

Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteilen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 191

bast

Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteilen

von

Manfred Hase
Wiebke Beyersdorf
Anke Hase
Kathrin Rademacher
Kerstin Schindler

HNL Ingenieur- und Prüfgesellschaft mbH
Pinneberg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 191

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

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 Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 07.0268

Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteilen

Fachbetreuung

Franz Bommert

Referat

Asphaltbauweisen

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-748-8

Bergisch Gladbach, Mai 2023

Kurzfassung-Abstract

Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteilen

Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine mögliche Gleichwertigkeit der Gebrauchseigenschaften von Asphalten unter Verwendung gummimodifizierter Bindemittel und polymermodifizierter Bindemittel nachzuweisen.

Es wurden Asphalte mit gummimodifizierten Bindemitteln und mit einem polymermodifizierten Bindemittel vergleichend untersucht. Dafür wurden Untersuchungen zur Ansprache des Kälte-, des Steifigkeits-, des Ermüdungs-, und des Verformungsverhaltens bei Wärme sowie zur Ermittlung des Korn- und Substanzverlust und zum Griffigkeitsverhalten durchgeführt.

Im Laboratorium wurden Asphalte der Sorten SMA 8 S, AC 16 B S und PA 8 jeweils mit vier gummimodifizierten Bindemitteln und einem polymermodifizierten Bindemittel hergestellt. Als gummimodifizierte Bindemittel wurden jeweils zwei im Nassverfahren (Großmaßstab) hergestellte Fertigprodukte (GmB) und zwei im Laboratorium „im Trockenverfahren“ gemischte gummimodifizierte Bindemittel (GmBT) verwendet. An den für die Labormischungen eingesetzten Bindemitteln wurden Bindemittelkenndaten ermittelt.

Weiterhin wurden durch den Auftraggeber überreichte Rückstellproben untersucht. Dabei handelte es sich um sieben Proben der Asphaltmischgutsorte SMA 8 S (sechs Varianten mit GmB(T) und eine Variante mit PmB) sowie zwei Rückstellproben der Sorte AC 11 D S (eine Variante mit GmB(T) und eine Variante mit PmB).

Im Hinblick auf eine Bewertung der einzelnen Asphalteigenschaften bzw. ermittelten Kenngrößen wurden mathematisch-statistische Verfahren angewandt.

Zusammenfassend können anhand der statistischen Auswertung der untersuchten Asphalteigenschaften abschließend nicht durchgängig signifikante Unterschiede (Vor- bzw. Nachteile) zwischen den Asphalten einer Sorte mit den hier eingesetzten gummimodifizierten Bindemitteln und mit dem eingesetzten

polymermodifizierten Bindemittel über alle untersuchten Asphalteigenschaften erkannt werden.

Es kann daher von einer Gleichwertigkeit der Gebrauchseigenschaften von Asphalten unter Verwendung gummimodifizierter Bindemittel und polymermodifizierter Bindemittel ausgegangen werden. Das Ziel des Forschungsvorhabens konnte somit erreicht werden.

Comparison of the usage properties of asphalts with polymer-modified binders and rubber-modified binders with different rubber contents

The target of the research project was documentation of possible equivalence of the usage properties of asphalts using rubber-modified binders and polymer-modified binders.

Asphalts with rubber-modified binders and with a polymer-modified binder were examined for comparison. For this, examinations were conducted on the reaction of low temperature, stiffness, fatigue and deformation behaviors with heat and for determination of the grain and substance loss and the skid resistance.

The lab, asphalts of types SMA 8 S, AC 16 B S and PA 8 were produced with four rubber-modified binders and one polymer-modified binder each. The rubber-modified binders used were two finished products produced by the wet procedure (large scale) (GmB) and two rubber-modified binders (GmBT) mixed in the lab "by the dry procedure". Binder indexes were determined for the binders used in the lab mixtures.

Furthermore, the retention samples submitted by the client were examined. These were seven samples of the asphalt mix types SMA 8 S (six versions with GmB(T) and one version with PmB) as well as two retention samples of type AC 11 D S (one version with GmB(T) and one version with PmB).

In light of evaluation of the individual asphalt properties or determined indexes, mathematically-statistical procedures were applied.

All in all, the statistical evaluations of the examined asphalt properties finally do not continually show any significant differences (advantages or

disadvantages) between the asphalts of one type with the rubber-modified binders and the polymer-modified binder used here across all examined asphalt properties.

Therefore, equivalence of the usage properties of asphalts using rubber-modified binders and polymer-modified binders can be assumed. The target of the research project thus could be reached.

Summary

Comparison of the usage properties of asphalts with polymer-modified binders and rubber-modified binders with different rubber contents

The target of the research project was documentation of possible equivalence of the usage properties of asphalts using rubber-modified binders and polymer-modified binders.

For this, comparative examinations were conducted on asphalts with rubber-modified binders and a polymer-modified binder on reaction of low temperature behavior, stiffness behavior, fatigue behavior and deformation behavior with heat and for determination of the grain and substance loss and the skid resistance.

In the lab, asphalts of types SMA 8 S, AC 16 B S and PA 8 were produced with four rubber-modified binders and one polymer-modified binder each. The polymer-modified binder used for SMA 8 S and AC 16 B S was a binder of type 25/55-55 A and for PA 8 a binder of type 40/100-65 A. As rubber-modified binders, two finished products (GmB) produced by the wet procedure (on a large scale) and two rubber-modified binders (GmBT) mixed in the lab "by the dry procedure" each were used, with SMA 8 S and AC 16 B S using a rubber-modified binder of type GmB(T) 25/55-55 (each manufacturer V1 and V2) and PA 8 S rubber-modified binder of type GmB(T) 25/55-65 (each manufacturer V1 and V2).

The binders used for the lab mixtures were used to determine conventional characteristic binder indexes and determine the behavior in low temperatures in the bending beam rheometer (BBR) and for deformation behavior in the dynamic shear rheometer (DSR). In addition to the DSR test (temperature sweep), MSCR tests (Multiple Stress Creep and Recovery Test) were performed.

Furthermore, the retention samples submitted by the client were examined. These were seven samples of the asphalt mix types SMA 8 S (6 versions with GmB(T) (GmB-1 to GmB-6) and one version with polymer-modified binder 25/55-55 A) as well as two retention samples of type AC 11 D S (one version with GmB(T)

(GmB-7) and one version with polymer-modified binder 40/80-55).

Regarding assessment of the individual asphalt properties or determined indexes, mathematically-statistical procedures (simple variance analyses with downstream LSD test or simple average comparisons) were applied.

Below, the essential results of the examinations on the asphalt are summarized:

For reaction of the low temperature behavior, uniaxial tension stress and thermal stress retained specimen tests were performed.

The mathematically-statistical evaluation shows that the values for the breaking temperature in SMA 8 S and AC 16 B S each significantly differ from the other examined versions, with GmBT 25/55-55 V1, and also each separately belong to a different homogeneous group. For the SMA 8 S and AC 16 B versions with GmBT 25/55-55 V1, the respective lowest values for the breaking temperature were determined. Among others, the softer basic bitumen of type 70/100 used in the lab mix GmBT 25/55-55 V1 could explain this.

The PA 8 shows a significantly lower value for the breaking temperature than in the other four versions for the version with GmBT 25/55-65 V1 and must be assigned to a separate homogeneous group.

For the values of the tensions at break, none of the asphalt types under observation here (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) showed any statistical evidence of differentiation into homogeneous groups.

No significant differences between the examined retention samples SMA 8 S with polymer-modified binder and rubber-modified binders were found with mathematically-statistical procedures.

No significant differences regarding the characteristic values for breaking temperature and tension at break could be found in the retention samples AC 11 D S with polymer- or rubber-modified binders based on the simple average comparison.

Reaction of the stiffness behavior took place based on indirect tensile tests ("splitting tension swelling tests").

The stone mastic asphalts show significant differences in stiffness modules at all test temperatures (-10, 0, 10, 20 °C) and after the LSD test, they are classified in different homogeneous groups, with SMA 8 S with rubber-modified binder GmBT 25/55-55 V1 always showing the lowest values.

The stiffness modules of the asphalt binders show significant differences at all test temperatures as well. For the AC 16 B S with rubber-modified binder GmBT 25/55-55 V1, the lowest stiffness values are found in all cases.

Significant differences were found between the stiffness modules of the examined porous asphalts PA 8 at all test temperatures, but classification in different homogeneous groups is only possible for stiffness modules at 10 °C. PA 8 with rubber-modified binder GmBT 25/55-65 V2 is assigned to a different homogeneous group at 10 °C with the significantly highest value.

The results of the statistical evaluation of the stiffness modules of the SMA 8 S retention samples show that there are significant differences. Classification into four different homogeneous groups each can be performed for the test temperatures 0, 10 and 20 °C, with assignment of the versions to homogeneous groups differing between the three test temperatures.

The simple average comparison of the stiffness modules of the retention samples AC 11 D S leads to the result that all four test temperatures have significant differences between the stiffness modules of the RS-AC 11 D S with polymer- or with rubber-modified binders, with the stiffness modules of the RS-AC 11 D S with polymer-modified binder 45/80-55 being larger.

Examinations on reaction of the fatigue behavior were performed with the indirect tensile test ("splitting tension swelling test").

Evaluation of the indexes of elastic initial elongation and load cycle number is not possible with the above mathematically-statistical procedures, since the fatigue tests of the versions to be compared used different surface tensions.

The fatigue curve of the SMA 8 S with binder 25/55-55 A is between the stone mastic asphalts with rubber-modified binder across the entire elongation area. In the SMA 8 S with polymer-modified binder 25/55-55 A, the

comparatively lowest pitch of the fatigue curve is evident. The fatigue curves of the different SMA 8-versions intersect due to different pitches.

Based on the fatigue functions for asphalt binder AC 16 B S, it is evident that the asphalt binders with GmBT 25/55-55 tend to be able to withstand more load cycles at the same initial elongation than the asphalt binders with GmB 25/55-55. AC 16 B S with binder 25/55-55 A is between the two versions examined here with GmBT 25/55-55 (V1 and V2).

The fatigue function of the PA 8 with 40/100-65 A has a similar course (pitch) as the fatigue curves of the versions with GmBT 25/55-65 V1 and GmBT 25/55-65 V2. The PA 8 with GmB 25/55-65 V2 can withstand a lower number of load cycles at the same initial elongation. The PA 8 with GmB 25/55-65 V1 stands out by its comparatively large pitch and therefore is even above all other curves at an initial elongation of about below 0.07.

Among the retention samples SMA 8 S, the version with polymer-modified binder has by far the best fatigue behavior across the entire mapped elongation area.

The fatigue curves of the retention samples AC 11 D S with polymer-modified and rubber-modified binders intersect, which means that the AC 11 DS with GmB 7 will withstand more load cycles at an initial elongation of 0.1 %.

Two selected stone mastic asphalts (SMA 8 S with 25/55-55 A and with rubber-modified binder GmB 25/55-55 V1) were used to additionally test the fatigue behavior with "tension-swelling tests".

At a test temperature of 20 °C, the SMA 8 S with GmB 25/55-55 V1 shows a higher load cycle number with similar elongation at the end of the test than SMA 8 S with 25/55-55 A. At 5 °C, by contrast, much higher load cycles are reached at the end of the test by the SMA 8 S with 25/55-55 A than the SMA 8 S with GmB 25/55-55 V1, at the same time with a larger elongation than in the version with rubber-modified binder at the end of the test. At a test temperature of -10 °C, the SMA 8 S with 25/55-55 A also shows a higher load cycle number at the end of the test than the SMA 8 S with GmB 25/55-55 V1. The results of the average comparison performed

finally shows that the recognized differences are significant at 20 °C and 5 °C.

Regarding reaction of the deformation behavior with heat, cyclic compression tests (SMA 8 S, AC 16 B S, retention samples SMA 8 S, retention samples AC 11 D S) and “dynamic penetration tests” (PA 8) were conducted.

The statistical evaluation shows significant differences between the examined stone mastic asphalts SMA 8 S for the index of elongation rate (from cyclic compression test). The results of the LSD-test show that the five examined SMA 8 S are structured in three different homogeneous groups. The SMA 8 S with polymer-modified binder 25/55-55 A is assigned to the middle group.

The asphalt binder AC 16 B S shows significant differences between the examined versions both based on the determined values for the elongation rate and the number of load impulses at the turning point or at the end of the test. In both indexes, the results of the LSD-tests led to classification in three homogeneous groups, but with slightly different assignments of the versions to the different groups. The AC 16 B S with GmB 25/55-55 V1 and with GmB 25/55-55 V2 belong to the group with the significantly lowest expansion rates and the group with the significantly highest load impulse numbers in the turning point or at the end of the test. The AC 16 B S with 25/55-55 A alone belongs in the group with the highest elongation rate for the index elongation rate and in the group with the lowest values together with AC 16 B S with GmBT 25/55-55 V1 for the index load impulse number.

The statistical evaluation of the determined expansion rates at the turning point or at the end of the test showed significant differences for the retention samples SMA 8 S, with the other versions all belonging to a homogeneous group with the exception of the RS-SMA 8 S with GmB 5. Evaluation of the load impulses at the turning point or at the end of the test leads to four homogeneous groups.

