WAV) und ausschließlich die Frischbindemittel (BM 1a und BM 2a) mit dem RTFOT-Verfahren und dem PAV-Verfahren gealtert wurden.

Zusätzlich dazu sind für alle Mischgutvarianten die entsprechenden Nullvariante (0) und Initialvarianten (X) hergestellt und die resultierenden Bindemittel extrahiert worden (siehe Kapitel 4.1). Zur Validierung des Alterungsverfahrens sind diese Varianten exemplarisch gealtert worden (AC D 0a und AC T Xa) und mit nach RTFOT/PAV-gealterten Bindemitteln verglichen worden. Vorrangig werden die Nullvarianten jedoch als grundlegendes Justierelement für die Einstellung der zu erzielenden Erweichungspunkte bei der Rejuvenierung verwendet.

Als Grundlage für die Konzeption der Mischgüter und für die Analyse sind alle Bindemittel mit den konventionellen Prüfverfahren Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) sowie der Nadelpenetration (PEN) geprüft worden. Als Ergänzung zur Beurteilung des Kälteverhalten sind die Bindemittel nach dem Verfahren zur Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß [48] geprüft worden. Als performance-orientiertes Prüfverfahren wurde die DSR-Prüfung nach dem Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren gewählt, hiermit wurden die BTSV-Temperatur und der BTSV-Phasenwinkel bestimmt.

Die nachfolgenden Variantenbezeichnungen (Nullvariante, Referenzvariante etc.) beziehen sich, falls nicht anders angegeben, auf die, resultierenden und rückgewonnen Bindemittel der entsprechenden Asphaltvarianten. Die Bindemittelvarianten sind mit dem Präfix BM gekennzeichnet.

5.1 Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) und Nadelpenetration (PEN)

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Prüfungen des Erweichungspunktes Ring und Kugel sowie der Nadelpenetration dargestellt und erläutert. Die Auswirkungen der Alterung werden mit entsprechenden Alterungsindikatoren gemäß dem Arbeitspapier Alterung von Asphalt im Laboratorium (AP AAL) [37] aufgezeigt. Der Alterungsindikator für die Ergebnisse des Prüfverfahrens Erweichungspunkt Ring und Kugel ist die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TR\&K}$; für die Nadelpenetration wird der Alterungsindex $I_{A,Pen}$ verwendet.

5.1.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D

Die Asphaltdeckschichtvarianten (AC D) wurden mit einem komplementären Bindemittel 50/70 (BM 1) hergestellt. Das Frischbindemittel (BM 1) weist einen Erweichungspunkt von 49,0 °C auf, nach der Kurzzeitalterung (RTFOT) erhöht sich der Erweichungspunkt auf 54,8 °C (BM 1_{RTFOT}) und nach der Langzeitalterung (PAV) auf 68,6 °C (BM 1_{PAV}).

Das resultierende Bindemittel (BM D 0) der Nullvariante (AC D 0) zeigt einen Erweichungspunkt von 54,8 °C vor und 78,3 °C nach der Alterung mit dem WAV (BM D 0a).

Hierbei zeigt sich, dass die Kurzzeitalterung durch das RTFOT-Verfahren beim BM 1 und bei der Nullvariante AC D 0 durch das Herstellen und die Extraktion übereinstimmend abgebildet werden.

Der Vergleich der Varianten nach Langzeitalterung BM 1_{PAV} (68,6 °C) und BM D 0a (78,3 °C) zeigt die Wirksamkeit des Wuppertaler-Alterungsverfahren auf. Durch das WAV wurde ein Alterungsniveau erreicht, das den Erweichungspunkt nach PAV-Alterung um 9,7 K deutlich übersteigt. Dies gilt auch für die Referenzvariante (BM D R0a), dessen Erweichungspunkt mit 70,1 °C über dem Wert der Variante BM 1_{PAV} liegt. Die Erweichungspunkte der rejuvenierten Varianten BM D R1a (72,7 °C), BM D R2a (72,9 °C) und

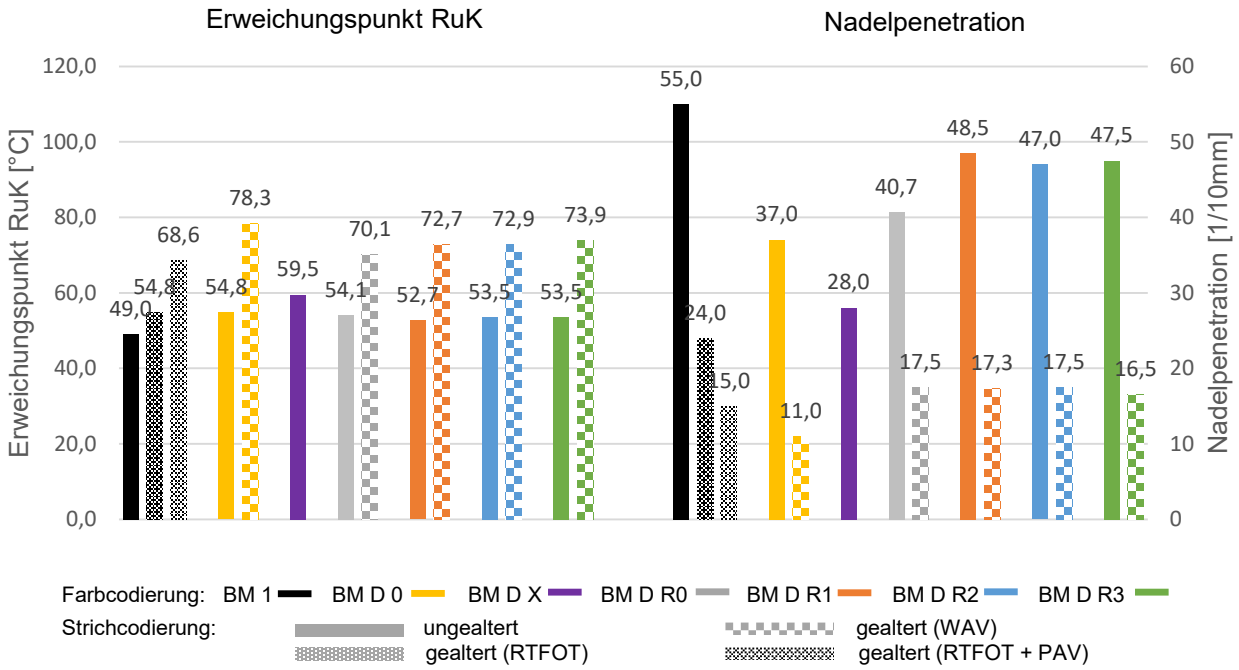

Bild 5-1: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfungen EP RuK und PEN für die Varianten des Asphaltdeckschichtmischgutes (AC D) vor der Alterung und nach der Alterung.

BM D R3a (73,9 °C) liegen im Mittel mit 4,6 K über dem Wert der Variante BM 1_{PAV}. Damit kann grundlegend von einer Wirksamkeit des Alterungsverfahrens ausgegangen werden.

Als Zielwert für die Verjüngung wurde der Erweichungspunkt der Nullvariante (BM D 0) mit 54,8 °C bestimmt. Der Vergleich der Erweichungspunkte der ungealterten Nullvariante (BM D 0) mit der ungealterten Initialvariante (BM D X) zeigt einen ΔEP-RuK von 4,7 K auf, der durch den Einsatz von weichem Bindemittel (R0) und Rejuvenatoren (R1 bis R3) abgesenkt werden muss.

Die ungealterten verjüngten Varianten weisen im Vergleich zur ungealterten Nullvariante sehr ähnliche Erweichungspunkte auf. Die Referenzvariante hat mit 54,1 °C den höchsten Erweichungspunkt und liegt damit -0,7 K unter der Nullvariante. Die drei rejuvenierten Varianten haben im Mittel einen Erweichungspunkt von 53,2 °C und liegen damit -1,6 K unter dem Erweichungspunkt der Nullvariante (54,8 °C). Die Variante AC D R1 bzw. das resultierende Bindemittel BM D R1 weist mit 52,7 °C den geringsten Erweichungspunkt und mit -2,1 K die größte Differenz im Vergleich zur Nullvariante auf; die Differenz zur Referenzvariante BM D R0 (54,1 °C) beträgt -1,4 K. Zu den anderen Varianten BM D R2 und BM D R3 gehört jeweils ein Erweichungspunkt von 53,5 °C; die Differenz zur Nullvariante beträgt damit -1,3 K und zur Referenzvariante -0,6 K. (siehe Bild 5-1)

Wie schon bei den ungealterten Varianten sind auch bei den gealterten Rejuvenatorvarianten die Ergebnisse der Kenndaten für die resultierenden Bindemittel sehr ähnlich. Die Spannweite zwischen den Ergebnissen der rejuvenierten Varianten beträgt (R = 1,2 K). Die Varianten BM D R1a, BM D R2a und BM D R3a weisen bei Erweichungspunkten von 72,7 °C, 72,9 °C und 73,9 °C Alterungsveränderungen $\Delta_{A,TR\&K}$ von +20,0 K, +19,4 K und 20,4 K auf.

Die mittlere Zunahme der Erweichungspunkte beträgt bei den rejuvenierten Varianten +19,9 K bei einem Erweichungspunkt von i. M. 73,2 °C. Mit einem $\Delta_{A,TR\&K}$ von +23,5 K und einem Erweichungspunkt von 78,3 °C zeigt die Nullvariante (BM D 0) die deutlichste Alterungsveränderung. Für die Referenzvariante (BM D R0) ist mit einem $\Delta_{A,TR\&K}$ von +16,0 K auf 70,1 °C die geringste Alterungsveränderung zu verzeichnen. (siehe Tab. 5-1)

Variante	Erweichungspunkt Ring und Kugel		Nadelpenetraion	
	$T_{R\&K}$ [°C]	$\Delta_{A,TR\&K}$ [K]	Pen [1/10 mm]	$I_{A,Pen}$ [-]
BM_1	49,0	5,8 [1)]	55,0	0,436 [1)]
BM_1_{RTFOT}	54,8	19,6 [2)]	24,0	0,273 [2)]
BM_1_{PAV}	68,6		15,0	
BM_D_0	54,8	23,5	37,0	0,297
BM_D_0a	78,3		11,0	
BM_D_X	59,5	---	28,0	---
BM_D_R0	54,1	16,0	40,7	0,430
BM_D_R0a	70,1		17,5	
BM_D_R1	52,7	20,0	48,5	0,357
BM_D_R1a	72,7		17,3	
BM_D_R2	53,5	19,4	47,0	0,372
BM_D_R2a	72,9		17,5	
BM_D_R3	53,5	20,4	47,5	0,347
BM_D_R3a	73,9		16,5	

[1)] Alterungsindikator zur RTFOT-Alterung [2)] Alterungsindikator zur PAV-Alterung

Tab. 5-1: Ergebnisse Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie Nadelpenetration der Asphaltdeckschichtvarianten

Bei der Nadelpenetration zeigen sich für die resultierenden Bindemittel äquivalente Ergebnisse. Auch hier wurde das Komplementärbindemittel BM 1 im frischen Zustand, nach Kurzzeitalterung (RTFOT) und Langzeitalterung (RTFOT+PAV) geprüft; durch die Kurzzeitalterung ist eine deutliche Verhärtung von 55,0 1/10mm auf 24 1/10mm zuerkennen. Die Langzeitalterung bewirkt eine Verhärtung auf 15 1/10mm.

Das resultierende Bindemittel der Nullvariante (BM D 0) weist nach Herstellung und Extraktion (Kurzzeitalterungsäquivalent) einen Penetrationswert von 37,0 1/10mm auf. Damit zeigt sich bei der Nullvariante eine um +13 K geringere Verhärtung infolge der Kurzzeitalterung durch Herstellung und Extraktion gegenüber der Kurzzeitalterung mittels RTFOT. Mit 28,0 1/10mm hat die Initialvariante (BM D X) einen um -9 K geringen Penetrationswert als die ungealterte Nullvariante BM D 0 (37 1/10mm).

Durch die Verjüngung mit weichem Bindemittel (R0) konnte ein Penetrationswert von 40,7 1/10mm bei der Referenzvariante BM D R0 erreicht werden, das entspricht einer Differenz von +3,7 1/10mm zur Nullvariante. Mit Hilfe der Rejuvenatoren (R1 bis R3) sind noch wesentlich höhere Penetrationswerte erzielt worden. Mit 48,5 1/10mm liegen bei der Variante BM D R1 die größten Differenzen von +11,5 1/10mm zur Nullvariante und mit +7,8 1/10mm zur Referenzvariante BM D R0 vor. Die Varianten BM D R2 und BM D R3 weisen Penetrationswerte von 47,0 1/10mm und 47,5 1/10mm auf, die Differenzen zur Nullvariante sind damit +10,0 1/10mm und +10,5 1/10mm sowie +6,3 1/10mm und +6,8 1/10mm zur Referenzvariante. Der mittlere Penetrationswert der rejuvenierten Varianten (R1 bis R3) liegt bei 47,7 1/10mm, die Einzelwerte haben eine Spannweite von 1,5 1/10mm. (siehe Bild 5-1)

Die mit dem WAV gealterten Varianten BM D R0a (17,5 1/10mm), BM D R1a (17,3 1/10mm), BM D R2a (17,5 1/10mm) und BM D R3a (16,5 1/10mm) zeigen mit einer Spannweite von lediglich 1 1/10mm sehr homogene Ergebnisse. Damit zeigen sich auch hier, wie bei den Ergebnissen beim Erweichungspunkt Ring und Kugel, sehr gleichmäßige Ergebnisse. Im Vergleich zur Nullvariante BM D 0 ist der zugehörige mittlere Penetrationswert der verjüngten Varianten (BM D R0 bis BM D R3) mit 17,2 1/10mm um +6,2 1/10mm höher.

Die Zunahme der Bindemittelhärte durch die Alterung (WAV) bei den rejuvenierten Varianten (BM D R1 bis BM D R3) liegt im Mittel bei -30,6 1/10mm, mit einer Spannweite von 1,7 1/10mm. Der Alterungsindex $I_{A,Pen}$ der Variante BM D R1 wurde mit 0,357 ermittelt. Die Variante BM D R2 und BM D R3 weisen Alterungsindizes von 0,372 bzw. 0,347 auf.

Die Differenz zwischen der ungealterten Referenzvariante (BM D R0) zur gealterten Referenzvariante (BM D R0a) ist mit 23,2 1/10mm zu beziffern; der Alterungsindex $I_{A,Pen}$ beträgt 0,430. (siehe Tab. 5-1)

Die Ergebnisse zur Bestimmung des Erweichungspunktes nach dem Ring- und Kugelverfahren zeigen für die ungealterten Varianten (BM D R0, BM D R1, BM D R2, BM D R3) mit einer Spannweite von 1,4 K sehr homogene Ergebnisse. Auch das Ergebnis des Komplementärbindemittels BM1 nach der Kurzzeitalterung mittels RTFOT und das Ergebnis der ungealterten Nullvariante (BM D 0) passen mit jeweils 54,8 °C in dieses Bild. Die zur Referenzvariante gehörenden Erweichungspunkte sind im ungealterten Zustand (BM D R0) geringfügig höher (54,1 °C) und im gealterten Zustand geringer (70,1 °C) und weisen damit eine kleinere Differenz als bei den rejuvenierten Varianten (R1 bis R3) auf. Die Spannweite liegt bei den gealterten Varianten bei 3,8 K, was durch den Erweichungspunkt der Referenzvariante begründet ist, allein die drei rejuvenierten Varianten haben eine Spannweite von 1,2 K.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Ergebnissen der Nadelpenetration, allerdings sind hier die Ergebnisse der gealterten Varianten (BM D R0a; BM D R1a; BM D R2a; BM D R3a) mit einer Spannweite von 1 K sehr homogen. Die Spannweite der ungealterten Varianten beträgt 7,8 1/10mm, was auch hier durch einen geringen Penetrationswert der Referenzvariante im Vergleich zu den rejuvenierten Varianten begründbar ist. Die rejuvenierten Varianten (BM D R1 bis BM D R3) haben lediglich eine Spannweite von 1,5 1/10mm und zeigen damit sehr homogene Ergebnisse. Die Alterung durch das WAV bewirkt bei der Referenzvariante eine Verhärtung von -23,2 1/10mm und bei den rejuvenierten Varianten (BM D R1 bis BM D R3) eine Verhärtung von i. M. -30,6 1/10mm mit einer Spannweite von 1,7 1/10mm.

Anhand der Alterungsindizes $\Delta_{A,TR\&K}$ und $I_{A,Pen}$ sind die Auswirkungen der Alterung auf die verjüngten Varianten ersichtlich. Die Referenzvariante BM D R0 zeigt sowohl die kleinste Alterungsveränderung $\Delta_{A,TR\&K}$ als auch den größten Alterungsindex $I_{A,Pen}$ und damit die geringste Auswirkung der Alterung auf die Prüfergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel sowie der Nadelpenetration. Beim Vergleich der rejuvenierten Varianten untereinander, ist für die Variante BM D R3 die größte Alterungsempfindlichkeit, während für die Variante BM D R2 die geringste Alterungsempfindlichkeit zu verzeichnen ist. Die Variante BM D R1 bewegt sich mit dem zugehörigen $\Delta_{A,TR\&K}$-Wert am Mittelwert der rejuvenierten Varianten und mit dem Alterungsindex $I_{A,Pen}$ auf einem ähnlichen Niveau wie die Variante BM D R2.

5.1.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B

Die Asphaltbinderschichtvarianten (AC B) wurden mit einem komplementären Bindemittel 30/45 (BM2) hergestellt. Das Frischbindemittel (BM 2) weist einen Erweichungspunkt von 53,0 °C auf, nach der Kurzzeitalterung (RTFOT) erhöht sich der Erweichungspunkt auf 60,6 °C (BM 2 RTFOT) und nach der Langzeitalterung (PAV) auf 74,6 °C (BM 1 PAV).

Das resultierende Bindemittel (BM B 0) der Nullvariante (AC B 0) hat einen Erweichungspunkt von 59,1 °C und das der Initialvariante (BM B X) einen von 65,7 °C. Der Vergleich der Erweichungspunkte der ungealterten Nullvariante (BM B 0) mit der ungealterten Initialvariante (BM B X) zeigt eine Differenz von 6,6 K, der durch den Einsatz von weichem Bindemittel (R0) und Rejuvenatoren (R1 und R3) abgesenkt werden muss. Als Zielwert für die Verjüngung wird auch hier der zur ungealterten Nullvariante zugehörige Erweichungspunkt angenommen. Die rejuvenierten Varianten (BM B R1, BM B R3) weisen nach Herstellung und Extraktion vergleichbare Werte mit geringe Abweichungen (<1 K) auf, der Mittelwert liegt bei 58,6 °C (mit -0,6 K zum Zielwert). Für die Varianten BM B R1 und BM B R3 wurden Erweichungspunkte von 58,4 °C und 58,7 °C mit -0,7 K und -0,4 K Differenz zum Zielwert ermittelt.

Die ungealterte Referenzvariante (BM B R0) und die ungealterten Rejuvenatorvarianten (BM B R1 und BM B R3) weisen im Vergleich zur ungealterten Nullvariante (BM B 0) sehr ähnliche Erweichungspunkte auf (R = 1,7 K). Für die Referenzvariante ergibt sich mit 60,1 °C der höchste Wert und liegt damit +1,0 K über der Nullvariante. Für die zwei rejuvenierten Varianten (BM B R1 und BM B R3) ergibt sich im Mittel einen Erweichungspunkt von 58,6 °C (R = 0,3 K), der damit -0,5 K unter dem Erweichungspunkt der Nullvariante (59,1 °C) liegt. Zu der Variante BM B R1 wurde der geringste Erweichungspunkt mit 58,4 °C und einer Differenz im Vergleich zur Nullvariante von -0,7 K ermittelt; die Differenz zur Referenzvariante BM D R0 (60,1 °C) beträgt -1,7 K. Die zweite geprüfte Variante BM B R3 weist einen Erweichungspunkt von 58,7 °C auf, mit einer Differenz zur Nullvariante von -0,4 K und von -0,6 K zur Referenzvariante.

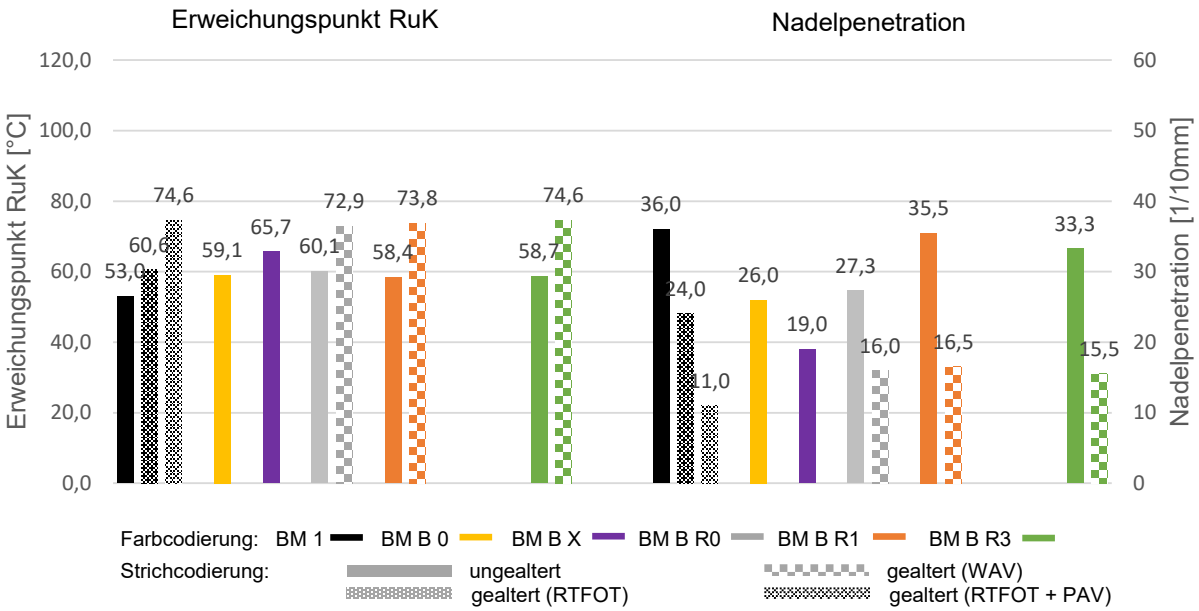

Bild 5-2: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfungen EP RuK und PEN für die Varianten des Asphaltbinderschichtmischgutes (AC B) vor der Alterung und nach der Alterung.

Die mit dem WAV gealterten Varianten (BM B R0a, BM B R1a, BM B R3a) zeigen insgesamt sehr homogene Ergebnisse R = 1,7 K). Bei den gealterten Rejuvenatorvarianten sind untereinander ebenfalls sehr ähnliche Ergebnisse (R = 0,8 K) ermittelt worden.

Durch die Alterung mit dem WAV konnte eine mittlere Alterungsveränderung des Erweichungspunktes von +15,7 K auf i. M. 74,2 für die Rejuvenatorvarianten erzielt werden. Die höchste Alterungsveränderung $\Delta_{A,TR\&K}$ zeigte sich bei der Variante BM B R3 mit +15,9 K, gefolgt von der Variante BM B R1 mit +15,4 K. Die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TR\&K}$ des Erweichungspunktes beträgt bei der Referenzvariante +12,8 K.

Bei der Nadelpenetration zeigen sich sehr ähnliche Ergebnisse. Auch hier wurde das Komplementärbindemittel BM 2 im frischen Zustand, nach Kurzzeitalterung (RTFOT) und Langzeitalterung (RTFOT+PAV) geprüft; der Penetrationswert im frischen Zustand beträgt 36,0 1/10mm, durch die Kurzzeitalterung ist eine deutliche Verhärtung auf 24 1/10mm zuerkennen. Die Langzeitalterung bewirkt eine Verhärtung auf 11,0 1/10mm.

Das resultierende Bindemittel der Nullvariante (BM B 0) weist nach Herstellung und Extraktion (Kurzzeitalterungsäquivalent) einen Penetrationswert von 26,0 1/10mm auf. Damit zeigt sich bei der Nullvariante eine um +2 1/10mm geringere Verhärtung infolge der Kurzzeitalterung durch Herstellung und Extraktion gegenüber der Kurzzeitalterung mittels RTFOT. Mit 19,0 1/10mm gehört zu der Initialvariante (BM B X) ein um -7,0 1/10mm geringerer Penetrationswert als zu der ungealterten Nullvariante BM B 0 (26,0 1/10mm).

Durch die Verjüngung mit weichem Bindemittel (R0) konnte ein Penetrationswert von 27,3 1/10mm für die Referenzvariante BM B R0 erreicht werden, das entspricht einer Differenz von +1,3 1/10mm zur Nullvariante. Mit Hilfe der Rejuvenatoren (R1 und R3) sind noch wesentlich höhere Penetrationswerte erzielt worden. Die größten Differenzen von +9,5 1/10mm zur Nullvariante und +8,2 1/10mm zur Referenzvariante BM B R0 sind der Variante BM B R1 bei einer Penetration von 35,5 1/10mm zuzuordnen. Die Variante BM B R3 weist einen Penetrationswerte von 33,3 1/10mm auf, die Differenz beträgt +7,3 1/10mm zur Nullvariante sowie +6,0 1/10mm zur Referenzvariante. Der zu den rejuvenierten Varianten (BM B R1 und BM B R3) ermittelte mittlere Penetrationswert liegt bei 34,4 1/10mm, die Einzelwerte haben eine Spannweite von 2,2 1/10mm.

Die mit dem WAV gealterten Varianten BM B R0a (16,0 1/10mm), BM B R1a (16,5 1/10mm) und BM B R3a (16,0 1/10mm) zeigen mit einer Spannweite von lediglich 1 1/10mm sehr homogene Ergebnisse. Damit zeigen sich auch hier, wie bei den Ergebnissen des Erweichungspunktes Ring und Kugel, eine hohe Gleichmäßigkeit.

Die Zunahme der Bindemittelhärte durch die Alterung (WAV) bei den rejuvenierten Varianten (R1 und R3) liegt im Mittel bei -16,9 1/10mm, mit einer Spannweite von 1 1/10mm. Die Differenz zwischen ungealterter (BM B R0) und gealterten Referenzvariante (BM B R0a) liegt bei -11,3 1/10mm, damit beträgt der Alterungsindex $I_{A,Pen}$ 0,586. Der Alterungsindizes der Varianten BM B R1 und BM B R2 betragen jeweils 0,465.

Die Ergebnisse zur Bestimmung des Erweichungspunktes nach dem Ring- und Kugelverfahren zeigen für die ungealterten verjüngten Varianten (BM B R0; BM B R1; BM D R3) mit einer Spannweite von 1,7 K sehr homogene Ergebnisse. Auch das Ergebnis des Komplementärbindemittels BM1 nach der Kurzzeitalterung mittels RTFOT (60,6 °C) und das Ergebnis der ungealterten Nullvariante (BM B 0) mit 59,1 °C zeigt eine gute Übereinstimmung.

Die Referenzvariante weist im ungealterten Zustand (BM B R0) einen geringfügig höheren Erweichungspunkt (60,1 °C) und im gealterten Zustand (BM B R0a) einen geringeren Erweichungspunkt (72,9 °C) als die Rejuvenatorvarianten auf und damit eine kleinere Alterungsveränderung als die rejuvenierten Varianten (BM B R1 und BM B R3). Bei den gealterten verjüngten Varianten liegt die Spannweite der Erweichungspunkte bei 1,7 K, was auf den Erweichungspunkt der Referenzvariante zurückgeführt wird; betrachtet man ausschließlich die Spannweite der beiden rejuvenierten Varianten, liegt diese bei 0,8 K.

Ein ähnliches Bild zeigt sich bei den Ergebnissen der Nadelpenetration, allerdings sind hier die Ergebnisse der gealterten Varianten (BM B R0a; BM B R1a und BM B R3a) mit einer Spannweite von 1,0 1/10mm sehr homogen. Die Spannweite bei den ungealterten Varianten beträgt 8,2 1/10mm, was auch hier mit einem geringen Penetrationswert der Referenzvariante im Vergleich zu den rejuvenierten Varianten begründet wird. Bei den rejuvenierten Varianten (BM B R1 und BM B R3) beträgt die Spannweite 2,2 1/10mm und zeigen damit sehr ähnliche Ergebnisse. Die Alterung durch das WAV bewirkt eine Bindemittelverhärtung bei der Referenzvariante von -11,3 1/10mm und von i. M. von -18,4 1/10mm mit einer Spannweite von 1,0 1/10mm bei den rejuvenierten Varianten (BM B R1 und BM B R3).

Die Alterungsindizes $\Delta_{A,TR\&K}$ und $I_{A,Pen}$ zeigen die Auswirkungen der Alterung auf die verjüngten Varianten. Bei den Rejuvenatorvarianten BM B R1 und BM B R3 liegen dieselben Alterungsindizes $I_{A,Pen}$ vor; auch die

Variante	Erweichungspunkt Ring und Kugel		Nadelpenetraion	
	$T_{R\&K}$ [°C]	$\Delta_{A,TR\&K}$ [K]	Pen [1/10 mm]	$I_{A,Pen}$ [-]
BM_2	53,0	7,6 [1)]	36,0	0,667 [1)]
BM_2$_{RTFOT}$	60,6		24,0	
BM_2$_{PAV}$	74,6	21,6 [2)]	11,0	0,306 [2)]
BM_B_0	59,1	---	26,0	---
BM_B_X	65,7	---	19,0	---
BM_B_R0	60,1	12,8	27,3	0,586
BM_B_R0a	72,9		16,0	
BM_B_R1	58,4	15,4	35,5	0,465
BM_B_R1a	73,8		16,5	
BM_B_R3	58,7	15,9	33,3	0,465
BM_B_R3a	74,6		15,5	

[1)] Alterungsindikator zur RTFOT-Alterung [2)] Alterungsindikator zur PAV-Alterung

Tab. 5-2: Ergebnisse Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie Nadelpenetration der Asphaltbinderschichtvarianten

dazugehörigen Alterungsveränderungen $\Delta_{A,TR\&K}$ der beiden Varianten sind sehr ähnlich. Deutliche Unterschiede werden im Vergleich zur Referenzvariante sichtbar, die die günstigsten Alterungsindikatoren von allen drei Varianten aufweist.

5.1.3 Asphalttragschichtvarianten AC T

Die Asphalttragschichtvarianten wurden ebenfalls mit dem komplementären Bindemittel 50/70 (BM 1) hergestellt. Das Frischbindemittel (BM 1) weist einen Erweichungspunkt von 49,0 °C auf, nach der Kurzzeitalterung (RTFOT) erhöht sich der Erweichungspunkt auf 54,8 °C (BM 1 RTFOT) und nach der Langzeitalterung (PAV) auf 68,6 °C (BM 1 PAV).

Das resultierenden Bindemittel (BM T 0) der Nullvariante weist einen Erweichungspunkt von 55,8 °C nach Herstellung und Extraktion (Kurzzeitalterungsäquivalent) auf. Damit zeigt sich auch hier, dass die Kurzzeitalterung durch das RTFOT-Verfahren beim BM 1 und bei der Nullvariante AC T 0 vergleichbar ist.

Als Zielwert für die Verjüngung sollte auch bei den Varianten der Asphalttragschicht der Erweichungspunkt der ungealterten Nullvariante (BM T 0) dienen. Allerdings stellte sich bei der Erstprüfung der Referenzvariante heraus, dass der hohe AG-Anteil (62,3%) und der sehr hohe Erweichungspunkt des Bindemittels aus dem Asphaltgranulate (86,8 °C) zu einer Rezeptur ohne komplementäres Bindemittel 50/70 führt. D.h. dass zur Ergänzung des Bindemittelgehaltes ausschließlich das weiche Bindemittel 160/220 (R0) eingesetzt wurde, wodurch der Zielwert aus der Nullvariante, aufgrund der einsetzbaren maximalen Menge des weichen Bindemittels (R0), unerreichbar bleibt. Daher ist der Zielwert von 55,8 nur theoretisch zu verstehen.

Die Initialvariante BM T X zeigte Erweichungspunkte von 78,2 °C vor der Alterung und 98,8 °C nach der Alterung. Die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TR\&K}$ beträgt damit 20,6 K. Die theoretisch zu erreichende Verjüngung, also die Differenz der Erweichungspunkt von BM T 0 und BM T X beträgt hiernach 22,4 K.

Mit der Erstprüfung für die Variante AC T R0 zeigte sich, das durch den vollständigen Einsatz des weichen Bindemittels (R0) als Zugabebindemittel ein Erweichungspunkt von 67,2 °C erzielt werden konnte. Für die Bindemittelvarianten mit den Rejuvenatoren R2 und R3 wurde dieser Wert als neuer Zielwert für die

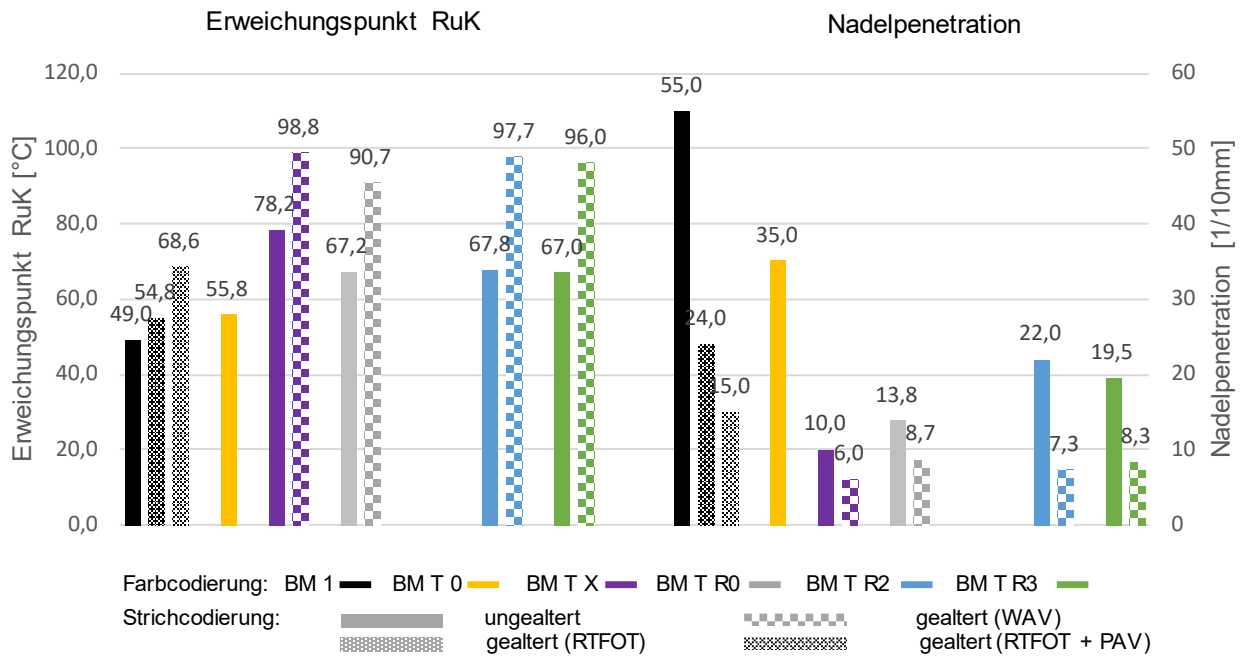

Bild 5-3: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfungen EP RuK und PEN für die Varianten des Asphalttragschichtmischgutes (AC T) vor der Alterung und nach der Alterung.

Bestimmung der Rejuvenatorzugabemenge angenommen, damit hinsichtlich der Verjüngung gleichwertige Ergebnisse ermittelt werden können.