Based on the simple average comparison, the two indexes from the pressure-swelling tests (elongation rate and number of load impulses at the turning point or at the end of the test) show significant differences between the AC 11 D S

with polymer-modified binder and the AC 11 D S with rubber-modified binder.

In all five examined porous asphalts, the dynamic penetration test was ended prematurely, before 10,000 load cycles were reached, when a penetration depth of 5 mm was achieved. The load cycle number at a penetration depth of 5 mm was statistically evaluated. The load cycle number showed significant differences between the five PA 8-versions. Based on the insights from the LSD-test, the PA 8 with GmB 25/55-65 V1 can be assigned to a different homogeneous group than the other four porous asphalts.

Regarding reaction of the deformation resistance with heat and permanence, wheel tracking tests on the asphalts produced in the lab of types SMA 8 S and AC 16 B S and the retention samples (SMA 8 S, AC 11 D S) were performed. The values for absolute track depth were statistically evaluated.

Significant differences between the five stone mastic asphalts SMA 8 S can be found for the values determined for absolute track depth. The SMA 8 S with polymer-modified binder 25/55-55 A with a higher value for absolute track depth is to be assigned to a different homogeneous group than the four SMA 8 S with rubber-modified binders.

There are no significant differences between the values of the absolute track depth for the five asphalt binders with polymer-modified binder and rubber-modified binders.

The applied mathematically-statistical procedures show significant differences in the index for absolute track depth between the seven retention samples with polymer-modified binder and rubber-modified binders and permit classification in two different homogeneous group. There are no significant differences between the version with polymer-modified binder 25/55-55 A and the versions with rubber-modified binders.

A simple average comparison for the index of absolute track depth was performed for the retention samples AC 11 D S, which shows that there are significant differences between the AC 11 D S with polymer-modified binder 45/80-55 and with rubber-modified binder (GmB 7). The value for absolute track depth is lower in the AC 11 D S with GmB 7.

In the scope of this research project, determination of the grain loss was performed on all asphalt types to collect results.

The results of the statistical evaluation lead to the conclusion that there are significant differences between the five examined stone mastic asphalts SMA 8 S in terms of the index of grain loss and that these can be classified in two different homogeneous groups. However, no significant differences can be found between the versions with rubber-modified binders and the version with polymer-modified binder, nor between the versions with rubber-modified binder produced by the wet procedure or "by the dry procedure".

The asphalt binders AC 16 B S show no significant differences between their values for grain loss.

Significant differences between the five versions are found for grain loss in PA 8 and classification is possible in two different groups based on the result of the LSD test. Again, there are no significant differences between the porous asphalts with polymer-modified or rubber-modified binders as well as in dependence on the manufacture of the rubber-modified binder.

There are significant differences between the values for grain loss of the seven examined retention samples of the asphalt mix type SMA 8 S. Accordingly, these can be classified in two different homogeneous groups with four and three versions respectively. There are therefore no significant differences between the retention samples with rubber-modified binders and the sample with polymer-modified binder 25/55-55 A.

The simple average comparison for grain loss of the two retention samples AC 11 D S shows that there are significant differences between the AC 11 D S with polymer-modified binder 45/80-55 and the AC 11 D S with rubber-modified binder (GmB 7), with the grain loss being significantly lower in the AC 11 D S with GmB 7.

Determination of the substance loss on porous asphalt was performed with the DSD (Darmstadt Scuffing Device) and the ARTe (Aachener Raveling Tester).

The statistical evaluation of the values determined by DSD-procedure for substance loss

shows that there are significant differences between the examined PA 8, permitting classification in two different homogeneous groups using the LSD test. The PA 8 with polymer-modified binder 40/100-65 A, along with the PA 8 with GmB 25/55-65 V1, belongs to the homogeneous group with significantly lower values for substance loss.

The results of the statistical evaluation of the values determined with the ARTe for substance loss show that there are significant differences between the values for grain loss between the PA 8 with polymer-modified binder 40/100-65 A and the four PA 8-versions with rubber-modified binders. The PA 8 with 40/100-65 A can be solely assigned to a homogeneous group with the lowest value for substance loss after performance of the LSD test. The four porous asphalts with rubber-modified binders all belong to another homogeneous group together.

Measurements with the SRT unit were performed for reaction of the skid resistance.

The statistical evaluation shows significant differences in all three asphalt types produced in the lab (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) between the SRT values of the respective five versions with different binders.

After completing the LSD test, the five SMA 8 S can be classified in two different homogeneous groups, with the SMA 8 S with polymer-modified binder 25/55-55 A and the SMA 8 S with GmB 25/55-55 V1 belonging to the homogeneous group with the lower SRT-values.

Among the asphalt binders AC 16 B S, the LSD-test for the SRT-value leads to three different homogeneous groups. Here, AC 16 B S with polymer-modified binder 25/55-55 A is solely assigned to the third homogeneous group, with the lowest SRT-value. The AC 16 B S with GmB 25/55-55 V1 is in the second group and the other AC 16 B S with rubber-modified binders form the first group with the highest SRT values.

Among the PA 8, the version with polymer-modified binder belong to a different homogeneous group than the four PA 8 with rubber-modified binders in terms of SRT value, which together form another homogeneous group with higher SRT values.

Significant differences between the SRT values of the seven retention samples are determined based on the statistical evaluation. Based on the LSD test, the retention samples SMA 8 S can be classified in three different homogeneous groups, with the RS-SMA 8 S with polymer-modified binder 25/55-55 A, together with three versions with rubber-modified binders, belonging to the second, middle homogeneous group.

Based on the simple average comparison, the SRT values for the retention samples of type AC 11 D S with 45/80-55 and with GmB 7 respectively are classified as significantly different, with the SRT value for RS - AC 11 D S being significantly higher than with GmB 7.

Finally, example calculations were performed to estimate the influence of the life time when using asphalts with rubber- or polymer-modified binders in asphalt cover and binder layers. For this, the material indexes of the stone mastic asphalts and asphalt binders with polymer-modified binder 25/55-55 A, as well as with rubber-modified binders GmB 25/55-55 V1 and V2 respectively, were considered.

By comparison with a "calibration" setup (use of calibration asphalts according to RDO asphalt 09), lower values for the fatigue status of the asphalt were determined at the same layer thickness both for a structure with polymer-modified binder in the asphalt cover and binder layers and for structures with rubber-modified binder in the asphalt cover and binder layers.

All in all, the statistical evaluation of the examined asphalt properties finally do not continually show any significant differences (advantages or disadvantages) between the asphalts of one type with the rubber-modified binders and the polymer-modified binder used here across all examined asphalt properties.

Therefore, equivalence of the usage properties of asphalts using rubber-modified binders and polymer-modified binders can be assumed. The target of the research project could thus be reached.

Inhalt

1	Einführung	13	4.2.5	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Verformungsverhaltens bei Wärme und der Dauerhaftigkeit (Spurbildungsversuch)	100
1.1	Ziel des Forschungsvorhabens	13	4.2.6	Ergebnisse zur Ermittlung des Kornverlusts	106
2	Untersuchungsmethodik	13	4.2.7	Ergebnisse zur Ermittlung des Substanzverlusts am Offenporigen Asphalt	109
2.1	Untersuchte Varianten	13	4.2.8	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Griffigkeitsverhaltens	111
2.1.1	Bindemittelsorten	13	4.2.9	Auswirkung der Verwendung gummimodifizierter bzw. polymermodifizierter Bindemittel auf die Nutzungsdauer	114
2.1.2	Asphaltmischgut	14	5	Zusammenfassung	115
2.2	Untersuchungen	16	6	Regelwerke und Literatur	117
2.2.1	Untersuchungen am Bindemittel	16	6.1	Regelwerke	117
2.2.2	Untersuchungen am Asphalt	20	6.2	Literatur und Software	118
3	Grundlagen für die Auswertung	27	Bilder		119
3.1	Aufbau der Datenbank	27	Tabellen		122
3.2	Mathematisch-statistische Verfahren zur Auswertung der Untersuchungsergebnisse	27			
3.2.1	Einfache Varianzanalyse	27			
3.2.2	Modifizierter LSD-Test	28			
3.2.3	Einfacher Mittelwertvergleich	28			
4	Untersuchungsergebnisse	29			
4.1	Bindemittelkennwerte	29			
4.1.1	Konventionelle Bindemittelkennwerte	29			
4.1.2	Performance-Eigenschaften des Bindemittels	33			
4.2	Eigenschaften des Asphaltes	45			
4.2.1	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Kälteverhaltens	45			
4.2.2	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Steifigkeitsverhaltens	73			
4.2.3	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Ermüdungsverhaltens	83			
4.2.4	Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Verformungsverhaltens bei Wärme	91			

Die Datenbank zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einführung

1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, eine mögliche Gleichwertigkeit der Gebrauchseigenschaften von Asphalten unter Verwendung Gummimodifizierter Bindemittel und Polymermodifizierter Bindemittel nachzuweisen.

Neben den Bestrebungen, durch Gummimodifizierungen die Asphalteeigenschaften zu verbessern, ist ein weiterer wesentlicher Aspekt, durch die Verwendung von aufbereitetem Gummi aus Altreifen dem Ziel des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, dem „Recycling“, nachzukommen. Auch angesichts einer zu erwartenden Verteuerung von Erdölprodukten sowie den daraus hergestellten Kunststoffen/ speziellen Polymeren ist ein alternatives Produkt zur Modifizierung von Bitumen von großem, wirtschaftlichem Interesse.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Untersuchte Varianten

2.1.1 Bindemittelsorten

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden zwei Polymermodifizierte Bindemittel (25/55-55 A, 40/100-65 A) sowie vom Angebot abweichend statt sechs (vgl. Protokoll zur 1. Betreuungsausschusssitzung am 29.09.2015) acht Gummimodifizierte Bindemittel untersucht.

In den Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten (E GmBA) ist das Nassverfahren als „Zugabe von additiviertem Gummimehl zum Bitumen zur Modifikation“ definiert. Das Trockenverfahren ist in den E GmBA beschrieben als „Verwendung eines additivierten Gummimehls oder eines Gummimodifizierten Bitumengranulates, das direkt dem Asphaltmischprozess zugegeben wird. (...)“ Bei der Herstellung im Trockenverfahren wird somit unmittelbar Gummimodifizierter Asphalt „GmA“ hergestellt (siehe auch Abbildung 1), so dass für Bindemitteluntersuchungen „Gummimodifiziertes Bitumen (GmBT)“ in jedem Fall vorab im Laboratorium „hilfsweise“ hergestellt werden muss.

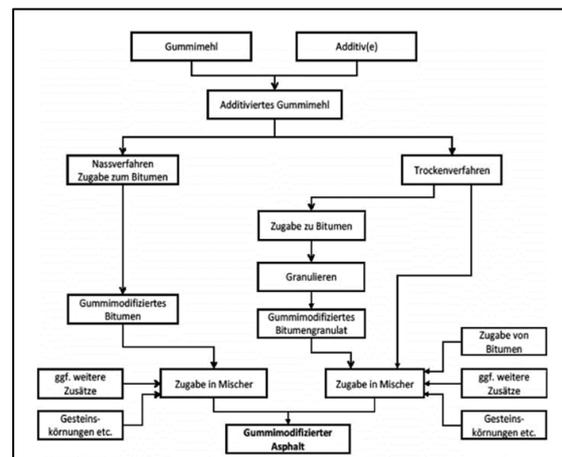


Abbildung 1: Begriffe bei der Modifizierung von Bitumen und Asphalt mit Gummi [E GmBA]

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden von zwei verschiedenen Bitumenherstellern jeweils im Nassverfahren (Großmaßstab) hergestellte Gummimodifizierte Bitumen der Sorte GmB 25/55-55 sowie der Sorte GmB 25/55-65 untersucht bzw. ausgewählte Varianten für die Herstellung von Asphalten eingesetzt. Die im Nassverfahren hergestellten Bitumen werden wie folgt bezeichnet:

- GmB 25/55-55 V 1
- GmB 25/55-65 V 1
- GmB 25/55-55 V 2
- GmB 25/55-65 V 2

Für die Herstellung Gummimodifizierter Bitumen im Trockenverfahren werden sogenannte Batches (Gummimodifiziertes Bitumengranulat, vgl. Abbildung 2) verwendet, die gemäß den Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten (E GmBA) mit einem Grundbitumen (Straßenbaubitumen) bei 180°C kurz vorgemischt werden. Nach einem Reifeprozess von 60 Minuten bei 180°C werden an den hergestellten Abmischungen nach kurzem Homogenisieren mit dem Rührwerk die Bindemittelkennwerte für das „GmBT“ bestimmt. Für die Asphaltherstellung wird ebenfalls eine jeweils „frisch“ herzustellende Abmischung (aus Grundbitumen und Batch) nach einer Reifezeit von einer Stunde der Gesteinskörnung im Mischer zugegeben. Für dieses Forschungsvorhaben werden Batches von zwei verschiedenen Herstellern eingesetzt, wobei jeweils zwei Abmischungen mit Straßenbaubitumen 50/70 oder 70/100 und unterschiedlichen Gummianteilen hergestellt werden, die den Anforderungen an Gummimodifiziertes Bitumen der Sorte GmBT 25/55-55 bzw. der Sorte GmBT 25/55-65 entsprechen.

Die „im Trockenverfahren hergestellten“ Bitumenvarianten werden im Weiteren bezeichnet als:

- GmBT 25/55-55 V 1
- GmBT 25/55-65 V 1
- GmBT 25/55-55 V 2
- GmBT 25/55-65 V 2



Abbildung 2: Gummi-Batch

Um die Anforderungen an Gummimodifiziertes Bitumen gemäß den E GmBA zu erfüllen, wurden verschiedene Varianten gemischt und einer Kurzprüfung unterzogen. In der folgenden Tabelle 1 sind die im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens angewendeten Mischrezepturen der gummimodifizierten Bitumenvarianten (im Trockenverfahren hergestellt) dargestellt.

Tabelle 1: Zusammensetzungen der im Trockenverfahren hergestellten Gummimodifizierten Bindemittel

Variante	Zusammensetzung [M.-%]		
	Batch	50/70	70/100
GmBT 25/55-55 V 1	70,0	-	30,0
GmBT 25/55-65 V 1	70,0	30,0	-
GmBT 25/55-55 V 2	75,0	25,0	-
GmBT 25/55-65 V 2	67,0	33,0	-

Die Bindemittelkennwerte für die „im Trockenverfahren“ und Nassverfahren hergestellten gummimodifizierten Bindemittelvarianten können dem Kapitel 4.1 entnommen werden.

2.1.2 Asphaltmischgut

Für die Performance-Prüfungen am Asphalt wurden dem Forschungsnehmer durch den Auftraggeber sieben Asphaltmischgutvarianten (Rückstellproben) der Sorten SMA 8 S (6 Varianten mit GmB(T) und 1 Variante mit PmB)

sowie zwei Asphaltmischgutvarianten (Rückstellproben) der Sorte AC 11 D S (1 Variante mit GmB(T) und 1 Variante mit PmB) zur Verfügung gestellt.

Diese Asphaltmischgutvarianten (Rückstellproben) werden im Folgenden bezeichnet als:

- RS – SMA 8 S – 25/55-55 A
- RS – AC 11 D S – 45/80-55
- RS – SMA 8 S – GmB 1
- RS – SMA 8 S – GmB 2
- RS – SMA 8 S – GmB 3
- RS – SMA 8 S – GmB 4
- RS – SMA 8 S – GmB 5
- RS – SMA 8 S – GmB 6
- RS – AC 11 D S – GmB 7

Weiterhin werden fünfzehn Asphaltmischgüter im Laboratorium (SMA 8 S, PA 8 und AC 16 B S) mit Gummi- bzw. Polymermodifizierten Bindemitteln hergestellt. Für die herzustellenden Asphaltmischgüter der Sorte SMA 8 S und AC 16 B S wurde als Gesteinsart Granodiorit, für die herzustellenden Mischgüter der Sorte PA 8 die Gesteinsart Diabas gewählt.

Es wurden Erstprüfungen unter Einsatz von jeweils zunächst einem Gummimodifizierten Bindemittel sowie des Polymermodifizierten Bindemittels erstellt. Einzusehen sind die Erstprüfungen im Anhang I.

Bei der Erstellung der Erstprüfungen unter Einsatz des Gummimodifizierten sowie der Polymermodifizierten Bindemittel wurde ein vergleichbarer Hohlraumgehalt angestrebt. Das Vorgehen wird im Folgenden erläutert.

Es wurden Erstprüfungen sowohl unter Einsatz des Gummimodifizierten als auch mit dem Polymermodifizierten Bindemittel mit einer Zusammensetzung für den AC 16 B S, den SMA 8 S und den PA 8 gemäß Tabelle 2 bis Tabelle 4 unter Variation des Bindemittelgehaltes hergestellt. In Abbildung 3 bis Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen Bindemittelgehalt und Hohlraumgehalt bei ansonsten gleichbleibender Gesteinskörnungszusammensetzung der Varianten für die drei Mischgutarten dargestellt.

Tendenziell wurde für die Varianten mit Gummimodifiziertem Bindemittel ein höherer Bindemittelgehalt benötigt, um einen vergleichbaren Hohlraumgehalt zu erreichen wie bei den

Varianten mit dem Polymermodifizierten Bindemittel (siehe hierzu auch Abbildung 3 und Abbildung 4).

Um einen aus ökonomischer Sicht zu hohen Bindemittelgehalt bei den Mischgutarten SMA 8 S und PA 8 unter Einsatz des Gummimodifizierten Bindemittels zu vermeiden, wurde kein Bindemittelträger (Arbocel) wie bei den Varianten unter Einsatz eines Polymermodifizierten Bindemittels hinzugefügt, was bei Einsatz von GmB auch nicht üblich und nicht erforderlich ist. Ohne Zugabe eines Bindemittelträgers bei den Mischgutvarianten SMA 8 S und PA 8 unter Einsatz des Gummimodifizierten Bindemittels konnte mit einem identischen Bindemittelgehalt ein vergleichbarer Hohlraumgehalt zu den Mischgutvarianten unter Einsatz von Polymermodifizierten Bindemitteln ermittelt werden (vgl. hierzu Tabelle 3 und Tabelle 4 sowie Abbildung 4 und Abbildung 5).

Tabelle 2: Zusammensetzung der Mischgutart AC 16 B S

Zusammensetzung [M.-%]		
Bindemittel	PmB	GmB
Bindemittelgehalt	4,8	5,1
Füller	5,3	5,3
Feine Gesteinskörnung	20,8	20,8
Grobe Gesteinskörnung	73,9	73,9
Grobkorn	27,1	27,1
Überkorn	3,9	3,9

Tabelle 3: Zusammensetzung der Mischgutart SMA 8 S

Zusammensetzung [M.-%]		
Bindemittel	PmB	GmB
Bindemittelgehalt	6,9	6,9
Bindemittelträger Arbocel	0,3	-
Füller	11,0	11,0
Feine Gesteinskörnung	15,0	14,8
Grobe Gesteinskörnung	74,0	74,2
Grobkorn	53,4	53,5
Überkorn	8,0	8,0

Tabelle 4: Zusammensetzung der Mischgutart PA 8

Zusammensetzung [M.-%]		
Bindemittel	PmB	GmB
Bindemittelgehalt	6,8	6,8
Bindemittelträger ArboceI	0,5	-
Füller	4,4	4,3
Feine Gesteinskörnung	2,0	2,1
Grobe Gesteinskörnung	93,6	93,6
Grobkorn	85,9	85,9
Überkorn	5,3	5,3

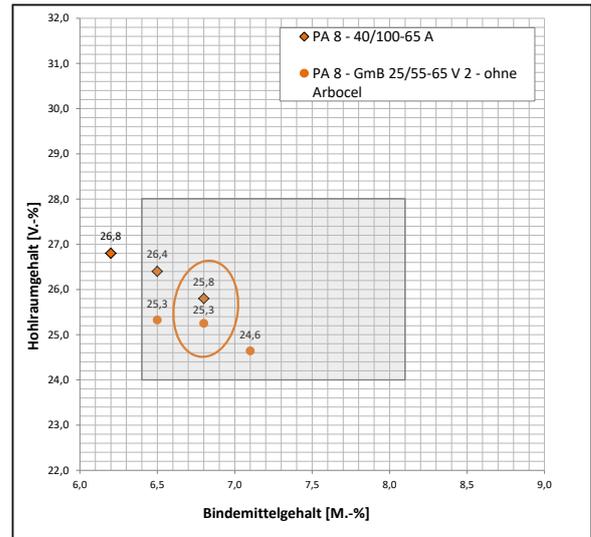


Abbildung 5: Varianten der Mischgutart PA 8

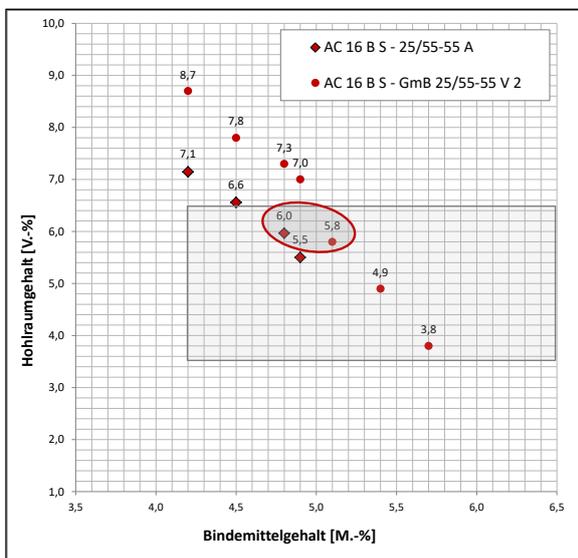


Abbildung 3: Varianten der Mischgutart AC 16 B S

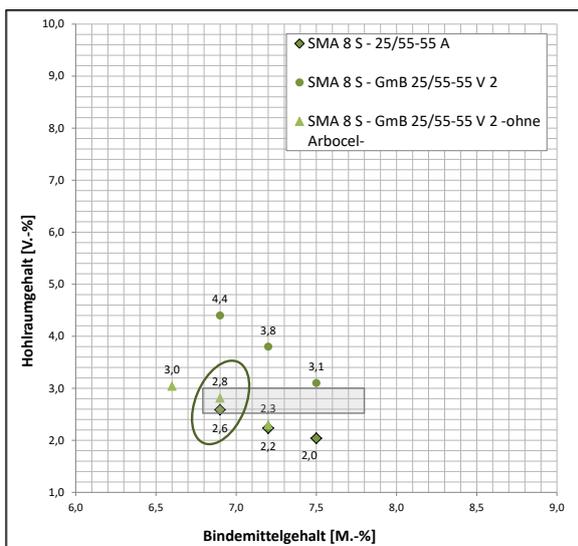


Abbildung 4: Varianten der Mischgutart SMA 8 S

2.2 Untersuchungen

2.2.1 Untersuchungen am Bindemittel

Die im Kapitel 2.1.1 genannten Bindemittel werden mit den in den TL Bitumen 07/13, Tabelle 2 genannten Prüfverfahren charakterisiert. Weiterhin werden die „zusätzlichen Prüfverfahren zur Erfahrungssammlung“ zum Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR) und zum Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (DSR) angewendet. Neben der DSR-Prüfung (Temperatursweep) werden MSCR-Prüfungen (Multiple Stress Creep and Recovery Test) durchgeführt.

Weiterhin erfolgt eine Charakterisierung der Bindemittel nach beschleunigter Langzeitalterung (PAV-Alterung) gemäß den TL Bitumen-StB 07/13, Tabelle 2 einschließlich der Ansprache des Verhaltens bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR) und des Verformungsverhaltens im dynamischen Scherrheometer (DSR).

Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer

Um das Tieftemperaturverhalten bitumen-haltiger Bindemittel zu untersuchen, werden Versuche mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) nach DIN EN 14771 durchgeführt.

Ein an beiden Enden aufgelagerter Bitumenbalken wird bei einer Prüftemperatur zwischen 0

°C und -40 °C mittig von einer konstanten Einzellast von 930 mN bis 1030 mN für 240 s belastet (siehe Abbildung 6).

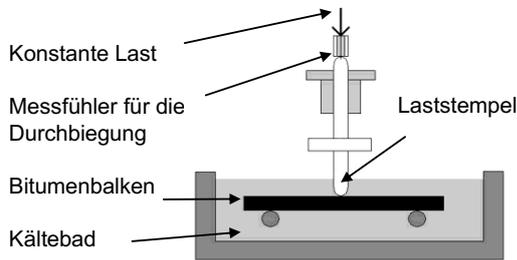


Abbildung 6: Prinzipskizze Bending Beam Rheometer

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen werden die Prüfungen bei -10 °C, -16 °C und -25 °C (TL Bitumen StB 07/13) durchgeführt.

Die ansteigende Durchbiegung des Bindemittelbalkens sowie deren zeitlicher Verlauf werden messtechnisch erfasst. Aus der Dehnungskurve wird die Biegekriechsteifigkeit S des Biegebalkens berechnet und im doppeltlogarithmischen Maßstab über die Zeit aufgetragen.

$$S(t) = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot \delta(t) \cdot b \cdot h^3} \text{ [MPa]}$$

P : Auflast [N]

l : Abstand zw. den Auflagern [mm]

$\delta(t)$: zeitabhängige Durchbiegung [mm]

b : Balkenbreite [mm]

h : Balkenhöhe [mm]

Als weitere Auswertgröße wird die Tangenten-neigung des Biegekriechsteifigkeitsverlaufes (m -Wert), aus der auch die Relaxationsfähigkeit des Bindemittels abgeschätzt werden kann, bestimmt.

Die Biegekriechsteifigkeit und der m -Wert sind für die Belastungszeiten 8 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s und 240 s als arithmetischer Mittelwert aus mindestens zwei Werten anzugeben. Wenn ein Einzelergebnis der Biegekriechsteifigkeit anzugeben ist, so ist der Wert der Belastungsdauer von 60 s zu verwenden.