Wie auch schon bei den Mischgutvarianten AC D und AC B zeigt sich hier, das die Rejuvenatorvarianten (BM T R2 und BM T R3) sehr ähnliche Erweichungspunkte im Vergleich zur Referenzvariante BM T R0 aufweisen. Die Erweichungspunkte der ungealterten Rejuvenatorvarianten BM T R2 und BM T R3 betragen 67,8 °C und 67,0 °C. Die mittlere Differenz zur Referenzvariante BM T R0 beträgt -0,2 K. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der Rejuvenatorvarianten vergleichbar und relativ homogen sind.

Bei den gealterten Varianten ist erkennbar, dass bei den Rejuvenatorvarianten (BM T R2a und BM T R3a) ähnliche Erweichungspunkte nach der Alterung (R = 1,7 K) mit dem WAV erzielt werden, wie bei der gealterte Initialvariante (BM T Xa). Mit 90,7 °C zeigt die gealterte Referenzvariante (BM T R0a) einen deutlich niedrigeren Erweichungspunkt nach der Alterung als die Rejuvenatorvarianten (BM T R2a und BM T R3a).

Für die Initialvariante wurde eine Alterungsveränderung von $\Delta_{A,TR\&K}$ von +20,6 K zwischen der ungealterten und gealterten Variante ermittelt. Die Alterungsveränderung liegt für die Referenzvariante bei +17,3 K und für die Rejuvenatorvarianten bei +29,9 K (BM T R2) und +29,0 K (BM T R3).

Für die Nadelpenetration zeigt sich, dass die rejuvenierten Varianten BM T R2 (22,0 1/10mm) und BM T R3 (19,5 1/10mm) wesentlich höhere Penetrationswerte aufweisen als die Referenzvariante BM T R0 (13,8 1/10mm). Die Spanweite R der verjüngten Varianten (BM T R0, BM T R2 und BM T R3) liegt bei 8,2 1/10mm, während die Spannweite R der rejuvenierten Varianten (BM T R2 und BM T R3) lediglich 2,5 1/10mm beträgt. Die gealterten verjüngten Varianten BM T R0a (8,7 1/10mm), BM T R2a (7,3 1/10mm) und BM T R3a (8,3 1/10mm) zeigen eine wesentlich geringere Spannweite von 1,4 1/10mm bei ihren Penetrationswerten. Daraus folgt, dass die Variante BM T R2 mit 0,332 den kleinsten Alterungsindex $I_{A,Pen}$ und somit die größte Alterungsempfindlichkeit aufweist. Der Alterungsindex $I_{A,Pen}$ der Variante BM T R3 beträgt 0,426 und ist damit etwas höher als der Alterungsindex der Variante BM T R2. Im Vergleich zur Referenzvariante BM T R0 ($I_{A,Pen}$ = 0,630) zeigen die rejuvenierten Varianten BM T R2 und BM T R3 allerdings eine ähnliche Alterungsempfindlichkeit.

Variante	Erweichungspunkt Ring und Kugel		Nadelpenetraion	
	$T_{R\&K}$ [°C]	$\Delta_{A,TR\&K}$ [K]	Pen [1/10 mm]	$I_{A,Pen}$ [-]
BM_1	49,0	5,8 [1)]	55,0	0,436 [1)]
BM_1$_{RTFOT}$	54,8	19,6 [2)]	24,0	0,273 [2)]
BM_1$_{PAV}$	68,6		15,0	
BM_T_0	55,8	---	35,0	---
BM_T_X	78,2	20,6	10,0	0,600
BM_T_Xa	98,8		6,0	
BM_T_R0	67,2	23,5	13,8	0,630
BM_T_R0a	90,7		8,7	
BM_T_R2	67,8	29,9	22,0	0,332
BM_T_R2a	97,7		7,3	
BM_T_R3	67,0	29,0	19,5	0,426
BM_T_R3a	96,0		8,3	

[1)] Alterungsindikator zur RTFOT-Alterung [2)] Alterungsindikator zur PAV-Alterung

Tab. 5-3: Ergebnisse Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie Nadelpenetration der Asphalttragschichtvarianten

5.1.4 Zusammenfassung Erweichungspunkt Ring und Kugel / Nadelpenetration

Mit Hilfe der Ergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel konnte gezeigt werden, dass die Kurzzeitalterung durch Herstellung und Extraktion äquivalent zum RTFOT abgebildet wurde. Des Weiteren zeigten die Ergebnisse auch, dass das WAV ein höheres Alterungsniveau im Vergleich zum PAV-Verfahren aufweist.

Die Ergebnisse des EP RuK zeigen ebenfalls eine enge Spannweite hinsichtlich einer Bewertung der Alterungsbeständigkeit. Da die einzelnen verjüngten Varianten auf Grundlage der Erweichungspunkte rezeptiert wurden, ist diese enge Spannweite insbesondere bei den ungealterten Varianten positiv zu bewerten ist.

Eine erste Tendenz hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit kann jedoch aus den Alterungsveränderungen $\Delta_{A,TR\&K}$ der ungealterten und gealterten Varianten abgelesen werden. Hierbei zeigt sich, dass die Referenzvarianten (R0) grundsätzlich die geringste Alterungsempfindlichkeit aufweisen, d.h. die Differenz zwischen den Erweichungspunkten der ungealterten und gealterten Bindemittelvarianten ist bei allen Mischgutvarianten am geringsten. Darüber hinaus weisen die Referenzvarianten auch grundsätzlich den höchsten Erweichungspunkt vor der Alterung und den niedrigsten Erweichungspunkt nach der Alterung auf. Damit zeigt der Alterungsindikator $\Delta_{A,TR\&K}$ deutliche Unterschiede zwischen den Referenzvarianten und den rejuvenierten Varianten. Im Gegensatz dazu zeigen die Rejuvenatorvarianten untereinander keine signifikanten Unterschiede.

Im Allgemein ist eine sehr ähnliche Tendenz bei den Ergebnissen der Nadelpenetration zu entnehmen. Auch hier zeigt die Referenzvariante grundsätzlich die günstigsten (größten) Alterungsindizes. Für die ungealterten Varianten stellt die Referenzvariante jeweils den kleinsten Penetrationswert.

Bei den gealterten Varianten der Deckschicht weist die Referenzvariante (BM D R0a) den gleichen Penetrationswert wie die Variante BM D R2a auf. Für die gealterte Referenzvariante der Binderschicht (BM B R0a) wurde ein 0,5 1/10mm geringerer Penetrationswert als für die Variante BM B R1a ermittelt. Bei den gealterten Tragschichtvarianten wurde für die Referenzvariante BM T R0a der höchste Penetrationswert

Dennoch ist eine leicht stärkere Abnahme der Penetration bei den rejuvenierten Varianten nach der Alterung im Vergleich zur Referenzvariante zu erkennen. Auch bei der Nadelpenetration zeigt der Alterungsindex $I_{A,Pen}$ die deutlichen Unterschiede zwischen der Referenzvariante und den rejuvenierten Varianten, die wesentlich empfindlicher auf die Alterung reagieren als die Referenzvariante.

5.2 Bitumen-Typisierung-Schnellverfahren

5.2.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D

Die Prüfergebnisse des Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahrens, hinsichtlich der BTSV-Temperatur (T_{BTSV}) sind äquivalent zu den Prüfergebnissen des Erweichungspunktes Ring und Kugel. Bis auf zwei Ausnahmen (BM 1 und BM D R1a) weisen alle Varianten Differenzen von kleiner ± 1,0 K gegenüber den entsprechenden Ergebnissen des EP RuK auf. Die Differenzen der Varianten BM 1 und BM D R1a sind kleiner ± 2,0 K.

Die nachfolgenden Ergebnisse sind in Bild 5-4 und Tab. 5-4 dargestellt.

Für das komplementäre Bindemittel BM 1 im frischen Zustand wurde eine BTSV-Temperatur (T_{BTSV}) von 50,9 °C und ein Phasenwinkel (δ_{BTSV}) von 81,9° bestimmt. Nach der Kurzzeitalterung im RTFOT zeigte sich eine T_{BTSV} von 55,2 °C und ein δ_{BTSV} von 79,2°, nach der Langzeitalterung im PAV wurden eine T_{BTSV} von 69,1 °C und ein δ_{BTSV} 74,0° gemessen.

Die Nullvariante des resultierenden Bindemittels (BM D 0) zeigt eine T_{BTSV} von 55,5 °C vor der Alterung und nach der Alterung mit dem WAV (BM D 0a) eine T_{BTSV} von 77,6 °C. Die Phasenwinkel δ_{BTSV} wurden 78,7° vor der Alterung und mit 70,4° nach der Alterung bestimmt.

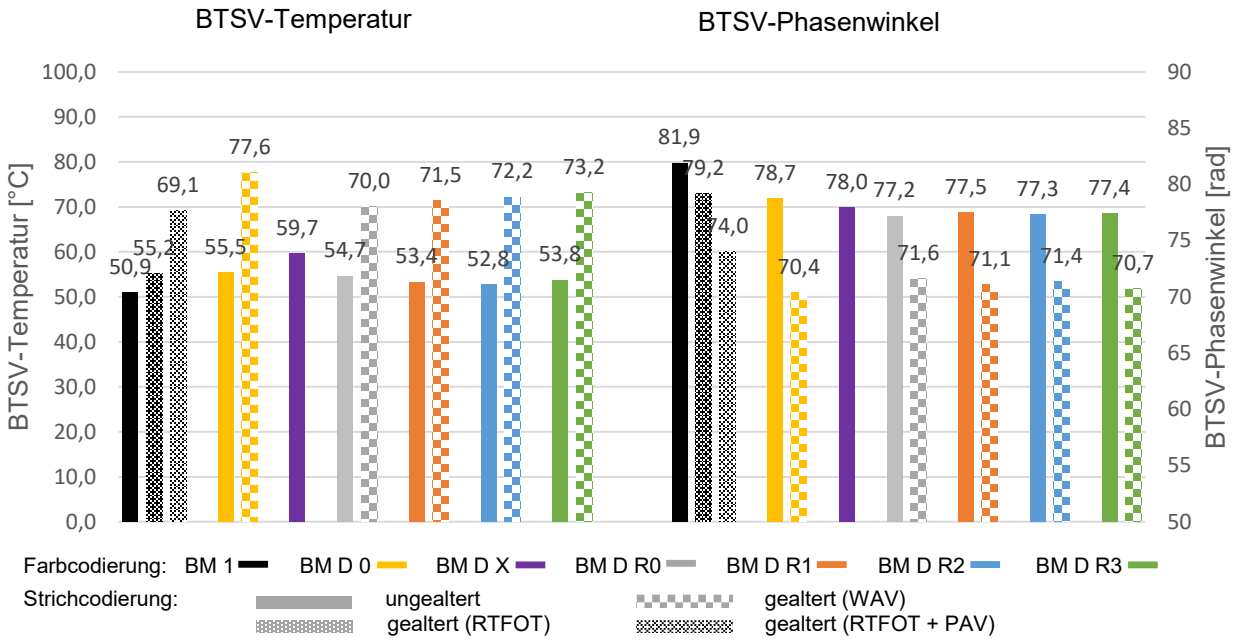

Bild 5-4: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung BTSV für die Varianten des Asphaltdeckschichtmischgutes (AC D) vor der Alterung und nach der Alterung.

Auch hierbei zeigt sich, dass die Kurzzeitalterung durch das RTFOT-Verfahren beim BM 1 und bei der Nullvariante AC D 0 durch das Herstellen und die Extraktion übereinstimmend abgebildet werden.

Die Wirksamkeit des Wuppertaler-Alterungsverfahren wird auch hier durch die Ergebnisse der Varianten BM 1 PAV (69,1 °C) und BM D 0a (77,6 °C) bestätigt. Mit dem WAV wurde ein Alterungsniveau erzielt, dass das PAV-Verfahren um 8,5 K übersteigt. Sowohl für die Referenzvariante als auch für die Rejuvenatorvarianten wird das Alterungsniveau des PAV-Verfahrens übertroffen.

Die ungealterte Referenzvariante (BM D R0) weist eine T_{BTSV} von 54,7 °C und ein δ_{BTSV} 77,2°; im Vergleich zur gealterten Variante (BM D R0a) mit einer T_{BTSV} von 70,0 °C und einem δ_{BTSV} 71,6° ergeben sich daraus Alterungsveränderungen von $\Delta_{A,TBTSV}$ = 15,3 K und $\Delta_{A,\delta BTSV}$ = -5,6°.

Bei den ungealterten Rejuvenatorvarianten (BM D R1 bis BM D R3) ergibt sich bei einer Spannweite von R = 1,0 K eine mittlere T_{BTSV} von 53,3 °C, die Ergebnisse des Phasenwinkels haben eine Spannweite von R = 0,2°. Die gealterten Varianten (BM D R1a bis BM D R3a) zeigen eine mittlere T_{BTSV} von 72,3 °C bei einer Spannweite von R = 1,7 K und einen mittleren Phasenwinkel von δ_{BTSV} = 71,1° bei einer Spannweite von R = 0,7°. Sowohl die ungealterten als auch die gealterten Varianten liefern damit sehr homogene Ergebnisse für die unterschiedlichen Rejuvenatoren. Die mittleren Alterungsveränderungen liegt hier bei $\Delta_{A,TBTSV}$ = 19,0 K und $\Delta_{A,\delta BTSV}$ = -6,3°.

Die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TBTSV}$ der Referenzvariante BM D R0 beträgt 15,3 K und die Differenz des Phasenwinkels liegt bei $\Delta_{A,\delta BTSV}$ = -7,9°. Die Rejuvenatorvarianten (BM D R1 bis BM D R3) weisen mittlere Alterungsveränderungen von 19,0 K bei einer Spannweite von 1,3 K (T_{BTSV}) sowie -6,3° bei einer Spannweite von 0,8° (δ_{BTSV}) auf. Die geringste Alterungsveränderung bei den Rejuvenatorvarianten ist bei der Variante (BM D R1) mit 18,1 K (T_{BTSV}) und –6,4° (δ_{BTSV}) gemessen worden. Die Varianten BM D R2 und BM D R3 weisen bei der T_{BTSV} jeweils eine Alterungsveränderung von 19,4 K auf; die Alterungsveränderungen beim Phasenwinkel liegen bei -5,9° (BM D R2) und -6,7° (BM D R3).

Variante	Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren			
	Temperatur		Phasenwinkel	
	T_{BTSV} [°C]	$\Delta_{A,TBTSV}$ [K]	$\delta\varepsilon_{BTSV}$ [°]	$\Delta_{A,\delta BTSV}$ [K]
BM_1	50,9	4,3 [1)]	81,9	- 2,7 [1)]
BM_1_{RTFOT}	55,2	18,2 [2)]	79,2	- 7,9 [2)]
BM_1_{PAV}	69,1		74,0	
BM_D_0	55,5	22,1	78,7	- 8,3
BM_D_0a	77,6		70,4	
BM_D_X	59,7	---	78,0	---
BM_D_R0	54,7	15,3	77,2	- 5,6
BM_D_R0a	70,0		71,6	
BM_D_R1	53,4	18,1	77,5	- 6,4
BM_D_R1a	71,5		71,1	
BM_D_R2	52,8	19,4	77,3	- 5,9
BM_D_R2a	72,2		71,4	
BM_D_R3	53,8	19,4	77,4	- 6,7
BM_D_R3a	73,2		70,7	

[1)] Alterungsindikator zur RTFOT-Alterung [2)] Alterungsindikator zur PAV-Alterung

Tab. 5-4: Ergebnisse des Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahrens der Asphaltdeckschichtvarianten

5.2.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B

Im Vergleich zu den Prüfergebnissen des Erweichungspunktes Ring und Kugel zeigen die Asphaltbinderschichtvarianten (AC B) sehr homogene Ergebnisse; die Spannweite bei den jeweiligen Differenzen zum EP-RuK-Ergebnis liegt bei 0,9 K. Abweichungen gibt es bei den Prüfergebnissen des Komplementärbindemittels BM 2, die Differenz zwischen EP RuK und T_{BTSV} beträgt 2,9 K im ungealterten Zustand und 4,1 K nach der Langzeitalterung im PAV.

Das komplementäre Bindemittel BM 2 weist im frischen Zustand eine BTSV-Temperatur (T_{BTSV}) von 55,9 °C und ein Phasenwinkel (δ_{BTSV}) von 81,4° auf. Nach der Kurzzeitalterung im RTFOT zeigte sich eine T_{BTSV} von 61,1 °C und ein δ_{BTSV} von 78,7°. Nach der Langzeitalterung im PAV wurden eine T_{BTSV} von 78,7 °C und ein δ_{BTSV} 73,3° bestimmt.

Die Nullvariante des resultierenden Bindemittels (BM B 0) zeigt eine T_{BTSV} von 59,4 °C und einen Phasenwinkel δ_{BTSV} von 78,7° im ungealterten Zustand. Für die ungealterte Initialvariante (BM B X) wurde eine T_{BTSV} von 66,0 °C und einen Phasenwinkel δ_{BTSV} von 75,7° ermittelt.

Die Wirksamkeit der Verjüngung zeigt sich auch hier im Vergleich zwischen der ungealterten Initialvariante, den verjüngten Varianten (BM B R0; BM B R1; BM B R3) und der Nullvariante. Die T_{BTSV}-Zunahme durch die Verwendung des Asphaltgranulates bei der Initialvarianten, ergibt sich aus der Differenz zwischen der T_{BTSV} der Initialvariante sowie der T_{BTSV}- der Nullvariante und beträgt 6,6 K. Der Vergleich zwischen Nullvariante und verjüngten Varianten zeigt, dass durch den Einsatz der Verjüngungsmittel eine relativ zielgenaue Absenkung der BTSV-Temperatur erzielt werden konnte. Die Spannweite zwischen den Prüfergebnissen der verjüngten Varianten liegt bei 1,5 K.

Die ungealterte Referenzvariante (BM B R0) weist eine T_{BTSV} von 60,0 °C und einen δ_{BTSV} von 75,1° auf; im Vergleich zur gealterten Variante (BM B R0a) mit einer T_{BTSV} von 72,6 °C und einem δ_{BTSV} 70,9° ergeben sich daraus Alterungsveränderungen von $\Delta_{A,TBTSV}$ = 12,6 K und $\Delta_{A,\delta BTSV}$ = -4,2°.

Die ungealterten Rejuvenatorvarianten (BM B R1 und BM B R3) weisen bei einer Spannweite von R = 0,5 K eine mittlere T_{BTSV} von 58,8 °C auf, die Ergebnisse des Phasenwinkels haben eine Spannweite von R = 0,1°. Die gealterten Varianten (BM B R1a und BM B R3a) zeigen eine mittlere T_{BTSV} von 74,2 °C

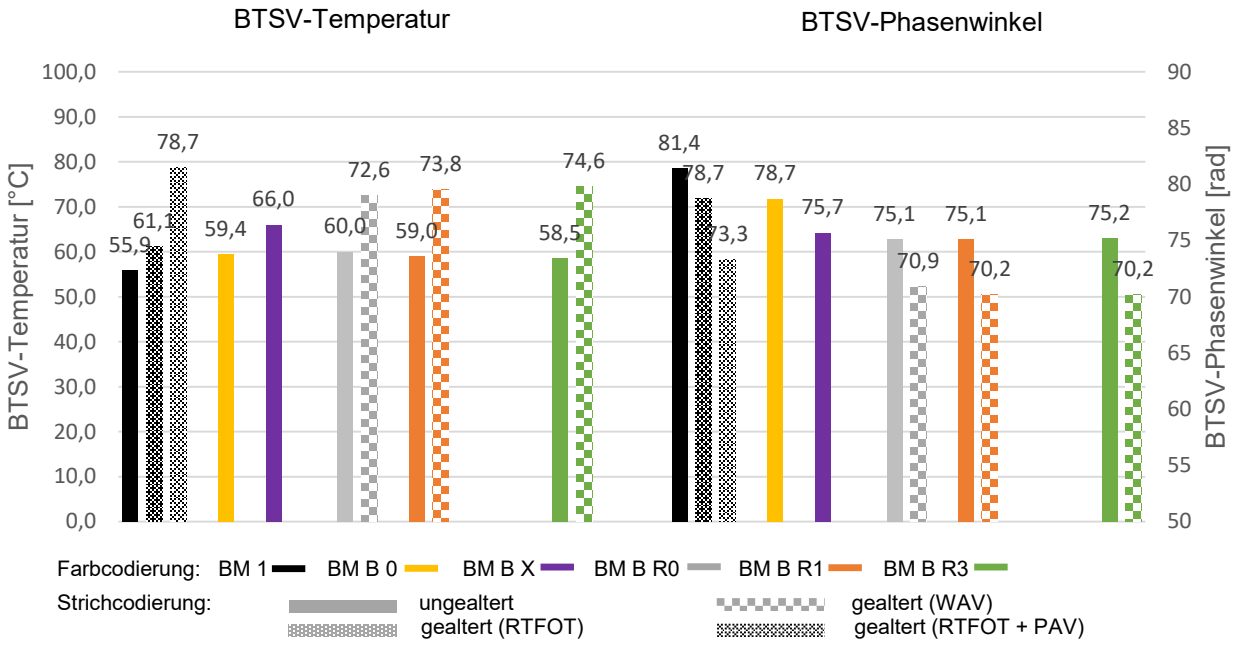

Bild 5-5: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung BTSV für die Varianten des Asphaltbinderschichtmischgutes (AC B) vor der Alterung und nach der Alterung.

bei einer Spannweite von R = 0,8 K, der Phasenwinkel der gealterten Rejuvenatorvarianten (BM B R1a und BM B R3a) beträgt jeweils 70,2°. Sowohl die ungealterten als auch die gealterten Varianten liefern damit sehr homogene Ergebnisse für die unterschiedlichen Rejuvenatoren.

Die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TBTSV}$ beträgt für die Referenzvariante (BM B R0) 12,6 K und die Alterungsveränderung des Phasenwinkels $\Delta_{A,\delta BTSV}$ liegt bei -4,2°. Die Rejuvenatorvarianten (BM B R1 bis BM B R3) weisen mittlere Alterungsveränderungen von 15,5 K ($\Delta_{A,TBTSV}$) bei einer Spannweite von 1,3 K

Variante	Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren			
	Temperatur		Phasenwinkel	
	T_{BTSV} [°C]	$\Delta_{A,TBTSV}$ [K]	$\delta\varepsilon_{BTSV}$ [°]	$\Delta_{A,\delta BTSV}$ [K]
BM_2	55,9	5,2 [1)]	81,4	- 2,7 [1)]
BM_2_{RTFOT}	61,1		78,7	
BM_2_{PAV}	78,7	22,8 [2)]	73,3	- 8,1 [2)]
BM_B_0	59,4	---	78,7	---
BM_B_X	66,0	---	75,7	---
BM_B_R0	60,0	12,6	75,1	- 4,2
BM_B_R0a	72,6		70,9	
BM_B_R1	59,0	14,8	75,1	- 4,9
BM_B_R1a	73,8		70,2	
BM_B_R3	58,5	16,1	75,2	- 5,0
BM_B_R3a	74,6		70,2	

[1)] Alterungsindikator zur RTFOT-Alterung [2)] Alterungsindikator zur PAV-Alterung

Tab. 5-5: Ergebnisse des Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahrens der Asphaltbinderschichtvarianten

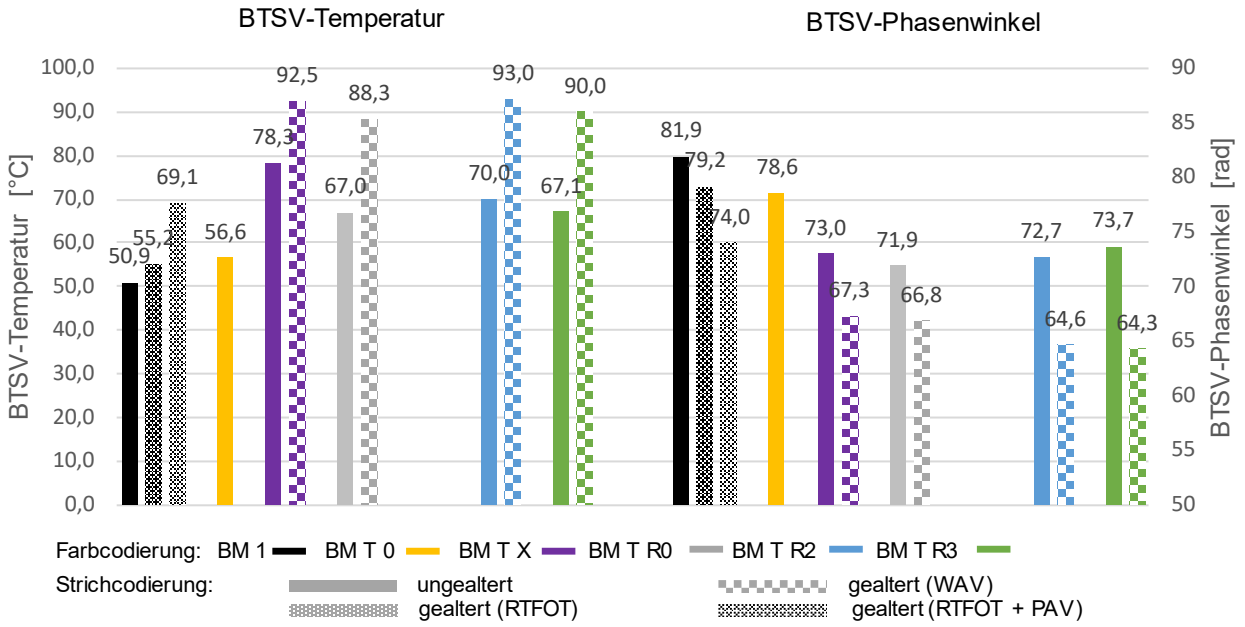

Bild 5-6: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfungen BTSV für die Varianten des Asphalttragschichtmischgutes (AC T) vor der Alterung und nach der Alterung.

und -5,0° ($\Delta_{A,\delta BTSV}$) bei einer Spannweite von 1,1° auf. Die geringste Alterungsveränderung der Rejuvenatorvarianten ist bei der Variante (BM B R1) mit 14,8 K und –4,9° ermittelt worden. Die Variante BM D R3 zeigt bei der T_{BTSV} eine Alterungsveränderung von 16,1 K und beim Phasenwinkel eine Alterungsveränderung von -5,0°.

5.2.3 Asphalttragschichtvarianten AC T

Auch die BTSV-Temperatur-Ergebnisse der Asphalttragschichtvarianten (AC T) zeigen teilweise sehr gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen des EP RuK. Größere Abweichungen können insbesondere bei gealterten Varianten mit Erweichungspunkten über 90 °C festgestellt werden. Die Abweichungen liegen zwischen -2,4 K und -6,3 K (R = 3,9 K); da die hier betroffenen Erweichungspunkte mit Glycerol als Badflüssigkeit bestimmt wurden, besteht die Möglichkeit, dass ein Vergleich der beiden Verfahren unter diesen Bedingungen nicht möglich ist.

Die Differenz zwischen der ungealterten Nullvariante (BM T 0) und der kurzzeit-gealterten Variante des komplementären Bindemittels (BM 1 RTFOT) zeigen auch hier, mit einer Differenz von 1,4 K, eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Kurzzeitalterung.

Im ungealterten Zustand ist für die Initialvariante eine T_{BTSV} von 78,3 °C und ein δ_{BTSV} 73,0° bestimmt worden. Für die gealterte Variante wurden Werte von 92,5 °C (T_{BTSV}) und 67,3° (δ_{BTSV}) ermittelt. Das entspricht einer Alterungsveränderung $\Delta_{A,TBTSV}$ von +14,2 °C und $\Delta_{A,\delta BTSV}$ von -5,7°.

Der Referenzvariante BM T R0 ist im ungealterten Zustand eine T_{BTSV} von 67,0 °C und einen δ_{BTSV} 71,9° zuzuordnen; im Vergleich zur gealterten Variante (BM T R0a) mit einer T_{BTSV} von 88,3 °C und einem δ_{BTSV} 66,8° ergeben sich daraus Alterungsveränderungen $\Delta_{A,TBTSV}$ von +21,3 K und $\Delta_{A,\delta BTSV}$ von -4,8°.

Für die ungealterten Rejuvenatorvarianten (BM T R2 und BM T R3) gilt bei einer Spannweite von R = 2,9 K eine mittlere T_{BTSV} von 68,6 °C , die Ergebnisse des Phasenwinkels haben eine Spannweite von R = 1,0°. Die gealterten Varianten (BM T R1a bis BM T R3a) zeigen eine mittlere T_{BTSV} von 91,5 °C bei einer Spannweite von R = 3,0 K und einen mittleren Phasenwinkel von δ_{BTSV} = 64,5° bei einer Spannweite von R = 0,3°. Hierbei ergeben sich mittlere Alterungsveränderungen von +22,9 °C ($\Delta_{A,TBTSV}$) und -8,8° ($\Delta_{A,\delta BTSV}$).

Variante	Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren			
	Temperatur		Phasenwinkel	
	T_{BTSV} [°C]	$\Delta_{A,TBTSV}$ [K]	$\delta\varepsilon_{BTSV}$ [°]	$\Delta_{A,\delta BTSV}$ [K]
BM_1	50,9	4,3 [1)]	81,9	- 2,7 [1)]
BM_1_{RTFOT}	55,2	18,2 [2)]	79,2	- 7,9 [2)]
BM_1_{PAV}	69,1		74,0	
BM_T_0	56,6	---	78,6	---
BM_T_X	78,3	14,2	73,0	- 5,7
BM_T_Xa	92,5		67,3	
BM_T_R0	67,0	21,3	71,9	- 5,1
BM_T_R0a	88,3		66,8	
BM_T_R2	70,0	23,0	72,7	- 8,1
BM_T_R2a	93,0		64,6	
BM_T_R3	67,1	22,9	73,7	- 9,4
BM_T_R3a	90,0		64,3	
[1)] Alterungsindikator zur RTFOT-Alterung [2)] Alterungsindikator zur PAV-Alterung				

Tab. 5-6: Ergebnisse des Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahrens der Asphalttragschichtvarianten

Die Alterungsveränderung der Referenzvariante BM T R0 für die T_{BTSV} liegt bei +21,3 K und die Alterungsveränderung des Phasenwinkels bei -4,8°. Die Rejuvenatorvarianten (BM T R1 bis BM T R3) weisen eine mittlere Alterungsveränderung $\Delta_{A,TBTSV}$ von +23,0 K bei einer Spannweite von 0,1 K und eine $\Delta_{A,\delta BTSV}$ von -8,8° bei einer Spannweite von 1,3° auf. Die geringsten Alterungsveränderungen bei den Rejuvenatorvarianten sind bei der Variante (BM T R3) mit +22,9 K und –8,1° gemessen worden. Die Variante BM T R2 weist Alterungsveränderung $\Delta_{A,TBTSV}$ von +23,0 K auf, die Alterungsveränderung beim Phasenwinkel liegt bei -9,4° (BM T R2).

5.2.4 Zusammenfassung Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren

Die Ergebnisse der BTSV-Temperatur spiegeln bis auf wenige Ausnahmen die Ergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel wider. Als Ausnahmen sind insbesondere die Erweichungspunkte der gealterten Asphalttragschichtvarianten (AC T R0, AC T R2 und AC T R3) mit Erweichungspunkten über 90 °C zu nennen.

Hinsichtlich des Phasenwinkels zeigt sich eine ausgeprägte Homogenität bei den ungealterten Varianten der Asphaltdeckschicht (R = 0,3°) und der Asphaltbinderschicht (R = 0,1°). Bei den ungealterten Varianten der Asphalttragschicht lässt sich diese Homogenität nicht erkennen, hier liegt die Spannweite bei 1,8°.

Eine ähnliche Homogenität, jedoch mit etwas größeren Spannweiten, lässt sich auch bei den gealterten Varianten erkennen. Die Spannweiten betragen 0,9° (AC D), 0,7° (AC B) und 2,5° (AC T).

Wie bei den Erweichungspunkten und der Nadelpenetration zeigen auch hier die Alterungsindikatoren $\Delta_{A,TBTSV}$ und $\Delta_{A,\delta BTSV}$ die deutlichen Unterschiede zwischen den Referenzvarianten und den rejuvenierten Varianten. Die Referenzvariante weist grundsätzlich die günstigeren Alterungsindikatoren gegenüber den Rejuvenatorvarianten auf.

5.3 Brechpunkt nach Fraaß (BPFra)

Für einige maßgebliche Varianten wurde der Brechpunkt nach Fraaß zur Abschätzung Bindemittelverhaltens bei tiefen Temperaturen bestimmt. Die alterungsbedingten Veränderungen werden mit dem Alterungsindikator $\Delta_{A,TFraaß}$ dargestellt.

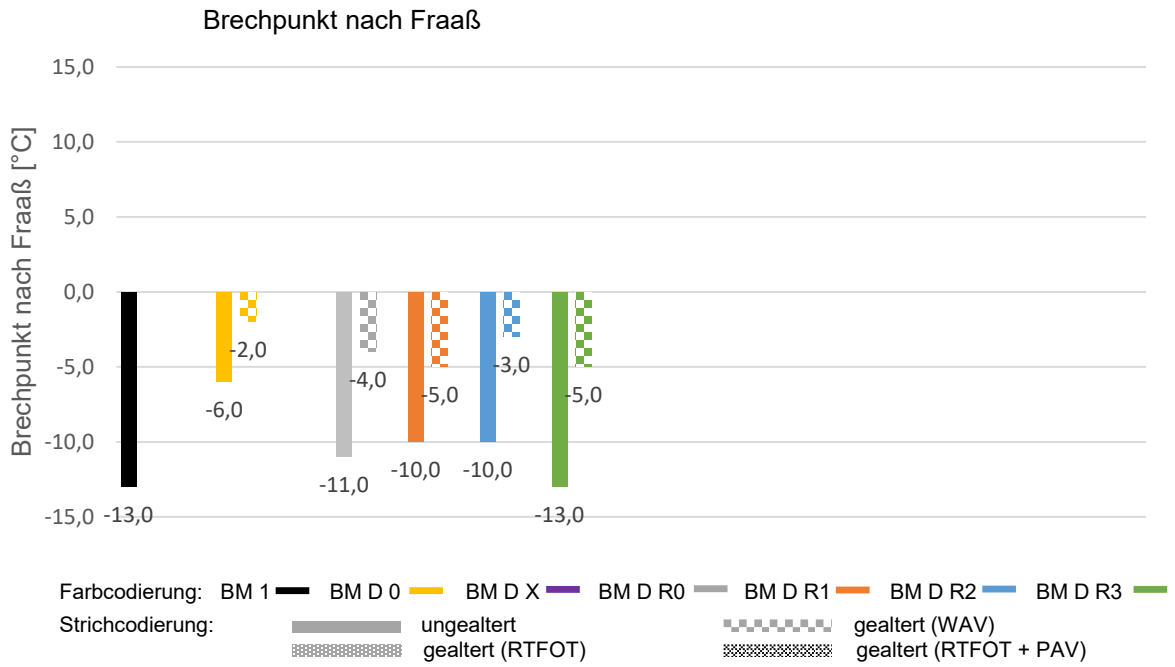

Bild 5-7: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung Brechpunkt nach Fraaß für die Varianten des Asphaltdeckschichtmischgutes (AC D) vor der Alterung und nach der Alterung.

5.3.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D

Die ungealterten und gealterten Varianten der Asphaltdeckschicht weisen mehrheitlich homogene Ergebnisse auf.

Für das Komplementärbindemittel wurde ein Brechpunkt von -13,0 °C im ungealterten Zustand bestimmt.