Die Einzelwerte der Biegekriechsteifigkeit und des m -Wertes bei 60 s wurden innerhalb dieses Forschungsvorhabens für alle drei Prüftemperaturen in einem Diagramm aufgetragen. Dabei wurden die Mittelwerte der

Biegekriechsteifigkeit S auf der Primär- und die Mittelwerte der m -Werte auf der Sekundärachse aufgezeichnet (siehe Abbildung 7).

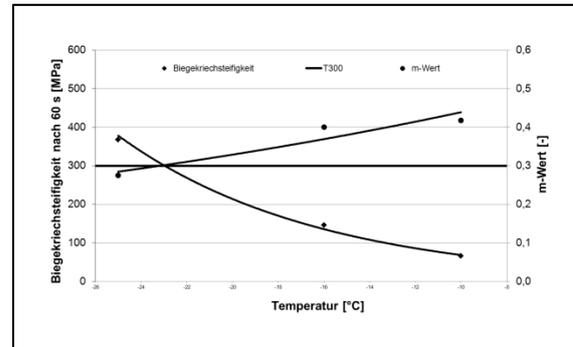


Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung von $T_{y=300}$ und $T_{m\text{-Wert}=0,3}$

Mittels mathematischer Näherungsformeln werden die Temperatur $T_{y=300}$ bei einer Biegekriechsteifigkeit von 300 MPa und die Temperatur $T_{m\text{-Wert}=0,3}$ beim Erreichen des m -Wertes von 0,3 ermittelt.

Verformungsverhalten im Dynamischen Scherrheometer (DSR)

DSR-Versuch

Mit Hilfe des DSR-Versuchs wird das viskoelastische Verhalten von Bitumen nach DIN EN 14770 sowie der Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung Temperatursweep (AL DSR-Prüfung (T-Sweep)) geprüft. Eine Bindemittelprobe wird zwischen zwei parallelen Metallplatten eingebaut und einer schwingenden (oszillierenden) Scherbeanspruchung ausgesetzt, vgl. Abbildung 8. Die Oszillation der oberen Platte bewirkt eine Deformation des Prüfgutes. Es werden zwei Arten der Messung unterschieden:

- Eine definierte Scherspannung (Drehmoment) wird vorgegeben und die daraus resultierende Deformation gemessen (kraft geregelter Versuch).
- Eine definierte Deformation wird vorgegeben und die notwendige Scherspannung (Drehmoment) gemessen (weg geregelter Versuch).

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden weggeregelte Versuche durchgeführt.

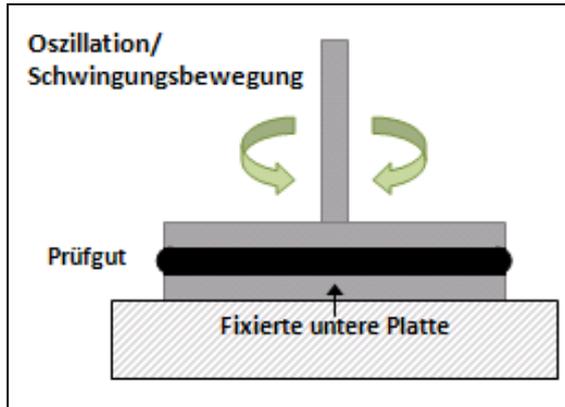


Abbildung 8: Prinzipskizze DSR-Prüfung

Die Untersuchungen wurden als Temperatursweep bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz und bei Temperaturen von 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C und 90 °C durchgeführt.

Als Messsystem wurde ein Platte/Platte-System mit Plattendurchmesser von 25 mm verwendet. Abweichend von der Arbeitsanleitung AL DSR-Prüfung (T-Sweep) erfolgt nach den E GmBA die DSR-Prüfung mit einer Spaltweite von 2 mm statt 1 mm. Das Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer wird im Rahmen des Forschungsprojektes für Gummimodifizierte Bindemittel mit 2 mm-Spaltweite und für Polymermodifizierte Bindemittel mit Spaltweiten von 1 mm und 2 mm bestimmt.

Aus den Messwerten der DSR-Prüfung können je Temperaturstufe der komplexe Schermodul (G^*) als Widerstand des Prüfgutes gegen die Beanspruchung,

$$G^* = \frac{\tau_{\max}}{d_{\max}} \quad [\text{Pa}]$$

mit

τ_{\max} : maximale Scherspannung

d_{\max} : maximale Verformung

sowie der Phasenwinkel (δ) als zeitliche Verzögerung des Materials auf die Beanspruchung

$$\delta = \omega(\Delta t) \quad [^\circ]$$

mit

ω : Winkelgeschwindigkeit

Δt : Zeitintervall

ermittelt werden (siehe auch Abbildung 9 und Abbildung 10).

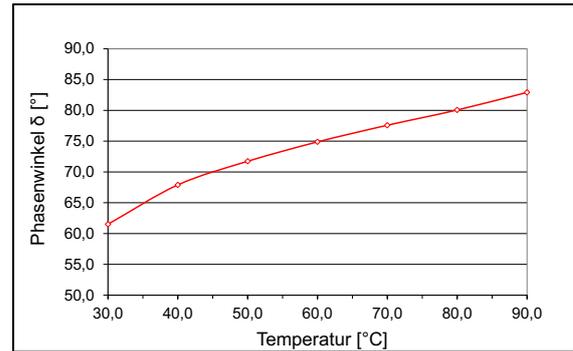


Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung Phasenwinkel in Abhängigkeit von der Temperatur

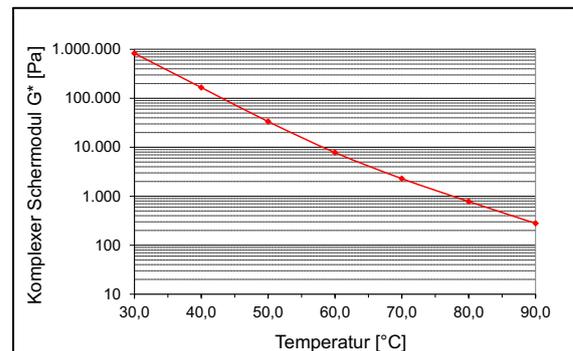


Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung Komplexer Schermodul in Abhängigkeit von der Temperatur

MSCR-Prüfung

Mit dem Dynamischen Scherrheometer kann anstelle einer dynamischen Prüfung (Dynamischer Scherversuch) auch ein Kriechversuch gemäß der Arbeitsanleitung „AL MSCR-Prüfung (DSR)“ durchgeführt werden, die MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test). Bei der MSCR-Prüfung wird auf die Bindemittelprobe eine konstante Kriechspannung aufgebracht (siehe Abbildung 11) und die resultierende Verformung in Abhängigkeit von der Zeit gemessen. Der Versuch wird bei einer konstanten Prüftemperatur von 60 °C durchgeführt.

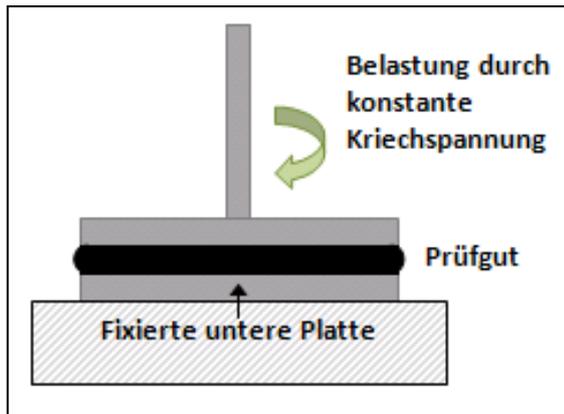


Abbildung 11: Prinzipskizze MSCR-Prüfung

Die Bindemittelprobe wird für die Dauer von einer Sekunde mit einer konstanten Spannung (Kriechbelastung) beansprucht, gefolgt von einer zwangungsfreien Erholungsphase, die neun Sekunden dauert. Bei drei Laststufen (0,1, 1,6 und 3,2 kPa) werden unmittelbar hintereinander je 10 Kriech- und Erholungszyklen angesetzt. Im Hinblick auf die derzeitige Überarbeitung der o.g. Arbeitsanleitung wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens weiterhin MSCR-Prüfungen bei nur einer Laststufe von 3,2 kPa durchgeführt.

In Analogie zur DSR-Prüfung wurde auch für die MSCR-Prüfung am Gummimodifizierten Bindemittel eine Spaltweite von 2 mm (gemäß E GmBA) und für Polymermodifizierte Bindemittel Spaltweiten von 1 mm und 2 mm gewählt.

Für jeden Zyklus werden der Absolutwert der Verformung zu Beginn der Kriechphase (ε_0) und der Wert der Verformung am Ende der Kriechphase (ε_c) erfasst. Aus diesen Werten errechnet sich der resultierende Wert der Verformung am Ende der Kriechphase

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_0$$

mit

ε_0 : Absolutwert der ursprünglich aufgegebenen Verformung zu Beginn der Kriechphase

ε_c : Absolutwert der Verformung am Ende der Kriechphase (nach 1 s)

Der Wert der Verformung am Ende der Erholungsphase jedes Zyklus wird mit ε_r bezeichnet.

Damit beträgt der resultierende Wert der Verformung am Ende der Erholungsphase für jeden Zyklus

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0$$

mit

ε_r : Wert der Verformung am Ende der Erholungsphase (nach 10 s)

ε_0 : Absolutwert der ursprünglich aufgegebenen Verformung zu Beginn der Kriechphase.

Aus den Messwerten (Verformungen) können für die Kriechbelastungen 0,1, 1,6 und 3,2 kPa jeweils die durchschnittliche prozentuale Erholung R

$$R_{0,1 \text{ kPa}} = \frac{\sum_{N=1}^{10} \left(\frac{\varepsilon_{1,0,1 \text{ kPa}, N} - \varepsilon_{10,0,1 \text{ kPa}, N}}{\varepsilon_{1,0,1 \text{ kPa}, N}} \cdot 100 \right)}{10} \quad \text{bzw.}$$

$$R_{1,6 \text{ kPa}} = \frac{\sum_{N=1}^{10} \left(\frac{\varepsilon_{1,1,6 \text{ kPa}, N} - \varepsilon_{10,1,6 \text{ kPa}, N}}{\varepsilon_{1,1,6 \text{ kPa}, N}} \cdot 100 \right)}{10} \quad \text{bzw.}$$

$$R_{3,2 \text{ kPa}} = \frac{\sum_{N=1}^{10} \left(\frac{\varepsilon_{1,3,2 \text{ kPa}, N} - \varepsilon_{10,3,2 \text{ kPa}, N}}{\varepsilon_{1,3,2 \text{ kPa}, N}} \cdot 100 \right)}{10}$$

sowie der durchschnittliche nicht rückverformbare Anteil J_{nr}

$$J_{nr,0,1 \text{ kPa}} = \frac{\sum_{N=1}^{10} \left(\frac{\varepsilon_{10,0,1 \text{ kPa}, N}}{0,100} \right)}{10} \quad \text{bzw.}$$

$$J_{nr,1,6 \text{ kPa}} = \frac{\sum_{N=1}^{10} \left(\frac{\varepsilon_{10,1,6 \text{ kPa}, N}}{1,600} \right)}{10} \quad \text{bzw.}$$

$$J_{nr,3,2 \text{ kPa}} = \frac{\sum_{N=1}^{10} \left(\frac{\varepsilon_{10,3,2 \text{ kPa}, N}}{3,200} \right)}{10}$$

mit

N: Zyklusnummer; N = 1 bis 10

$\varepsilon_{1,0,1 \text{ kPa}, N}$: Wert der Verformung am Ende der Kriechphase, hier z. B. bei 0,1 kPa

$\varepsilon_{10,0,1 \text{ kPa}, N}$: Wert der Verformung am Ende der Erholungsphase, hier z. B. bei 0,1 kPa

bestimmt werden. In Abbildung 12 sind die Ergebnisse der MSCR-Prüfung exemplarisch dargestellt.

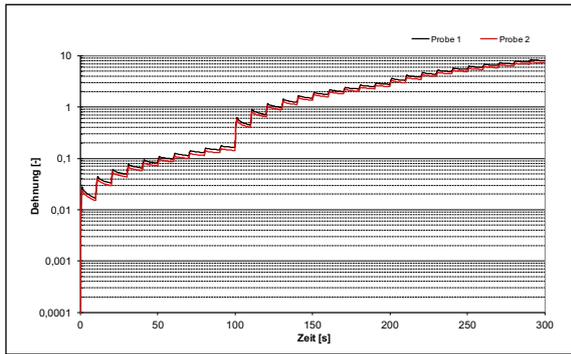


Abbildung 12: Beispielhafte Darstellung einer Dehnungs-Erholungskurve über drei Laststufen

2.2.2 Untersuchungen am Asphalt

An den angelieferten Asphaltmischgutvarianten sowie den im Laboratorium hergestellten Asphaltvarianten werden zur Bestimmung des Kälteverhaltens Zug- und Abkühlversuche durchgeführt. Zur Ermittlung des Steifigkeitsverhaltens werden Spaltzug-Schwellversuche herangezogen. Das Ermüdungsverhalten wird mittels Spaltzug-Schwellversuchen und an zwei ausgewählten Varianten mittels Zug-Schwellversuchen bestimmt. Zur Bestimmung des Verformungswiderstandes werden Einaxiale Druck-Schwellversuche bzw. Dynamische Stempeleindringversuche durchgeführt. Die Dauerhaftigkeit wird anhand von Untersuchungen zur Griffigkeit, Substanzverlust und Kornverlust von Probekörpern ermittelt.