Den höchsten Brechpunkt unter den ungealterten Varianten wird für die Nullvariante mit -6,0 °C ermittelt. Mit -13,0 °C weist die Variante BM D R3 den tiefsten Brechpunkt der ungealterten Rejuvenatorvarianten auf, die Varianten BM D R1 und BM D R2 haben jeweils einen Brechpunkt von -10,0 °C. Die Referenzvariante zeigt einen Brechpunkt von -11,0 °C.

Der Brechpunkt von -2,0 °C ist für die gealterte Nullvariante ermittelt worden; der Brechpunkt der Referenzvariante beträgt -4,0 °C. Die Rejuvenatorvarianten weisen Brechpunkte von -3,0 °C (BM D R2) und -5,0 °C (BM D R1 und BM D R3) auf.

Die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TFraaß}$ der Brechpunkte liegt zwischen 4,0 K und 8,0 K. Die Variante BM D R3 weist mit 8,0 K die höchste Alterungsveränderung, aber nicht den höchsten Brechpunkt auf. Der höchste Brechpunkt nach Alterung (WAV) zeigt sich bei der Nullvariante (BM D 0a), die ebenfalls die geringste Alterungsveränderung (4,0 K) aufweist. Die Referenzvariante und die Variante BM D R2 haben jeweils eine alterungsbedingte Veränderung von 7,0 K zwischen ihren ungealterten und gealterten Varianten. Die Variante BM D R1 zeigt eine Alterungsveränderung von 5,0 K und hat damit die geringste Alterungsveränderung unter den verjüngten Varianten.

5.3.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B

Bei der Asphaltbinderschicht weisen die Ergebnisse der ungealterten verjüngten Varianten ebenfalls eine relativ gute Homogenität auf. Für die Referenzvariante wurde ein Brechpunkt von -6,5 °C vor der Alterung und von -3,5 °C nach der Alterung ermittelt. Die Variante BM B R1 weist Brechpunkte von -9,0 °C vor Alterung sowie -4,0 °C nach Alterung auf; die Brechpunkte zur Variante BM B R3 sind -8,5 °C vor Alterung und -4,5 °C nach Alterung.

Variante	Brechpunkt nach Fraaß	
	BP Fra [°C]	$\Delta_{A,TFraaß}$ [K]
BM_1	- 13,0	---
BM_1_{RTFOT}	---	---
BM_1_{PAV}	---	
BM_D_0	- 6,0	4,0
BM_D_0a	- 2,0	
BM_D_X	---	---
BM_D_R0	- 11,0	7,0
BM_D_R0a	- 4,0	
BM_D_R1	- 10,0	5,0
BM_D_R1a	- 5,0	
BM_D_R2	- 10,0	7,0
BM_D_R2a	- 3,0	
BM_D_R3	- 13,0	8,0
BM_D_R3a	- 5,0	

Tab. 5-7: Ergebnisse Brechpunkt nach Fraaß für die Asphaltdeckschichtvarianten

Daraus ergibt sich die größte Alterungsveränderung $\Delta_{A,TFraaß}$ mit 5,0 K bei der Variante BM B R1, die Referenzvariante weist mit 3,0 K die geringste Alterungsveränderung auf. Für die Variante BM B R3 wurde eine Alterungsveränderung von 4,0 K ermittelt.

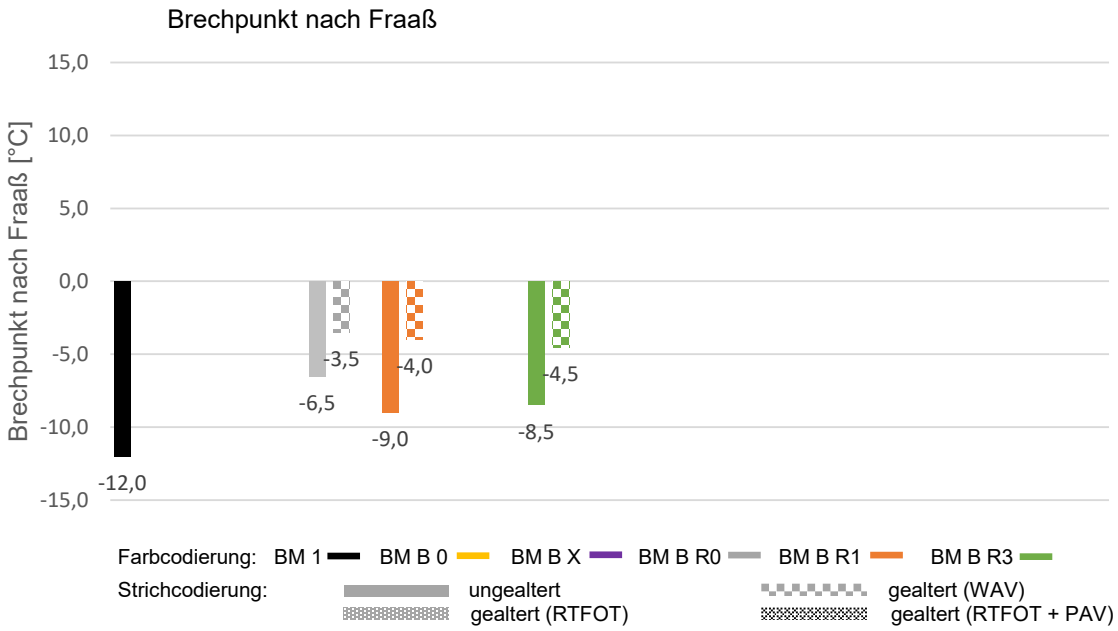

Bild 5-8: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung Brechpunkt nach Fraaß für die Varianten des Asphaltbinderschichtmischgutes (AC B) vor der Alterung und nach der Alterung.

Variante	Brechpunkt nach Fraaß	
	BP Fra [°C]	$\Delta_{A,TFraaß}$ [K]
BM_2	- 12,0	---
BM_2_{RTFOT}	---	---
BM_2_{PAV}	---	
BM_B_0	---	---
BM_B_X	---	---
BM_B_R0	- 6,5	3,0
BM_B_R0a	- 3,5	
BM_B_R1	- 9,0	5,0
BM_B_R1a	- 4,0	
BM_B_R3	- 8,5	4,0
BM_B_R3a	- 4,5	

Tab. 5-8: Ergebnisse Brechpunkt nach Fraaß für die Asphaltbinderschichtvarianten

5.3.3 Asphalttragschichtvarianten AC T

Durch die Verwendung eines Asphaltgranulates mit einem hohen Erweichungspunkt und einem relativ hohen Anteil in der Mischgutzusammensetzung resultiert ein relativ hartes Bindemittel, was sich auch bei den Ergebnissen des Brechpunktes nach Fraaß bemerkbar macht.

Die ungealterte Initialvariante (BM T X) liefert einen Brechpunkt von +3,0 °C vor der Alterung (WAV) und +10,0 °C nach der Alterung.

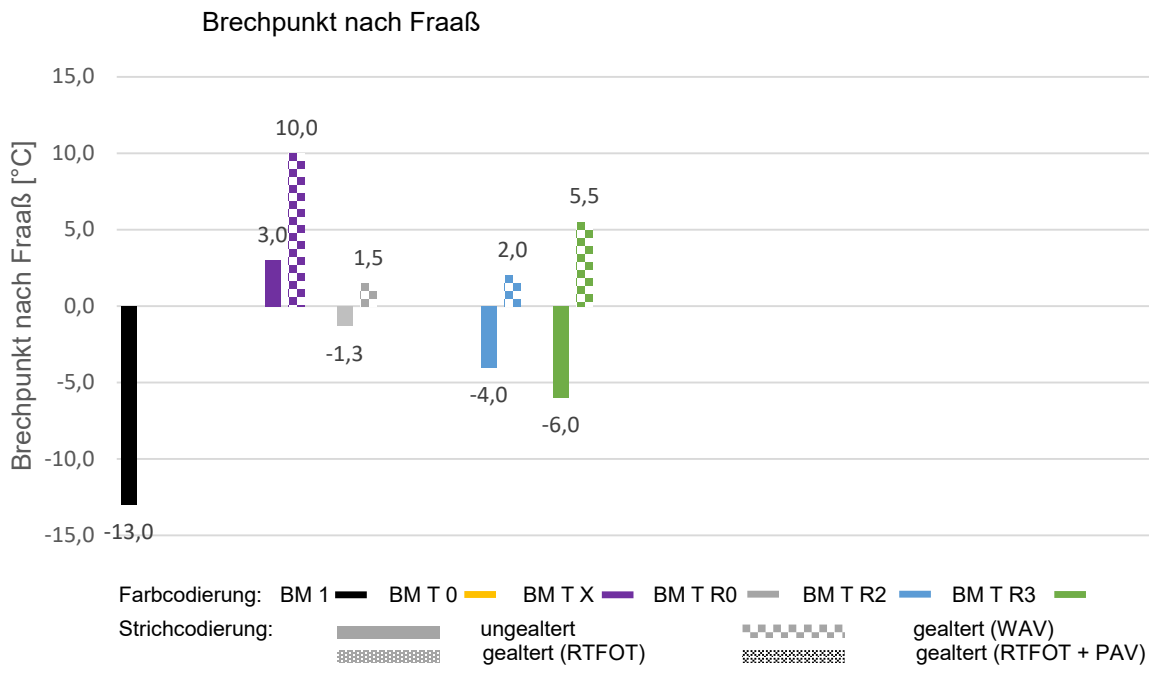

Bild 5-9: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung Brechpunkt nach Fraaß für die Varianten des Asphalttragschichtmischgutes (AC T) vor der Alterung und nach der Alterung.

Variante	Brechpunkt nach Fraaß	
	BP Fra [°C]	$\Delta_{A,TFraaß}$ [K]
BM_1	- 13,0	---
BM_1$_{RTFOT}$	---	---
BM_1$_{PAV}$	---	
BM_T_0	---	---
BM_T_X	3,0	7,0
BM_T_Xa	10,0	
BM_T_R0	- 1,3	2,8
BM_T_R0a	1,5	
BM_T_R2	- 4,0	6,0
BM_T_R2a	2,0	
BM_T_R3	- 6,0	11,5
BM_T_R3a	5,5	

Tab. 5-9: Ergebnisse Brechpunkt nach Fraaß für die Asphalttragschichtvarianten

Bei den verjüngten Variante (BM T R0; BM T R2 und BM T R3) liegen die Brechpunkte mit -1,3 °C; -4,0 °C und -6,0 °C noch im negativen Zahlenbereich, während die Brechpunkte nach der Alterung auch bei den verjüngten Varianten (BM T R0a; BM T R2a und BM T R3a) mit +1,5 °C, +2,0 °C und +5,5 °C ausschließlich im positiven Wertebereich gemessen wurden.

Während die Referenzvariante BM T R0 mit 2,8 K eine relativ kleine Alterungsveränderung $\Delta_{A,TFraaß}$ aufweist, zeigen die Rejuvenatorvarianten wesentlich größere Veränderungen. Für die Variante BM T R2 wurde eine Alterungsveränderung von 6,0 K und für die Variante BM T R3 eine Alterungsveränderung von 11,5 K ermittelt.

5.3.4 Zusammenfassung Brechpunkt nach Fraaß

Die Ergebnisse des Brechpunktes nach Fraaß liefern überschaubare, aber dennoch homogene Ergebnisse für die Asphaltdeckschicht und die Asphaltbinderschicht. Hierbei lassen sich keine klaren Unterschiede für eine Bewertung der Alterungsbeständigkeit festmachen, obwohl die rejuvenierten Varianten stets größere Alterungsveränderungen aufweisen als die Referenzvariante. Erst die Varianten der Asphalttragschicht zeigen deutliche Unterschiede. Während die Referenzvariante (BM T R0) eine sehr kleine Alterungsveränderung (2,8 K) im Brechpunkt zwischen der ungealterten und gealterten Variante aufweist gibt es bei den Varianten BM T R2 (6,0 K) und BM T R3 (11,5 K) verhältnismäßig große Veränderungen durch die Alterung.

5.4 Zusammenfassung Bindemittelprüfungen

Mit Hilfe der Ergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel konnte gezeigt werden, dass die Kurzzeitalterung durch Herstellung und Extraktion äquivalent zum RTFOT abgebildet wurde. Des Weiteren zeigten die Ergebnisse auch, dass das WAV ein erhöhtes Alterungsniveau zum PAV-Verfahren aufweist.

Die Ergebnisse des EP RuK zeigen eine enge Spannweite hinsichtlich einer Analyse der Alterungsbeständigkeit. Da die einzelnen verjüngten Varianten auf Grundlage der Erweichungspunkte rezeptiert wurden, ist diese enge Spannweite insbesondere bei den ungealterten Varianten positiv zu bewerten.

Eine erste Tendenz hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit kann jedoch aus den Alterungsveränderungen $\Delta_{A,TR\&K}$ der ungealterten und gealterten Varianten abgelesen werden. Hierbei zeigt sich, dass die Referenzvarianten (R0) grundsätzlich die geringste Alterungsempfindlichkeit aufweisen, d.h. die Differenz zwischen den Erweichungspunkten der ungealterten und gealterten Referenzvarianten ist bei allen Mischgutvarianten am geringsten. Darüber hinaus weisen die Referenzvarianten im Vergleich zu den jeweiligen Rejuvenatorvarianten grundsätzlich den höchsten Erweichungspunkt vor der Alterung und den niedrigsten Erweichungspunkt nach der Alterung auf. Damit zeigt der Alterungsindikator $\Delta_{A,TR\&K}$ deutliche Unterschiede zwischen der Referenzvarianten und den rejuvenierten Varianten. Im Gegensatz dazu zeigen die Rejuvenatorvarianten untereinander keine signifikanten Unterschiede.

Im Allgemein ist eine sehr ähnliche Tendenz den Ergebnissen der Nadelpenetration zu entnehmen. Auch hier zeigt die Referenzvariante grundsätzlich die günstigsten (größten) Alterungsindizes. Für die ungealterten Varianten stellt die Referenzvariante ebenfalls jeweils den kleinsten Penetrationswert.

Bei den gealterten Varianten der Deckschicht weist die Referenzvariante (BM D R0a) den gleichen Penetrationswert wie die Variante BM D R2a auf. Für die gealterte Referenzvariante der Binderschicht (BM B R0a) wurde ein 0,5 1/10mm geringerer Penetrationswert als für die Variante BM B R1a ermittelt. Bei den gealterten Tragschichtvarianten wurde für die Referenzvariante BM T R0a der höchste Penetrationswert

Dennoch ist eine leicht stärkere Abnahme der Penetration bei den rejuvenierten Varianten nach der Alterung im Vergleich zur Referenzvariante zu erkennen. Auch bei der Nadelpenetration zeigt der Alterungsindex $I_{A,Pen}$ die deutlichen Unterschiede zwischen der Referenzvariante und den rejuvenierten Varianten, die wesentlich empfindlicher auf die Alterung reagieren als die Referenzvariante.

Die Ergebnisse der BTSV-Temperatur spiegeln bis auf wenige Ausnahmen die Ergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel wider. Als Ausnahmen sind insbesondere die Erweichungspunkte der gealterten Asphalttragschichtvarianten (AC T R0, AC T R2 und AC T R3) mit Erweichungspunkten über 90 °C zu nennen.

Hinsichtlich des Phasenwinkels zeigt sich eine ausgeprägte Homogenität bei den ungealterten Varianten der Asphaltdeckschicht (R = 0,3°) und der Asphaltbinderschicht (R = 0,1°). Diese Homogenität lässt sich bei den ungealterten Varianten der Asphalttragschicht nicht erkennen, hier liegt die Spannweite bei 1,8°.

Eine ähnliche Homogenität, jedoch mit etwas größeren Spannweiten, lässt sich auch bei den gealterten Varianten erkennen. Die Spannweiten betragen 0,9° (AC D), 0,7° (AC B) und 2,5° (AC T).

Wie bei dem Erweichungspunkt und der Nadelpenetration zeigen auch beim Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren die Alterungsindikatoren $\Delta_{A,TBTSV}$ und $\Delta_{A,\delta BTSV}$ die deutlichen Unterschiede zwischen den Referenzvarianten und den rejuvenierten Varianten. Die Referenzvariante weist grundsätzlich die günstigeren Alterungsindikatoren gegenüber den Rejuvenatorvarianten auf.

Die Ergebnisse des Brechpunktes nach Fraaß liefern überschaubare, aber dennoch homogene Ergebnisse für die Asphaltdeckschicht und die Asphaltbinderschicht. Hierbei lassen sich keine klaren Unterschiede für eine Bewertung der Alterungsbeständigkeit festmachen, obwohl die rejuvenierten Varianten stets größere Alterungsveränderungen aufweisen als die Referenzvariante. Erst die Varianten der Asphalttragschicht zeigen deutliche Unterschiede. Dabei ist die Alterungsveränderung im Brechpunkt zwischen der ungealterten und gealterten Variante der Referenzvariante (BM T R0) sehr klein (2,8 K). Die Varianten BM T R2 (6,0 K) und BM T R3 (11,5 K) zeigen verhältnismäßig große Veränderungen durch die Alterung.

6 Prüfung der Asphaltperformance

Die Asphaltperformance soll an Hand der Prüfergebnisse verschiedener performance-orientierter Prüfverfahren durchgeführt werden. Für alle Asphaltarten (AC D, AC B und AC T) ist die Steifigkeit nach den TP Asphalt-StB Teil 26 [49] sowie das Kälteverhalten mit dem Einaxialen Zugversuch und dem Abkühlversuch nach den TP Asphalt-StB Teil 46A [49] bestimmt worden. Des Weiteren werden für die Beurteilung und den Vergleich der Dauerhaftigkeit zwischen den ungealterten und gealterten Asphaltvarianten bei der Asphaltdeckschicht und der –binderschicht die Prüfung der Standfestigkeit mit

dem Einaxialen Druckschwellversuch nach den TP Asphalt-StB Teil 25 B1 [50] und bei der Asphalttragschicht die Ermüdungsbeständigkeit nach TP Asphalt-StB Teil 24 [51] geprüft.

6.1 Bestimmung der Asphalt-Steifigkeit

Als ein wesentliches Bewertungskriterium für die Alterung von Asphalt ist die Steifigkeit zu sehen, da sich durch die Alterung des Asphaltes zwangsläufig eine Versteifung des Asphaltes vollzieht (Steifigkeitszunahme). Die Beurteilung der Steifigkeitszunahme durch Alterung erfolgt anhand der Prüfergebnisse des Spaltzug-Schwellversuches (nach TP Asphalt-StB Teil 26 [49]). Hierzu werden an ungealterten und gealterten Asphaltvarianten die Steifigkeiten bei verschiedenen Temperaturen (-10 °C, 0 °C, +10 °C und +20 °C) sowie verschiedenen Belastungsfrequenzen (10,0 Hz; 5,0 Hz; 3,0 Hz; 1,0 Hz; 0,3 Hz und 0,1 Hz) bestimmt. Aus den Laborergebnissen sind für jede Asphaltvariante die Hauptkurven ermittelt worden.

Die Bewertung der Alterungsbeständigkeit erfolgt durch den direkten Vergleich der Steifigkeitsmodule bei mittleren Temperaturen (+20 °C) und tieferen Temperaturen (-10 °C) sowie einer Belastungsfrequenz von 10 Hz. Die gewählten Temperaturen geben zum einen die Grenztemperaturen der Prüfung nach TP Asphalt-StB Teil 26 wieder und zum anderen zeigen die Ergebnisse ein gutes Abbild der Steifigkeitsniveaus bei mittleren und tiefen Temperaturen. Durch diesen Vergleich können erste Auswirkungen der Alterung auf die Steifigkeit erkannt werden. Dazu werden die Ergebnisse der ungealterten und gealterten Varianten in einem Säulendiagramm gegenübergestellt.

In einem weiteren Diagramm sind jeweils alle Hauptkurven eines Asphaltmischgutes sowie der Alterungsindex $I_{A,E(T)}$ dargestellt. Der Alterungsindex ermöglicht einen direkten Blick auf die Auswirkungen der Versteifung durch Alterung zu den jeweiligen Temperatur- und Belastungsniveaus.

Zudem sind verschiedene Ergebnisse zu unterschiedlichen Temperatur- und Belastungsniveaus in einer Tabelle zusammengestellt. Die Tabelle enthält die in den Laboruntersuchern ermittelten Werte der Steifigkeitsmodule bei (-10 °C/10 Hz) und (+20 °C/10 Hz) sowie die aus der Hauptkurve berechneten Steifigkeitsmodule für eine sehr tiefe Temperatur bei (-40 °C/1,0 Hz) und eine hohe Temperatur bei (+50 °C/0,1 Hz). Diese Bedingungen entsprechen in etwa den Grenzen der Temperatur-Frequenz-Äquivalente (x*) der Hauptkurven bei (x* = -4,0 und x* = 8,0). Die Betrachtung der Grenzbereiche ist notwendig, da insbesondere die Versteifung durch Alterung bei tiefen Temperaturen als kritisch zu betrachten ist, da sich dabei kritische Spannungszustände ergeben können. Eine Versteifung durch Alterung bei mittleren und hohen Temperaturen hingegen kann zu positiven Effekten bezogen auf die Standfestigkeit führen.

6.1.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D – Beurteilung der Steifigkeitszunahme

Für die Asphaltdeckschichtvarianten sind die Nullvariante, die Referenzvariante und drei Rejuvenatorvarianten untersucht worden. Das Bild 6-1 zeigt eine wesentliche Übersicht der Prüfergebnisse bei den Temperaturen -10 °C und +20 °C sowie einer Frequenz von 10 Hz.

Hier ist erkennbar, dass die Nullvariante sowohl bei (-10 °C/10 Hz) als auch bei (+20 °C/10 Hz) jeweils die höchste Steifigkeit im Vergleich zu den ungealterten und gealterten Varianten aufweist. Gleichzeitig stellt sie auch die geringsten Alterungsindizes zu diesen Bedingungen.

Ein Vergleich der verjüngten Varianten bei (-10 °C/10 Hz) zeigt insgesamt einen mittleren Alterungsindex von 1,088 bei einer Spannweite von 0,124.

Für die ungealterte Referenzvariante wurde der höchste Steifigkeitsmodul gegenüber den ungealterten rejuvenierten Varianten ermittelt. Mit absteigenden Steifigkeitsmodulen folgen die Varianten AC D R1, AC D R2 und AC D R3.

Bei den gealterten und verjüngten Varianten ist der Steifigkeitsmodul bei (-10 °C/10 Hz) der Rejuvenatorvariante AC D R3a etwas höher als der Steifigkeitsmodul der Referenzvariante AC D R0a. Die Rejuvenatorvarianten AC D R1a und AC D R2a weisen geringere Steifigkeitsmodule im Vergleich zur gealterten Referenzvariante auf.

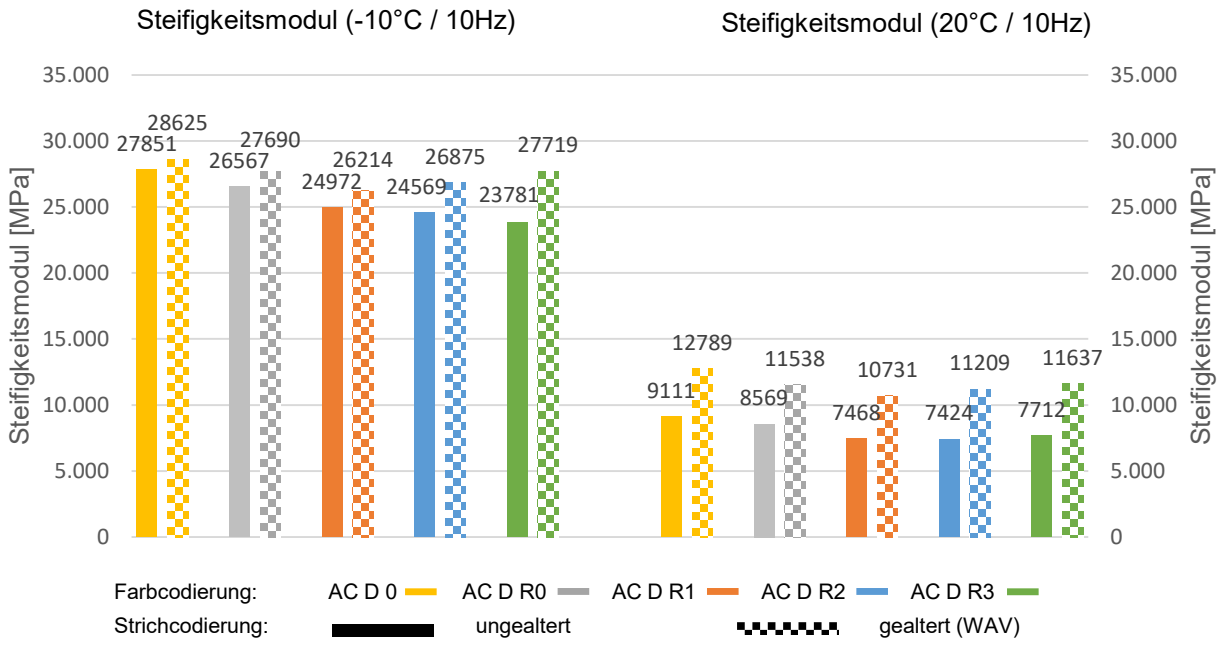

Bild 6-1: Steifigkeitsmodule der ungealterten und gealterten Asphaltdeckschichtvarianten bei Temperaturen von -10 °C und 20 °C sowie einer Belastungsfrequenz von 10 Hz.

Im Vergleich zu den anderen verjüngten Varianten weist die Variante AC D R3 die größte Differenz zwischen den Steifigkeitsmodulen der ungealterten und gealterten Variante auf. Folglich hat sie auch den höchsten Alterungsindex bei (-10 °C/10 Hz).

Die geringste Differenz und damit den geringsten Alterungsindex bei (-10 °C/10 Hz) zeigt die Referenzvariante AC D R0 im Vergleich zu den verjüngten Varianten. Darauf folgen mit zunehmendem Alterungsindex die Varianten AC D R1 und AC D R2 (vgl. Tab. 6-1).

Im mittleren Temperaturbereich (+20 °C) und bei einer Frequenz von 10 Hz zeigt sich ein ähnliches Bild, die Nullvariante hat auch unter diesen Prüfbedingungen jeweils im ungealterten und gealterten Zustand die höchsten Steifigkeitsmodule. Der Alterungsindex beträgt 1,404.

Ein mittlerer Alterungsindex von 1,451 mit einer Spannweite von 0,164 ergibt sich unter Betrachtung der Gesamtheit der verjüngten Varianten.

Auch hier zeigt die ungealterte Referenzvariante mit 9111 MPa den höchsten Steifigkeitsmodul im Vergleich zu den ungealterten Rejuvenatorvarianten, für die folgende Steifigkeitsmodule ermittelt wurden: AC D R1 mit 7468 MPa, AC D R2 mit 7424 MPa und AC D R3 mit 7712 MPa.

Bei den gealterten und verjüngten Varianten ist der Steifigkeitsmodul bei (20 °C/10 Hz) der Rejuvenatorvariante AC D R3a etwas höher als das Steifigkeitsmodul der Referenzvariante AC D R0a. Die Rejuvenatorvarianten AC D R1a und AC D R2a weisen geringere Steifigkeitsmodule im Vergleich zur gealterten Referenzvariante auf.

Die zwei Varianten mit den höchsten Alterungsindizes bei (-10 °C/10 Hz) haben auch bei (+20 °C/10 Hz), die höchsten Alterungsindizes. Zudem sind die Alterungsindizes mit 1,510 (AC D R2) und mit 1,509(AC D R3) fast gleich. Den geringsten Alterungsindex weist die Referenzvariante mit 1,346 auf; die Variante AC D R1 hat einen Alterungsindex von 1,437.

Das Bild 6-2 zeigt die Hauptkurven und die als Kurve dargestellten Alterungsindizes für alle untersuchten Varianten. Die Darstellung der Hauptkurven und der Alterungskurven erfolgt nach dem Temperatur-

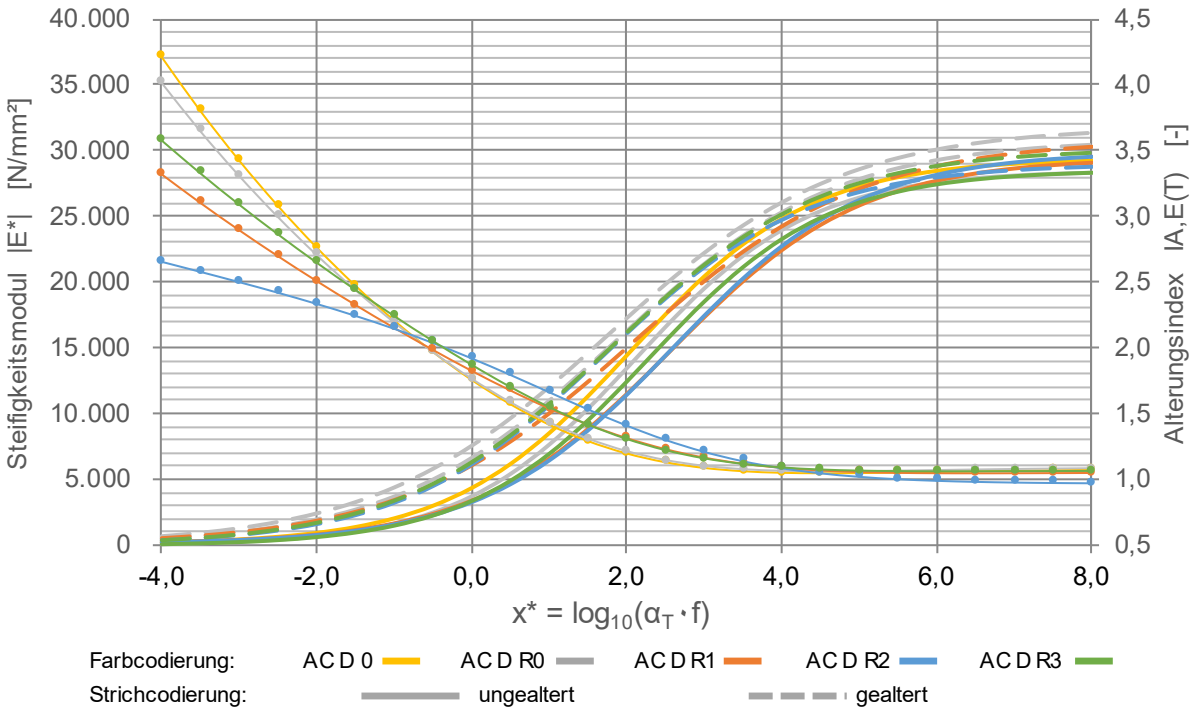

Bild 6-2: Hauptkurven der Asphaltdeckschichtvarianten mit Darstellung der Alterungsindizes zu verschiedenen Temperatur-Frequenz-Äquivalenten

Frequenz-Äquivalenz-Prinzip gemäß TP Asphalt-StB Teil 26. Demzufolge gibt es für jede Kombination aus Temperatur und Frequenz ein entsprechendes Belastungsniveau (x*).

Die Belastungsniveaus liegen üblicherweise im Bereich von -4,0 bis +8,0 und decken dabei einen Temperaturbereich von +50,0 °C bis -40,0 °C ab. Dabei ist zu beachten, je kleiner der Wert des Belastungsniveaus desto höher ist die Temperatur der Belastungskombination.

Bei der Betrachtung enger Spannweiten von Belastungsniveaus kommt es, bedingt durch die Frequenz, zu Verschiebungen im Temperaturbereich, sodass es durchaus Belastungsniveaus gibt, deren Temperatur kleiner der Temperatur des wertemäßigen größeren Belastungsniveaus ist. Des Weiteren gibt die Größe des Wertes des Belastungsniveaus keine Auskunft über die Belastungsintensität.

Die Analyse der Alterungskurven erfolgt grundsätzlich von tiefen Temperaturen (x* = 8,0) hin zu hohen Temperaturen (x* = -4,0) und damit entgegen der Laufrichtung der Abszissen-Achse.

Bei der Betrachtung der Alterungskurven ist erkennbar, dass der Verlauf der Alterungskurven im Bereich von tiefen Temperaturen, mit Belastungsniveaus von (x* = 8,0 bis 6,0) für alle Varianten nahezu konstant ist (Steigung der Alterungskurve < 0,010).

Das Belastungsniveau von (x* = +4,0 bis +8,0) entspricht Temperaturen kleiner -10 °C. In diesem Bereich entspricht der Mittelwert des Alterungsindex aller Varianten 1,049 bei einer Spannweite von 0,114; wobei das Maximum (1,090) und das Minimum (0,975) bei der Variante AC D R2 zu finden sind.

Im Bereich von (x* = +6,0 bis +4,0) beginnt für alle Varianten ein progressiver Verlauf der Alterungskurven. Die Variante R2 zeigt den frühesten Anstieg bei x* = +6,0; darauf folgen die Variante R1 (x* = +5,0) und R3 (x* = +4,5). Ein ausgeprägter progressiver Verlauf ist bei der Nullvariante und der Referenzvariante ab (x* = +4,0) erkennbar, wobei die Verläufe auch in ihrer Größenordnung sehr ähnlich sind. Die Kurven der Varianten AC D R1 und AC D R3 verlaufen ebenfalls in diesem Bereich sehr ähnlich, ihre Kurven weisen allerdings größere Krümmungen auf als die Kurven der Referenzvariante und der Nullvariante. Der Verlauf der Alterungskurve der Variante AC D R2 zeigt die größte Krümmung.

Variante	Steifigkeitsmodul -10 °C / 10 Hz		Steifigkeitsmodul 20 °C / 10 Hz		Steifigkeitsmodul[1)] -40 °C / 1,0 Hz		Steifigkeitsmodul[1)] 50 °C / 0,1 Hz	
	$\|E^*\|$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\|E^*\|$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\|E^*\|$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\|E^*\|$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]
AC_D_0	27.851	1,028	9.111	1,404	29.200	1,072	159	4,208
AC_D_0a	28.625		12.789		31.316		669	
AC_D_R0	26.567	1,042	8.569	1,346	28.300	1,078	123	4,033
AC_D_R0a	27.690		11.538		30.507		496	
AC_D_R1	24.972	1,050	7.468	1,437	29.035	1,045	148	3,324
AC_D_R1a	26.214		10.731		30.337		492	
AC_D_R2	24.569	1,094	7.424	1,510	29.536	0,975	134	2,664
AC_D_R2a	26.875		11.209		28.811		357	
AC_D_R3	23.781	1,166	7.712	1,509	28.292	1,057	117	3,590
AC_D_R3a	27.719		11.637		29.896		420	

[1)] anhand der Hauptkurve ermittelte Ergebnisse mit Hilfe des Temperatur-Frequenz-Äquivalent

Tab. 6-1: Zusammenstellung der Ergebnisse für die ungealterten und gealterten Varianten der Asphaltdeckschicht sowie der Alterungsindizes bei verschiedenen Temperatur-Frequenz-Bedingungen.

Im Bereich der Belastungsniveaus zwischen x* = 0,0 und x* = -2,0 schneiden die Alterungskurve der rejuvenierten Varianten die Kurven der Referenz- sowie Nullvariante und weisen somit im folgenden Verlauf kleiner Alterungsindizes auf.

Bis auf die Variante AC D R2 zeigen alle Varianten im Weiteren einen weitestgehend progressiven Verlauf. Die Variante AC D R2 hat im Bereich des Belastungsniveaus x* = +1,0 einen Wendepunkt und verläuft ab dort in Richtung x* = -4,0 degressiv weiter und erreicht damit bei x* = -4,0 den geringsten Alterungsindex aller Varianten.

Die Tab. 6-1 zeigt eine Zusammenstellung der Steifigkeitsmodule für die verschiedenen Asphaltdeckschichtvarianten bei unterschiedlichen Belastungskombinationen (Temperatur/Frequenz). Hier zeigt sich, dass die Varianten AC D R2 und R3 bei (-10 °C/10 Hz) höhere Alterungsindizes aufweisen als die Referenzvariante und die Variante AC D R1. Die Varianten AC D R2 und AC D R3 zeigen bis (-40 °C/1 Hz) eine deutliche Reduzierung der Alterungsindizes, wobei die Variante AC D R2 einen Alterungsindex von < 1,0 aufweist. Der Alterungsindex der Variante AC D R1 ist bei (-40 °C/1 Hz) nahezu gleich gegenüber der Belastungskombination (-10 °C/10 Hz).

Im mittleren Temperaturbereich weisen die Varianten AC D R2 und AC D R3 ebenfalls die höchsten Alterungsindizes auf.

Die höchsten Alterungsindizes werden im Bereich der hohen Temperaturen erreicht, hierfür steht exemplarisch die Belastungskombination (50 °C/0,1 Hz), die bei den Asphaltdeckschichtvarianten einem Belastungsniveau von x* = -4,0 entspricht. Den höchsten Alterungsindex hat hier die Nullvariante mit 4,208; gefolgt von der Referenzvariante mit 4,033. Die Rejuvenatorvariante mit dem höchsten Alterungsindex ist die Variante AC D R3 (mit 3,590); die Variante AC D R1 folgt dem mit 3,324. Den geringsten Alterungsindex weist die Variante AC D R2 mit 2,664 bei den hohen Temperaturen auf.

Die Beurteilung der Alterungsempfindlichkeit erfolgt anhand des Alterungsindex $I_{A,E(T)}$ im Bereich von tiefen Temperaturen (-10 °C/20 Hz) und hohen Temperaturen (50 °C/0,1 Hz). Eine Beurteilung anhand des Tiefsttemperaturbereiches erfolgt nicht, da sich die Steifigkeitsmodule der Bindemittel hier nahe des Glasmoduls befinden wodurch sich alle Alterungsindizes auf einem konstanten Niveau nahe 1,0 einpendeln.

Die Variante AC D R0 zeigt hier insgesamt die besten Eigenschaften nach Alterung. Begründet wird das zum einen durch den geringen und nahe 1,0 liegenden Alterungsindex (1,042) bei tiefen Temperaturen, der zudem sehr ähnlich zum Alterungsindex (1,050) der Variante AC D R1 ist. Er deutet in diesem Bereich auf eine geringe Alterungsempfindlichkeit hin, die sich positiv auf das Kälteverhalten auswirken könnte.

Für den Bereich der hohen Temperaturen stellt die Variante AC D R1 nur den dritthöchsten Alterungsindex (3,324) unter den verjüngten Varianten, der sich allerdings auf einem ähnlichen Niveau mit dem

zweithöchsten Alterungsindex (3,590) der Varianten AC D R3 und näherungsweise zum Alterungsindex (4,033) der Referenzvariante befindet. Zudem zeigt die Variante AC D R1 hier die höchsten Steifigkeiten unter den rejuvenierten Varianten. Der hohe Alterungsindex deutet hierbei auf eine deutliche Versteifung durch Alterung hin und damit auf eine hohe Alterungsempfindlichkeit. Allerdings könnte diese zunehmende Versteifung durch Alterung der Standfestigkeit des Asphaltdeckschichtmaterials zu Gute kommen, weshalb ein hoher Alterungsindex bei hohen Temperaturen positiv gewertet wird.

Die Variante AC D R2 zeigt bei tiefen Temperaturen einen Alterungsindex von 1,094 und daher eine mäßige Alterungsempfindlichkeit sowie im Bereich der hohen Temperaturen die geringste Alterungsempfindlichkeit aller verjüngten Varianten. Die Variante AC D R3 zeigt sowohl bei tiefen Temperaturen (1,166) als auch bei hohen Temperaturen (3,590) die höchsten Alterungsindizes der rejuvenierten Varianten und damit die höchste Alterungsempfindlichkeit.

6.1.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B – Beurteilung der Steifigkeitszunahme

Für die Asphaltbinderschichtvarianten sind die Referenzvariante und zwei Rejuvenatorvarianten (AC B R1 und AC B R3) geprüft worden. In Bild 6-3 sind die Prüfergebnisse bei den Temperaturen -10 °C und +20 °C sowie einer Frequenz von 10 Hz zu sehen.

Der Vergleich der verjüngten Varianten bei (-10 °C/10 Hz) weist insgesamt einen mittleren Alterungsindex von 0,987 bei einer Spannweite von 0,084 auf.

Für die ungealterte Rejuvenatorvariante AC B R1 wurde der höchste Steifigkeitsmodul gegenüber der Referenzvariante und der Variante AC B R3 ermittelt. Darauf folgen die Referenzvariante AC B R0 und die Variante AC B R3 in absteigender Reihenfolge.

Die Prüfergebnisse der gealterten und verjüngten Varianten zeigen den höchsten Steifigkeitsmodul bei der Referenzvariante AC B R0a. Die Rejuvenatorvarianten AC B R1a weist den geringsten Steifigkeitsmodul auf, der zugleich kleiner als der Steifigkeitsmodul ihres ungealterten Pendants ist.

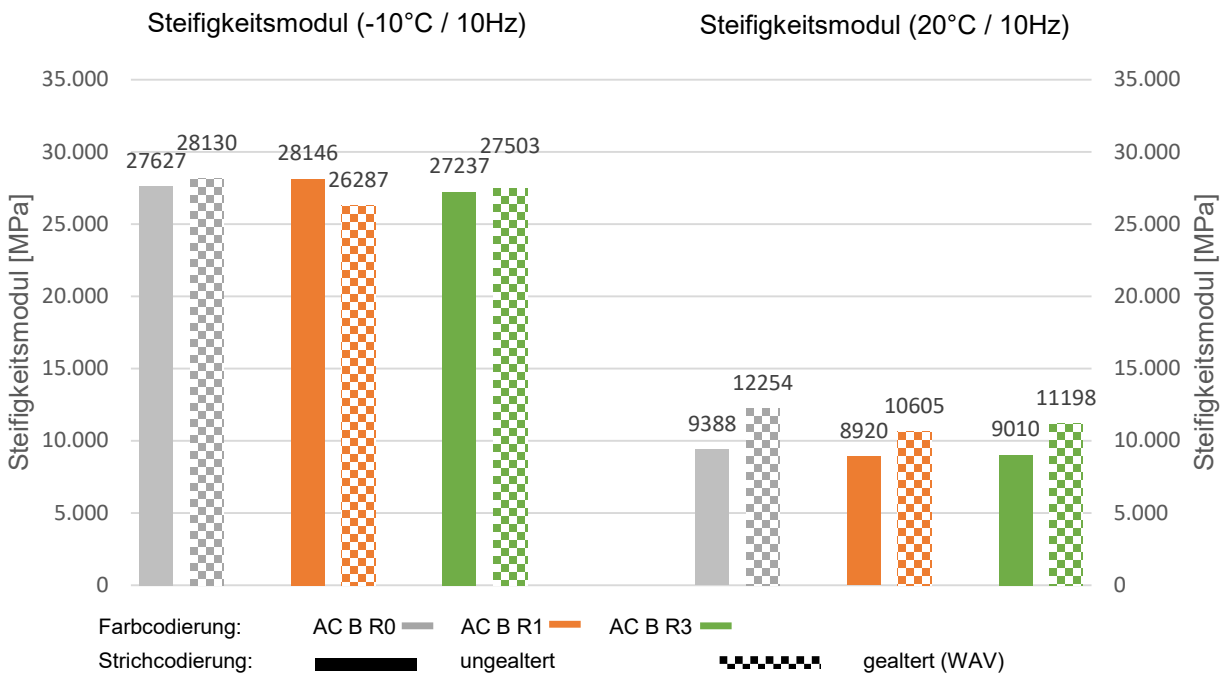

Bild 6-3: Steifigkeitsmodule der ungealterten und gealterten Asphaltbinderschichtvarianten bei Temperaturen von -10 °C und 20 °C sowie einer Belastungsfrequenz von 10 Hz.

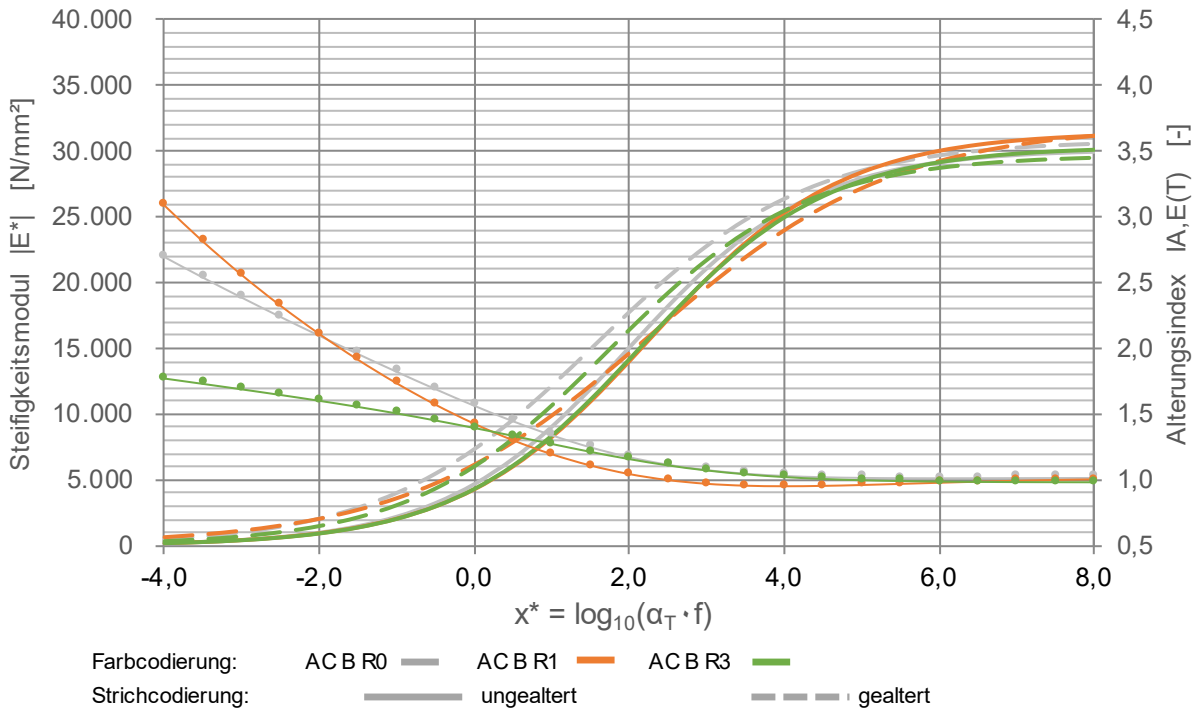

Bild 6-4: Hauptkurven der Asphaltbinderschichtvarianten mit Darstellung der Alterungsindizes zu verschiedenen Temperatur-Frequenz-Äquivalenten

Dadurch, dass die Variante AC B R1 im ungealterten Zustand den höchsten Steifigkeitsmodul und im gealterten Zustand den geringsten Steifigkeitsmodul besitzt, weist sie zum einen die größte Alterungsdifferenz und zugleich einen Alterungsindex von < 1,0 auf.

Im mittleren Temperaturbereich (+20 °C) und bei einer Frequenz von 10 Hz zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den Asphaltdeckschichtvarianten. Die Referenzvariante hat unter diesen Prüfbedingungen jeweils im ungealterte und gealterten Zustand die höchsten Steifigkeitsmodule. Der Alterungsindex beträgt 1,305.

Insgesamt ergibt sich ein mittlerer Alterungsindex von 1,246 mit einer Spannweite von 0,116 für alle verjüngten Varianten.

Die Variante AC B R1 hat bei (20 °C/10 Hz) sowohl im ungealterten als auch im gealterten Zustand die geringsten Steifigkeitsmodule im Vergleich zu allen verjüngten Varianten und weist mit 1,189 den geringsten Alterungsindex auf. Im Gegensatz zur Prüfung bei -10 °C ist der Alterungsindex hier > 1,0.

Der Alterungsindex der Variante AC B R3 beträgt 1,243.

Das Bild 6-4 zeigt die Hauptkurven und die Alterungskurven der Asphaltbinderschichtvarianten. Hier ist erkennbar, dass die Hauptkurve der Variante AC B R1a die Hauptkurve ihres ungealterten Pendants AC B R1 bei ca. (x* = +2,5) schneidet, was im Bereich von (x* = +2,5 bis x* = +7,5) zu Alterungsindizes von kleiner eins führt. Die Variante AC B R3 weist im Bereich von (x* = +5,0 bis x* = +8,0) ebenfalls Alterungsindizes von kleiner eins auf.

Bei der Betrachtung der Alterungskurven (von x* = +8,0 nach x* = -4,0) ist im Bereich bis x* = +4,5 ein nahezu konstanter Verlauf (Steigung der Alterungskurve < 0,010) bei allen Varianten erkennbar. Der mittlere Alterungsindex für alle Varianten in diesem Bereich ist 0,997 bei einer Spannweite von 0,073. Das Maximum ist bei der Referenzvariante mit 1,027 und das Minimum bei der Variante AC B R1 mit 0,954 zu finden.

Die Kurve zum Alterungsindex der Variante AC B R3 beginnt ab x* = +3,0 ihren progressiven Verlauf und zeigt bis x* = +2,0 einen ähnlichen Verlauf wie die Referenzvariante, weist aber insgesamt die größten Krümmungsradien im Kurvenverlauf auf und wechselt bei x* = +0,5 (Wendepunkt) in einen degressiven Verlauf.

Variante	Steifigkeitsmodul -10 °C / 10 Hz		Steifigkeitsmodul 20 °C / 10 Hz		Steifigkeitsmodul[1)] -40 °C / 1,0 Hz		Steifigkeitsmodul[1)] 50 °C / 0,1 Hz	
	$\lvert E^* \rvert$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\lvert E^* \rvert$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\lvert E^* \rvert$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\lvert E^* \rvert$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]
AC_B_R0	27.627	1,018	9.388	1,305	29.944	1,021	186	2,704
AC_B_R0a	28.130		12.254		30.575		503	
AC_B_R1	28.146	0,934	8.920	1,189	31.119	1,003	190	3,095
AC_B_R1a	26.287		10.605		31.227		588	
AC_B_R3	27.237	1,010	9.010	1,243	30.099	0,981	178	1,770
AC_B_R3a	27.503		11.198		29.529		315	

[1)] anhand der Hauptkurve ermittelte Ergebnisse mit Hilfe des Temperatur-Frequenz-Äquivalent

Tab. 6-2: Zusammenstellung der Ergebnisse für die ungealterten und gealterten Varianten der Asphaltbinderschicht sowie der Alterungsindizes bei verschiedenen Temperatur-Frequenz-Bedingungen.

Für die Varianten AC B R0 (ab x* = +4,0) und R1 (ab x* = +3,5) ist ein durchgängig progressiver Verlauf der Alterungskurve erkennbar. Die Variante AC B R1 zeigt dabei den längsten konstanten Verlauf bis x* = +3,5 und die kleinsten Krümmungsradien im weiteren Kurvenverlauf wodurch sie ab x* = -2,0 die höchsten Alterungsindizes erreicht.

Die Steifigkeitsmodule für die verschiedenen Asphaltbinderschichtvarianten bei unterschiedlichen Belastungskombinationen (Temperatur/Frequenz) sind in Tab. 6-2 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die Varianten AC B R0 und AC B R3 bei (-10 °C/10 Hz) ähnliche Alterungsindizes aufweisen. Die Variante AC B R1 hat mit 0,934 einen Alterungsindex von < 1,0. Bei der Belastungskombination (-40 °C/1 Hz) weist die Variante AC B R3 mit 0,981 einen Alterungsindex von < 1,0 auf, während der Alterungsindex der Variante AC B R1 bei 1,003 liegt. Der Alterungsindex der Referenzvariante AC B R0 ist bei beiden Belastungskombinationen sehr ähnlich.

Bei mittleren Temperaturen weist die Referenzvariante den höchsten Alterungsindex auf (1,305), gefolgt von der Variante AC B R3 mit 1,243. Den geringsten Alterungsindex hat demnach die Variante AC B R1 mit 1,189.

Im Bereich der hohen Temperaturen zeigt die Belastungskombination (50 °C/0,1 Hz) exemplarisch, dass die Variante AC B R1 den höchsten Alterungsindex (3,095), während die Variante AC B R3 den geringsten Alterungsindex (1,770) aufweist. Die Variante AC B R0 hat einen Alterungsindex von 2,704.

Bei den Asphaltbinderschichtvarianten zeigen sich im Bereich der tiefen Temperaturen (-10 °C/10 Hz) für die Alterungsempfindlichkeit keine signifikanten Unterschiede bei den Alterungsindizes der geprüften Varianten. Alle Indizes bewegen sich im Nahbereich der 1,0 und weisen damit eine geringe Alterungsempfindlichkeit für diesen Bereich auf. Hervorzuheben und besonders positiv ist hierbei, dass die Variante AC B R1 einen Alterungsindex kleiner eins aufweist und damit nach der Alterung eine geringere Steifigkeit als vor der Alterung zeigt.

Im Bereich der hohen Temperaturen weist die Variante AC B R3 mit einem Alterungsindex von 1,770 deutlich die geringste Alterungsempfindlichkeit auf. Darauf folgt die Referenzvariante mit 2,704 und danach die Variante AC B R1 mit 3,095.

Da die Standfestigkeit ebenfalls eine maßgebende Eigenschaft der Asphaltbinderschicht ist, ist hier, wie bei der Asphaltdeckschicht, ein hoher Alterungsindex bei hohen Temperaturen als positiv zu bewerten. Damit zeigt auch hier die Variante AC B R1 die besten Eigenschaften nach der Alterung. Wie alle Varianten hat sie eine geringe Alterungsempfindlichkeit bei tiefen Temperaturen und weist bei hohen Temperaturen, bedingt durch einen hohen Alterungsindex, die höchsten Steifigkeiten auf. Obwohl die Variante AC B R3 die geringste Alterungsempfindlichkeit zeigt, weist sie sowohl vor als auch nach Alterung die geringsten Steifigkeiten auf, was als negativ zu beurteilen ist.

6.1.3 Asphalttragschichtvarianten AC T – Beurteilung der Steifigkeitszunahme

Für die Asphalttragschichtvarianten sind die Initialvarianten, die Referenzvariante sowie die Rejuvenatorvarianten AC T R2 und AC T R3 hinsichtlich ihrer Steifigkeitszunahme durch Alterung untersucht worden. Im Bild 6-5 sind die Prüfergebnisse bei den Temperaturen -10 °C und +20 °C sowie einer Frequenz von 10 Hz dargestellt.

Beim Vergleich der verjüngten Varianten ist erkennbar, dass die Referenzvariante sowohl im ungealterten als auch im gealterten Zustand die höchsten Steifigkeitsmodule bei den Temperaturen -10 °C und +20 °C aufweist. Bei den ungealterten Varianten zeigt die Variante AC T R2 höhere Steifigkeitsmodule als die Variante AC T R3, während die gealterte Variante AC T R3 höhere Steifigkeitsmodule aufweist als die Variante AC T R2.

Die Tab. 6-3 zeigt die zugehörigen Alterungsindizes. Hier ist erkennbar, dass die Variante AC T R3 sowohl bei -10 °C als auch bei 20 °C die höchsten Alterungsindizes aufweist, gefolgt von der Variante AC T R2 und der Referenzvariante AC T R0.

In den Grenzbereichen der Bewertung bei tiefen Temperaturen (-40 °C) und hohen Temperaturen (+50 °C) zeigt sich ein etwas anderes Bild. Hier hat die Referenzvariante die höchsten Alterungsindizes. Im Bereich der tiefen Temperaturen zeigt die Variante AC T R3 einen höheren Alterungsindex als die Variante AC T R2, während im Bereich von hohen Temperaturen die Variante AC T R2 einen höheren Alterungsindex gegenüber der Variante AC T R3 aufweist.

Das Bild 6-6 zeigt die Hauptkurven und Alterungskurven für alle geprüften Asphalttragschichtvarianten. Anhand der Verläufe der Hauptkurven der verjüngten Varianten ist erkennbar, dass die Kurven aller ungealterten Varianten unterhalb ihrer jeweiligen gealterten Varianten verlaufen, dem zu Folge gibt es bei den Verjüngten Varianten keine Alterungsindizes kleiner eins.

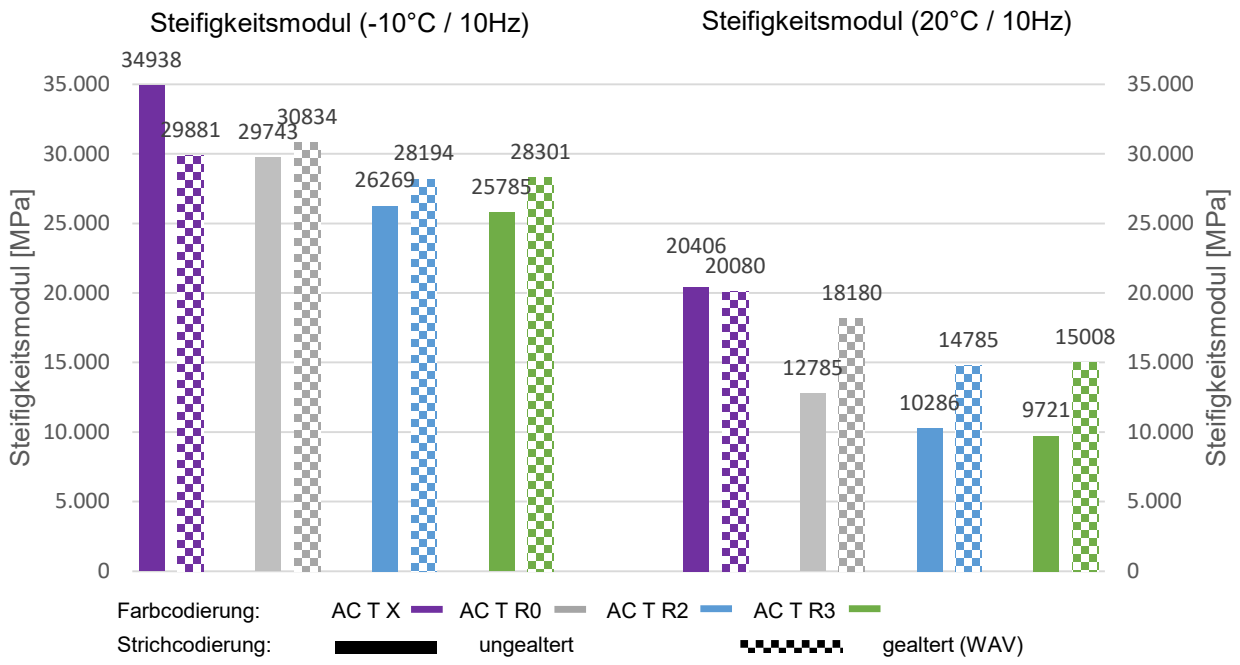

Bild 6-5: Steifigkeitsmodule der ungealterten und gealterten Asphalttragschichtvarianten bei Temperaturen von -10 °C und 20 °C sowie einer Belastungsfrequenz von 10 Hz.

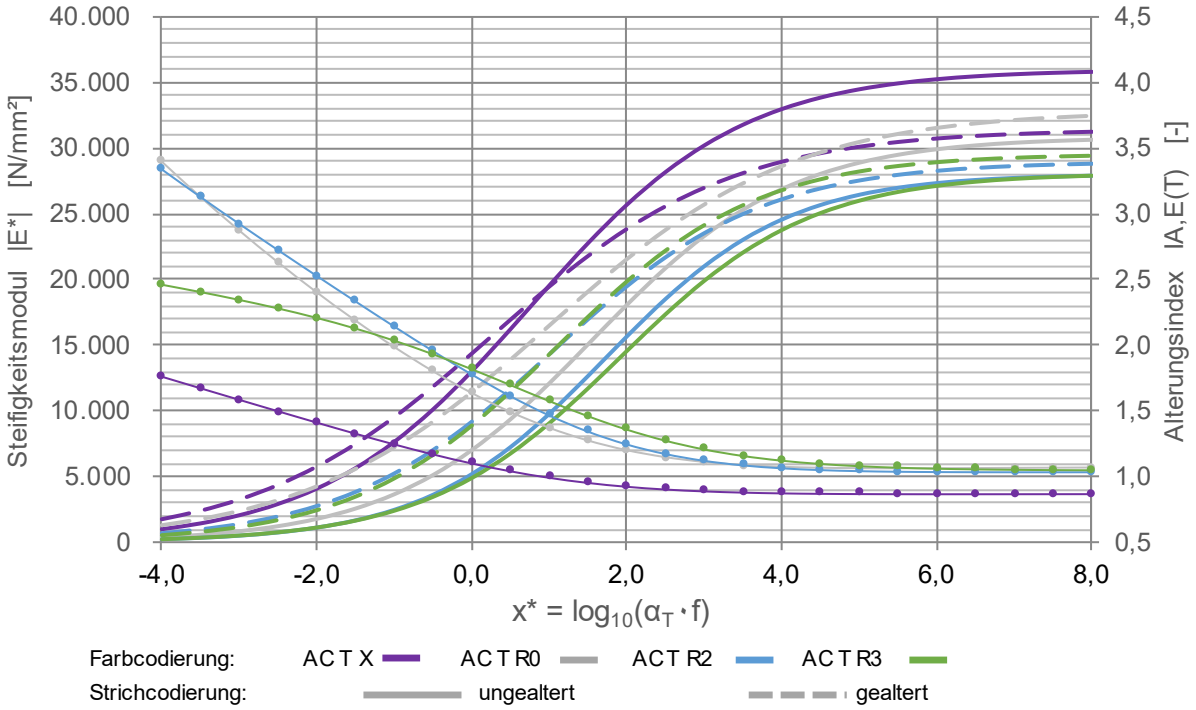

Bild 6-6: Hauptkurven der Asphalttragschichtvarianten mit Darstellung der Alterungsindizes zu verschiedenen Temperatur-Frequenz-Äquivalenten

Es ist zu erkennen, dass die Hauptkurve der Referenzvariante grundsätzlich höhere Steifigkeitsmodule als die Rejuvenatorvarianten aufweist. Die Rejuvenatorvarianten zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf ihrer Hauptkurven mit nur geringen Unterschieden im Bereich der mittleren und tiefen Temperaturen, wo die Steifigkeitsmodule der Variante AC T R2 etwas geringer sind als die Steifigkeitsmodule der Variante AC T R3.

Die Betrachtung der Alterungskurven erfolgt auch hier entgegen der Laufrichtung der Abszissen-Achse (von x* = +8,0 nach x* = -4,0). Alle Varianten zeigen im Bereich von x* = +8,0 bis x* = +5,5 einen nahezu konstanten Verlauf (Steigung < 0,010). Die Variante AC T R3 zeigt ab x* = +5,5 einen progressiven Verlauf, der am Wendepunkt bei x* = +0,5 in einen degressiven Verlauf wechselt. Die Variante AC T R2 und AC T R0 zeigen ab x* = +4,5 bzw. x* = +4,0 einen durchgängig progressiven und ähnlichen Kurvenverlauf, wobei die Krümmungsradien der Variante AC T R2 etwas größer sind und damit die Referenzvariante bei x* = -4,0 einen etwas höheren Alterungsindex als die Variante AC T R2 erreicht.

Die Initialvariante zeigt die längste konstante Phase der Alterungskurve bis x* = 3,0 mit Alterungsindizes im Bereich von x* = +8,0 bis x* = +1,0 von kleiner 1,0. Der weitere Verlauf ist schwach progressiv und entwickelt sich zum Ende (x* = -4,0) hin in einen nahezu linearen Verlauf.

Die Tab. 6-3 zeigt eine Übersicht mit den Steifigkeitsmodulen und Alterungsindizes zu den wesentlichen Belastungskombinationen. Hier wird ersichtlich, dass die Initialvariante grundsätzlich die höchsten Steifigkeitsmodule und geringsten Alterungsindizes aufweist.

Im Vergleich der verjüngten Varianten zeigt die Referenzvariante in den Grenzbereichen (-40 °C/+50 °C) die höchsten Alterungsindizes während sie im mittleren Temperaturbereich (+20 °C) und bei tiefen Temperaturen (-10 °C) die kleinsten Alterungsindizes aufweist

Die Variante AC T R3 hat im Vergleich zur Variante AC T R2 im Tiefsttemperaturbereich (-40 °C/-10 °C) und den mittleren Temperaturen (+20 °C) größere Alterungsindizes. Im Bereich der hohen Temperaturen zeigt die Variante AC T R2 höhere Alterungsindizes als die Variante AC T R3.

Variante	Steifigkeitsmodul -10 °C / 10 Hz		Steifigkeitsmodul 20 °C / 10 Hz		Steifigkeitsmodul[1)] -40 °C / 1,0 Hz		Steifigkeitsmodul[1)] 50 °C / 0,1 Hz	
	$\|E^*\|$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\|E^*\|$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\|E^*\|$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]	$\|E^*\|$ [MPa]	$I_{A,E(T)}$ [-]
AC_T_X	34.938	0,855	20.406	0,980	35.807	0,874	1.028	1,756
AC_T_Xa	29.881		20.008		31.291		1.805	
AC_T_R0	29.743	1,037	12.785	1,422	30.580	1,063	389	3,406
AC_T_R0a	30.834		18.180		32.499		1.325	
AC_T_R2	26.269	1,073	10.186	1,452	27.884	1,036	200	3,340
AC_T_R2a	28.194		14.785		28.880		668	
AC_T_R3	25.785	1,098	9.721	1,544	27.893	1,053	225	2,453
AC_T_R3a	28.301		15.008		29.364		552	

[1)] anhand der Hauptkurve ermittelte Ergebnisse mit Hilfe des Temperatur-Frequenz-Äquivalent

Tab. 6-3: Zusammenstellung der Ergebnisse für die ungealterten und gealterten Varianten der Asphaltdeckschicht sowie der Alterungsindizes bei verschiedenen Temperatur-Frequenz-Bedingungen.

Aufgrund des hohen Anteils an Asphaltgranulat (ca. 62 %) und den fehlenden Verjüngungsmitteln weist die Initialvariante sowohl im ungealterten als auch im gealterten Zustand die höchsten Steifigkeitsmodule auf. Ebenfalls begründbar durch den hohen Anteil an bereits gealtertem Bindemittel sind die geringen Alterungsindizes dieser Variante, da durch die vorwiegend thermische Alterung nur noch relativ wenig leicht flüchtige Bestandteile aus dem Bindemittel entweichen können.

Die ungealterte und die gealterte Referenzvariante zeigen im Vergleich der verjüngten Varianten in allen Bereichen deutlich höhere Steifigkeitsmodule als die Rejuvenatorvarianten AC T R2 und AC T R3. Die Rejuvenatorvarianten zeigen im ungealterten und gealterten Zustand sehr ähnliche Verläufe der Hauptkurven mit geringen Unterschieden im Bereich der mittleren Temperaturen bei den ungealterten Varianten sowie im Bereich der mittleren und tiefen Temperaturen bei den gealterten Varianten.

Diese Unterschiede bei den gealterten Varianten begründen die höheren Alterungsindizes der Variante AC T R3 bei den mittleren und tiefen Temperaturen gegenüber der Variante AC T R2. Durch die höheren Alterungsindizes im Bereich der mittleren und tiefen Temperaturen zeigt sich eine geringfügig schlechtere Alterungsbeständigkeit.

Bei hohen Temperaturen zeigt die Referenzvariante AC T R0 den höchsten Alterungsindex und damit die höchste Alterungsempfindlichkeit. Die Variante AC T R2 zeigt einen ähnlich hohen Wert während die Variante AC T R3 einen deutlich geringeren Wert aufweist. Wie bereits erläutert trägt die Versteifung eines Asphaltes durch Alterung zur Verbesserung der Standfestigkeit bei und ist damit aus diesem Blickwinkel positiv zu bewerten. Allerdings handelt es sich hier um ein Asphalttragschichtmaterial bei dem die Standfestigkeit keine maßgebende Eigenschaft ist, wodurch eine hohe Versteifung bzw. hoher Alterungsindex aus diesem Grund nicht positiv bewertet werden kann. Allerdings kann durch eine höhere Steifigkeit der Asphalttragschicht die Tragfähigkeit und damit die Dehnungen an der Unterseite minimieren, was zu einer Verlängerung der Lebensdauer führen kann. Anderseits beeinflusst die Versprödung des Bindemittels auch den Widerstand gegen Rissbildung negativ, daher sind für eine abschließende Beurteilung Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten der Asphalttragschichtvarianten erforderlich.

6.1.4 Zusammenfassung – Beurteilung der Steifigkeitszunahme

In den vorherigen Kapiteln wurden die Ergebnisse zur Bestimmung der Steifigkeit anhand von Diagrammen und Tabellen dargestellt und erläutert sowie materialspezifisch bewertet. Die materialspezifischen Bewertungen werden hier nochmal zusammengefasst und die Ergebnisse abschließend beurteilt.

Grundlegend ist anzumerken, dass neben den absoluten Werten der Steifigkeitsmodule die Alterungsindizes eine wesentliche Kenngröße zur Beurteilung darstellen. Durch den Alterungsindex $I_{A,E(T)}$ wird die relative Änderung des Steifigkeitsmoduls durch die Alterung ersichtlich.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass eine Steifigkeitszunahme durch Alterung nicht zwangsläufig als negativ zu beurteilen ist, sondern das jeweilige Belastungsniveau mitbetrachtet werden muss. So kann eine Steifigkeitszunahme bei hohen Temperaturen einen positiven Effekt auf die Standfestigkeit haben und damit zur Dauerhaftigkeit eines Asphaltes beitragen. Während eine Steifigkeitszunahme im Bereich der tiefen Temperaturen auf ein frühzeitiges Versagen durch Kälterissbildung deuten kann.

Die Beurteilung der Alterungsempfindlichkeit erfolgt anhand des Alterungsindex $I_{A,E(T)}$ im Bereich von tiefen Temperaturen (-10 °C/20 Hz) und hohen Temperaturen (50 °C/0,1 Hz). Eine Beurteilung anhand des Tiefsttemperaturbereiches erfolgt nicht, da sich die Steifigkeitsmodule der Bindemittel hier nahe des Glasmoduls befinden wodurch sich alle Alterungsindizes auf einem konstanten Niveau nahe 1,0 einpendeln.

Die Variante AC D R1 zeigt hier insgesamt die besten Eigenschaften nach Alterung. Begründet wird das zum einen durch den geringen und nahe 1,0 liegenden Alterungsindex (1,050) bei tiefen Temperaturen, der zudem sehr ähnlich zum Alterungsindex (1,042) der Referenzvariante AC D R0 ist. Er deutet in diesem Bereich auf eine geringe Alterungsempfindlichkeit hin, die sich positiv auf das Kälteverhalten auswirkt.

Für den Bereich der hohen Temperaturen stellt die Variante AC D R1 nur den dritthöchsten Alterungsindex (3,324) unter den verjüngten Varianten, der sich allerdings auf einem ähnlichen Niveau mit dem zweithöchsten Alterungsindex (3,590) der Varianten AC D R3 und näherungsweise zum Alterungsindex (4,033) der Referenzvariante befindet. Zudem zeigt die Variante AC D R1 hier die höchsten Steifigkeiten unter den rejuvenierten Varianten. Der hohe Alterungsindex deutet hierbei auf eine deutliche Versteifung durch Alterung hin und damit auf eine hohe Alterungsempfindlichkeit hin. Allerdings kommt diese zunehmende Versteifung durch Alterung der Standfestigkeit des Asphaltdeckschichtmaterials zugute, weshalb ein hoher Alterungsindex bei hohen Temperaturen aus diesem Blickwinkel positiv gewertet werden kann.