Ansprache des Kälteverhaltens

Die Ansprache des Kälteverhaltens erfolgt gemäß den Technischen Prüfvorschriften TP Asphalt-StB, Teil 46 A (Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch).

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden Abkühl- sowie Einaxiale Zugversuche durchgeführt. Für beide Versuchstypen werden prismatische Probekörper, die aus walzsegmentverdichteten Platten heraus gesägt werden, verwendet.



Abbildung 13: Prüfvorrichtung mit eingebauten Probekörpern für Abkühl- bzw. Zugversuche

Bei dem Abkühlversuch wird ein Asphaltprobekörper auf konstanter Länge gehalten und beginnend bei einer Temperatur von 20 °C mit einem Temperaturgradienten von -10 K/h abgekühlt. In dem auf konstanter Länge gehaltenen Probekörper bauen sich kryogene Zugspannungen auf, bis der Probekörper reißt. Neben den

kontinuierlich erfasst, durch Abkühlung entstehenden kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur werden die Bruchtemperatur T_{Br} sowie die Bruchspannung σ_{Br} zum Zeitpunkt des Probekörpersversagens (Spannungsabfall) erfasst.

Zugversuche werden bei konstanten Prüftemperaturen von 20, 5, -10 und -25 °C durchgeführt. Beim Zugversuch wird der Probekörper mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 1 mm/min gezogen, bis dieser reißt. Erfasst werden die Zugfestigkeit β_t und die Bruchdehnung ϵ_{Br} am Ende des Versuchs, also zum Zeitpunkt des Probekörpersversagens.

Ausgehend von den vier bei den Prüftemperaturen erfassten Werten für die Zugfestigkeiten kann die Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur mittels einer kubischen Spline-Funktion beschrieben werden.

Stehen Ergebnisse aus Abkühl- und Zugversuchen zur Verfügung, so wird als weitere Kenngröße die Zugfestigkeitsreserve in Abhängigkeit von der Temperatur rechnerisch bestimmt. Die Zugfestigkeitsreserve ist die Differenz zwischen der Zugfestigkeit und der kryogenen Zugspannung. Sie ist ein Maß dafür, welche Spannung der Asphalt durch mechanogene Beanspruchung neben den auftretenden, temperaturbedingten kryogenen Zugspannungen aufnehmen kann.

Eine Darstellung der Ergebnisse aus Abkühl- (blaue Kurve) und Zugversuchen (rote Kurve) ist in Abbildung 14 wiedergegeben. Die schwarze Kurve ist die rechnerisch ermittelte Zugfestigkeitsreserve.

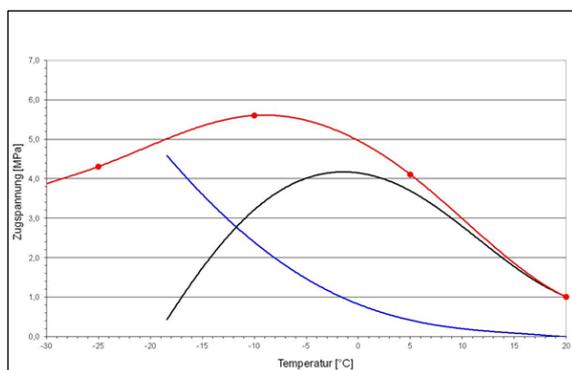


Abbildung 14: Darstellung der Ergebnisse von Abkühl- und Zugversuchen

Ansprache des Steifigkeitsverhaltens

Im Teil 26 der DIN EN 12697 sind Verfahren zur Bestimmung des Steifigkeitsverhaltens für Heiasphalt beschrieben. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wird die Steifigkeit mit dem Spaltzug-Schwellversuch nach der AL Sp-Asphalt 09 „Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgre in die Dimensionierung“ bestimmt.

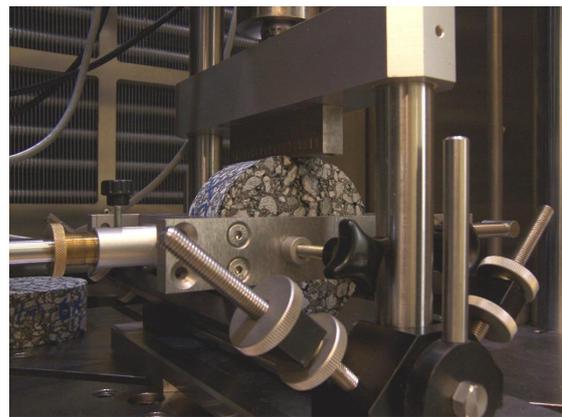


Abbildung 15: Prvorrichtung mit eingebautem Probekper fr den Spaltzug-Schwellversuch

Der Spaltzug-Schwellversuch wird an zylindrischen Probekpern durchgefhrt, die aus walzsegmentverdichteten Platten heraus gebohrt werden (Abbildung 15).

Bei dem Spaltzug-Schwellversuch wird ber zwei diametral gegenberliegende Lasteintragungsschienen auf die Mantelflche eines zylindrischen Probekpers eine Druck-Schwellbelastung mit sinusfrmigem Verlauf aufgebracht. Dabei bilden sich orthogonal zur Lasteintragungsrichtung Zugspannungen aus, in deren Richtung die Verformung des Probekpers gemessen wird.

Die Bestimmung der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion erfolgt anhand von Multi-stage-Versuchen, wobei die Prtemperatur und die Belastungsfrequenz variiert werden. Als Prtemperaturen werden 20, 10, 0 und -10 °C und als Belastungsfrequenzen 0,1, 1, 5 und 10 Hz gewhlt.

Die festgelegte Unterspannung der Druck-Schwellbelastung von 0,035 MPa dient der Lagesicherung des Probekpers. Die Oberspannung ist in Abhngigkeit von der Prtemperatur und der Belastungsfrequenz so zu whlen, dass

der Wert für die anfängliche elastische horizontale Dehnung in Probekörpermitte zwischen 0,05 und 0,10 ‰ beträgt.

Während des Versuchs darf der Probekörper keine Schädigung erfahren. Der Versuch wird nach einer definierten Anzahl von Lastwechseln, die abhängig von der Belastungsfrequenz ist, beendet.

Als Versuchsergebnis wird aus der aufgebrachten Kraft und der gemessenen Verformung der von Prüftemperatur und -frequenz abhängige Steifigkeitsmodul als Mittelwert von drei Einzelergebnissen berechnet. Daraus kann die materialspezifische Steifigkeitsmodul-Temperatur-Funktion, die sogenannte Hauptkurve, ermittelt werden (Abbildung 16).

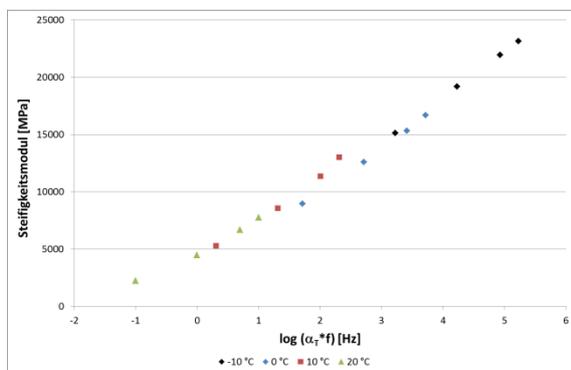


Abbildung 16: Hauptkurve – Steifigkeitsmodul in Abhängigkeit der Temperatur (Faktor α_T) und der Frequenz (f)

Weiter können aus den Ergebnissen die für eine bestimmte Frequenz (z. B. 10 Hz) prognostizierten, temperaturabhängigen Steifigkeitsmoduln abgeleitet werden (siehe Abbildung 17), die dann in dieser Form in der rechnerischen Dimensionierung berücksichtigt werden.

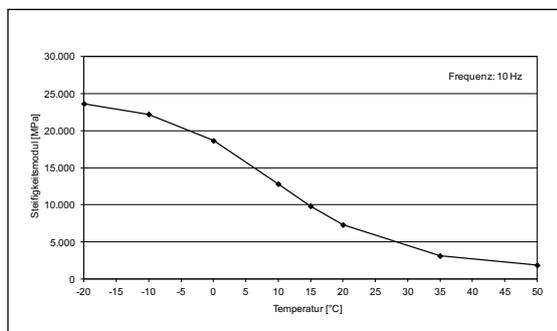


Abbildung 17: Beispielhafte Darstellung der prognostizierten Steifigkeitsmoduln

Ansprache des Ermüdungsverhaltens

Der Teil 24 der DIN EN 12697 enthält Versuche zur Bestimmung der Ermüdungsbeständigkeit von Heißasphalt. Im Rahmen des vorliegenden Vorhabens wird das Ermüdungsverhalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch gemäß der „Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung“ (AL Sp-Asphalt 09) ermittelt.

Der Versuchsaufbau entspricht der Beschreibung im Abschnitt oben „Ansprache des Steifigkeitsverhaltens“.

Zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion sind für die Spaltzug-Schwellbelastung drei Oberspannungen so zu wählen, dass die Werte für die anfängliche elastische horizontale Dehnung in Probekörpermitte zwischen 0,05 und 0,30 ‰ liegen. Gleichzeitig muss bis zum Erreichen des Ermüdungskriteriums eine Lastwechselzahl zwischen 1.000 und 1.000.000 erreicht werden. Als Unterspannung werden unabhängig von der gewählten Oberspannung zur Lagesicherung des Probekörpers 0,035 MPa festgelegt.

Die Ermüdungsversuche werden bei einer Prüftemperatur von 20 °C und bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz durchgeführt.

Der Versuch läuft bis zum Versagen des Probekörpers aufgrund eintretender „Ermüdung“. Als Ermüdungskriterium wird die Makrorissbildung definiert. Diese gilt im Maximum der Energy Ratio ER (Lastwechselzahl N x Steifigkeitsmodul $E(N)$) als erreicht (Abbildung 18).

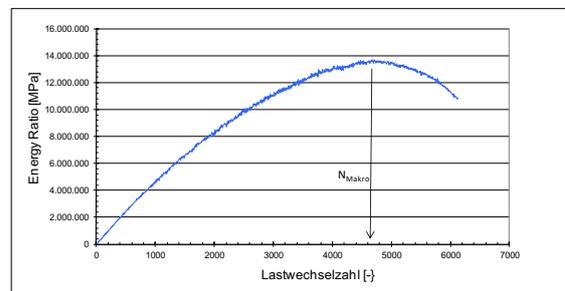


Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse eines Ermüdungsversuches

Zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion werden für die einzelnen Versuche die anfänglichen elastischen horizontalen Dehnungen in Abhängigkeit von der erreichten Ermüdungslastwechselzahl N_{Makro} im doppelt-

logarithmischen Maßstab aufgetragen (siehe Abbildung 19). Die Ermüdungsfunktion wird über eine Potenzfunktion beschrieben.

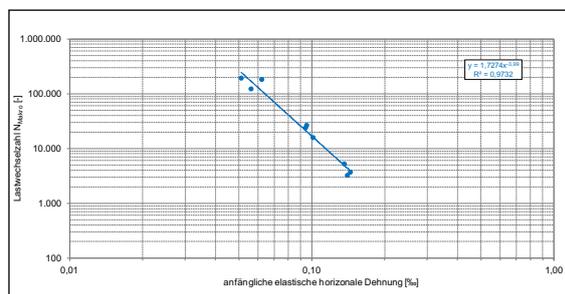


Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung einer dehnungs-basierten Ermüdungsfunktion

An zwei ausgewählten Asphaltvarianten wird das Ermüdungsverhalten außerdem noch mit dem Einaxialen Zug-Schwellversuch in Anlehnung an den Entwurf der Technischen Prüfvorschriften TP Asphalt-StB Teil 46 B angesprochen.

Beim Einaxialen Zug-Schwellversuch wird eine Beanspruchung simuliert, die einerseits die Verkehrsbeanspruchung und gleichzeitig die kryogenen Zugspannungen berücksichtigt.

Für die Einaxialen Zug-Schwellversuche werden prismatische Probekörper, die aus walzsegmentverdichteten Platten heraus gesägt werden, verwendet (Abbildung 20). Die Probekörper werden einer sinusförmigen Zug-Schwellbelastung ausgesetzt.



Abbildung 20: Prüfvorrichtung mit eingebautem Probekörper für Zug-Schwellversuch

Die Versuche werden hier bei -10 , 5 und 20 °C durchgeführt. Als Unterspannung σ_u wird die kryogene Zugspannung aus den zugehörigen Abkühlversuchen bei der jeweils entsprechenden Temperatur angesetzt und als Oberspannung σ_o die Summe $\sigma_u(T) + 1,2$ MPa gewählt.