Die Variante AC D R2 zeigt aufgrund ihrer Alterungsindizes (1,094) bei tiefen Temperaturen eine mäßige Alterungsempfindlichkeit sowie im Bereich der hohen Temperaturen die geringste Alterungsempfindlichkeit aller verjüngten Varianten auf. Die Variante AC D R3 zeigt sowohl bei tiefen Temperaturen (1,166) als auch bei hohen Temperaturen (3,590) die höchsten Alterungsindizes der rejuvenierten Varianten und damit die höchste Alterungsempfindlichkeit.

Bei den Asphaltbinderschichtvarianten zeigen sich im Bereich der tiefen Temperaturen (-10 °C/10Hz) für die Alterungsempfindlichkeit keine signifikanten Unterschiede bei den Alterungsindizes der geprüften Varianten. Alle Indizes bewegen sich im Nahbereich der 1,0 und weisen damit eine geringe Alterungsempfindlichkeit für diesen Bereich auf. Hervorzuheben und besonders positiv ist hierbei das die Variante AC B R1 einen Alterungsindex kleiner eins aufweist und damit nach der Alterung eine geringere Steifigkeit als vor der Alterung zeigt.

Im Bereich der hohen Temperaturen weist die Variante AC B R3 mit einem Alterungsindex von 1,770 deutlich die geringste Alterungsempfindlichkeit auf. Darauf folgt die Referenzvariante mit 2,704 und die Variante AC B R1 mit 3,095.

Da die Standfestigkeit ebenfalls eine maßgebende Eigenschaft der Asphaltbinderschicht ist, ist hier, wie bei der Asphaltdeckschicht, ein hoher Alterungsindex bei hohen Temperaturen ggf. positiv zu bewerten. Damit zeigt auch hier die Variante AC B R1 die besten Eigenschaften nach der Alterung. Wie alle Variante hat sie eine geringe Alterungsempfindlichkeit bei tiefen Temperaturen und weist bei hohen Temperaturen, bedingt durch einen hohen Alterungsindex, die höchsten Steifigkeiten auf. Obwohl die Variante AC B R3 die geringste Alterungsempfindlichkeit zeigt, weist sie sowohl vor als auch nach Alterung die geringsten Steifigkeiten auf, was als negativ zu beurteilen ist.

Die Referenzvariante AC T R0 zeigt bei hohen Temperaturen den höchsten Alterungsindex und damit die höchste Alterungsempfindlichkeit. Die Variante AC T R2 zeigt einen ähnlich hohen Wert während die Variante AC T R3 einen deutlich geringeren Wert aufweist. Wie bereits erläutert trägt die Versteifung eines Asphaltes durch Alterung zur Verbesserung der Standfestigkeit bei und ist damit aus dieser Perspektive positiv zu bewerten. Allerdings handelt es sich hier um ein Asphalttragschichtmaterial bei dem die Standfestigkeit keine maßgebende Eigenschaft ist, wodurch eine hohe Versteifung bzw. hoher Alterungsindex aus diesem Grund nicht positiv bewertet werden kann.

Für alle Asphaltmischgüter gilt jedoch, dass durch höhere Steifigkeiten in den Asphaltschichten die Dehnungen an der Unterseite minimiert werden können, was zu einer Verlängerung der Lebensdauer führen kann. Anderseits beeinflusst die Versprödung des Bindemittels auch den Widerstand gegen Rissbildung infolge tiefer Temperaturen und ggf. das Ermüdungsverhalten negativ. Daher sind für eine abschließende Beurteilung Untersuchungen zum Kälteverhalten (AC D, AC B, AC T), Ermüdungsverhalten (AC T) sowie der Standfestigkeit (AC D, AC B) der Asphaltmischgutvarianten erforderlich.

6.2 Kälteverhalten – Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch

Das Kälteverhalten von Asphalten wird mittels zwei verschiedener Prüfverfahren untersucht und anhand der Ergebnisse bewertet.

Mit dem Einaxialen Zugversuch (UTST) wird der Probekörper bei konstanter Temperatur und konstanter Zuggeschwindigkeit so lange belastet, bis er reißt. Als Ergebnis wird anschließend die maximale Spannung (Zugfestigkeit) $ß_t(T)$ und die korrespondierende Bruchdehnung $\varepsilon_F(T)$ bei der Prüftemperatur T ermittelt. Die Versuche werden bei vier unterschiedlichen Temperaturen: +20°C, +5°C, -10°C und -25°C durchgeführt.

Beim Abkühlversuch (TSRST) wird die Probekörperlänge konstant gehalten und die Prüftemperatur um 10 K/h ab einer Starttemperatur von 20 °C gleichmäßig verringert. Der Versuch läuft solange, bis entweder der Probekörper reißt oder eine Lufttemperatur von -40 °C erreicht wird. Als Ergebnisse der Abkühlversuche werden der Verlauf der kryogenen Spannung in Abhängigkeit der Probekörpertemperatur sowie die Bruchspannung σ_F und Bruchtemperatur T_F zum Zeitpunkt des Versagens angegeben. [52]

Für jede Asphaltvariante und jedes Prüfverfahren wurden mindestens drei Probekörper geprüft. Falls die Ergebnisse gemäß den TP Asphalt-StB Teil 46 A als verdächtig eingestuft wurden, wurden die Prüfung an mindestens einem Probekörper wiederholt. Die hier dargestellten Ergebnisse sind demnach Mittelwerte aus den durchgeführten Prüfungen.

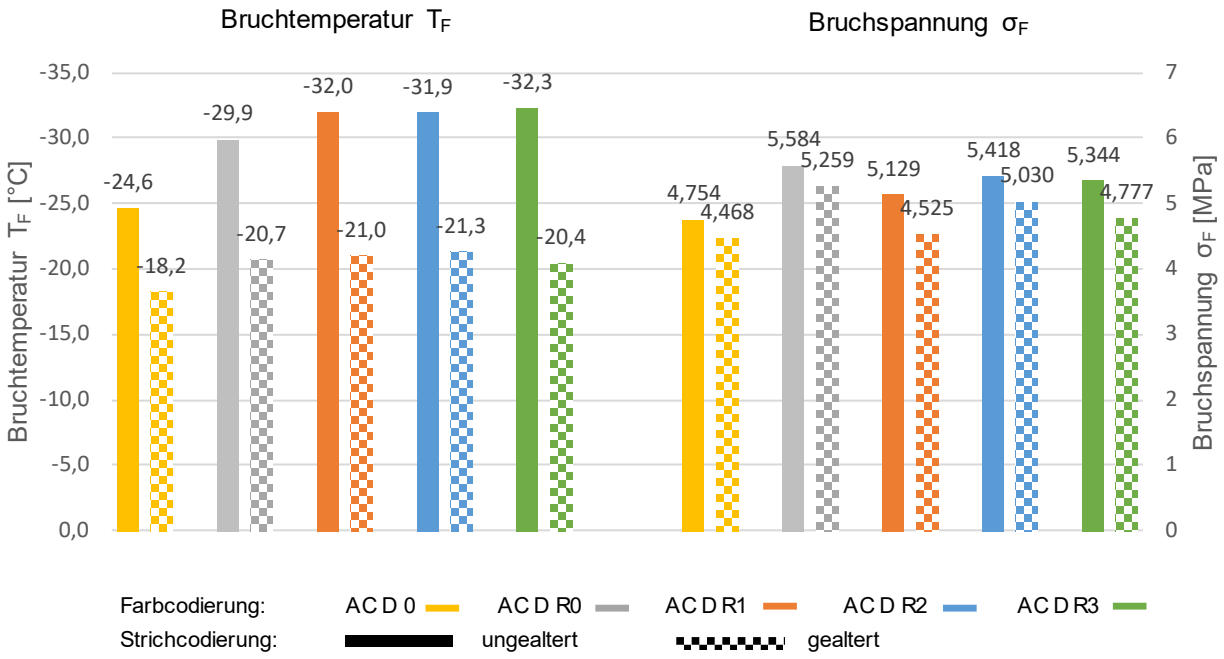

Bild 6-7: Ergebnisse des Abkühlversuches der ungealterten und gealterten Asphaltdeckschichtvarianten (AC D).

6.2.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D

Für die Asphaltdeckschichtvarianten sind die Nullvariante, die Referenzvariante und drei Rejuvenatorvarianten untersucht worden. Das Bild 6-7 zeigt die Ergebnisse des Abkühlversuches der verschiedenen ungealterten und gealterten Varianten.

Hinsichtlich der Bruchtemperatur ist zu bemerken, dass diese im Allgemeinen durch die Alterung ansteigen wird. Als Alterungskennwert wird hierfür die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TF}$ angegeben, je größer der Wert $\Delta_{A,TF}$ ist desto größer sind die Auswirkungen der Alterung auf das Material

Bei der Bruchtemperatur der ungealterten Rejuvenatorvarianten ist zu erkennen, dass diese alle sehr ähnliche Werte und nur geringfügige Differenzen untereinander aufweisen. Im Mittel wurde für die ungealterten Rejuvenatorvarianten eine Bruchtemperatur von -32,1 °C ermittelt. Die Referenzvariante und die Nullvariante zeigen mit -29,9 °C bzw. -24,6 °C höhere Bruchtemperaturen als die Rejuvenatorvarianten.

Bei den gealterten Varianten zeigt sich ein ähnliches Bild. Die gealterten Rejuvenatorvarianten haben ebenfalls dicht bei einander liegende Bruchtemperaturen von im Mittel -20,9 °C bei einer Spannweite 0,9 K. Hier ist die Differenz zur Bruchtemperatur der gealterten Referenzvariante wesentlich geringer, die gealterte Referenzvariante weist eine Bruchtemperatur von -20,7 °C auf. Für die gealterte Nullvariante wurde eine Bruchtemperatur von -18,2 °C ermittelt.

Damit weisen die Rejuvenatorvarianten die größten Alterungsveränderungen $\Delta_{A,TF}$ (i. M. 11,2 K) im Vergleich zu der Referenzvariante und der Nullvariante auf. Die größte Veränderung ist bei der Variante AC D R3 mit 11,9 K erkennbar, darauf folgt die Variante AC D R1 mit 11,0 K und die Variante AC D R2 mit 10,6 K. Die Alterungsveränderungen innerhalb der Rejuvenatorvarianten sind mit einer Spannweite von 1,3 K allerdings gering. Die geringste Alterungsveränderung aller Varianten wurde bei der Nullvariante mit 6,4 K ermittelt, darauf folgt die Referenzvariante mit 9,2 K.

Die Auswirkungen der Alterung auf die Bruchspannungen werden mit dem Alterungsindex $I_{A,\sigma F}$ angegeben. Hierbei gilt, je größer die Auswirkung der Alterung ist, desto kleiner ist der Wert des Index.

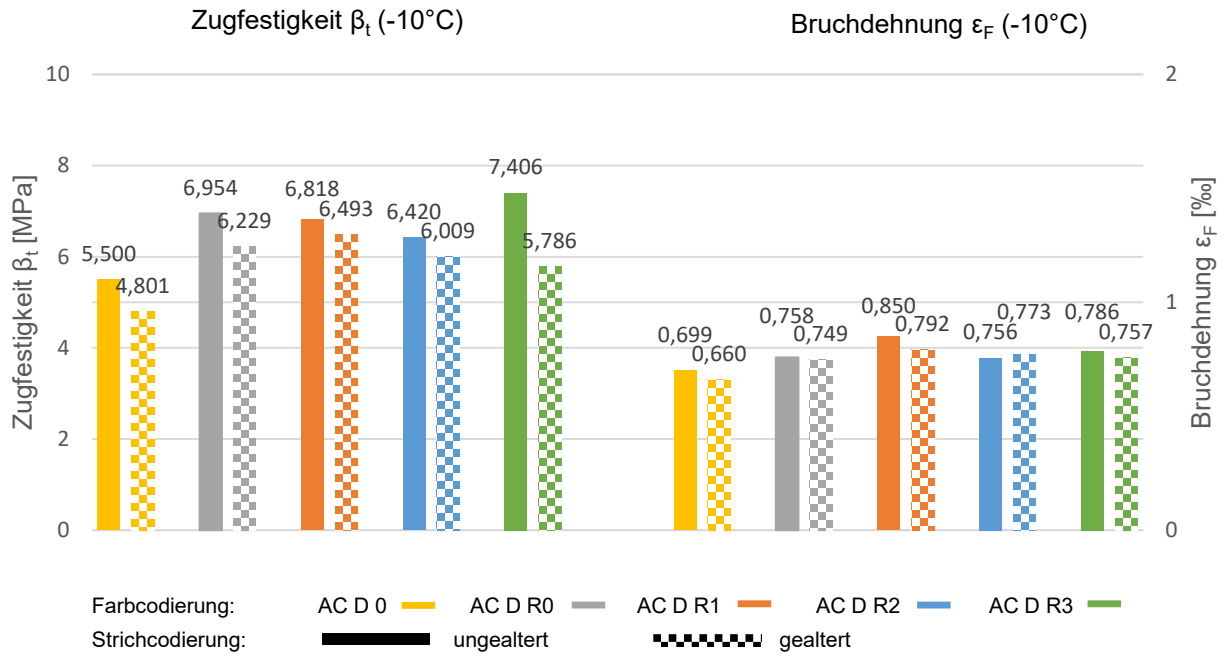

Bild 6-8: Ergebnisse des Zugversuches für die ungealterten und gealterten Asphaltdeckschichtvarianten (AC D).

Bei den ertragbaren Bruchspannungen zeigt die Referenzvariante sowohl bei den ungealterten als auch bei den gealterten Varianten den höchsten Wert, gefolgt von der Variante AC D R2, der Variante AC D R3 und der Variante AC D R1. Das Schlusslicht bildet die Nullvariante. Die höchsten Alterungsindizes $I_{A,\sigma F}$ weisen allerdings die Referenzvariante AC D R0 mit 0,942 und die Nullvariante mit 0,940 auf und zeigen damit die geringste Auswirkung durch Alterung auf die Bruchspannung. Der höchste Index bei den Rejuvenatorvarianten wurde bei der Variante AC D R2 mit 0,928 ermittelt. Die Variante AC D R3 folgt mit 0,894 und die Variante AC D R1 mit 0,882.

Die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung werden mit dem Einaxialen Zugversuch ermittelt. Als Alterungsindikator für die Zugfestigkeit wird der Index $I_{A,\beta t}$ und für die Bruchdehnung der Index $I_{A,\varepsilon t}$ verwendet.

Im Allgemeinen wird die, durch die Alterung verursachte, Versteifung bzw. Versprödung (Elastizitätsverlust) des Bindemittels die Zugfestigkeit und die ertragbare Bruchdehnung des Asphaltes abnehmen.

Die Ergebnisse des Zugversuches für die Varianten der Asphaltdeckschicht sind in Bild 6-8 dargestellt. Die Nullvariante weist mit Abstand die geringste Zugfestigkeit sowohl bei den ungealterten als auch bei den gealterten Varianten auf. Die höchste Zugfestigkeit bei den ungealterten Varianten mit 7,406 MPa und die geringste Zugfestigkeit bei den verjüngten und gealterten Varianten mit 5,780 MPa zeigt die Variante AC D R3 und damit auch den geringsten Alterungsindex in Höhe von 0,781. Den höchsten Alterungsindex mit 0,952 und damit die geringsten Auswirkungen der Alterung auf die Zugfestigkeit weist die Variante AC D R1 auf. Die Variante AC D R2 hat mit 0,936 einen relativ ähnlichen Alterungsindex wie die Variante AC D R1.

Bei der Bruchdehnung zeigt sich ein weniger differenziertes Bild, die Spannweite des Alterungsindex liegt bei 0,091 wobei das Maximum bei der Variante AC D R2 mit 1,022 und das Minimum bei der Variante AC D R1 mit 0,932 zu finden ist. Die Variante AC D R2 ist hierbei die einzige Variante die nach Alterung eine höhere Bruchdehnung aufweist als im ungealterten Zustand. Bei der Variante AC D R1 sind mit dem kleinsten Index die größten Auswirkungen der Alterung auf den Kennwert gegeben. Da hinsichtlich der Bruchdehnung keine Präzision existierte und aufgrund der geringen Spannweite ist eine Einordnung der Ergebnisse nicht möglich. Positiv zu bewerten ist hierbei, dass die Variante AC D R1 sowohl vor als auch nach der Alterung die höchsten Werte aufweist.

Die Tab. 6-4 zeigt wesentliche Ergebnisse der Prüfverfahren zum Kälteverhalten. Es wird die Bruchtemperatur und die Kryogene Spannung bei -10 °C aus dem Abkühlversuch sowie die Zugfestigkeit bei -10 °C aus dem Einaxialen Zugversuch dargestellt. Aus der Differenz der Zugfestigkeit und der Kryogenen Spannung lässt sich die Zugfestigkeitsreserve bestimmen. Die Temperatur von -10 °C wurde als maßgebender Bewertungspunkt für alle Materialien und Varianten gewählt, da die Temperatur eine realistische Belastung im Straßenaufbau darstellt und damit von Relevanz ist.

Variante	Bruchtemperatur		Kryogene Spannung		Zugfestigkeit		Zugfestigkeitsreserve	
	T_F [°C]	$\Delta_{A,TF}$ [K]	$\sigma_{kry,(-10°C)}$ [MPa]	$I_{A,\sigma kry,(-10°C)}$ [-]	$\beta_{t,(-10°C)}$ [MPa]	$I_{A,\beta t,(-10°C)}$ [-]	$\Delta\beta_{t,(-10°C)}$ [MPa]	$I_{A,\Delta\beta t,(-10°C)}$ [-]
AC_D_0	-24,6	6,4	1,022	2,490	5,500	0,873	4,478	0,504
AC_D_0a	-18,2		2,545		4,801		2,256	
AC_D_R0	-29,9	9,2	0,761	3,277	6,954	0,896	6,193	0,603
AC_D_R0a	-20,7		2,494		6,229		3,735	
AC_D_R1	-32,0	11,0	0,484	4,070	6,818	0,952	6,334	0,714
AC_D_R1a	-21,0		1,970		6,493		4,523	
AC_D_R2	-31,9	10,6	0,493	4,479	6,420	0,936	5,927	0,641
AC_D_R2a	-21,3		2,208		6,009		3,801	
AC_D_R3	-32,3	11,9	0,508	4,364	7,406	0,781	6,898	0,517
AC_D_R3a	-20,4		2,217		5,786		3,569	

Tab. 6-4: Zusammenstellung der Ergebnisse der Abkühl- und Zugversuche mit Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C für die Asphaltdeckschichtvarianten (AC D).

Hinsichtlich der kryogenen Spannung ist erkennbar, dass die Rejuvenatorvarianten geringere Werte aufweisen als die Referenz- und die Nullvariante, sowohl bei den ungealterten als auch bei den gealterten Varianten. Ein Vergleich der rejuvenierten Varianten zeigt, dass die Variante AC D R1 die geringsten kryogenen Spannungen und die Variante AC D R2 die höchsten kryogenen Spannungen innerhalb dieser Gruppe aufweisen. Bei der Betrachtung der Alterungsindizes IA,σkry,(-10 °C) zeigt sich, dass die rejuvenierten Varianten die höchsten Alterungsindizes aufweisen. Mit 4,479 stellt die Variante AC D R2 den höchsten Alterungsindex, gefolgt von der Variante AC D R3 mit 4,364 und der Variante AC D R1 mit 4,070. Die Nullvariante zeigt mit 2,490 den geringsten Alterungsindex bei den kryogenen Spannungen. Der Alterungsindex der Referenzvariante beträgt 3,277.

Die Werte für die Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C sind ebenfalls der Tab. 6-4 zu entnehmen. Die Auswirkungen der Alterung werden mit dem Alterungsindex $I_{A,\Delta\beta t,(-10\,°C)}$ beschrieben. Ein kleiner Alterungsindex bedeutet eine große Veränderung und damit eine wesentliche Verschlechterung hinsichtlich des Widerstandes gegen Kälterissbildung. Die geringsten Zugfestigkeitsreserven und der geringste Alterungsindex aller Varianten sind bei der Nullvariante zu finden. Die Referenzvariante zeigt im ungealterten Zustand eine Zugfestigkeitsreserve von 6,193 MPa.

Die mittlere Zugfestigkeitsreserve der rejuvenierten Varianten im ungealterten Zustand beträgt 6,386 MPa bei einer Spannweite von 0,971 MPa. Die höchste Zugfestigkeitsreserve der ungealterten Varianten und die geringste Zugfestigkeitsreserve der gealterten Varianten ist bei der Rejuvenatorvariante AC D R3 zu finden und daher auch der geringste Alterungsindex von 0,517. Die gealterten Rejuvenatorvarianten weisen eine mittlere Zugfestigkeitsreserve von 3,964 MPa mit einer Spannweite von 0,954 MPa auf. Die Variante AC D R1 zeigt bei den gealterten Varianten die höchste Zugfestigkeitsreserve (4,523 MPa) sowie den höchsten Alterungsindex (0,714). Die Variante AC D R2 stellt mit 5,927 die geringste Zugfestigkeitsreserve der ungealterten Rejuvenatorvarianten.

Die Zugfestigkeitsreserve der Referenzvariante beträgt im ungealterten Zustand 6,193 MPa und im gealterten Zustand 3,735 MPa. Daraus ergibt sich ein Alterungsindex von 0,603. Die Nullvariante AC D 0 zeigt noch wesentliche geringere Zugfestigkeitsreserven im ungealterten (4,478 MPa) und gealterten Zustand (2,256 MPa) sowie einen Alterungsindex von 0,504.

Hinsichtlich der Bruchtemperatur ist zu erkennen, dass die Nullvariante AC D 0 wesentlich höhere Bruchtemperaturen aufweist als die rejuvenierten Varianten. Auch die Referenzvariante AC D R0 zeigt eine etwas höhere Bruchtemperatur im Vergleich zu den rejuvenierten Varianten (AC D R1, AC D R2, AC D R3). Gleichwohl sind die Auswirkungen der Alterung, gekennzeichnet durch die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TF}$, bei den rejuvenierten Varianten höher als bei der Referenzvariante AC D R0 und der Nullvariante AC D 0.

Die größere Alterungsveränderung der Referenzvariante AC D R0 gegenüber der Nullvariante AC D 0 lässt sich durch das höhere Alterungspotential des weichen Bindemittels hinsichtlich des Entweichens von leicht flüchtigen Bindemittelbestandteilen durch die thermische Belastung der Alterung erklären.

Bei der kryogenen Spannung zeigt sich für die rejuvenierten Varianten (AC D R1, AC D R2, AC D R3) ein ähnliches Bild im Vergleich zur Bruchtemperatur. Die Rejuvenatorvarianten zeigen deutlich kleinere Spannungen als die Referenzvariante AC D R0, allerdings auch wesentlich höhere Alterungsindizes. Die Variante AC D R1 stellt hierbei den kleinsten Alterungsindex $I_{A,\sigma kry,(-10\,°C)}$ im Vergleich zu den beiden anderen Rejuvenatorvarianten (AC D R2 und AC D R3).

Die Variante AC D R1 zeigt hinsichtlich der Zugfestigkeit und der Zugfestigkeitsreserve die höchsten Alterungsindizes und damit die geringsten Auswirkungen der Alterung. Zudem ist erkennbar, dass die Variante AC D R1 im gealterten Zustand noch die höchste Zugfestigkeitsreserve und im ungealterten die zweithöchste Zugfestigkeitsreserve aufweist. Insbesondere die Zugfestigkeitsreserve ist eine sehr wichtige Kenngröße für die Materialbewertung, da sie ein Maß für die ertragbaren Lastwechsel in diesem Temperaturbereich (hier: -10 °C) darstellt.

6.2.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B

Bei den Asphaltbindeschichtvarianten sind ausschließlich die Referenzvariante sowie die zwei Rejuvenatorvarianten AC B R1 und AC B R3 hinsichtlich ihres Kälteverhaltens vor Alterung und nach Alterung untersucht worden.

Die Ergebnisse des Abkühlversuches sind in Bild 6-9 zu sehen. Während die Bruchtemperaturen der ungealterten um ca. 2,2 K variieren, liegen die Bruchtemperaturen der gealterten Varianten mit einer Spannweite von 0,7 K deutlich dichter beieinander. Die Variante AC B R1 weist sowohl im ungealterten als auch im gealterten Zustand die niedrigsten Bruchtemperaturen auf, gefolgt von der Variante AC B R3. Die Referenzvariante zeigt die höchsten Bruchtemperaturen. Allerdings zeigt die Referenzvariante mit 8,1 K auch die geringste Alterungsveränderung $\Delta_{A,TF}$. Hierbei hat die Variante AC B R1 mit 9,6 K die größte Alterungsveränderung. Die Alterungsveränderung der Variante AC B R3 beträgt 9,1 K.

Bei den Bruchspannungen zeigt die Rejuvenatorvariante AC B R3 die höchsten Werte, mit 4,414 MPa im ungealterten und 3,644 MPa im gealterten Zustand; der Alterungsindex liegt bei 1,211. Die Variante AC B R1 weist mit 1,348 den höchsten Alterungsindex auf. Ihre Bruchspannung im ungealterten Zustand beträgt 4,053 MPa und im gealterten Zustand 3,007 MPa. Die Referenzvariante AC B R0 hat mit 1,183 den geringsten Alterungsindex, aber auch die geringste Bruchspannung im ungealterten Zustand (3,924 MPa).

Mit dem Einaxialen Zugversuch wurden die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung bei verschiedenen Temperaturen geprüft. Die Ergebnisse für eine Temperatur von -10 °C sind im Bild 6-10 dargestellt.

Hier zeigt sich, dass die Variante AC B R3 im ungealterten (4,448 MPa) und gealterten Zustand (3,704 MPa) die geringsten Zugfestigkeiten aufweist. Sie zeigt ebenfalls den höchsten Alterungsindex und damit die geringsten Auswirkungen auf den Materialkennwert durch Alterung. Den höchsten Wert der ungealterten Varianten erreicht die Variante AC B R1 mit 5,432 MPa, der höchste Wert für die gealterten Varianten konnte bei der Referenzvariante mit 3,946 MPa festgestellt werden. Der Wert der ungealterten Variante AC B R1 liegt mit 3,861 MPa nur geringfügig unter dem Wert der Referenzvariante. Die Referenzvariante stellt mit 0,771 einen etwas höheren Alterungsindex als die Variante AC B R1.

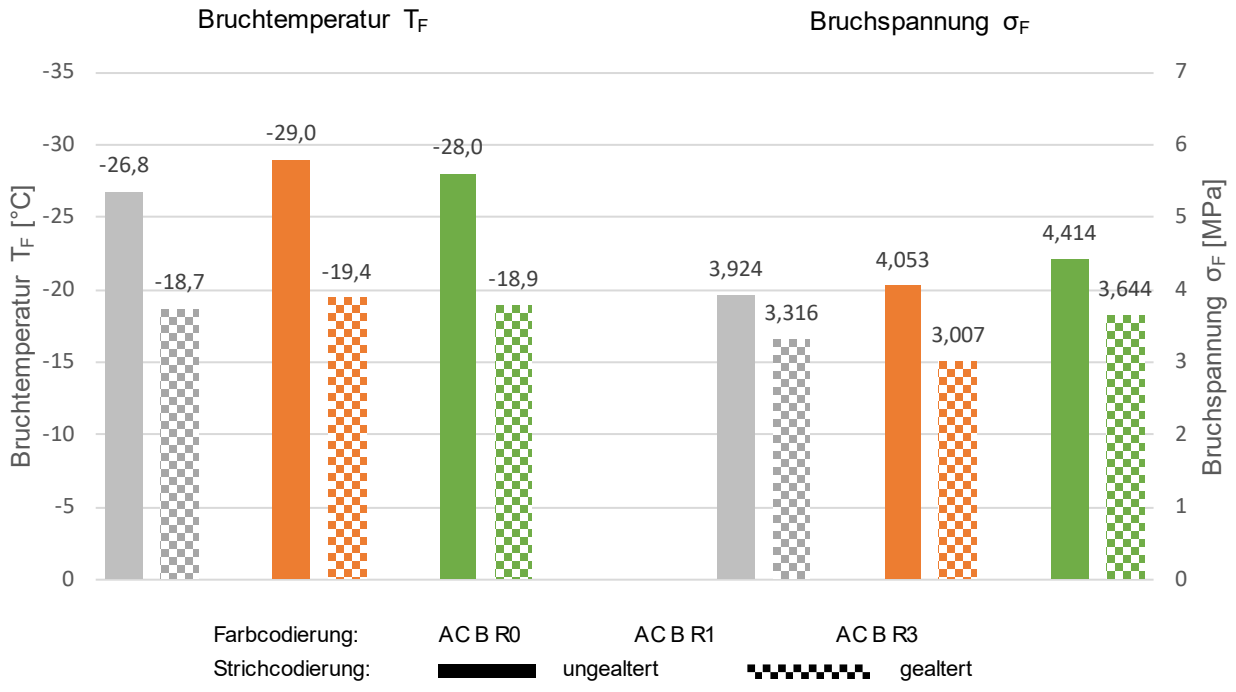

Bild 6-9: Ergebnisse des Abkühlversuches der ungealterten und gealterten Asphaltbinderschichtvarianten (AC B).

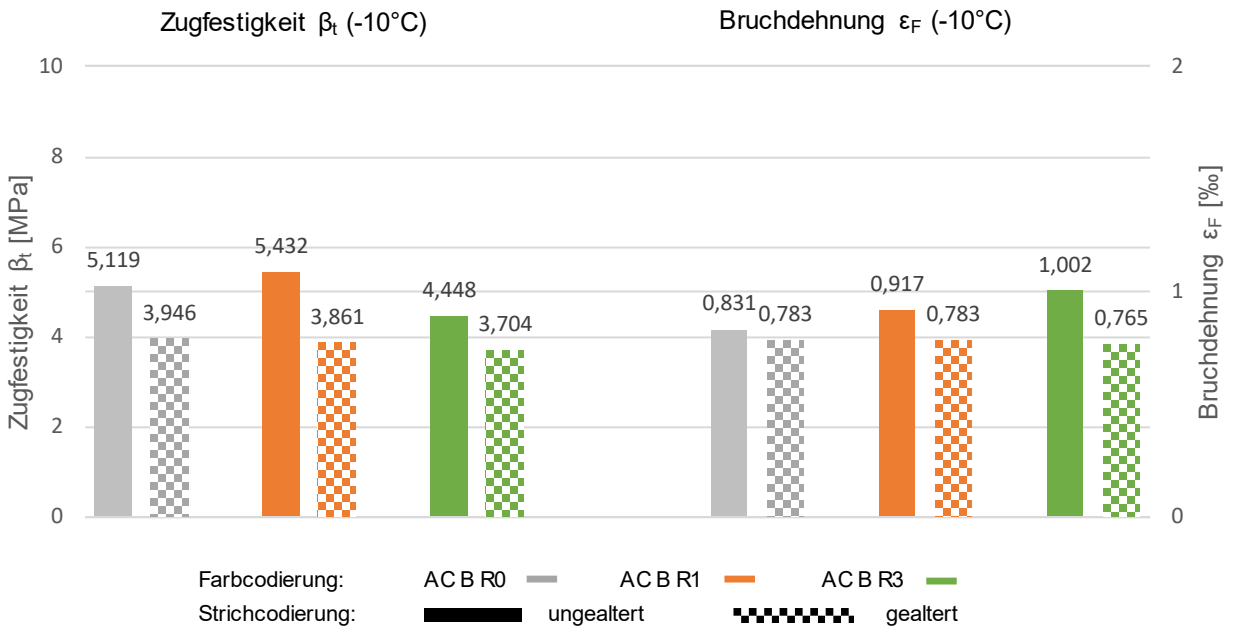

Bild 6-10: Ergebnisse des Zugversuches für die ungealterten und gealterten Asphaltbinderschichtvarianten (AC B).

Bei den Bruchdehnungen zeigt die Referenzvariante den geringsten und die Variante AC B R3 den höchsten Alterungsindex. Die Variante AC B R3 hat mit 1,002 ‰ die höchste Bruchdehnung bei der ungealterten und mit 0,765 ‰ die geringste Bruchdehnung bei der gealterten Variante. Die geringste Bruchdehnung bei den ungealterten Varianten ist bei der Referenzvariante mit 0,831 ‰ zu finden. Die Referenzvariante und die Variante AC B R1 weisen mit 0,783 ‰ die gleiche Bruchdehnung auf, die nur geringfügig über der Bruchdehnung der Variante AC B R3 liegt.

Die Tab. 6-5 gibt zusätzlich zu den Werten der Bruchtemperatur und der Zugfestigkeit noch die Prüfergebnisse für die Kryogene Spannung sowie die Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C an.

Bei der Kryogenen Spannung ist zu erkennen, dass die Variante AC B R3 den höchsten Alterungsindex aufweist und die höchsten Spannungen sowohl bei den ungealterten als auch bei den gealterten Varianten. Die Variante AC B R1 zeigt im ungealterten und gealterten Zustand die geringsten Spannungen sowie den geringsten Alterungsindex.

Hinsichtlich der Zugfestigkeitsreserve zeigt die Variante AC B R3 den höchsten Alterungsindex sowie die kleinsten Werte für die ungealterten und gealterten Varianten. Auch hier zeigt die Variante AC B R1 die höchsten Werte vor und nach Alterung. Der Alterungsindex der Variante AC B R1 ist mit 0,480 geringfügig höher als derjenige der Referenzvariante (0,475).

Variante	Bruchtemperatur		Kryogene Spannung		Zugfestigkeit		Zugfestigkeitsreserve	
	T_F [°C]	$\Delta_{A,TF}$ [K]	$\sigma_{kry,(-10°C)}$ [MPa]	$I_{A,\sigma kry,(-10°C)}$ [-]	$\beta_{t,(-10°C)}$ [MPa]	$I_{A,\beta t,(-10°C)}$ [-]	$\Delta\beta_{t,(-10°C)}$ [MPa]	$I_{A,\Delta\beta t,(-10°C)}$ [-]
AC_B_R0	-26,8	8,1	0,684	2,687	5,119	0,771	4,435	0,475
AC_B_R0a	-18,7		1,838		3,946		2,108	
AC_B_R1	-29,0	9,6	0,591	2,602	5,432	0,711	4,841	0,480
AC_B_R1a	-19,4		1,538		3,861		2,323	
AC_B_R3	-28,0	9,1	0,718	2,812	3,770	0,982	3,052	0,552
AC_B_R3a	-18,9		2,019		3,704		1,685	

Tab. 6-5: Zusammenstellung der Ergebnisse der Abkühl- und Zugversuche mit Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C für die Asphaltbinderschichtvarianten (AC B).

Die Prüfergebnisse der Binderschicht zeigen, dass die Variante AC B R1 die tiefsten Bruchtemperaturen und die höchste Zugfestigkeit, aber auch die ungünstigsten Alterungsindikatoren hinsichtlich dieser Kennwerte bei den ungealterten Varianten aufweist. Für die Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C zeigt sie ebenfalls die höchsten Werte sowie einen Alterungsindex der sich nur geringfügig von der Referenzvariante unterscheidet, auch hier ist insbesondere die Zugfestigkeitsreserve eine sehr wichtige Kenngröße für die Materialbewertung, da sie ein Maß für die ertragbaren Lastwechsel in diesem Temperaturbereich (hier: -10 °C) darstellt.

Vorteilhaft sind auch die relativ geringen Kryogenen Spannungen bei -10 °C im Vergleich zur Referenzvariante und der Variante AC B R3; hierbei präsentiert die Variante AC B R1 auch den günstigsten Alterungsindex.

6.2.3 Asphalttragschichtvarianten AC T

Für die Asphalttragschichtvarianten wurde die Initialvariante, die Referenzvariante sowie die zwei Rejuvenatorvarianten AC T R2 und AC T R3 auf ihr Kälteverhalten vor und nach Alterung geprüft.

In Bild 6-11 sind die Ergebnisse des Abkühlversuches dargestellt. Die ungealterte Initialvariante AC T X zeigt eine Bruchtemperatur von -9,5 °C auf, während die gealterte Variante mit +0,4 °C sogar eine positive Bruchtemperatur aufweist. Die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TF}$ ist dementsprechend 9,9 K und damit die geringste von allen geprüften Asphalttragschichtvarianten.

Die ungealterte Referenzvariante AC T R0 zeigt im Vergleich zu den beiden Rejuvenatorvarianten mit -20,9 °C die höchste Bruchtemperatur, gefolgt von der Variante AC T R2 mit -26,9 °C und der Variante AC T R3 mit -29,3 °C. Bei den gealterten Varianten hingegen stellt AC T R3 mit -5,7 °C die höchste Bruchtemperatur, die Variante AC T R2 folgt mit -6,6 °C und die Referenzvariante mit -7,3 °C. Daraus ergeben sich die Alterungsveränderungen für die Variante AC T R3 mit 23,6 K, die Variante AC T R2 mit 20,3 K und die Referenzvariante mit 13,6 K.

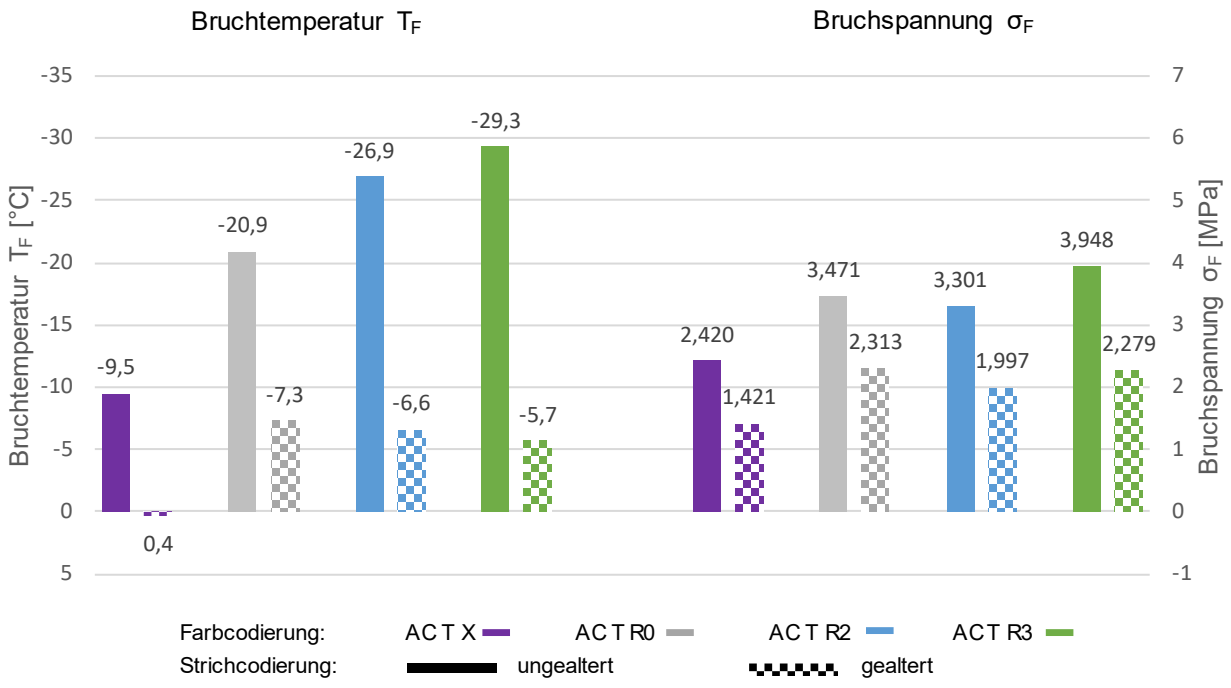

Bild 6-11: Ergebnisse des Abkühlversuches der ungealterten und gealterten Asphalttragschichtvarianten (AC T).

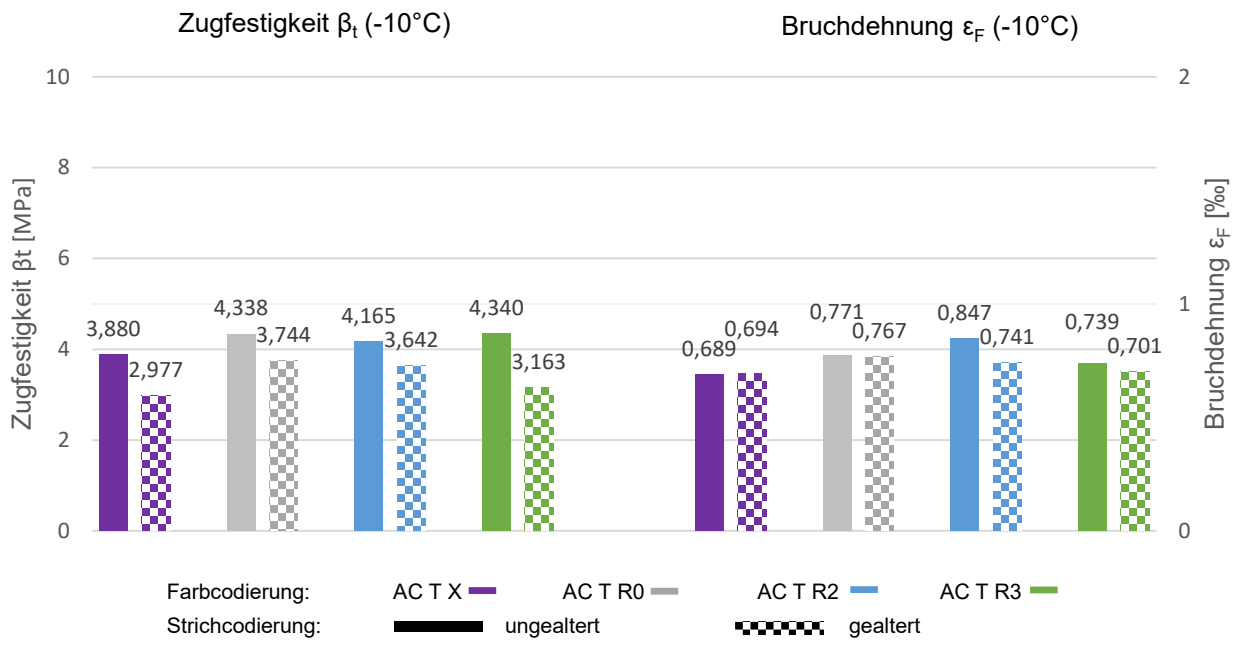

Bild 6-12: Ergebnisse des Zugversuches für die ungealterten und gealterten Asphalttragschichtvarianten (AC T).

Hinsichtlich der Ergebnisse des Abkühlversuches der Variante AC T R2 ist zu bemerken, dass die Ergebnisse dem Mittelwert aus fünf Einzelprüfungen (bzw. Prüfkörpern) entsprechen. Die Spannweite der Einzelprüfung liegt bei der Bruchtemperatur bei 15 K und ist damit als verdächtig anzusehen. Da keine besonderen Gründe für diese inhomogenen Ergebnisse ersichtlich waren, wurden alle fünf Ergebnisse bei der Mittelwertbildung berücksichtigt.

Bei den Bruchspannungen weist die ungealterte Variante AC T R3 (3,948 MPa) die höchsten Bruchspannungen auf, der geringste Wert ist mit 3,301 MPa bei der Variante AC T R2 zu finden. Für die ungealterte Referenzvariante wurde eine Bruchspannung von 3,471 MPa ermittelt.

Für die gealterten Varianten zeigt die Referenzvariante AC T R0 mit 2,313 MPa die höchste Bruchspannung, wobei die Differenz zur gealterten Variante AC T R3 (2,279 MPa) sehr gering ist. Die ermittelte Bruchspannung der Variante AC T R2 ist mit 1,997 MPa deutlich kleiner.

Auch für die Varianten der Asphalttragschicht wurden die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung bei verschiedenen Temperaturen untersucht. Die Prüfergebnisse für die Prüftemperatur von -10 °C sind in Bild 6-12 enthalten.

Hier zeigt sich, dass die ungealterte Referenzvariante AC T R0 und die ungealterte Variante AC T R3 sehr ähnliche Ergebnisse aufweisen (4,338 MPa bzw. 4,340 MPa). Die Variante AC T R2 zeigt mit 4,165 MPa eine etwas geringere Zugfestigkeit. Die höchste Zugfestigkeit unter den gealterten Varianten erreicht mit 3,744 MPa die Referenzvariante AC T R0a, darauf folgt die Variante AC T R2a mit 3,642 MPa und die Variante AC T R3a mit 3,163 MPa. Daraus ergeben sich Alterungsindizes von 0,863 für die Referenzvariante AC T R0a sowie 0,874 für die Variante AC T R2a und 0,729 für die Variante AC T R3a.

Bei den Bruchdehnungen ist erkennbar, dass die Initialvariante AC T X und die Referenzvariante AC T R0 kaum Unterschiede zwischen ihren ungealterten und gealterten Varianten aufweisen; dementsprechend liegen die Alterungsindizes bei 1,007 und 0,995. Die Variante AC T R2 weist die größten Differenzen zwischen ihrer ungealterten Variante und gealterten Variante auf, der Alterungsindex liegt hier bei 0,875. Die Variante AC T R3 hat einen Alterungsindex von 0,949.

Variante	Bruchtemperatur		Kryogene Spannung		Zugfestigkeit		Zugfestigkeitsreserve	
	T_F [°C]	$\Delta_{A,TF}$ [K]	$\sigma_{kry,(-5°C)}$ [MPa]	$I_{A,\sigma kry,(-5°C)}$ [-]	$\beta_{t,(-5°C)}$ [MPa]	$I_{A,\beta t,(-5°C)}$ [-]	$\Delta\beta_{t,(-5°C)}$ [MPa]	$I_{A,\Delta\beta t,(-5°C)}$ [-]
AC_T_X	- 9,5	9,9	1,834	---	3,880	0,767	2,046	---
AC_T_Xa	+ 0,4		---		2,977		---	
AC_T_R0	-20,9	13,6	0,912	2,285	4,338	0,863	3,426	0,485
AC_T_R0a	- 7,3		2,084		3,744		1,660	
AC_T_R2	-26,9	20,3	0,411	3,477	4,165	0,874	3,754	0,590
AC_T_R2a	- 6,6		1,429		3,642		2,213	
AC_T_R3	-29,3	23,6	0,386	5,702	4,340	0,729	3,954	0,243
AC_T_R3a	- 5,7		2,201		3,163		0,962	

Tab. 6-6: Zusammenstellung der Ergebnisse der Abkühl- und Zugversuche mit Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C für die Asphalttragschichtvarianten (AC T).

Aufgrund der hohen Bruchtemperaturen der gealterten Variante wird bei der Asphalttragschicht die Bewertungstemperatur auf -5 °C hochgesetzt, da eine Berechnung der Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C nicht möglich ist. Des Weiteren stellt die Bewertungstemperatur von -5 °C eine realistische Temperatur im Bereich der Asphalttragschichten dar.

Die Werte sind in Tab. 6-6 enthalten und zeigen, dass die Variante AC T R3 die geringste Kryogene Spannung vor der Alterung aufweist, wobei die Kryogene Spannung der Variante AC T R2 einen relativ ähnlichen Wert zeigt. Der höchste Wert nach Alterung ist ebenfalls bei der Variante AC T R3 zu finden und dieser unterscheidet sich deutlich von dem Wert der Kryogenen Spannung der Variante AC T R2.

Für die Initialvariante AC T X konnte keine Zugfestigkeitsreserve bei -5 °C ermittelt werden, da die Bruchtemperatur der gealterten Initialvariante +0,4 °C beträgt. Bei den verjüngten Varianten zeigt sich, dass Zugfestigkeitsreserven der ungealterten Rejuvenatorvarianten deutlich höher sind als die Zugfestigkeitsreserve der Referenzvariante AC T R0. Die Zugfestigkeitsreserven der Rejuvenatorvarianten bewegen sich mit 3,738 MPa für AC T R2 und 3,744 MPa für AC T R3 auf dem gleichen Niveau. Für die gealterten Varianten ergibt sich ein etwas anderes Bild, die höchste Zugfestigkeitsreserve weist die Variante AC T R2 mit 1,917 MPa auf. Während die Zugfestigkeitsreserve der Variante AC T R3 nur 1,296 MPa beträgt und damit deutlich geringer ist. Mit der gealterten Referenzvariante wurde eine Zugfestigkeitsreserve von 1,718 ermittelt. Den höchsten Alterungsindex (0,520) und damit die geringsten Auswirkungen zeigt die Referenzvariante, gefolgt von der Variante AC T R2 mit 0,513 und der Variante AC T R3 mit 0,346.

Der Vergleich der Initialvariante AC T X zu den verjüngten Varianten (AC T R0, AC T R2 und AC T R3) zeigt deutlich das Verbesserungspotential einer Verjüngung. Die Ergebnisse des Abkühlversuches zeigen deutliche Verbesserungen bei der ungealterten Referenzvariante AC T R0 und insbesondere bei den Varianten mit Rejuvenatoren (AC T R2, AC T R3). Auch die Zugfestigkeiten der verjüngten Varianten zeigen im Vergleich zur Initialvariante AC T X höhere Werte. Auch nach der Alterung ist beim Vergleich der Initialvariante AC T X mit den verjüngten Varianten ein deutliches Verbesserungspotential erkennbar. Beim Vergleich der Rejuvenatorvarianten mit der Referenzvariante AC T R0 sowie dem Vergleich der Rejuvenatorvarianten untereinander sind deutliche Unterschiede feststellbar. Während die Variante AC T R3 vor der Alterung deutlich höhere oder mit die höchsten Werte bei den ermittelten Kennwerten aufweist, zeigt sie nach der Alterung im Allgemeinen die geringste Performance. Die ungealterte Variante AC T R2 zeigt im Vergleich zur ungealterten Referenzvariante AC T R0 auch kleinere Werte (z. B. Zugfestigkeit, Bruchspannung) ansonsten größere Wert. Die gealterte Variante AC T R2a hingegen weist grundsätzlich kleinere Wert auf, wenn auch die Differenzen zur Referenzvariante AC T R0a hinsichtlich der Bruchtemperatur und der Zugfestigkeit nicht so groß sind wie zwischen der Variante AC T R3a und der Referenzvariante AC T R0a.

6.2.4 Zusammenfassung – Kälteverhalten

Bei den Asphaltdeckschichtvarianten ist hinsichtlich der Bruchtemperatur zu erkennen, dass die Nullvariante AC D 0 wesentlich höhere Bruchtemperaturen aufweist als die rejuvenierten Varianten

(AC D R1, AC D R2, AC D R3). Auch die Referenzvariante AC D R0 zeigt eine etwas höhere Bruchtemperatur im Vergleich zu den rejuvenierten Varianten. Gleichwohl sind die Auswirkungen der Alterung, gekennzeichnet durch die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TF}$, bei den rejuvenierten Varianten höher als bei der Referenzvariante AC D R0 und der Nullvariante AC D 0.

Die größere Alterungsveränderung der Referenzvariante AC D R0 gegenüber der Nullvariante AC D 0 lässt sich durch das höhere Alterungspotential des weichen Bindemittels hinsichtlich des Entweichens von leicht flüchtigen Bindemittelbestandteilen durch die thermische Belastung der Alterung erklären.

Bei der kryogenen Spannung zeigt sich für die rejuvenierten Varianten (AC D R1, AC D R2, AC D R3) im Vergleich zur Bruchtemperatur ein ähnliches Bild. Die Rejuvenatorvarianten zeigen deutlich kleiner Spannungen als die Referenzvariante AC D R0, allerdings auch wesentlich höhere Alterungsindizes. Die Variante AC D R1 stellt hierbei den kleinsten Alterungsindex $I_{A,\sigma kry,(-10\,°C)}$ im Vergleich zu den beiden anderen Rejuvenatorvarianten (AC D R2 und AC D R3).

Die Variante AC D R1 zeigt hinsichtlich der Zugfestigkeit und der Zugfestigkeitsreserve die höchsten Alterungsindizes und damit die geringsten Auswirkungen der Alterung.

Die Prüfergebnisse der Binderschicht zeigen, dass die Variante AC B R1 die tiefsten Bruchtemperaturen und die höchste Zugfestigkeit bei den ungealterten Varianten aufweist, aber auch die ungünstigsten Alterungsindikatoren hinsichtlich dieser Kennwerte. Für die Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C zeigt sie ebenfalls die höchsten Werte sowie einen Alterungsindex der sich nur geringfügig von der Referenzvariante unterscheidet. Vorteilhaft sind auch die relativ geringen Kryogenen Spannungen bei -10 °C im Vergleich zur Referenzvariante und der Variante AC B R3; hierbei repräsentiert die Variante AC B R1 auch den günstigsten Alterungsindex.

Der Vergleich der Initialvariante AC T X zu den verjüngten Varianten (AC T R0, AC T R2 und AC T R3) zeigt deutlich das Verbesserungspotential einer Verjüngung.

Die Ergebnisse des Abkühlversuches zeigen erhebliche Verbesserungen bei der ungealterten Referenzvariante AC T R0 und insbesondere bei den Varianten mit Rejuvenatoren (AC T R2, AC T R3). Auch die Zugfestigkeiten der verjüngten Varianten zeigen im Vergleich zur Initialvariante AC T X grundsätzlich höhere Werte. Auch nach der Alterung ist beim Vergleich der Initialvariante AC T Xa mit den verjüngten Varianten (AC T R2a, AC T R3a) ein deutliches Verbesserungspotential erkennbar.

Beim Vergleich der Rejuvenatorvarianten mit der Referenzvariante AC T R0 sowie dem Vergleich der Rejuvenatorvarianten untereinander sind deutliche Unterschiede feststellbar. Während die Variante AC T R3 vor der Alterung deutlich höhere oder mit die höchsten Werte bei den ermittelten Kennwerten aufweist, zeigt sie nach der Alterung im Allgemeinen die geringste Performance. Die ungealterte Variante AC T R2 zeigt im Vergleich zur ungealterten Referenzvariante AC T R0 auch kleinere Werte (z. B. Zugfestigkeit, Bruchspannung) ansonsten größere Werte. Die gealterte Variante AC T R2a hingegen weist grundsätzlich kleinere Wert auf, wenn auch die Differenzen zur Referenzvariante AC T R0a hinsichtlich der Bruchtemperatur und der Zugfestigkeit nicht so groß sind wie zwischen der Variante AC T R3a und der Referenzvariante AC T R0a.

6.3 Bestimmung der Standfestigkeit – Einaxialer Druckschwellversuch

Der Einaxiale Druckschwellversuch dient zur Ermittlung der Standfestigkeit bei hohen Temperaturen. Mit dem Druckschwellversuch nach TP Asphalt-StB Teil 25 B1 [50] wurden die Varianten der Asphaltdeckschicht und der Asphaltbinderschicht geprüft. Wie bekannt ist tritt durch die Alterung eine Versteifung des Bindemittels ein, die im Allgemeinen einen positiven Einfluss auf die Standfestigkeit ausüben könnte. Es ist daher zu erwarten, dass die gealterten Varianten eine höhere Standfestigkeit als die ungealterten Varianten aufweisen. Im Arbeitspapier Alterung von Asphalt im Laboratorium (AP AAL) [37] werden keine Alterungsindikatoren für die Bewertung der Standfestigkeit gegeben. In Anlehnung an die vorausgegangene Analyse werden aber auch hier für die Standfestigkeit Alterungsindikatoren berechnet und geprüft welche Aussagekraft diese Indikatoren besitzen.

Die Prüfergebnisse sind einerseits in Diagrammen als Kriechkurven und andererseits in tabellarischer Form dargestellt. Die Diagramme enthalten die Kriechkurven der ungealterten und gealterten Varianten, wobei der Wendepunkt, falls vorhanden, mit einem X markiert ist.

Die Tabelle enthält eine Analyse hinsichtlich des Wendepunktes und des Versuchsendes. Für die unterschiedlichen Varianten sind die Dehnungen und die Dehnungsraten am Wendepunkt angegeben, falls kein Wendepunkt vorhanden ist, werden ersatzweise die Dehnungen und Dehnungsraten des Versuchsendes zur Analyse herangezogen.

Die Analyse hinsichtlich des Versuchsendes beruht auf den Dehnungen und Dehnungsraten bei 10.000 Belastungszyklen, falls diese nicht erreicht werden die Anzahl der Belastungszyklen und die Dehnungsrate bei einer Dehnung von 40 ‰ ersatzweise zur Bewertung genutzt.

Da ein sehr standfestes Material eine geringe Dehnung bei einer hohen Anzahl von Belastungszyklen und ein nicht standfestes Material nach wenigen Belastungszyklen hohe Dehnungen am Wendepunkt oder am definierten Versuchsende aufweist, müssen sowohl die erreicht Zyklenanzahl als auch der Wert des Ergebnisses in einem geeigneten Alterungsindikator berücksichtigt werden. Die Unterschiede zwischen den ungealterten und gealterten Varianten hinsichtlich der Dehnung und der erreichten Zyklenanzahl werden daher nach der folgenden Formel zum Alterungsindex $I_{A,\varepsilon(n)}$ berechnet:

$$I_{A,\varepsilon(n)} = \frac{\sqrt{(\varepsilon_A - \varepsilon)^2 + (N_A - N)^2}}{1.000}$$

$I_{A,E(n)}$ = Alterungsindex, bezogen auf die Dehnung und Zyklenanzahl
ε = Dehnung der ungealterten Variante
ε_A = Dehnung der gealterten Variante
N = Zyklenanzahl der ungealterten Variante
N_A = Zyklenanzahl der gealterten Variante

Formel 6-1: Formel zur Berechnung des Alterungsindex für die Dehnung unter Einbeziehung der erreichten Zyklenanzahl des Einaxialen Druckschwellversuches

Die Formel basiert auf dem Satz von Pythagoras und gibt daher ein skaliertes Maß des Abstandes zwischen den Bewertungspunkten (Wendepunkt/Versuchende) wieder. Je größer der Abstand zwischen den Bewertungspunkten der ungealterten und gealterten Varianten ist, desto größer sind Auswirkungen der Alterung auf das Material und desto größer wird der Alterungsindex. Wie bei allen Alterungsindikatoren werden hierbei ausschließlich die Auswirkungen der Alterung bzw. die Veränderungen durch die Alterung betrachtet, daher stellt auch dieser Index keine Bewertungsgrundlage für die Standfestigkeit dar.

Da die Dehnungsrate punktspezifisch und damit weitestgehend unabhängig von der erreichten Zyklenanzahl ist, wird hierfür ein einfacher Index $I_{A,\varepsilon*}$ nach folgender Formel gebildet:

$$I_{A,\varepsilon*} = \frac{\varepsilon_A^*}{\varepsilon^*}$$

Formel 6-2: Formel zur Berechnung des Alterungsindex für die Dehnungsrate des Einaxialen Druckschwellversuches

6.3.1 Asphaltdeckschichtvarianten AC D

Für die Asphaltdeckschicht wurden die Nullvariante, die Referenzvariante sowie alle drei Rejuvenatorvarianten hergestellt und mit dem Einaxialen Druckschwellversuch nach den TP Asphalt-StB Teil 25 B1 [50] geprüft.

Das Bild 6-13 zeigt die mittleren Kriechkurven aller Varianten aus den Druckschwellversuchen. Wie es zu erwarten war, zeigen die gealterten Varianten durch die alterungsbedingte Versteifung eine wesentlich höhere Standfestigkeit als die ungealterten Varianten.

Während die gealterten Rejuvenatorvarianten keine Wendepunkte in den Kriechkurven aufweisen, sind bei der Nullvariante AC D 0 und Referenzvariante AC D R0 Wendepunkte ermittelt worden. Betrachtet man

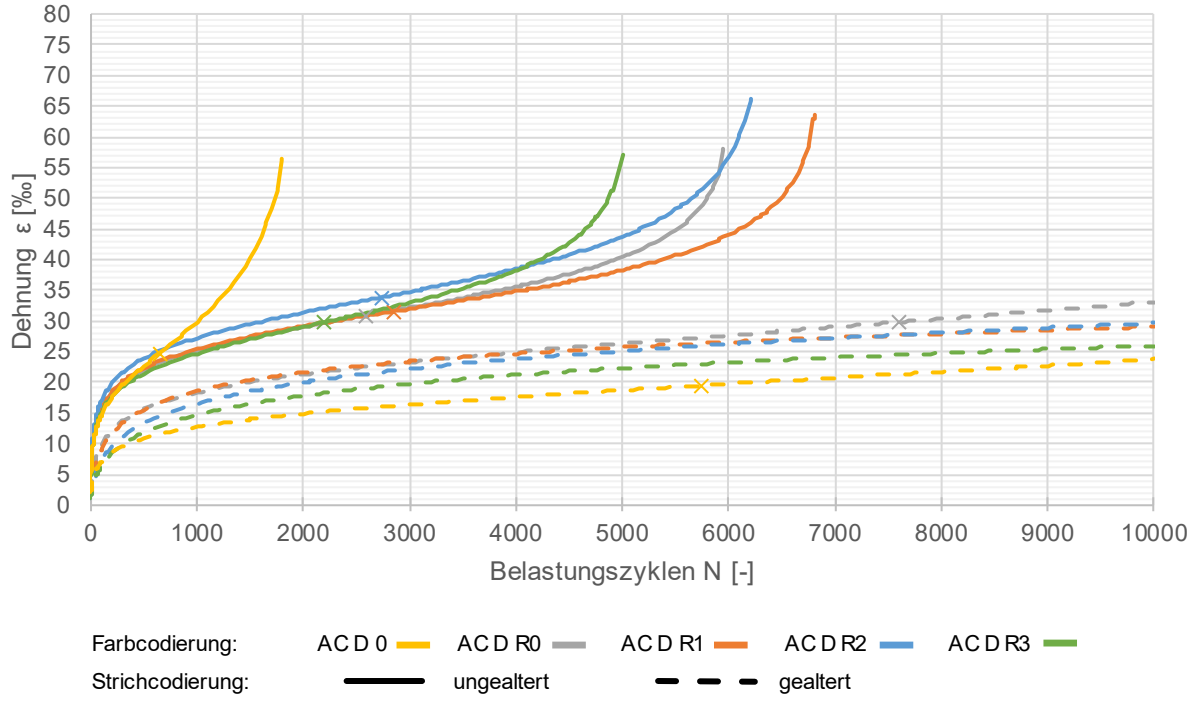

Bild 6-13: Kriechkurvenverläufe der ungealterten und gealterten Asphaltdeckschichtvarianten (AC D)

die Dehnung am Versuchsende, also bei 10.000 Zyklen, dann zeigt die gealterte Nullvariante mit 23,7 ‰ die geringste Dehnung, gefolgt von den Rejuvenatorvarinaten AC D R3 (26,0 ‰), AC D R1 (29,0 ‰) und AC D R2 (29,7 ‰) sowie der Referenzvariante AC D R0 mit 33,1 ‰.

Bei allen ungealterten Varianten sind Wendepunkte im Kriechkurvenverlauf ermittelt worden und keine ungealterte Variante hat die 10.000 Belastungszyklen überdauert.

Die ungealterte Nullvariante zeigt die geringste Standfestigkeit, ihr Wendepunkt wurde bereits nach 645 Zyklen erreicht, die Dehnungsrate im Wendepunkt beträgt 139,5 ‰·10^{-4}/n. Die Referenzvariante, die Variante AC D R1 und die Variante AC D R3 zeigen bis zum Belastungszyklus 2.000 sehr ähnliche Verläufe, während die Variante AC D R2 eine Konsolidierungsphase bei höherer Dehnung aufweist.

Im Vergleich zu den anderen Rejuvenatorvarianten und der Referenzvariante erreicht die Variante AC D R3 zuerst ihren Wendepunkt bei 2.200 Zyklen mit einer Dehnungsrate von 38,3 ‰·10^{-4}/n. Ihr Versuchsende liegt bei 4.222 Belastungszyklen und einer Dehnung von 40,0 ‰ (vgl. Tab. 6-7). Die ungealterte Variante AC D R1 zeigt die höchste Standfestigkeit aller ungealterter Variante; sie erreicht den Wendepunkt bei 2.850 Zyklen mit einer Dehnungsrate von 27,3 ‰·10^{-4}/n und ihr Versuchsende mit 40,0 ‰ bei 5.378 Zyklen. Dazwischen liegen die Referenzvariante AC D R0 sowie die Variante AC D R2 mit Wendepunkten bei 2.602 (AC D R0) und 2.752 (AC D R2) mit Dehnungsraten von 30,9 ‰·10^{-4}/n (AC D R0) und 33,5 ‰·10^{-4}/n (AC D R2). Das Versuchsende bei 40,0 ‰ und 4.341 Zyklen der Variante AC D R2 unterscheidet sich nur geringfügig von der Variante AC D R3. Die Referenzvariante AC D R0 weist bei 4.935 Zyklen eine Dehnung von 40,0 ‰ auf.

Die Auswirkungen der Alterung auf die Kennwerte der Standfestigkeit (Dehnung und Dehnungsrate) werden durch die Alterungsindikatoren $I_{A,\varepsilon(n)}$ und I_{A,ε^*} beschrieben und sind in Tab. 6-7 enthalten.

Die Ergebnisse sind zum einen nach dem Wendepunkt-Kriterium und zum anderen nach dem Versuchsende ausgewertet und in die Tabelle übernommen worden.

Das Wendepunkt-Kriterium verweist auf die Zyklenanzahl, Dehnung und Dehnungsrate im Wendepunkt der Kriechkurve. Ist kein Wendepunkt vorhanden sind die Ergebnisse zum Versuchsende anzugeben [50]. Das Kriterium Versuchsende verweist ebenfalls auf die Zyklenanzahl, Dehnung und Dehnungsrate allerdings zum Versuchsende bei 10.000 Belastungszyklen oder beim Erreichen einer Dehnung von 40,0 ‰.

Variante	Zyklus	Dehnung Wendepunkt[2)]		Dehnungsrate Wendepunkt		Zyklus	Dehnung Versuchsende[1)]		Dehnungsrate Versuchsende[1)]	
	n	$\varepsilon_{(n)}$	$I_{A,\varepsilon(n)}$	ε^*	I_{A,ε^*}	n	$\varepsilon_{(n)}$	$I_{A,\varepsilon(n)}$	ε^*	I_{A,ε^*}
	[-]	[‰]	[-]	[‰·10^{-4} /n]	[-]	[-]	[‰]	[-]	[‰·10^{-4} /n]	[-]
AC_D_0	654	24,8	5,096	139,5	0,073	1.493	40,0	8,507	305,8	0,034
AC_D_0a	5.750	19,5		10,1		10.000	23,7		10,3	
AC_D_R0	2.602	30,9	4,998	30,9	0,425	4.935	40,0	5,065	63,4	0,237
AC_D_R0a	7.600	29,8		13,1		10.000	33,1		15,0	
AC_D_R1	2.850	31,6	7,150	27,3	0,195	5.378	40,0	4,622	50,2	0,106
AC_D_R1a	10.000	29,0		5,3		10.000	29,0		5,3	
AC_D_R2	2.752	33,9	7,248	33,5	0,227	4.341	40,0	5,659	47,1	0,161
AC_D_R2a	10.000	29,7		7,6		10.000	29,7		7,6	
AC_D_R3	2.200	29,8	7,800	38,3	0,152	4.222	40,0	5,778	84,9	0,068
AC_D_R3a	10.000	26,0		5,8		10.000	26,0		5,8	

1) Das Versuchsende tritt nach 10.000 Belastungszyklen oder beim Überschreiten einer Dehnung von 40 ‰ ein (TP Asphalt-StB Teil 25 B1; Ausgabe 2020).
2) Falls Wendepunkt nicht vorhanden, Versuchsende bei 10.000 Belastungszyklen.

Tab. 6-7: Zusammenstellung der Prüfergebnisse des Druckschwellversuches der Asphaltdeckschichtvarianten (AC D)

Bei der Betrachtung des Alterungsindex I_{A,ε^*} für das Wendepunktkriterium ist zu erkennen, dass die Nullvariante den geringsten Index (0,073) und damit auch die größte Alterungsempfindlichkeit aufweist. Den höchsten Alterungsindex zum Wendepunkt-Kriterium zeigt die Referenzvariante AC D R0 mit 0,425. Für die Variante AC D R2 wurde ein Alterungsindex von 0,227 ermittelt, die Alterungsindizes der Varianten AC D R1 und AC D R3 betragen 0,195 und 0,152.

Unter Verwendung des Kriteriums Versuchsende ergibt sich die gleiche Rangfolge mit AC D R0 (0,237), AC D R2 (0,161), AC D R1 (0,106) und AC D R3 (0,068) sowie die Nullvariante AC D 0 mit 0,034.

Der Alterungsindex I_{A,ε^*} betrachtet ausschließlich das Verhältnis zwischen ungealterter und gealterter Variante, da für die Dehnungsrate grundsätzlich der kleinste Wert im Verlauf, ob am Wendepunkt oder am Versuchende betrachtet wird, ist daher hierfür das Wendepunkt-Kriterium als Bewertungskriterium vorzuziehen.

Bei der Dehnung verhält es sich etwas anders, da es hierfür ein Abbruchkriterium gibt (hier: 40,0 ‰) bei dem dann die erreicht Zyklenanzahl als Bewertungsgröße herangezogen wird. Des Weiteren kann die Zyklenanzahl und die Dehnung zum Zeitpunkt des Versagens (Wendepunkt) bewertet werden. Als adäquater Alterungsindikator ist hier der Alterungsindex $I_{A,\varepsilon(n)}$ verwendet worden, der sowohl die erreichte Zyklenanzahl und die Dehnungen zur Bewertung berücksichtigt (vgl. Formel 6-1).

Da die rejuvenierten Varianten nach der Alterung keine Wendepunkte, die Referenzvariante AC D R0 und Nullvariante AC D 0 aber sehr wohl Wendepunkte in ihren Kriechkurvenverläufen aufweisen, ergibt sich hierbei ein verzerrtes Bild. Der Index für die Referenzvariante AC D R0 und Nullvariante AC D 0 wird für das Wendepunkt-Kriterium zwischen den Wendepunkten bzw. dem Versuchsende nach 10.000 Zyklen berechnet. Daher werden für die gealterten Rejuvenatorvarianten überhöhte Indizes abbilden, was dazu führt, dass die Rejuvenatorvarianten im Vergleich zu der Referenzvariante und der Nullvariante die höchsten Alterungsindizes aufweisen.

Daher ist bei der Beurteilung des Alterungsverhaltens nach der Dehnung das Kriterium Versuchsende vorzuziehen. Wie die Tab. 6-7 zeigt, weist die Nullvariante mit einem Alterungsindex $I_{A,\varepsilon(n)}$ von 8,507 die mit Abstand größte Alterungsempfindlichkeit auf. Die Varianten AC D R2 und AC D R3 weisen mit 5,778 bzw. 5,659 im Vergleich zu der Variante AC D R1 (4,622) und der Referenzvariante AC D R0 (5,065) relativ hohe Indizes auf.

Der Alterungsindex $I_{A,\varepsilon(n)}$ erscheint grundsätzlich ein realistisches Bewertungsmittel zur Alterungsempfindlichkeit zu sein; er bildet sehr gut das subjektive Empfinden bei der Betrachtung der Kriechkurven sowie die Rangfolge Dehnungsraten der ungealterten Varianten.