Ausgewertet wird hier die akkumulierte bleibende Dehnung in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl, vgl. Abbildung 21.

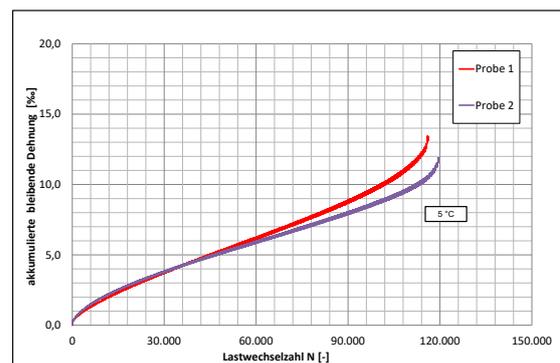


Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung der akkumulierten bleibenden Dehnung in Abhängigkeit der Lastwechselzahl

Ansprache des Verformungsverhaltens bei Wärme

Die Ansprache des Verformungsverhaltens bei Wärme erfolgt bei den Asphaltbetonvarianten mit dem Druck-Schwellversuch und bei den offenen Asphalten mit dem Dynamischen Stempelindringversuch.

Die Durchführung der Druck-Schwellversuche erfolgt gemäß den Technischen Prüfvorschriften TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 „Einaxialer Druck-Schwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhalten von Walzasphalten bei Wärme“.

Bei dem Druckschwellversuch wird ein zylindrischer Probekörper bei isothermen Versuchsbedingungen (50 °C) einer auf der Grundfläche des Probekörpers gleichmäßig verteilten haversine-impulsförmigen Druckschwellbelastung unterworfen, siehe Abbildung 22.

Als Probekörper können Marshall-Probekörper oder aus im Laboratorium hergestellten Platten herausgebohrte Probekörper verwendet werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden Untersuchungen an Marshall-Probekörpern durchgeführt.

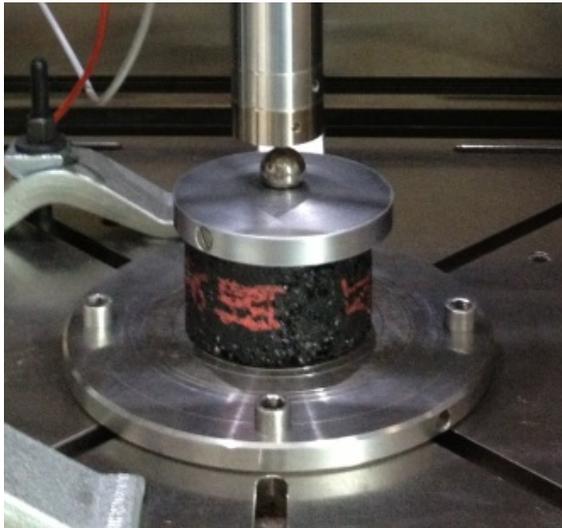


Abbildung 22: Prüfvorrichtung mit eingebautem Probekörper für Druck-Schwellversuche

Nach den Technischen Prüfvorschriften dauert ein Belastungszyklus 1,7 s, wobei auf die Dauer des Lastimpulses von 0,2 s eine Lastpause von 1,5 s folgt.

Die Unterspannung beträgt 0,025 MPa, die Oberspannung der Belastung ist 0,35 MPa.

Während des Versuchs wird die bleibende Verformung (Dehnung) des Probekörpers erfasst, siehe Abbildung 23.

Der Versuch wird nach 10.000 Belastungszyklen beendet oder vorzeitig, wenn die Dehnung einen Wert von 40 ‰ überschreitet.

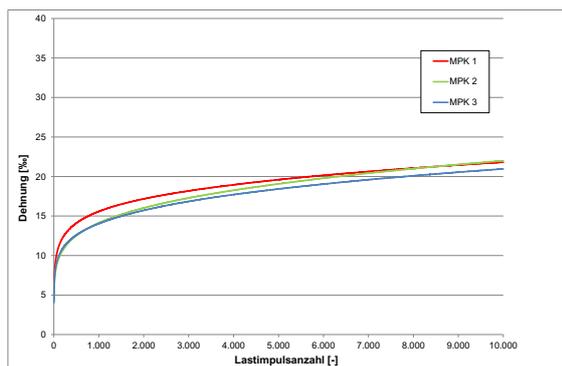


Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung einer Impulskriechkurve (ohne Wendepunkt)

Dynamische Stempelerindringversuche werden nach der TP Asphalt-StB, Teil 25 A 2 „Dynamischer Stempelerindringversuch an Walzasphalt“ durchgeführt.

Auf einen zylindrischen Probekörper mit einem Durchmesser von 197 ± 5 mm, der aus einer Asphalt-Probekörperplatte herausgebohrt wurde, wird

ein Lasteinleitungsstempel mit einem Durchmesser von 80 mm aufgesetzt, siehe Abbildung 24. Es erfolgt eine haversine-impulsförmige Druck-Schwellbelastung. Ein Belastungszyklus dauert 1,7 s, wobei auf den Lastimpuls von 0,2 s eine Lastpause von 1,5 s folgt. Die Versuche werden bei 50 °C durchgeführt. Die Oberspannung beträgt 0,80 MPa und die Unterspannung liegt bei 0,02 MPa.

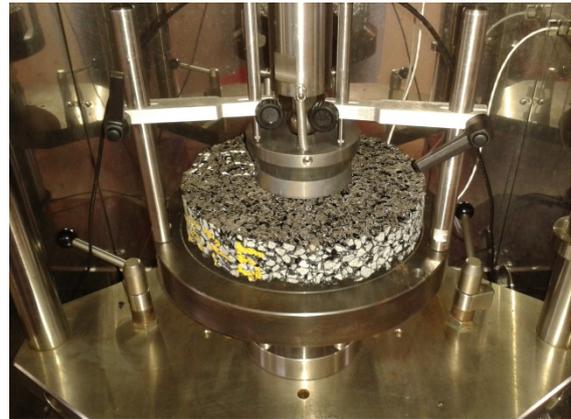


Abbildung 24: Prüfvorrichtung mit eingebautem Probekörper für Dynamische Eindringtiefe

Die dynamische Stempelerindringtiefe wird in Abhängigkeit von der Anzahl der Belastungszyklen erfasst. Der Versuch wird nach 10.000 Belastungszyklen oder vorzeitig bei Erreichen einer Eindringtiefe von 5 mm beendet.

Ansprache des Verformungsverhaltens und der Dauerhaftigkeit mit dem Spurbildungsversuch

Spurbildungsversuche werden gemäß den Technischen Prüfvorschriften TP Asphalt-StB, Teil 22 durchgeführt.

Spurbildungsversuche können an walzsektorverdichteten Probekörperplatten oder Bohrkernscheiben durchgeführt werden, wobei jeweils parallel zwei Probekörper gleichzeitig geprüft werden.

Beim Spurbildungsversuch erfolgt die wiederholte Belastung durch ein hin und her rollendes Prüfrad. Nach TP Asphalt-StB, Teil 22 ist das Prüfrad Vollgummi-bereift. Die Radlast beträgt 700 N. Das Prüfmedium ist Luft und die Prüftemperatur beträgt 60 °C.



Abbildung 25: Prüfvorrichtung für Spurbildungsversuche

Vor Beginn der Messaufzeichnung erfolgt eine Vorbelastung mit 5 Belastungszyklen und anschließend die Nullstellung/-messung. Die Probekörper werden in der Regel mit 10.000 Zyklen beansprucht. Beim Erreichen einer Spurrinnentiefe mit einem Wert von mehr als 20 Prozent der Plattendicke ist der Versuch abubrechen.

Die Entwicklung der Spurrinnentiefe wird während des Versuchs aufgezeichnet.

Als Kenngrößen für den Widerstand gegen Verformungen durch wiederholte Belastung werden die absolute Spurrinnentiefe sowie die proportionale Spurrinnentiefe bezogen auf die Dicke der Asphalt-Probepalte angegeben.

Ermittlung des Kornverlusts

Die Ermittlung des Kornverlusts von Offenporigem Asphalt erfolgt gemäß den Technischen Prüfvorschriften TP Asphalt-StB, Teil 17 an Marshall-Probekörpern in der Trommel des Los Angeles-Prüfgerätes. Der Kornverlust wird dabei durch Wägung der Probekörper vor und nach Beanspruchung ermittelt. Die Prüfung wird bei 20 °C durchgeführt. Die Trommel wird mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 30 bis 33 min^{-1} in Rotation versetzt und der Probekörper in der Trommel so 300 Umdrehungen ausgesetzt.



Abbildung 26: LA-Trommel

Der Kornverlust PL wird als Mittelwert aus fünf Marshallprobekörpern in Massenprozent angegeben.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird die Ermittlung des Kornverlusts zur Erfahrungssammlung an allen Asphaltarten durchgeführt.

Ermittlung des Substanzverlust von Offenporigem Asphalt

In der DIN CEN/TS 12697-50 sind Prüfverfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Oberflächenverschleiß beschrieben. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden Untersuchungen in Anlehnung an o.g. Vorschrift mit zwei Oberflächen-Verschleiß-Prüfmaschinen (OVPM), dem DSD (Darmstadt Scuffing Device) und dem ARTe (Aachener Raveling Tester) durchgeführt.

Mit dem DSD wird der Widerstand von Asphaltdeckschichten gegen Schubbelastung an der Oberfläche geprüft. Die Beanspruchung simuliert den Lenkvorgang eines langsam rollenden Pkw an einem warmen Tag, wobei die Bewegung einem langsam aus einem Parkstand rangierenden Pkw nachempfunden ist. Dafür wird eine walzsektorverdichtete Asphalt-Probepalte (26 x 26 cm) auf einem Tisch vor und

zurückbewegt, wobei gleichzeitig die eingespannte Probeplatte um 180° oszillierend geschwenkt wird. Dabei wird durch eine vertikale Last von 1.000 N ein profilloses Prüfrad auf die Probeplatte gedrückt. Die Prüftemperatur beträgt 40°C .



Abbildung 27: DSD (hier ohne Sicherheitskäfig) [TU Darmstadt]

Ermittelt wird der Gewichtsverlust der Platte nach jeweils 2, 4, 6, 8 und 10 Doppelschubzyklen. Dieser Wert wird in Gramm als Kornverlust angegeben.

Mit dem ARTe wird auf die Oberfläche einer Asphalt-Probeplatte eine hohe Schubspannung erzeugt. Bei dem Versuch wird die Asphalt-Probeplatte, die in einer Befestigungseinrichtung eingelegt ist, 600 mal vorwärts und rückwärts bewegt. Während dieser lateralen Bewegung rotiert ein aus zwei Reifen bestehender Radsatz (Reifendruck 200 kPa) auf der Asphalt-Probeplatte. Die Räder haben eine Drehzahl von $47 \pm 1 \text{ min}^{-1}$. Die Prüftemperatur beträgt 20°C . Nach der Hälfte der Lastwechsel ist die Platte um 180° zu drehen.



Abbildung 28: ARTe [RWTH Aachen]

Am Versuchsende wird der Substanzverlust in Gramm erfasst.

Ermittlung der Griffigkeit

Die Griffigkeit wird anhand von Messungen mit dem SRT-Gerät in Anlehnung an die TP Griff-StB (SRT) durchgeführt.

Mit dem SRT-Gerät wird der Reibwiderstand zwischen des an einem Pendelarm angebrachten Gleitkörpers und Asphaltoberfläche (hier einer Probeplatte) bestimmt.



Abbildung 29: SRT-Gerät

Vor der Messung mit dem SRT-Geräte ist zunächst die Reiblänge des Gleitkörpers einzustellen. Für die Prüfung wird der Pendelarm in waagerechter Ausgangslage arretiert und dann durch eine Sperrklinge ausgelöst. Unmittelbar vor jeder Messung ist die Oberfläche mit Wasser zu übergießen. Der Pendelarm zieht während des Vorwärtsschwungs einen Schleppzeiger mit. Anhand des Zeigerstands kann dann an einer Skala der SRT-Wert abgelesen werden. Dieser Wert ist in Abhängigkeit von der Temperatur des Gleitkörpers noch zu korrigieren.

An jeder Asphalt-Probeplatte wurden an fünf Stellen jeweils fünf bzw. drei Einzelwerte ermittelt und daraus ein Mittelwert für jede Variante/Platte berechnet. Die hier untersuchten Asphalt-Probeplatten wurden vor den Messungen durch Sandstrahlen von überschüssigem Bitumen an den Oberflächen der Asphalt-Probeplatten befreit.

Anhand des SRT-Wertes kann die Mikrorauheit bewertet werden.

3 Grundlagen für die Auswertung

3.1 Aufbau der Datenbank

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde eine Access Datenbank mit allen relevanten Untersuchungsergebnissen erstellt.

In der Datenbank sind die Ergebnisse in systematischer Weise in Tabellen hinterlegt und können über Formulare, Diagramme und Abfragen abgerufen und auch weiter bearbeitet werden.