Die Variante AC D R1 stellt die alterungsbeständigste Asphaltdeckschichtvariante dar. Sie weist zum einen im ungealterten Zustand den spätesten Versagenszeitpunkt (Wendepunkt) und dazu relativ geringe Dehnungen sowie die geringsten Dehnungsraten auf. Sie ist damit als standfester einzustufen als die Referenzvariante. Nach der Alterung zeigt sie eine sehr ähnliche Konsolidierungsphase wie die Referenzvariante mit abnehmenden Dehnungsraten im Gegensatz zur Referenzvariante.

Die Variante AC D R3 weist die größte Alterungsempfindlichkeit auf, sie zeigt im ungealterten Zustand den frühesten Versagenszeitpunkt und nach der Alterung einen sehr flachen Kurvenverlauf mit geringe Dehnungen.

Die Variante AC D R2 bewegt sich dazwischen; im ungealterten Zustand zeigt sie eine deutlich höhere Konsolidierungsphase als AC D R1 und AC D R3 wodurch das Versuchsende zu einem ähnlichen Zeitpunkt wie AC D R3 erreicht wird. Im gealterten Zustand zeigt die Variante AC D R2 eine ähnliche Konsolidierungsphase wie AC D R3 und nähert sich aufgrund höherer Dehnungsraten im weiteren Verlauf der Variante AC D R1 an und übersteigt sie schlussendlich.

6.3.2 Asphaltbinderschichtvarianten AC B

Bei der Asphaltbinderschicht wurden die Referenzvariante AC B R0 sowie die Rejuvenatorvarianten AC B R1 und AC B R3 untersucht.

Das Bild 6-14 zeigt die Kriechkurvenverläufe der ungealterten und gealterten Varianten. Hierbei ist erkennbar, dass alle Kriechkurven Wendepunkte aufweisen. Bei den ungealterten Varianten tritt der frühste Versagenszeitpunkt beim Zyklus 1.170 mit einer Dehnungsrate von 32,4 ‰·10^{-4}/n bei der Referenzvariante auf. Die Variante AC B R3 versagt bei 1.845 Zyklen mit einer Dehnungsrate von 33,1 ‰·10^{-4}/n und die Variante AC B R1 als letzte bei 1.451 Zyklen mit 34,8 ‰·10^{-4}/n.

Bei den gealterten Varianten kehrt sich die Rangfolge um und die Variante AC B R1 zeigt einen Wendepunkt bei 6.453 Zyklen mit einer Dehnungsrate von 30,6 ‰·10^{-4}/n, während die Variante AC B R3 bei 6.854 Zyklen eine Dehnungsrate von 33,1 ‰·10^{-4}/n aufweist und die Referenzvariante AC B R0 erst bei 8.600 Zyklen mit einer Dehnungsrate von 29,7 ‰·10^{-4}/n versagt.

Die Kriechkurvenverläufe sehen insbesondere in den Konsolidierungsphasen sowohl bei den ungealterten als auch bei den gealterten Varianten sehr ähnlich aus. Bedingt durch unterschiedliche Dehnungsraten trennen sich die Kriechkurven im weiteren Verlauf.

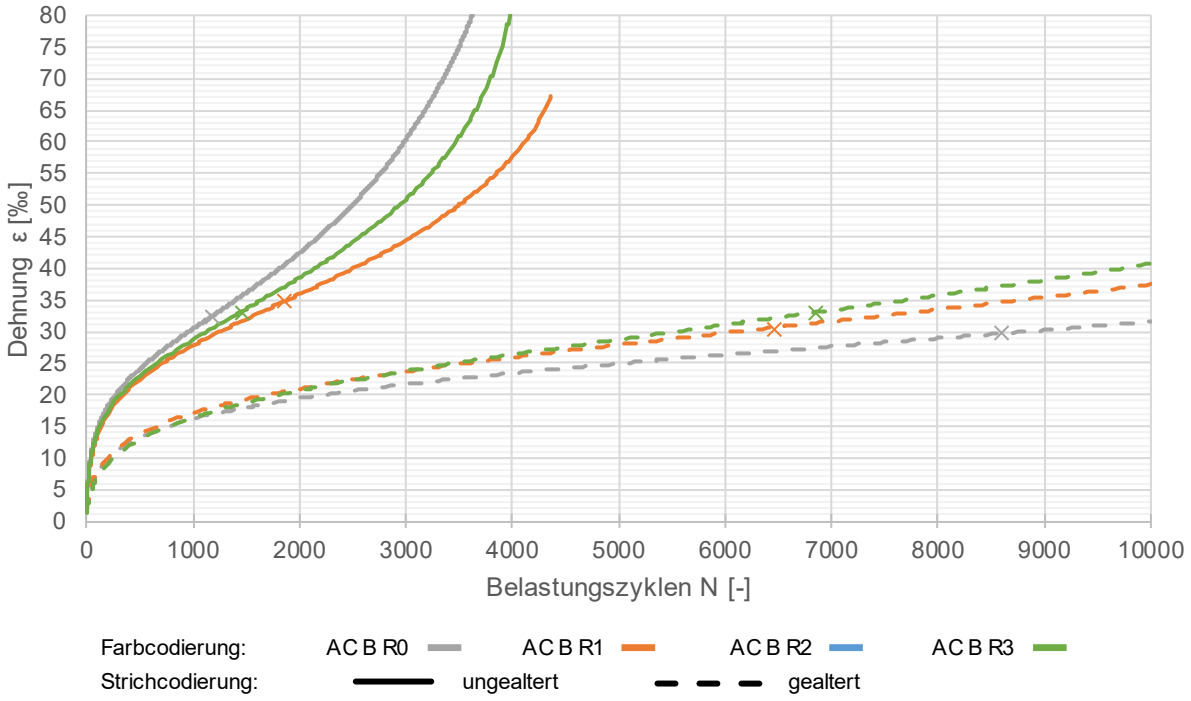

Bild 6-14: Kriechkurvenverläufe der ungealterten und gealterten Asphaltbinderschichtvarianten (AC B)

Variante	Zyklus	Dehnung Wendepunkt		Dehnungsrate Wendepunkt		Zyklus	Dehnung Versuchsende[1)]		Dehnungsrate Versuchsende[1)]	
	n	$\varepsilon_{(n)}$	$I_{A,\varepsilon(n)}$	ε^*	I_{A,ε^*}		$\varepsilon_{(n)}$	$I_{A,\varepsilon(n)}$	ε^*	I_{A,ε^*}
	[-]	[‰]	[-]	[‰· 10 $^{-4}$ /n]	[-]		[‰]	[-]	[‰· 10 $^{-4}$ /n]	[-]
AC_B_R0	1.170	32,4	7,435	113,0	0,112	1.814	40,0	8,230	127,3	0,101
AC_B_R0a	8.600	29,7		12,7		10.000	31,5		12,8	
AC_B_R1	1.854	34,8	4,618	78,0	0,235	2.506	40,0	7,498	84,9	0,250
AC_B_R1a	6.453	30,6		18,3		10.000	37,5		21,2	
AC_B_R3	1.451	33,1	5,403	96,1	0,238	2.140	40,0	7,587	105,2	0,254
AC_B_R3a	6.854	33,1		22,9		9.727	40,0		26,7	

[1)] Das Versuchsende tritt nach 10.000 Belastungszyklen oder beim Überschreiten einer Dehnung von 40 ‰ ein (TP Asphalt-StB Teil 25 B1; Ausgabe 2020).

Tab. 6-8: Zusammenstellung der Prüfergebnisse des Druckschwellversuches der Asphaltbinderschichtvarianten (AC B)

Das Versuchsende erreichend alle ungealterten Variante mit der Überschreitung der 40,0 ‰-Grenze; die Referenzvariante AC B R0 zuerst bei 1.814 Zyklen, gefolgt von der Variante AC B R3 mit 2.140 Zyklen und der Variante AC B R1 bei 2.506 Zyklen. Hinzu kommt die gealterte Variante AC B R3, die eine Dehnung von 40,0 ‰ bei 9.727 Zyklen erreicht. Die Varianten AC B R1 bleibt mit 37,5 ‰ und die Referenzvariante mit 31,5 ‰ bei 10.000 Zyklen unterhalb des Kriteriums für das vorzeitige Versuchsende.

Die Tab. 6-8 zeigt jeweils die Dehnungen und Dehnungsraten zum Wendepunkt-Kriterium und zum Kriterium Versuchsende sowie die dazugehörigen Alterungsindizes. Hinsichtlich des Alterungsindex I_{A,ε^*} am Wendepunktkriterium zeigen die Varianten AC B R1 (0,235) und AC B R3 (0,238) sehr ähnliche Werte sowie deutlich höhere Werte als der Alterungsindex der Referenzvariante. Gleiches zeigt sich für den Alterungsindex $I_{A,\varepsilon(n)}$ beim Kriterium Versuchsende. Die Varianten AC B R1 und AC B R3 weisen sehr ähnliche Werte auf und im Verhältnis kleinere Werte als die Referenzvariante.

6.3.3 Zusammenfassung – Standfestigkeit

Die Variante AC D R1 zeigt sich als alterungsbeständigste Asphaltdeckschichtvariante. Sie weist im ungealterten Zustand den spätesten Versagenszeitpunkt (Wendepunkt) und dazu relativ geringe Dehnungen sowie die geringsten Dehnungsraten auf. Sie weist damit auch einen günstigeren Verlauf bei der Standfestigkeit auf als die Referenzvariante. Nach der Alterung zeigt sie eine sehr ähnliche Konsolidierungsphase wie die Referenzvariante mit abnehmenden Dehnungsraten im Gegensatz zur Referenzvariante.

Die Variante AC D R3 weist die größte Alterungsempfindlichkeit auf, sie zeigt im ungealterten Zustand den frühesten Versagenszeitpunkt und nach der Alterung einen sehr flachen Kurvenverlauf mit geringe Dehnungen.

Die Variante AC D R2 zeigt im ungealterten Zustand eine Konsolidierungsphase mit deutlich höheren Dehnungen als AC D R1 und AC D R3 wodurch das Versuchsende zu einem ähnlichen Zeitpunkt wie AC D R3 erreicht wird. Im gealterten Zustand zeigt die Variante AC D R2 eine ähnliche Konsolidierungsphase wie AC D R3 und nähert sich aufgrund höherer Dehnungsraten im weiteren Verlauf der Variante AC D R1 an und übersteigt sie schlussendlich

Bei der Binderschicht weist die Rejuvenatorvariante AC B R1 die beste Alterungsbeständigkeit auf, wobei die Variante AC B R3 hier ein ähnliches Niveau zeigt. Während in den Kriechkurvenverläufen ein späteres Versagen der ungealterten Variante AC B R2 eintritt, zeigt sie ein früheres Versagen bei den gealterten Varianten. Letztendlich zeigen die Alterungsindizes I_{A,ε^*} am Wendepunkt und $I_{A,\varepsilon(n)}$ am Versuchsende die geringen Unterschiede.

6.4 Ermüdungsbeständigkeit

Die Beständigkeit gegen Ermüdung nach den TP Asphalt-StB Teil 24 wird ausschließlich an den Varianten der Asphalttragschicht untersucht. Die Untersuchungen sollen zeigen, inwieweit sich die Ermüdungsbeständigkeit beim Einsatz von Rejuvenatoren im Vergleich zur Referenzvariante verändert und damit Einfluss auf die Performance des Asphaltes nimmt.

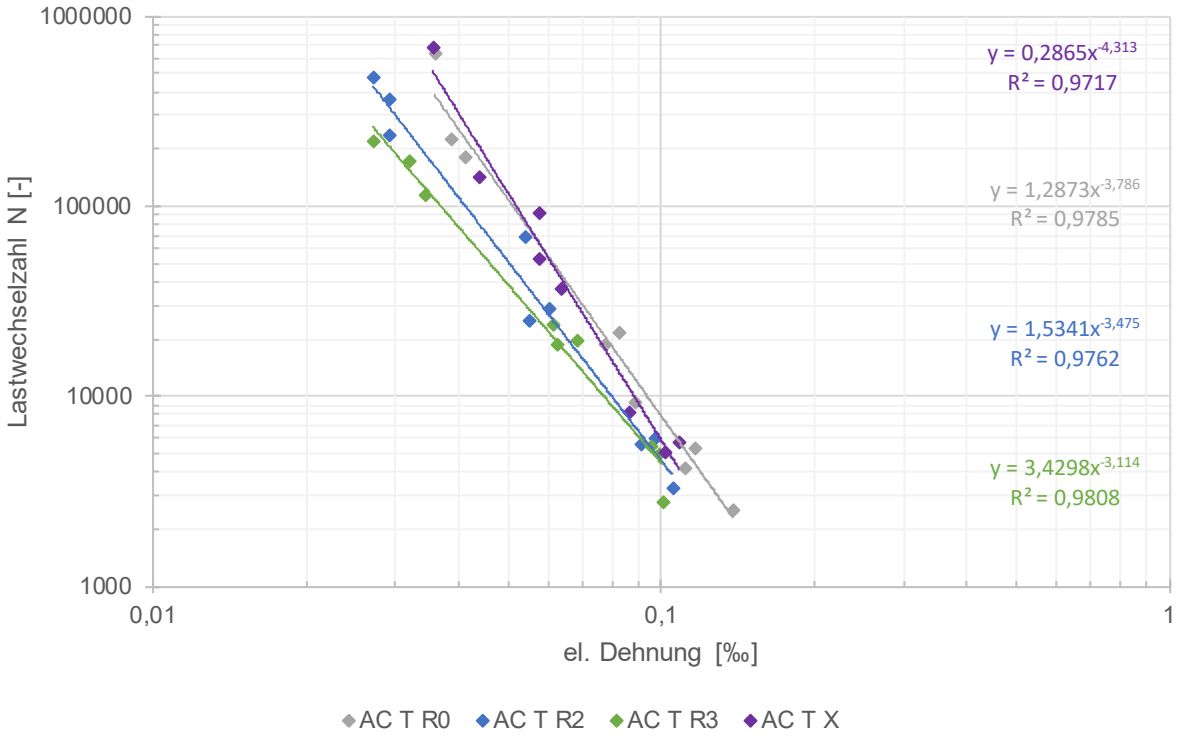

Bild 6-15: Ermüdungsfunktionen der ungealterten Varianten der Asphalttragschicht

Hierzu sind die Ermüdungsversuche an den Varianten der Asphalttragschicht durchgeführt und die Ermüdungsfunktionen ermittelt worden.

Das Bild 6-15 zeigt Ermüdungsfunktionen der ungealterten Varianten der Asphalttragschichten und damit die Ausgangslage für die Bewertung der Ermüdungsbeständigkeit.

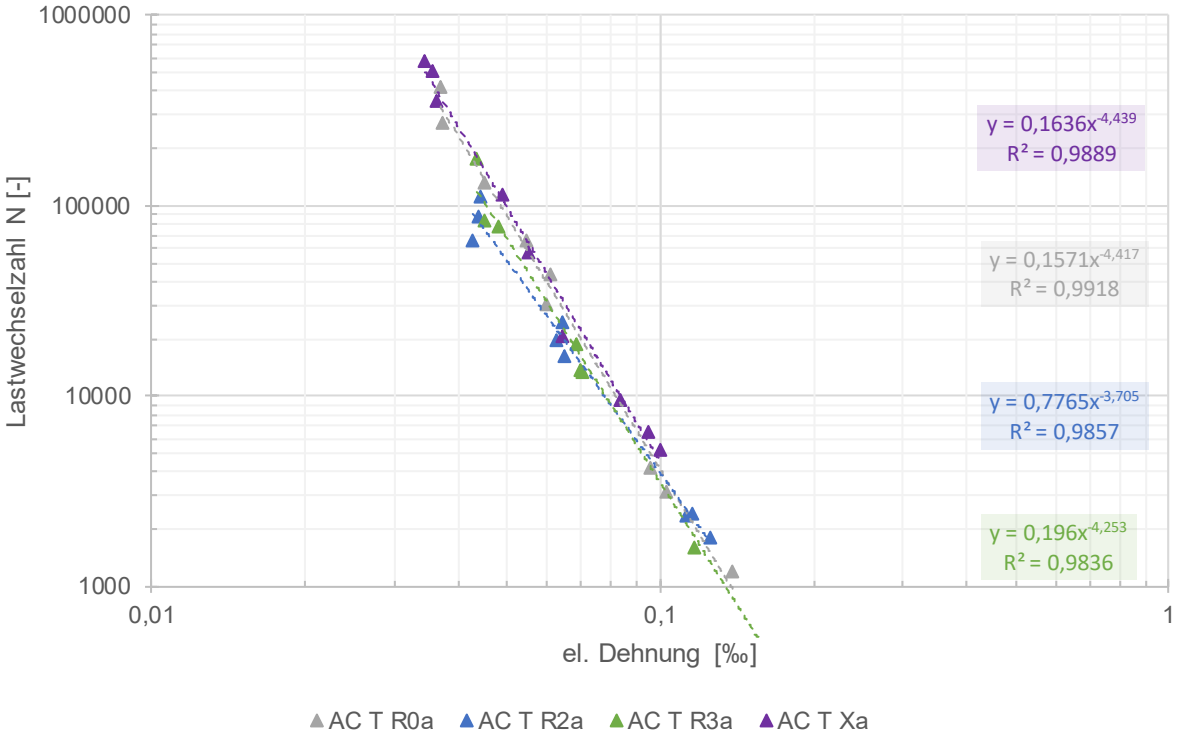

Bild 6-16: Ermüdungsfunktionen der gealterten Varianten der Asphalttragschicht

Es ist zu erkennen, dass die Rejuvenatorvarianten AC T R2 und AC T R3 bei einer Dehnung von 0,1 ‰ ähnliche Lastwechselzahlen aufweisen, während die Referenzvariante AC T R0 hier wesentlich höhere Lastwechsel erträgt. Bei der Betrachtung der Verläufe wird ersichtlich, dass die Referenzvariante und die Variante AC T R2 relativ parallel zu einander verlaufen, wobei die Referenzvariante im Bereich der höheren Lastwechselzahlen verläuft. Die Variante AC T R3 verläuft im Vergleich zu AC T R0 und AC T R2 etwas flacher, das bei kleineren Dehnungen zu geringeren Lastwechselzahlen führt.

Im Bild 6-16 sind die Ermüdungsfunktionen der gealterten Varianten dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Variante AC T R3 die größte Veränderung erfährt, der Verlauf der Ermüdungsfunktion wird durch die Alterung wesentlich steiler. Der Schnittpunkt der Ermüdungsfunktionen von Variante AC T R3 und AC T R3a liegt bei einer Dehnung von ca. 0,1 ‰, damit nimmt die Lastwechselzahl im Bereich von Dehnungen größer 0,1 ‰ ab und bei Dehnungen kleiner 0,1 ‰ deutlich zu. Der Schnittpunkt der Ermüdungsfunktionen der Referenzvariante liegt bei einer Dehnung von ca. 0,033 ‰, d. h. die ertragbaren Lastwechsel nehmen im Bereich größerer Dehnungen ab und für kleinere Dehnungen zu.

Die geringste Veränderung durch die Alterung erfährt die Variante AC T R2, die Ermüdungsfunktion der Variante AC T R2a verläuft geringfügig steiler als die Ermüdungsfunktion der ungealterten Variante AC T R2. Dadurch ergeben sich kaum Unterschiede in den ertragbaren Lastwechseln bei dieser Variante. Die Referenzvariante zeigt eine niedrigere Lastwechselzahl im Vergleich zur ungealterten Variante sowohl bei hohen als auch bei niedrigeren Dehnungen nach der Alterung. Dennoch kann die Referenzvariante eine höhere Lastwechselzahl im Vergleich zu anderen Varianten aufnehmen und zeigt damit die beste Ermüdungsfestigkeit auf (vgl. Bild 6-17).

Die Tab. 6-9 enthält eine Zusammenfassung der Lastwechselzahlen aller Varianten bei unterschiedlichen elastischen Anfangsdehnungen. Die Auswirkungen der Alterung auf die Ermüdungsbeständigkeit sind durch den Alterungsindex $I_{A,NMakro}$ gegeben.

Hier ist ebenfalls ersichtlich, dass die Variante AC T R2 die geringsten Veränderungen durch Alterung erfährt. Die Alterungsindizes über die gesamte Bandbreite der Anfangsdehnungen (0,05; 0,08; 0,11) hat die geringste Spannweite (0,167) und die Werte liegen mit (1,008; 0,905; 0,841) nahe bei 1,0.

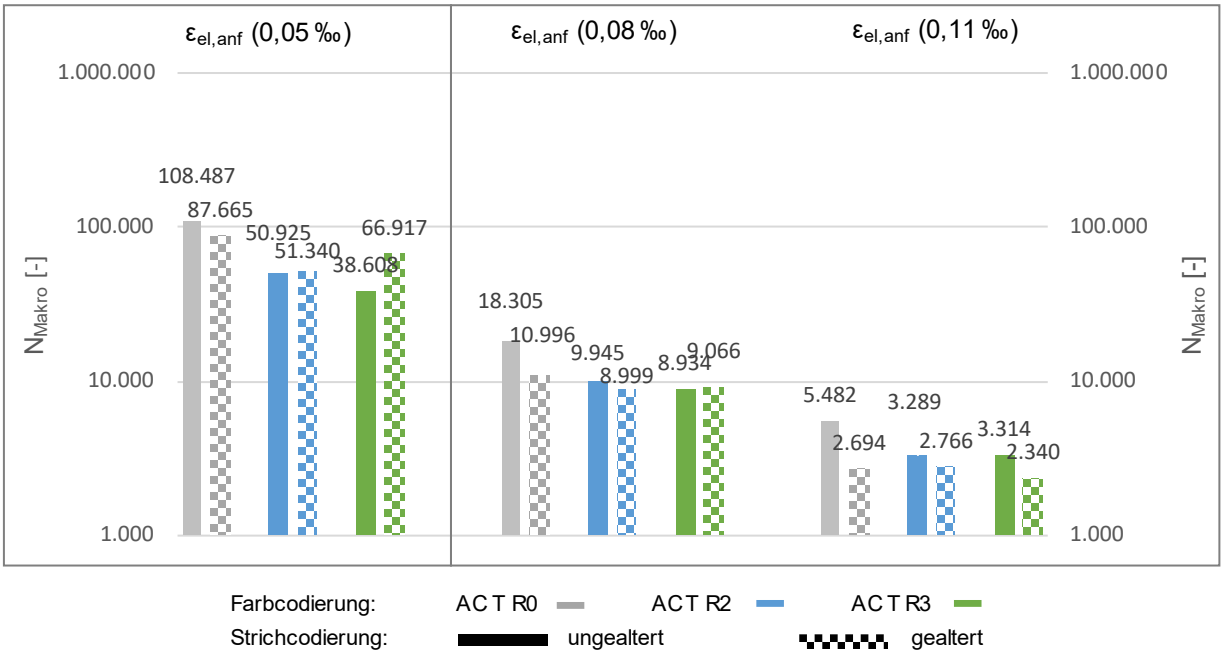

Bild 6-17: Grafische Darstellung der Ermüdungslastwechselzahlen bei unterschiedlichen elastischen Anfangsdehnungen.

Variante	Lastwechselzahl bei $\varepsilon_{el,anf}$ (0,05 ‰)		Lastwechselzahl bei $\varepsilon_{el,anf}$ (0,08 ‰)		Lastwechselzahl bei $\varepsilon_{el,anf}$ (0,11 ‰)		Ermüdungsparameter		
	N_{Makro} [-]	$I_{A,NMakro}$ [-]	N_{Makro} [-]	$I_{A,NMakro}$ [-]	N_{Makro} [-]	$I_{A,NMakro}$ [-]	k [-]	n [-]	R^2 [-]
AC_T_X	117.076	0,833	15.420	0,785	3.905	0,754	0,2865	-4,3130	0,98
AC_T_Xa	97.511		12.105		2.945		0,1636	-4,4390	0,99
AC_T_R0	108.487	0,808	18.305	0,601	5.482	0,491	1,2873	-3,7860	0,98
AC_T_R0a	87.665		10.996		2.694		0,1571	-4,4170	0,98
AC_T_R2	50.925	1,008	9.945	0,905	3.289	0,841	1,5341	-3,4750	0,98
AC_T_R2a	51.340		8.999		2.766		0,7765	-3,7050	0,99
AC_T_R3	38.608	1,733	8.934	1,015	3.314	0,706	3,4298	-3,1140	0,98
AC_T_R3a	66.917		9.066		2.340		0,1960	-4,2530	0,98

Tab. 6-9: Darstellung von Ermüdungslastwechselzahlen und Alterungsindizes bei unterschiedlichen elastischen Anfangsdehnungen sowie die Parameter der Ermüdungsfunktionen

Die Variante AC T R3 zeigt im Lastfall mit geringen Dehnungen (0,05 ‰) erheblich mehr ertragbare Lastwechselzahlen bei ihrer gealterten Variante als bei ihrer ungealterten Variante weshalb der Alterungsindex mit 1,733 deutlich größer 1,0 ist. Der Alterungsindex beträgt bei einer Dehnung von 0,08 ‰ 1,015 und bei 0,11 ‰ Dehnung 0,706. Die Spannweite der Alterungsindizes beträgt damit 1,027.

Bei der Referenzvariante AC T R0 ist deutliche erkennbar, dass die ertragbaren Lastwechselzahlen durch die Alterung erheblich abnehmen. Die Alterungsindizes sind alle kleiner 1,0 und weisen eine Spannweite von 0,317 auf.

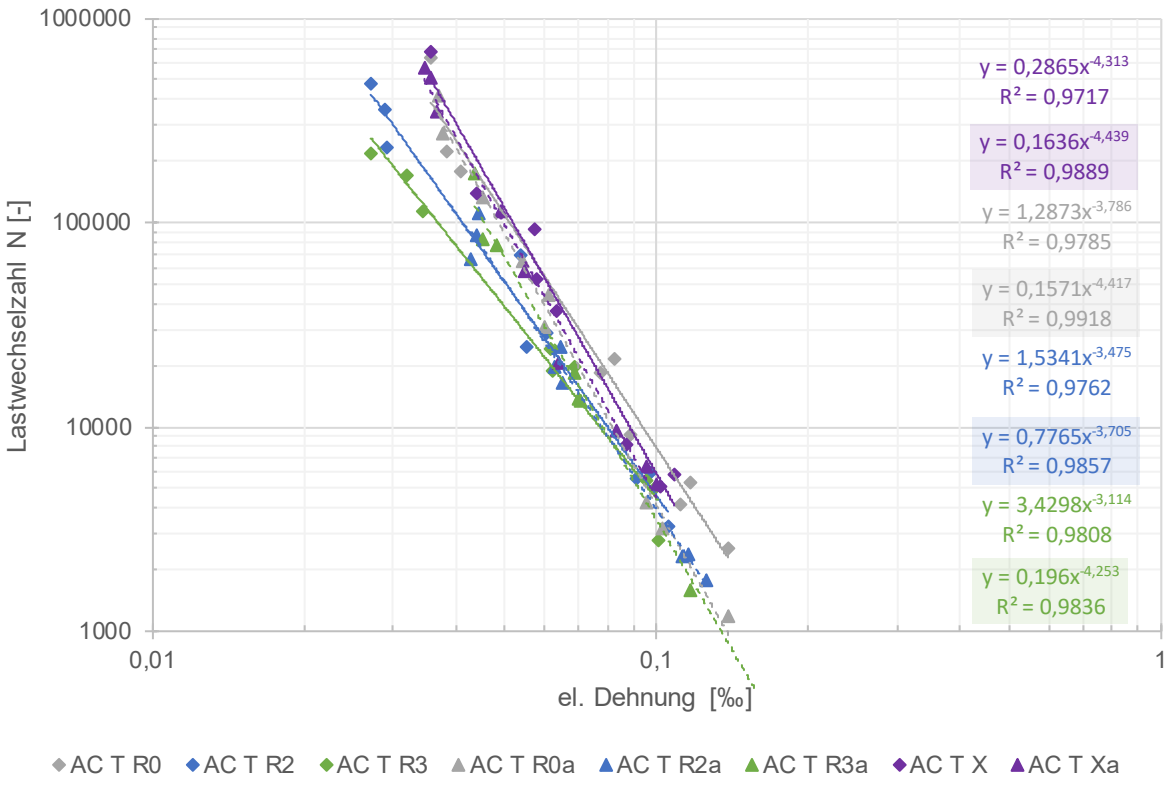

Bild 6-18: Ermüdungsfunktionen der ungealterten und gealterten Varianten der Asphalttragschicht

6.4.1 Zusammenfassung – Ermüdungsbeständigkeit

Die Variante AC T R2 zeigt am deutlichsten die geringsten Auswirkungen der Alterung auf die Ermüdungsbeständigkeit. Bei geringer Dehnung (0,05 ‰) ist die ertragbare Lastwechselzahl nach Alterung (AC T R2a) geringfügig höher als die Lastwechselzahl der ungealterten Variante (AC T R2). Bei größeren Dehnungen (0,08 ‰ und 0,11 ‰) fällt die ertragbare Lastwechselzahl leicht ab; die Alterungsindizes erreichen aber immer noch ein Niveau das oberhalb der Alterungsindizes der Referenzvariante AC T R0 und der Initialvariante AC T X liegt. Die geringe Alterungsempfindlichkeit ist gekennzeichnet durch eine sehr geringe Spannweite (0,167) bei den Alterungsindizes $I_{A,NMakro}$.

Die Variante AC T R3 weist mit einer Spannweite von 1,027 bei den Alterungsindizes $I_{A,NMakro}$ eine erhebliche Alterungsempfindlichkeit auf. Während sie bei kleinen Dehnungen (0,05 ‰) eine erhöhte Lastwechselzahl nach der Alterung zeigt, fällt die ertragbare Lastwechselzahl bei großen Dehnungen (0,11 ‰) deutlich ab. Im mittleren Dehnungsbereich (0,08 ‰) sind nur geringe Auswirkungen der Alterung auf die Lastwechselzahlen erkennbar.

7 Zusammenfassung und Fazit

In den vorherigen Kapiteln wurden die Ergebnisse zu den Bindemittel- und Asphaltprüfungen anhand von Diagrammen und Tabellen dargestellt und erläutert. Die Ergebnisse dieser Prüfungen werden hier noch einmal zusammengefasst und mit einer abschließenden Analyse ergänzt und bewertet.

Mit Hilfe der Ergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel konnte gezeigt werden, dass die Kurzzeitalterung durch Herstellung und Extraktion äquivalent zum RTFOT abgebildet wurde. Des Weiteren zeigten die Ergebnisse auch, dass das WAV ein höheres Alterungsniveau zum PAV-Verfahren aufweist.

Die Ergebnisse des EP RuK zeigen ebenfalls eine enge Spannweite hinsichtlich einer Bewertung der Alterungsbeständigkeit. Da die einzelnen verjüngten Varianten auf Grundlage der Erweichungspunkte rezeptiert wurden, ist diese enge Spannweite insbesondere bei den ungealterten Varianten positiv zu bewerten.

Eine erste Tendenz hinsichtlich der Alterungsbeständigkeit kann jedoch aus den Alterungsveränderungen $\Delta_{A,TR\&K}$ der ungealterten und gealterten Varianten abgelesen werden. Hierbei zeigt sich, dass die Referenzvarianten (R0) grundsätzlich die geringsten Alterungsempfindlichkeiten aufweisen, d.h. die Differenz zwischen den Erweichungspunkten der ungealterten und gealterten Bindemittelvarianten ist bei allen Mischgutvarianten am geringsten. Darüber hinaus weisen die Referenzvarianten auch grundsätzlich den höchsten Erweichungspunkt vor der Alterung und den niedrigsten Erweichungspunkt nach der Alterung auf. Damit zeigt der Alterungsindikator $\Delta_{A,TR\&K}$ deutliche Unterschiede zwischen den Referenzvarianten und den rejuvenierten Varianten. Im Gegensatz dazu zeigen die Rejuvenatorvarianten untereinander keine signifikanten Unterschiede.

Im Allgemein ist eine sehr ähnliche Tendenz bei den Ergebnissen der Nadelpenetration zu entnehmen. Auch hier zeigt die Referenzvariante grundsätzlich die günstigsten (größten) Alterungsindizes. Für die ungealterten Varianten stellt die Referenzvariante jeweils den kleinsten Penetrationswert.

Bei den gealterten Varianten der Deckschicht weist die Referenzvariante (BM D R0a) den gleichen Penetrationswert wie die Variante BM D R2a auf. Für die gealterte Referenzvariante der Binderschicht (BM B R0a) wurde ein 0,5 1/10mm geringerer Penetrationswert als für die Variante BM B R1a ermittelt. Bei den gealterten Tragschichtvarianten wurde für die Referenzvariante BM T R0a der höchste Penetrationswert.

Dennoch ist eine leicht stärkere Abnahme der Penetration bei den rejuvenierten Varianten nach der Alterung im Vergleich zur Referenzvariante zu erkennen. Auch bei der Nadelpenetration zeigt der Alterungsindex $I_{A,Pen}$ die deutlichen Unterschiede zwischen der Referenzvariante und den rejuvenierten Varianten, die wesentlich empfindlicher auf die Alterung reagieren als die Referenzvariante.

Die Ergebnisse der BTSV-Temperatur spiegeln bis auf wenige Ausnahmen die Ergebnisse des Erweichungspunktes Ring und Kugel wider. Als Ausnahmen sind insbesondere die Erweichungspunkte der

gealterten Asphalttragschichtvarianten (AC T R0, AC T R2 und AC T R3) mit Erweichungspunkten über 90 °C zu nennen.

Hinsichtlich des Phasenwinkels zeigt sich eine ausgeprägte Homogenität bei den ungealterten Varianten der Asphaltdeckschicht (R = 0,3°) und der Asphaltbinderschicht (R = 0,1°). Bei den ungealterten Varianten der Asphalttragschicht lässt sich diese Homogenität nicht erkennen, hier liegt die Spannweite bei 1,8°.

Eine ähnliche Homogenität, jedoch mit etwas größeren Spannweiten, lässt sich auch bei den gealterten Varianten erkennen. Die Spannweiten betragen 0,9° (AC D), 0,7° (AC B) und 2,5° (AC T).

Wie bei den Erweichungspunkten und der Nadelpenetration zeigen auch hier die Alterungsindikatoren $\Delta_{A,TBTSV}$ und $\Delta_{A,\delta BTSV}$ die deutlichen Unterschiede zwischen den Referenzvarianten und den rejuvenierten Varianten. Die Referenzvariante weist grundsätzlich die günstigeren Alterungsindikatoren gegenüber den Rejuvenatorvarianten auf.

Die Ergebnisse des Brechpunktes nach Fraaß liefern überschaubare, aber dennoch homogene Ergebnisse für die Asphaltdeckschicht und die Asphaltbinderschicht. Hierbei lassen sich keine klaren Unterschiede für eine Bewertung der Alterungsbeständigkeit festmachen, obwohl die rejuvenierten Varianten stets größere Alterungsveränderungen aufweisen als die Referenzvariante. Erst die Varianten der Asphalttragschicht zeigen deutliche Unterschiede. Während die Referenzvariante (BM T R0) eine sehr kleine Alterungsveränderung (2,8 K) im Brechpunkt zwischen der ungealterten und gealterten Variante aufweist gibt es bei den Varianten BM T R2 (6,0 K) und BM T R3 (11,5 K) verhältnismäßig große Veränderungen durch die Alterung.