ID	HNL Nr	Herkunft	Bezeichnung Asphalt	Erstprüfungen	Gesteinsart	Mischgutart
1	1323-16	Rückstellproben	RS - SMA 8 S - 25/55-55 A			SMA 8 S
2	5666-15	Rückstellproben	RS - AC 11 D S - 45/80-55			AC 11 D S
3	1348-16	Rückstellproben	RS - SMA 8 S - GmB 1			SMA 8 S
4	1349-16	Rückstellproben	RS - SMA 8 S - GmB 2			SMA 8 S
5	1350-16	Rückstellproben	RS - SMA 8 S - GmB 3			SMA 8 S
6	1351-16	Rückstellproben	RS - SMA 8 S - GmB 4			SMA 8 S
7	5665-15	Rückstellproben	RS - SMA 8 S - GmB 5			SMA 8 S
8	1347-16	Rückstellproben	RS - SMA 8 S - GmB 6			SMA 8 S
9	5667-15	Rückstellproben	RS - AC 11 D S - GmB 7			AC 11 D S
10	3574-16	Rückstellproben	PA 8 - 40/100-65 A	Acrobat-Dokument	Diabas	PA 8
11	3575-16	Labormischungen	PA 8 - GmB 25/55-65 V1		Diabas	PA 8
12	3576-16	Labormischungen	PA 8 - GmB 25/55-65 V2	Acrobat-Dokument	Diabas	PA 8
13	3577-16	Labormischungen	PA 8 - GmBT 25/55-65 V1		Diabas	PA 8
14	3578-16	Labormischungen	PA 8 - GmBT 25/55-65 V2		Diabas	PA 8
15	5531-16	Labormischungen	SMA 8 S - 25/55-55 A	Acrobat-Dokument	Granodiorit	SMA 8 S
16	5532-16	Labormischungen	SMA 8 S - GmB 25/55-55 V1		Granodiorit	SMA 8 S
17	5533-16	Labormischungen	SMA 8 S - GmB 25/55-55 V2	Acrobat-Dokument	Granodiorit	SMA 8 S
18	5534-16	Labormischungen	SMA 8 S - GmBT 25/55-55 V1		Granodiorit	SMA 8 S
19	5535-16	Labormischungen	SMA 8 S - GmBT 25/55-55 V2		Granodiorit	SMA 8 S
20	5536-16	Labormischungen	AC 16 B S - 25/55-55 A	Acrobat-Dokument	Granodiorit	AC 16 B S
21	5537-16	Labormischungen	AC 16 B S - GmB 25/55-55 V1		Granodiorit	AC 16 B S

Abbildung 30: Aufbau der Datenbank

3.2 Mathematisch-statistische Verfahren zur Auswertung der Untersuchungsergebnisse

Zur Interpretation der Versuchsergebnisse sollen die ermittelten performance-relevanten Asphaltkennwerte, die das Verformungsverhalten bei Wärme, das Tieftemperaturverhalten, das Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten sowie die Griffigkeit und den Korn- / Substanzverlust beschreiben, mathematisch-statistisch ausgewertet werden. Die Auswertung erfolgt nach den von Sachs [1] beschriebenen statistischen Methoden.

Um mögliche signifikante Unterschiede der ermittelten Asphaltkennwerte zwischen den verschiedenen untersuchten Varianten erkennen zu können, werden einfache Varianzanalysen mit nachgeschaltetem modifizierten LSD-Test

(Least Significant Difference Test) sowie Mittelwertvergleiche durchgeführt.

3.2.1 Einfache Varianzanalyse

Mithilfe der einfachen Varianzanalyse wird die Gleichheit von Mittelwerten mehrerer Stichprobengruppen überprüft. Die k normalverteilten Gruppen mit je n_i Stichprobenelementen und insgesamt n Elementen haben gleiche, aber unbekannte Varianzen.

Für die einfache Varianzanalyse wird die Summe der Abweichungsquadrate der Stichprobenwerte um das Gesamtmittel (Q_{gesamt}) in zwei Anteile zerlegt:

- die Summe der Abweichungsquadrate aller Einzelwerte x_{ij} um die Gruppenmittelwerte \bar{x}_i ($Q_{\text{innerhalb}}$) und

- die Summe der Abweichungsquadrate der Gruppenmittelwerte \bar{x}_i um das Gesamtmittel \bar{x} (Q_{zwischen}).

Die zugehörigen Varianzen oder mittleren Quadrate (MQ) werden als Quotienten aus der Summe der Abweichungsquadrate und dem zugehörigen Freiheitsgrad ν berechnet:

$$MQ_{\text{zwischen}} = s_{\text{zwischen}}^2 = \frac{1}{\nu_1} \sum_i n_i \cdot (\bar{x}_i - \bar{x})^2$$

mit

$$\nu_1 = k - 1,$$

$$MQ_{\text{innerhalb}} = s_{\text{innerhalb}}^2 = \frac{1}{\nu_2} \sum_{ij} (x_{ij} - \bar{x})^2$$

mit $\nu_2 = n - k$.

MQ_{zwischen} wird als Stichprobenfehler und $MQ_{\text{innerhalb}}$ als Versuchsfehler bezeichnet. Entstammen alle Gruppen einer Grundgesamtheit, dann sollten die Varianzen MQ_{zwischen} und $MQ_{\text{innerhalb}}$ etwa gleich groß sein. Ist aber der Quotient aus MQ_{zwischen} und $MQ_{\text{innerhalb}}$ größer als der maßgebende Wert der F-Verteilung, so befinden sich unter den Gruppen solche mit unterschiedlichen Mittelwerten μ_i .

Die Null-Hypothese, alle Mittelwerte seien gleich, wird somit anhand der Prüfgröße

$$\hat{F} = \frac{MQ_{\text{zwischen}}}{MQ_{\text{innerhalb}}}$$

verworfen, wenn bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$

$$\hat{F} > F(\nu_1; \nu_2; \alpha) \text{ ist.}$$

In diesem Fall unterscheiden sich mindestens zwei Mittelwerte μ_i voneinander und die Alternativhypothese $\mu_i \neq \mu$ wird für bestimmte i akzeptiert. Die Ablehnung der Null-Hypothese lässt jedoch nicht den Schluss zu, dass alle Mittelwerte signifikant voneinander verschieden sind. Es ist also herauszufinden, welche Mittelwerte oder welche Gruppen von Mittelwerten sich unterscheiden.

3.2.2 Modifizierter LSD-Test

Ein multipler Mittelwertvergleich mit Hilfe des modifizierten LSD-Tests gibt darüber Auskunft, welche Mittelwerte zu homogenen Gruppen zusammengefasst werden können, d. h. der gleichen Grundgesamtheit entstammen. Dazu werden die k Mittelwerte der Größe nach absteigend geordnet und es wird überprüft, ob benachbarte Mittelwerte eine größere Differenz aufweisen als die kleinste signifikante Differenz (least significant difference = LSD).

Die kleinste signifikante Differenz berechnet sich:

- bei gleichen Stichprobenumfängen einer Messreihe zu:

$$LSD = t_{n-k, \alpha} \cdot \sqrt{\frac{2}{n_i} \cdot MQ_{\text{innerhalb}}},$$

mit

t = Schwellenwert der t-Verteilung bei der Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 0,05$,

n_i = Stichprobenumfang einer Messreihe,

$MQ_{\text{innerhalb}}$ = Varianz der Einzelwerte um die Gruppenmittelwerte.

- bei ungleichen Stichprobenumfängen einer Messreihe zu:

$$LSD_{a,b} = t_{n-k, \alpha} \cdot \sqrt{\left(\frac{n_a + n_b}{n_a \cdot n_b} \right) \cdot MQ_{\text{innerhalb}}}$$

mit

n_a, n_b = Stichprobenumfang der benachbarten Mittelwerte.

Wenn die Differenz der Mittelwerte größer als der LSD-Wert ist, wird die Nullhypothese „alle Mittelwert sind gleich“ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ entsprechend einer statistischen Sicherheit von $S = 0,95$ verworfen und es können homogene Gruppe gebildet werden.

3.2.3 Einfacher Mittelwertvergleich

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfache Mittelwertvergleich angewendet, um zu überprüfen, ob sich die Mittelwerte einer Kenngröße

bestimmt an zwei Asphaltvarianten statistisch voneinander unterscheiden.

Hierfür wird die Null-Hypothese formuliert, dass die Mittelwerte gleich seien, das heißt, die Differenz der Mittelwerte im statistischen Sinne gleich null ist.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2.$$

Die Testgröße \hat{t} zur Überprüfung der Null-Hypothese berechnet sich für die Fälle gleicher und ungleicher Stichprobenumfänge sowie gleicher und nichtgleicher Varianzen gemäß [1]. Überschreitet die Testgröße \hat{t} bei vorgegebener Überschreitungswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ die für die Anzahl der Freiheitsgrade ν in [2] angegebene Signifikanzschranke der t-Verteilung, so wird die Alternativhypothese

$$H_A = \mu_1 \neq \mu_2$$

akzeptiert; das heißt, die Null-Hypothese auf Homogenität der Stichprobenmittelwerte wird abgelehnt.

4 Untersuchungsergebnisse

4.1 Bindemittelkennwerte

In den Kapiteln 4.1.1 und 4.1.2 sind die Bindemittelkennwerte der für die Labormischungen verwendeten zwei polymermodifizierten Bindemittel, vier im Nassverfahren (Großmaßstab) hergestellten gummi-modifizierten Bindemittel sowie vier „im Trockenverfahren hergestellten“ gummi-modifizierten Bindemittel (Zusammensetzung vgl. Kapitel 2.1.1) zu entnehmen.

4.1.1 Konventionelle Bindemittelkennwerte

Für die zehn im Rahmen des Forschungsvorhabens eingesetzten Bindemittel sind in der Tabelle 5 die nach TL Bitumen 07/13, Tabelle 2 zu ermittelnden, konventionellen Bindemittelkennwerte zusammengestellt.

Dabei konnte ein Wert für den Brechpunkt nach Fraaß nur an zwei der acht Gummi-modifizierten Bindemittel sicher ermittelt werden. Augenscheinlich deutliche Unterschiede (in der Größenordnung der Messwerte) von polymer-modifizierten Bindemitteln (PmB) und gummi-modifizierten Bindemitteln (GmB bzw. GmBT) sind bei der Auszugslänge bei der Kraftduktilitätsprüfung zu erkennen, die bei den beiden polymer-modifizierten Bindemittelsorten deutlich größer ist als bei den acht gummi-modifizierten Bindemitteln. Auffällig ist weiter, dass bei der Ermittlung der elastischen Rückstellung bei keinem gummi-modifizierten Bindemittel die Auszugslänge von 200 mm erreicht wird. Die genannten Prüfungen können ggf. für gummi-modifizierte Bindemittel als nicht geeignet bewertet werden.

Weiter ist die Lagerstabilität (ermittelt anhand der Differenz Erweichungspunkt Ring und Kugel) bei den gummi-modifizierten Bindemitteln ungünstiger (überwiegend deutlich größere Zunahme) gegenüber den polymer-modifizierten Bindemitteln, was insbesondere bei der Lagerung vor der Asphaltherstellung zu beachten ist.

Tabelle 5: Bindemittelkennwerte nach TL Bitumen 07/13, Tabelle 2

Variante	Penetration [0,1mm]	Erw. RuK [°C]	El. Rückstellung [%]	Auszugslänge [mm]	Erw. RuK oben [°C]	Erw. RuK unten [°C]	Lagerstabilität Differenz EP(RuK) [°C]	Flammpunkt [°C]	Kraftduktilität 10°C (5°C) Auszugslänge [mm]	Kraftduktilität 10°C (5°C) max. Kraft [N]	Kraftduktilität 10°C (5°C) Arbeit von 0-Riss [J/cm²]	Brechpunkt nach Fraaß [°C]
25/55-55 A	44	62,4	89	200	57,2	57,0	0,2	368	898,5	61,8	20,45	-11
40/100-65 A	41	71,0	96	200	62,4	61,6	0,8	369	1483,8 (487,6)	34,7 (21,9)	53,19 (116,85)	-13
GmB 25/55-55 V 1	33	63,2	67	138	54,6	65,4	10,8	308	158,0	65,0	6,8	*
GmB 25/55-65 V 1	33	75,4	85	124	67,2	69,0	1,8	304	166,9	54,7	8,1	*
GmB 25/55-55 V 2	38	61,0	66	164	52,2	62,6	10,4	323	176,6	54,1	6,24	-20
GmB 25/55-65 V 2	48	65,0	60	146	54,6	67,6	13,0	341	181,5	50,4	6,9	-12
GmBT 25/55-55 V 1	53	61,0	62	181	43,8	77,6	33,8	300	197,6	24,1	4,3	*
GmBT 25/55-65 V 1	38	68,8	78	117	52,0	75,8	23,8	294	146,9	45,1	5,6	*
GmBT 25/55-55 V 2	33	63,0	59	113	53,0	68,6	15,6	292	119,6	75,8	5,9	*
GmBT 25/55-65 V 2	35	66,6	66	134	51,2	66,0	15,2	278	148,1	62,3	6,3	*

*konnte nicht ermittelt werden

Der Tabelle 6 sind noch ergänzend die Binde-
mittelkennwerte Erweichungspunkt Ring und
Kugel, Nadelpenetration und elastische Rück-
stellung nach RTFOT-Alterung zu entnehmen.