Bei den Untersuchungen zur Steifigkeit ist grundlegend anzumerken, dass neben den absoluten Werten der Steifigkeitsmodule die Alterungsindizes eine wesentliche Kenngröße zur Beurteilung darstellen. Durch den Alterungsindex $I_{A,E(T)}$ wird die relative Änderung des Steifigkeitsmoduls durch die Alterung ersichtlich.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass eine Steifigkeitszunahme durch Alterung nicht zwangsläufig als negativ zu beurteilen ist, sondern das jeweilige Belastungsniveau mitbetrachtet werden muss. So kann eine Steifigkeitszunahme bei hohen Temperaturen einen positiven Effekt auf die Standfestigkeit haben und damit zur Dauerhaftigkeit eines Asphaltes beitragen. Während eine Steifigkeitszunahme im Bereich der tiefen Temperaturen auf ein frühzeitiges Versagen durch Kälterissbildung deuten kann.

Die Beurteilung der Alterungsempfindlichkeit erfolgt anhand des Alterungsindex $I_{A,E(T)}$ im Bereich von tiefen Temperaturen (-10 °C/20 Hz) und hohen Temperaturen (50 °C/0,1 Hz). Eine Beurteilung anhand des Tiefsttemperaturbereiches erfolgt nicht, da sich die Steifigkeitsmodule der Bindemittel hier nahe des Glasmoduls befinden wodurch sich alle Alterungsindizes auf einem konstanten Niveau nahe 1,0 einpendeln.

Die Variante AC D R1 zeigt hier insgesamt die besten Eigenschaften nach Alterung. Begründet wird das mit dem geringen und nahe 1,0 liegenden Alterungsindex (1,050) bei tiefen Temperaturen, der zudem sehr ähnlich zum Alterungsindex (1,042) der Referenzvariante AC D R0 ist. Er deutet in diesem Bereich auf eine geringe Alterungsempfindlichkeit hin, die sich positiv auf das Kälteverhalten auswirkt.

Für den Bereich der hohen Temperaturen stellt die Variante AC D R1 nur den dritthöchsten Alterungsindex (3,324) unter den verjüngten Varianten, der sich allerdings auf einem ähnlichen Niveau mit dem zweithöchsten Alterungsindex (3,590) der Varianten AC D R3 und näherungsweise zum Alterungsindex (4,033) der Referenzvariante befindet. Zudem zeigt die Variante AC D R1 hier die höchsten Steifigkeiten unter den rejuvenierten Varianten. Der hohe Alterungsindex deutet hierbei auf eine deutliche Versteifung durch Alterung hin und damit auf eine hohe Alterungsempfindlichkeit hin. Allerdings kommt diese zunehmende Versteifung durch Alterung der Standfestigkeit des Asphaltdeckschichtmaterials zugute, weshalb ein hoher Alterungsindex bei hohen Temperaturen aus diesem Blickwinkel positiv gewertet werden kann.

Die Variante AC D R2 zeigt aufgrund ihrer Alterungsindizes (1,094) bei tiefen Temperaturen eine mäßige Alterungsempfindlichkeit sowie im Bereich der hohen Temperaturen die geringste Alterungsempfindlichkeit aller verjüngten Varianten auf. Die Variante AC D R3 zeigt sowohl bei tiefen Temperaturen (1,166) als auch bei hohen Temperaturen (3,590) die höchsten Alterungsindizes der rejuvenierten Varianten und damit die höchste Alterungsempfindlichkeit.

Bei den Asphaltbinderschichtvarianten zeigen sich im Bereich der tiefen Temperaturen (-10 °C/10 Hz) für die Alterungsempfindlichkeit keine signifikanten Unterschiede bei den Alterungsindizes der geprüften Varianten. Alle Indizes bewegen sich im Nahbereich der 1,0 und weisen damit eine geringe Alterungsempfindlichkeit für diesen Bereich auf. Hervorzuheben und besonders positiv ist hierbei das die Variante AC B R1 einen Alterungsindex kleiner eins aufweist und damit nach der Alterung eine geringere Steifigkeit als vor der Alterung zeigt.

Im Bereich der hohen Temperaturen weist die Variante AC B R3 mit einem Alterungsindex von 1,770 deutlich die geringste Alterungsempfindlichkeit auf. Darauf folgt die Referenzvariante mit 2,704 und die Variante AC B R1 mit 3,095.

Da die Standfestigkeit ebenfalls eine maßgebende Eigenschaft der Asphaltbinderschicht ist, ist hier, wie bei der Asphaltdeckschicht, ein hoher Alterungsindex bei hohen Temperaturen ggf. positiv zu bewerten. Damit zeigt auch hier die Variante AC B R1 die besten Eigenschaften nach der Alterung. Wie alle Variante hat sie eine geringe Alterungsempfindlichkeit bei tiefen Temperaturen und weist bei hohen Temperaturen, bedingt durch einen hohen Alterungsindex, die höchsten Steifigkeiten auf. Obwohl die Variante AC B R3 die geringste Alterungsempfindlichkeit zeigt, weist sie sowohl vor als auch nach Alterung die geringsten Steifigkeiten auf, was negativ zu beurteilen ist.

Die Referenzvariante AC T R0 zeigt bei hohen Temperaturen den höchsten Alterungsindex und damit die höchste Alterungsempfindlichkeit. Die Variante AC T R2 zeigt einen ähnlich hohen Wert während die Variante AC T R3 einen deutlich geringeren Wert aufweist. Wie bereits erläutert trägt die Versteifung eines Asphaltes durch Alterung zur Verbesserung der Standfestigkeit bei und ist damit aus dieser Perspektive positiv zu bewerten. Allerdings handelt es sich hier um ein Asphalttragschichtmaterial bei dem die Standfestigkeit keine maßgebende Eigenschaft ist, wodurch eine hohe Versteifung bzw. hoher Alterungsindex aus diesem Grund nicht positiv bewertet werden kann.

Für alle Asphaltmischgüter gilt jedoch, dass durch höhere Steifigkeiten in den Asphaltschichten die Dehnungen an der Unterseite minimiert werden können, was zu einer Verlängerung der Lebensdauer führen kann. Anderseits beeinflusst die Versprödung des Bindemittels auch den Widerstand gegen Rissbildung infolge tiefer Temperaturen und ggf. das Ermüdungsverhalten negativ. Daher wurden für eine abschließende Beurteilung Untersuchungen zum Kälteverhalten (AC D, AC B, AC T), Ermüdungsverhalten (AC T) sowie der Standfestigkeit (AC D, AC B) der Asphaltmischgutvarianten durchgeführt.

Beim Kälteverhalten der Asphaltdeckschichtvarianten ist hinsichtlich der Bruchtemperatur zu erkennen, dass die Nullvariante AC D 0 wesentlich höhere Bruchtemperaturen aufweist als die rejuvenierten Varianten (AC D R1, AC D R2, AC D R3). Auch die Referenzvariante AC D R0 zeigt eine etwas höhere Bruchtemperatur im Vergleich zu den rejuvenierten Varianten. Gleichwohl sind die Auswirkungen der Alterung, gekennzeichnet durch die Alterungsveränderung $\Delta_{A,TF}$, bei den rejuvenierten Varianten höher als bei der Referenzvariante AC D R0 und der Nullvariante AC D 0.

Die größere Alterungsveränderung der Referenzvariante AC D R0 gegenüber der Nullvariante AC D 0 lässt sich durch das höhere Alterungspotential des weichen Bindemittels hinsichtlich des Entweichens von leicht flüchtigen Bindemittelbestandteilen durch die thermische Belastung der Alterung erklären.

Bei der kryogenen Spannung zeigt sich für die rejuvenierten Varianten (AC D R1, AC D R2, AC D R3) im Vergleich zur Bruchtemperatur ein ähnliches Bild. Die Rejuvenatorvarianten zeigen deutlich kleiner Spannungen als die Referenzvariante AC D R0, allerdings auch wesentlich höhere Alterungsindizes. Die Variante AC D R1 hat hierbei den kleinsten Alterungsindex $I_{A,\sigma kry,(-10\ °C)}$ im Vergleich zu den beiden anderen Rejuvenatorvarianten (AC D R2 und AC D R3).

Die Variante AC D R1 zeigt hinsichtlich der Zugfestigkeit und der Zugfestigkeitsreserve die höchsten Alterungsindizes und damit die geringsten Auswirkungen der Alterung.

Die Prüfergebnisse der Binderschicht zeigen, dass die Variante AC B R1 die tiefsten Bruchtemperaturen und die höchste Zugfestigkeit bei den ungealterten Varianten aufweist, aber auch die ungünstigsten Alterungsindikatoren hinsichtlich dieser Kennwerte. Für die Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C zeigt sie ebenfalls die höchsten Werte sowie einen Alterungsindex der sich nur geringfügig von der Referenzvariante unterscheidet. Vorteilhaft sind auch die relativ geringen Kryogenen Spannungen bei -10 °C im Vergleich

zur Referenzvariante und der Variante AC B R3; hierbei repräsentiert die Variante AC B R1 auch den günstigsten Alterungsindex.

Der Vergleich der Initialvariante AC T X zu den verjüngten Varianten (AC T R0, AC T R2 und AC T R3) zeigt deutlich das Verbesserungspotential einer Verjüngung.

Die Ergebnisse des Abkühlversuches zeigen erhebliche Verbesserungen bei der ungealterten Referenzvariante AC T R0 und insbesondere bei den Varianten mit Rejuvenatoren (AC T R2, AC T R3). Auch die Zugfestigkeiten der verjüngten Varianten zeigen im Vergleich zur Initialvariante AC T X grundsätzlich höhere Werte. Auch nach der Alterung ist beim Vergleich der Initialvariante AC T Xa mit den verjüngten Varianten (AC T R2a, AC T R3a) ein deutliches Verbesserungspotential erkennbar.

Beim Vergleich der Rejuvenatorvarianten mit der Referenzvariante AC T R0 sowie dem Vergleich der Rejuvenatorvarianten untereinander sind deutliche Unterschiede feststellbar. Während die Variante AC T R3 vor der Alterung deutlich höhere oder mit die höchsten Werte bei den ermittelten Kennwerten aufweist, zeigt sie nach der Alterung im Allgemeinen die geringste Performance. Die ungealterte Variante AC T R2 zeigt im Vergleich zur ungealterten Referenzvariante AC T R0 auch kleinere Werte (z. B. Zugfestigkeit, Bruchspannung) ansonsten größere Werte. Die gealterte Variante AC T R2a hingegen weist grundsätzlich kleinere Wert auf, wenn auch die Differenzen zur Referenzvariante AC T R0a hinsichtlich der Bruchtemperatur und der Zugfestigkeit nicht so groß sind wie zwischen der Variante AC T R3a und der Referenzvariante AC T R0a.

Hinsichtlich der Standfestigkeit zeigt sich die Variante AC D R1 als alterungsbeständigste Asphaltdeckschichtvariante. Sie weist im ungealterten Zustand den spätesten Versagenszeitpunkt (Wendepunkt) und dazu relativ geringe Dehnungen sowie die geringsten Dehnungsraten auf. Sie weist damit auch einen günstigeren Verlauf bei der Standfestigkeit auf als die Referenzvariante. Nach der Alterung zeigt sie eine sehr ähnliche Konsolidierungsphase wie die Referenzvariante mit abnehmenden Dehnungsraten im Gegensatz zur Referenzvariante.

Die Variante AC D R3 weist die größte Alterungsempfindlichkeit auf, sie zeigt im ungealterten Zustand den frühesten Versagenszeitpunkt und nach der Alterung einen sehr flachen Kurvenverlauf mit geringe Dehnungen.

Die Variante AC D R2 zeigt im ungealterten Zustand eine Konsolidierungsphase mit deutlich höheren Dehnungen als AC D R1 und AC D R3 wodurch das Versuchsende zu einem ähnlichen Zeitpunkt wie AC D R3 erreicht wird. Im gealterten Zustand zeigt die Variante AC D R2 eine ähnliche Konsolidierungsphase wie AC D R3 und nähert sich aufgrund höherer Dehnungsraten im weiteren Verlauf der Variante AC D R1 an und übersteigt sie schlussendlich.

Bei der Binderschicht weist die Rejuvenatorvariante AC B R1 die beste Alterungsbeständigkeit auf, wobei die Variante AC B R3 hier ein ähnliches Niveau zeigt. Während in den Kriechkurvenverläufen ein späteres Versagen der ungealterten Variante AC B R2 eintritt, zeigt sie ein früheres Versagen bei den gealterten Varianten. Letztendlich zeigen die Alterungsindizes I_{A,ε^*} am Wendepunkt und $I_{A,\varepsilon(n)}$ am Versuchsende die geringen Unterschiede.

Die Variante AC T R2 zeigt am deutlichsten die geringsten Auswirkungen der Alterung auf die Ermüdungsbeständigkeit. Bei geringer Dehnung (0,05 ‰) ist die ertragbare Lastwechselzahl nach Alterung (AC T R2a) geringfügig höher als die Lastwechselzahl der ungealterten Variante (AC T R2). Bei größeren Dehnungen (0,08 ‰ und 0,11 ‰) fällt die ertragbare Lastwechselzahl leicht ab; die Alterungsindizes erreichen aber immer noch ein Niveau das oberhalb der Alterungsindizes der Referenzvariante AC T R0 und der Initialvariante AC T X liegt. Die geringe Alterungsempfindlichkeit ist gekennzeichnet durch eine sehr geringe Spannweite (0,167) bei den Alterungsindizes $I_{A,NMakro}$.

Die Variante AC T R3 weist mit einer Spannweite von 1,027 bei den Alterungsindizes $I_{A,NMakro}$ eine erhebliche Alterungsempfindlichkeit auf. Während sie bei kleinen Dehnungen (0,05 ‰) eine erhöhte Lastwechselzahl nach der Alterung zeigt, fällt die ertragbare Lastwechselzahl bei großen Dehnungen (0,11 ‰) deutlich ab. Im mittleren Dehnungsbereich (0,08 ‰) sind nur geringe Auswirkungen der Alterung auf die Lastwechselzahlen erkennbar.

Die Ergebnisse zeigen, dass es deutliche Unterschiede zwischen einer Verjüngung mit weichen Bindemitteln und einer Rejuvenierung (mit Zusatzmitteln) gibt. Bei der Verjüngung mit weichen Bindemitteln sind im Allgemeinen die günstigeren Alterungsindikatoren festgestellt worden. Die ungealterten Rejuvenatorvarianten zeigten im Allgemeinen eine ähnliche oder gelegentlich bessere Performance als die Referenzvarianten, nach der Alterung weisen sie jedoch im Allgemeinen eine etwas schlechtere Performance auf als die Referenzvarianten mit weichem Bindemittel als Verjüngungsmittel. Untereinander zeigen die Rejuvenatorvarianten ebenfalls signifikante Unterschiede; hierbei konnte festgestellt werden, dass der Rejuvenator R1 sehr häufig die günstigeren Alterungsindikatoren und damit auch eine bessere Performance (z.B. Standfestigkeit, Zugfestigkeitsreserve) als die Rejuvenatoren R2 und R3 aufweist. Der Rejuvenator R3 dagegen zeigt sehr häufig die ungünstigsten Alterungsindikatoren und damit höchste Alterungsempfindlichkeit sowie die geringste Performance (vgl. Standfestigkeit. Zugfestigkeitsreserve, Steifigkeit, Ermüdung).

Aufgrund dieser Erkenntnisse ist es notwendig die Performance nicht nur anhand von ungealterten Asphalten zu prüfen, sondern auch nach einer Alterung. Mit dem hier verwendeten Alterungsverfahren (WAV) konnte gezeigt werden, dass ein Alterungsniveau oberhalb der PAV-Alterung erreicht werden konnte, wobei das Alterungsverfahren mit einfachen Labormitteln (Grundausstattung) durchgeführt wurde und somit in jeder Prüfstelle reproduzierbar ist.

Zur Beurteilung von Rejuvenatoren sollten Prüfungen sowohl am extrahierten Bindemittel als auch an Asphalten durchgeführt werden. Grundsätzlich eignet sich hierzu das Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren mit der Bestimmung der BTSV-Temperatur und des Phasenwinkels, bei Straßenbaubitumen kann alternativ auch der Erweichungspunkt Ring und Kugel verwendet werden.

Zur Bestimmung der Asphalt-Performance liefern Prüfungen zur Steifigkeitsentwicklung vom ungealterten in den gealterten Zustand sowie zum Kälteverhalten wichtige Parameter bei denen signifikante Unterschiede beobachtet werden konnten. Insbesondere die Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C (AC D, AC B) bzw. -5 °C (AC T) liefert bei kritischen Temperaturen aussagekräftige Ergebnisse zur Performance der Asphalte.

Die Prüfung der Standfestigkeit mit dem Druckschwellversuch wird nach den hier vorliegenden Erkenntnissen als vernachlässigbar eingestuft, da durch die Alterung eine signifikante Versteifung der Bindemittel erfolgt und damit eine grundsätzliche Verbesserung der Standfestigkeit zu erwarten ist.

Abschließend kann festgestellt werden, dass sich eine sinnvoll Prüfsystematik aus der Prüfung und dem Vergleich einer Referenzvariante (ungealtert und gealtert) mit weichem Bindemittel sowie einer Rejuvenatorvariante (ungealtert und gealtert) ergibt. Hierzu eigenen sich die Prüfverfahren Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahren (bzw. alternativ bei Straßenbaubitumen auch der Erweichungspunkt Ring und Kugel) sowie das einfache Kälteverhalten (Bestimmung der Zugfestigkeitsreserve) bei -10 °C (AC D, AC B) bzw. -5 °C (AC T). Zur Minimierung des Arbeitsaufwandes und Erhöhung der Akzeptanz einer Prüfsystematik trägt ein technisch einfach umsetzbares und dennoch wirkungsvolles Alterungsverfahren bei.

Da die hier vorliegenden Ergebnisse allein auf der Verwendung von Straßenbaubitumen beruhen, ist eine Verifizierung bzw. Falsifizierung für modifizierte Bindemittel durchzuführen. Dazu sollte zunächst die vorgeschlagen Prüfsystematik berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

[1] FGSV (HRSG.): *H Re WA - Hinweise zur Anwendung von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt*. (FGSV 753). Köln : FGSV Verlag GmbH, 2022

[2] RADENBERG, Martin ; BOETCHER, Sabine ; SEDAGHAT, Natasha ; WISTUBA, Michael P. ; WALTHER, Axel ; BÜCHLER, Stephan ; SCHMIDT, Hans ; CETINKAYA: *Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt*. Schlussbericht zum FE 07.0250/2011/LRB. 2016

[3] DEUTSCHER ASPHALTVERBAND (DAV) E.V.: *Wiederverwenden von Asphalt* : *Nachhaltigkeit auf höchstem Niveau*. Bonn : DAV, 2014

[4] DEUTSCHER BUNDESTAG: *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen* (in Kraft getr. am 29. 7. 2017) (2017-07-29)

[5] FGSV E. V.: *TL AG-StB 09* : *Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat*. Köln : FGSV-Verlag, 2009

[6] FGSV E. V.: *M WA* : *Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt*. Köln : FGSV-Verlag, 2014

[7] FGSV E. V.: *TL Asphalt-StB 07/13* : *Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen*. Köln : FGSV-Verlag, 2013

[8] VELSKE, Siegfried ; MENTLEIN, Horst ; EYMANN, Peter: *Straßenbau, Straßenbautechnik*. 7., neu bearb. Aufl. Köln : Werner, 2013 (Werner-Ingenieur-Texte WIT)

[9] HOFKO, Bernhard ; HOSPODKA, Markus ; EBERHARDSTEINER, Lukas ; BLAB, Ronald ; FÜSSL, Josef ; GROTHE, Hinrich ; GROßEGGER, Daniel ; HANDLE, Florian: *Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt*. In: *Straße und Autobahn* (2014), Nr. 8

[10] HERR, Burghard: *Einfluß des Lösemittels auf die Eigenschaften von polymermodifizierten Bitumen*. In: *Asphalt Magazin* (1999), Nr. 6, S. 12–17

[11] NEUMANN, Hans-Joachim ; RAHIMIAN, Iradj ; PACZYNSKA-LAHME, Barbara: *Zur Strukturalterung von Bitumen*. In: *Bitumen Magazin* (1992), Nr. 2

[12] NEUMANN, Hans-Joachim: *Was ist Bitumen?* In: *Bitumen Magazin* (1995), Nr. 4

[13] SHEN, Junan ; AMIRKHANIAN, Serji ; MILLER, Jennifer Aune: *Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement*. In: *Construction and Building Materials* (2007), Nr. 5

[14] BROWNRIDGE, Jim: *The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation* : *Use and Need for Asphalt Rejuvenators*. In: *Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation* (2010)

[15] ROSTLER, F. S. ; WHITE, R. M.: *Influence of Chemical Composition of Asphalts on Performance, Particularly Durability*. 1959

[16] MCGOVERN, E. W.: *Resume of Five Field Applications of Bituminous Pavement Rejuvenator*. Verona, Pennsylvania : Koppers Company, Inc., 1963

[17] BOYER, R. E.: *Technical Report R690* : *Reclamite as a life Extender for Asphalt concrete pavements*. Port Hueneme, California : Navy Facilities Engineering Command, 1970

[18] ROSTLER, F. S. ; WHITE, R. M.: *Rejuvenation of Asphalt Pavements*. Oakland, California : Materials Research and Development, Inc., 1970

[19] VALUE ENGINEERING: *Report on Reclamite Usage*. San Bruno, California : Navy Facilities Engineering Command - Western Division, 1973

[20] BROWN, E. R. ; JOHNSON, R. R.: *Evaluation of rejuvenators for bituminous pavements*. Tyndall, Florida : Air Force Civil Engineering Center, 1976

[21] UNITED STATES GENERAL ACCOUNTING OFFICE: *Airfield Pavements: Use of Sealer / Rejuvenator to Extend Life of Airfields*. Washington, D.C. : United States General Accounting Office, 1997

[22] ESCOBAR, S. J. ; DAVIDSON, D. D.: *Role of Recycling Agents in the Restoration of Aged Asphalt Cements*. 1979

[23] LITTLE, D. H. ; HOLMGREEN, R. J. ; EPPS, J. A.: *Effect of Recycling Agents on the Structural Performance of Recycled Asphalt Concrete Materials*. 1981

[24] SHEN, Junan ; AMIRKHANIAN, Serji ; TANG, Boming: *Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures*. In: *Construction and Building Materials* (2007), Nr. 21

[25] CRAWLEY, A. B.: *Innovative Hot In-Place Recycling of Hot-Mix Asphalt Pavement in Mississippi*. In: *Transportation Researce Record 1654* (1999)

[26] KAZMIEROWSKI, Tom ; MARKS, Pamela ; LEE, Stephan: *Ten-year performance review of in situ hot-mix recycling in Ontario*. In: *Transportation Researce Record 1684* (1999)

[27] DENCK, Christian: *Wiederverwendung von Ausbauasphalt* : *Nicht nur ein Beitrag zur Ressourcenschonung* (DAV-Informationsveranstaltung "Asphaltanwendungen in der Praxis"). Hamburg, 2010

[28] FGSV E. V.: *Stellungnahme der Arbeitsgruppe 7 "Asphaltbauweisen"* : *FGSV zum "100%-Recycling" und "Grünem Asphalt"*. In: *Asphalt* (2013), Nr. 5

[29] MINISTERIUM FÜR VERKEHR BADEN-WÜRTTEMBERG: *Ergänzungen zu den Technischen Vertragsbedingungen im Straßenbau Baden-Württemberg (ETV-StB-BW)*. 2018

[30] GOHL, S.: *Maximalrecycling nach den ETV-StB-BW*. In: *Asphalt* (2014), Nr. 6

[31] DIN E. V.: *DIN 52050* : *BTSV-Prüfung*. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel. Berlin : Beuth Verlag, 2018

[32] ALISOV, Alexander ; WISTUBA, Michael ; RADENBERG, Martin: *Typisierung von Bitumen mittels instationärer Oszillationsrheometrie*. Technische Universität Braunschweig. Dissertation. 2017

[33] FGSV E. V.: *RPE-Stra 01* : *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahme an Straßenbefestigungen*. Köln : FGSV-Verlag, 2001

[34] AL-SAAIDY, Haydar Raheem: *Effects of Recycling Process on Performance-Related Properties of Recycled Asphalt Mixtures Before and After Ageing*. Wuppertal, Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Straßenentwurf und Straßenbau. Dissertation. 2018

[35] SCHRÖDER, Julian: *Untersuchungen zum Einsatz von polymermodifizierten Bindemitteln in Asphalttragschichten unter Berücksichtigung verschiedener Anteile von Asphaltgranulat*. Wuppertal, Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Straßenentwurf und Straßenbau. Masterarbeit. 2018

[36] LANDESBETRIEB STRAßENBAU NRW: *Online-Auskunft der Straßeninformationsbank Nordrhein-Westfalen (NWSIB)*. URL https://www.nwsib-online.nrw.de/

[37] FGSV E. V.: *AP AAL* : *Arbeitspapier Alterung von Asphalt im Laboratorium*. Köln : FGSV-Verlag, 2022, S. 1–24

[38] DIN E. V.: *DIN EN 14769* : *Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV)*. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel. Berlin : Beuth Verlag, 2012

[39] MOLLENHAUER, Konrad ; MOUILLET, Virginie ; PIÉRARD, Nathalie ; TUSAR, Marjan ; GABET, Thomas: *Laboratory aging of asphalt mixtures : simulation of reclaimed asphalt and application as test method for durability.* 2021

[40] DIN E. V.: *DIN EN 12697-45* : *Alterungsbeständigkeit an gesättigten Asphalt-Probekörpern (SATS-Prüfung)*. Asphalt- Prüfverfahren für Heißasphalt. Berlin : Beuth Verlag, 2012

[41] COLLOP, A. C. ; CHOI, Y. K. ; AIREY, G. D. ; ELLIOTT, R. C.: *Development of the saturation ageing tensile stiffness (SATS) test*. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport* 157 (2004), Nr. 3, S. 163–171

[42] WELLNER, Frohmut ; ASCHER, Daniel ; RADENBERG, Martin ; ÇETINKAYA, Reha: *Bestimmung des Alterungsverhaltens von Asphaltgemischen als Grundlage für die Dimensionierung und Prognose der Lebensdauer und Schadensentstehung* : *[Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: FE 04.205/2006/ARB]*. Bremen : Fachverl. NW, 2013 (Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 1091)

[43] POTSCHKA, Volker ; TAPPERT, Axel: *Veränderungen der Bindemitteleigenschaften während der Herstellung, Verarbeitung und Liegezeit von Asphalt*. Bonn- Bad Godesberg : Bundesminister für Verkehr Abt. Straßenbau, 1987 (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik 512)

[44] ÇETINKAYA, Reha: *Bewertung der Einflussgrößen auf die thermisch-oxidative Alterung von Bitumen im Asphalt*. Zugl.: Bonn, Univ., Diss., 2011. Bochum, Bochum : Europ. Univ.-Verl.; Bochumer Univ.-Verl., 2011 (Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswegebau Bd. 23)

[45] BELL, Chris A. ; WIEDER, Alan J. ; FELLIN, Marco J.: *Laboratory aging of asphalt-aggregate mixtures* : *Field validation*. Washington, DC : Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994

[46] BECKEDAHL, Hartmut J. ; NEUTAG, Lars: *Development of an incremental method for mechanistic asphalt concrete pavement deterioration models*. Abschlussbericht zum DFG-Projekt BE 1905/4-1. 2014

[47] RAMADAN, Eiad: *Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten von Asphaltschichten bei unterschiedlichen Alterungsstufen*. Dissertation. Aachen : Shaker Verlag, 2016, S. 1–175

[48] DIN E. V.: *DIN EN 12593* : *Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß*. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel. Berlin : Beuth Verlag, 2015

[49] FGSV E. V.: *TP Asphalt-StB Teil 26* : *Spaltzug-Schwellversuch - Bestimmung der Steifigkeit*. Technische Prüfvorschriften für Asphalt. Köln : FGSV-Verlag, 2018

[50] FGSV E. V.: *TP Asphalt-StB Teil 25 B 1* : *Einaxialer Druck-Schwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme*. Technische Prüfvorschriften für Asphalt. Köln : FGSV-Verlag, 2012

[51] FGSV E. V.: *TP Asphalt-StB Teil 24* : *Spaltzug-Schwellversuch - Beständigkeit gegen Ermüdung*. Technische Prüfvorschriften für Asphalt. Köln : f, 2018

[52] FGSV E. V.: *TP Asphalt-StB Teil 46 A* : *Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch*. Technische Prüfvorschriften für Asphalt. Köln : FGSV-Verlag, 2013

Bildverzeichnis

Bild 4-1: Berechnungen der Einwaage für Erstprüfungen der Referenzvarianten (links) und der Rejuvenatorvarianten (rechts) (hier: exemplarische Darstellungen für die AC D R0 und AC D R1)
Bild 4-2: Diagramm zur Ermittlung des prozentualen Anteils der Rejuvenatoren (hier: AC D; exemplarische Darstellung)
Bild 5-1: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfungen EP RuK und PEN für die Varianten des Asphaltdeckschichtmischgutes (AC D) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 5-2: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfungen EP RuK und PEN für die Varianten des Asphaltbinderschichtmischgutes (AC B) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 5-3: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfungen EP RuK und PEN für die Varianten des Asphalttragschichtmischgutes (AC T) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 5-4: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung BTSV für die Varianten des Asphaltdeckschichtmischgutes (AC D) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 5-5: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung BTSV für die Varianten des Asphaltbinderschichtmischgutes (AC B) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 5-6: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfungen BTSV für die Varianten des Asphalttragschichtmischgutes (AC T) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 5-7: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung Brechpunkt nach Fraaß für die Varianten des Asphaltdeckschichtmischgutes (AC D) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 5-8: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung Brechpunkt nach Fraaß für die Varianten des Asphaltbinderschichtmischgutes (AC B) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 5-9: Prüfergebnisse der Bindemittelprüfung Brechpunkt nach Fraaß für die Varianten des Asphalttragschichtmischgutes (AC T) vor der Alterung und nach der Alterung.
Bild 6-1: Steifigkeitsmodule der ungealterten und gealterten Asphaltdeckschichtvarianten bei Temperaturen von -10 °C und 20 °C sowie einer Belastungsfrequenz von 10 Hz.
Bild 6-2: Hauptkurven der Asphaltdeckschichtvarianten mit Darstellung der Alterungsindizes zu verschiedenen Temperatur-Frequenz-Äquivalenten
Bild 6-3: Steifigkeitsmodule der ungealterten und gealterten Asphaltbinderschichtvarianten bei Temperaturen von -10 °C und 20 °C sowie einer Belastungsfrequenz von 10 Hz.
Bild 6-4: Hauptkurven der Asphaltbinderschichtvarianten mit Darstellung der Alterungsindizes zu verschiedenen Temperatur-Frequenz-Äquivalenten
Bild 6-5: Steifigkeitsmodule der ungealterten und gealterten Asphalttragschichtvarianten bei Temperaturen von -10 °C und 20 °C sowie einer Belastungsfrequenz von 10 Hz.
Bild 6-6: Hauptkurven der Asphalttragschichtvarianten mit Darstellung der Alterungsindizes zu verschiedenen Temperatur-Frequenz-Äquivalenten
Bild 6-7: Ergebnisse des Abkühlversuches der ungealterten und gealterten Asphaltdeckschichtvarianten (AC D).
Bild 6-8: Ergebnisse des Zugversuches für die ungealterten und gealterten Asphaltdeckschichtvarianten (AC D).
Bild 6-9: Ergebnisse des Abkühlversuches der ungealterten und gealterten Asphaltbinderschichtvarianten (AC B).
Bild 6-10: Ergebnisse des Zugversuches für die ungealterten und gealterten Asphaltbinderschichtvarianten (AC B).
Bild 6-11: Ergebnisse des Abkühlversuches der ungealterten und gealterten Asphalttragschichtvarianten (AC T).
Bild 6-12: Ergebnisse des Zugversuches für die ungealterten und gealterten Asphalttragschichtvarianten (AC T).
Bild 6-13: Kriechkurvenverläufe der ungealterten und gealterten Asphaltdeckschichtvarianten (AC D)
Bild 6-14: Kriechkurvenverläufe der ungealterten und gealterten Asphaltbinderschichtvarianten (AC B)
Bild 6-15: Ermüdungsfunktionen der ungealterten Varianten der Asphalttragschicht
Bild 6-16: Ermüdungsfunktionen der gealterten Varianten der Asphalttragschicht
Bild 6-17: Grafische Darstellung der Ermüdungslastwechselzahlen bei unterschiedlichen elastischen Anfangsdehnungen.
Bild 6-18: Ermüdungsfunktionen der ungealterten und gealterten Varianten der Asphalttragschicht

Tabellenverzeichnis

Tab. 4-1: Zusammenfassung der Laborergebnisse aus den Erstprüfungen der Asphaltmischgüter für die Deckschichtvarianten
Tab. 4-2: Zusammenfassung der Laborergebnisse aus den Erstprüfungen der Asphaltmischgüter für die Binderschichtvarianten
Tab. 4-3: Zusammenfassung der Laborergebnisse aus den Erstprüfungen der Asphaltmischgüter für die Tragschichtvarianten
Tab. 5-1: Ergebnisse Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie Nadelpenetration der Asphaltdeckschichtvarianten
Tab. 5-2: Ergebnisse Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie Nadelpenetration der Asphaltbinderschichtvarianten
Tab. 5-3: Ergebnisse Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie Nadelpenetration der Asphalttragschichtvarianten
Tab. 5-4: Ergebnisse des Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahrens der Asphaltdeckschichtvarianten
Tab. 5-5: Ergebnisse des Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahrens der Asphaltbinderschichtvarianten
Tab. 5-6: Ergebnisse des Bitumen-Typisierungs-Schnellverfahrens der Asphalttragschichtvarianten
Tab. 5-7: Ergebnisse Brechpunkt nach Fraaß für die Asphaltdeckschichtvarianten
Tab. 5-8: Ergebnisse Brechpunkt nach Fraaß für die Asphaltbinderschichtvarianten
Tab. 5-9: Ergebnisse Brechpunkt nach Fraaß für die Asphalttragschichtvarianten
Tab. 6-1: Zusammenstellung der Ergebnisse für die ungealterten und gealterten Varianten der Asphaltdeckschicht sowie der Alterungsindizes bei verschiedenen Temperatur-Frequenz-Bedingungen.
Tab. 6-2: Zusammenstellung der Ergebnisse für die ungealterten und gealterten Varianten der Asphaltbinderschicht sowie der Alterungsindizes bei verschiedenen Temperatur-Frequenz-Bedingungen.
Tab. 6-3: Zusammenstellung der Ergebnisse für die ungealterten und gealterten Varianten der Asphaltdeckschicht sowie der Alterungsindizes bei verschiedenen Temperatur-Frequenz-Bedingungen.
Tab. 6-4: Zusammenstellung der Ergebnisse der Abkühl- und Zugversuche mit Zugfestigkeitsreserve bei -10 °C für die Asphaltdeckschichtvarianten (AC D).
Tab. 6-5: Zusammenstellung der Ergebnisse der Abkühl- und Zugversuche mit Zugfestigkeitsreserve bei 10 °C für die Asphaltbinderschichtvarianten (AC B).
Tab. 6-6: Zusammenstellung der Ergebnisse der Abkühl- und Zugversuche mit Zugfestigkeitsreserve bei 10 °C für die Asphalttragschichtvarianten (AC T).
Tab. 6-7: Zusammenstellung der Prüfergebnisse des Druckschwellversuches der Asphaltdeckschichtvarianten (AC D)
Tab. 6-8: Zusammenstellung der Prüfergebnisse des Druckschwellversuches der Asphaltbinderschichtvarianten (AC B)
Tab. 6-9: Darstellung von Ermüdungslastwechselzahlen und Alterungsindizes bei unterschiedlichen elastischen Anfangsdehnungen sowie die Parameter der Ermüdungsfunktionen