Tabelle 6: Bindemittelkennwerte nach TL Bitumen 07/13, Tabelle 2 (nach RTFOT-Alterung)

Variante	Massenänderung [%]	Penetration [0,1mm]	Verbl. Penetration [%]	Erw. RuK [°C]	Anstieg/Abfall EP (RuK) [°C]	El. Rückstellung [%]	Auszuglänge [mm]
25/55-55 A	-0,03	31	70	62,4	0,0	80	200
40/100-65 A	0,02	28	68	67,4	-3,6	90	200
GmB 25/55-55 V 1	0,05	24	73	70,6	7,4	71	110
GmB 25/55-65 V 1	-0,15	30	91	79,6	4,2	82	124
GmB 25/55-55 V 2	-0,13	30	79	68,2	-7,2	71	100
GmB 25/55-65 V 2	-0,15	30	63	85,0	20,0	68	116
GmBT 25/55-55 V 1	-0,68	49	92	67,8	6,8	76	161
GmBT 25/55-65 V 1	-0,61	34	89	77,2	8,4	79	130
GmBT 25/55-55 V 2	0,01	29	88	70,4	7,4	74	91
GmBT 25/55-65 V 2	-0,07	30	86	74,6	8,0	71	98

In der Tabelle 7 sind die Ergebnisse für die Nadelpenetration, den Erweichungspunkt Ring und Kugel, die elastische Rückstellung sowie die Kraftduktilität nach RTFOT- und PAV-Alterung dargestellt.

Tabelle 7: Bindemittelkennwerte nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung

Variante	Penetration [0,1mm]	Verbl. Penetration [%]	Erw. RuK [°C]	Anstieg/Abfall EP (RuK) [°C]	Ei. Rückstellung [%]	Auszugslänge [mm]	Kraftduktilität 10°C Auszugslänge [mm]	Kraftduktilität 10°C max. Kraft [N]	Kraftduktilität 10°C Arbeit von 0-Riss [J/cm ²]
25/55-55 A	17	39	69,6	+7,2	69	200	311,8	192,04	19,26
40/100-65 A	19	46	68,8	-2,1	72	200	335,0	159,07	16,9
GmB 25/55-55 V 1	19	58	78,6	+15,2	58	57	68,9	121,5	5,4
GmB 25/55-65 V 1	23	70	86,0	+10,6	76	103	115,5	69,8	5,6
GmB 25/55-55 V 2	21	55	89,0	+28,0	65	54	43,5	117,39	3,49
GmB 25/55-65 V 2	29	60	87,0	+22,0	65	97	103,0	90,7	6,23
GmBT 25/55-55 V 1	47	89	70,2	+9,2	75	163	215,2	36,2	6,29
GmBT 25/55-65 V 1	30	79	84,0	+15,2	74	86	122,9	62,6	5,33
GmBT 25/55-55 V 2	19	58	79,0	+16,0	60	61	12,5	117,9	0,73
GmBT 25/55-65 V 2	25	71	79,2	+12,6	57	69	78,1	101,6	5,11

4.1.2 Performance-Eigenschaften des Bindemittels

Für die zehn im Rahmen des Forschungsvorhabens eingesetzten Bindemittel sind nachfolgend die Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen ermittelt im Biegebalkenrheometer sowie im dynamischen Scherrheometer wiedergegeben.

Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR)

Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die im BBR-Versuch ermittelten Kenngrößen Biegekriechsteifigkeit und m-Wert für die untersuchten Bindemittel im Lieferzustand (PmB, GmB) bzw. nach Herstellung (GmBT) sowie nach RTFOT- + PAV-Alterung zu entnehmen.

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 34 bis Abbildung 36) ist noch ergänzend die Biegekriechsteifigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur (angepasst an eine Exponentialfunktion) dargestellt.

Tabelle 8: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer

Variante	Biegekriechsteifigkeit [MPa] bei			m-Wert [-] bei		
	-10 °C	-16 °C	-25 °C	-10 °C	-16 °C	-25 °C
25/55-55 A	76,493	183,213	495,553	0,44	0,344	0,237
40/100-65 A	78,944	187,963	491,324	0,443	0,345	0,225
GmB 25/55-55 V 1	61,261	144,698	382,933	0,417	0,348	0,246
GmB 25/55-65 V 1	47,049	96,101	248,595	0,392	0,333	0,252
GmB 25/55-55 V 2	46,912	106,205	315,946	0,429	0,355	0,265
GmB 25/55-65 V 2	62,062	148,960	402,362	0,405	0,342	0,251
GmBT 25/55-55 V 1	23,101	51,172	213,495	0,474	0,412	0,300
GmBT 25/55-65 V 1	32,459	68,967	233,697	0,408	0,356	0,266
GmBT 25/55-55 V 2	48,414	119,472	291,652	0,473	0,447	0,345
GmBT 25/55-65 V 2	56,535	122,298	370,753	0,397	0,346	0,249

Tabelle 9: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung

Variante	Biegekriechsteifigkeit [MPa] bei			m-Wert [-] bei		
	-10 °C	-16 °C	-25 °C	-10 °C	-16 °C	-25 °C
25/55-55 A	174,99	316,396	542,560	0,326	0,259	0,190
40/100-65 A	154,618	298,283	560,838	0,351	0,288	0,215
GmB 25/55-55 V 1	95,184	184,763	441,275	0,338	0,294	0,234
GmB 25/55-65 V 1	50,044	110,262	287,463	0,38	0,337	0,259
GmB 25/55-55 V 2	84,449	125,422	347,914	0,325	0,285	0,235
GmB 25/55-65 V 2	93,391	175,388	408,981	0,342	0,294	0,235
GmBT 25/55-55 V 1	21,267	54,287	200,781	0,427	0,379	0,316
GmBT 25/55-65 V 1	31,192	67,747	176,939	0,416	0,411	0,354
GmBT 25/55-55 V 2	90,870	171,389	305,846	0,318	0,293	0,288
GmBT 25/55-65 V 2	55,343	104,759	186,322	0,432	0,405	0,332

Aus Abbildung 31 kann für die polymermodifizierten Bindemittel der Sorte 25/55-55 A und 40/100-65 A im Lieferzustand sowie nach

RTFOT- + PAV-Alterung die Biegekriechsteifigkeit für die drei hier untersuchten Prüftemperaturen entnommen werden.

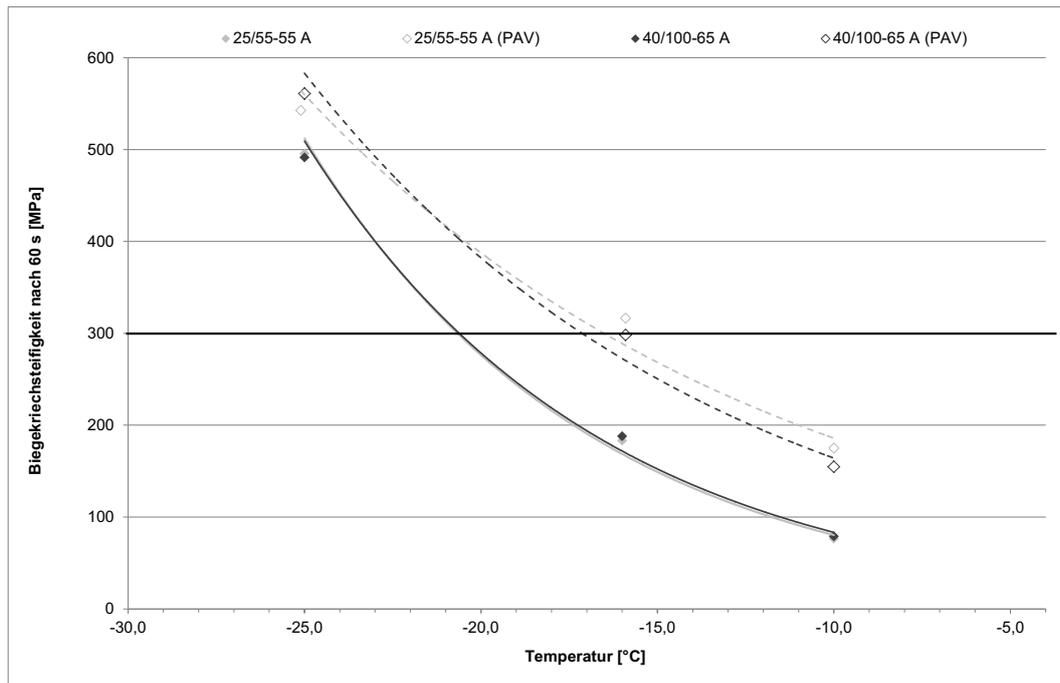


Abbildung 31: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung – Polymermodifizierte Bindemittel (PmB)

Abbildung 32 zeigt die ermittelten Biegekriechsteifigkeiten für die im Nassverfahren hergestellten gummi-modifizierten Bindemittel. Die gummi-modifizierten Bindemittel GmB 25/55-55 V1 und GmB 25/55-65 V2 weisen insbesondere bei der Prüftemperatur von -25 °C vergleichsweise höhere Steifigkeiten gegenüber den beiden anderen gummi-modifizierten Bindemitteln auf. Nach RTFOT- + PAV-Alterung ändert sich die Reihung der untersuchten

Bindemittel hinsichtlich der Biegekriechsteifigkeit nicht gegenüber den Bindemitteln im Lieferzustand.

Insgesamt ist für die hier untersuchten gummi-modifizierten Bindemittel ein geringeres Niveau der Biegekriechsteifigkeiten gegenüber den hier untersuchten polymermodifizierten Bindemitteln zu konstatieren, vgl. Abbildung 31.

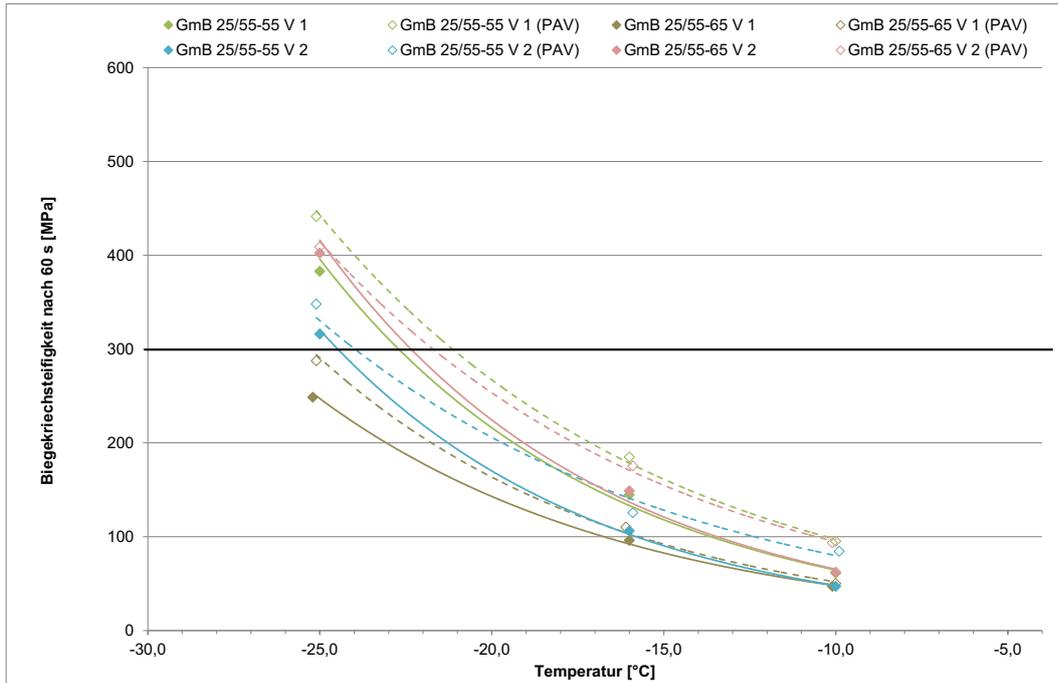


Abbildung 32: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung – Gummimodifizierte Bindemittel (GmB) im Nassverfahren

In der Abbildung 33 sind die Biegekriechsteifigkeiten für die „im Trockenverfahren“ hergestellten gummimodifizierten Bindemittel zusammengestellt. Für die mit dem Batch von Hersteller V1 hergestellten GmBT 25/55-55 und 25/55-65 liegen die Werte für die Biegekriechsteifigkeiten auf vergleichsweise geringem Niveau. Nach RTFOT- + PAV-Alterung kann insbesondere bei den Prüftemperaturen -10 °C und -16 °C keine wesentliche Zunahme in der Biegekriechsteifigkeit erkannt werden.

Die GmBT 25/55-55 und 25/55-65, hergestellt mit Batch von Hersteller V2, liegen im Vergleich zu Hersteller V1 auf höherem Steifigkeitsniveau.

Nach RTFOT- + PAV-Alterung nimmt die Biegekriechsteifigkeit teilweise ab.

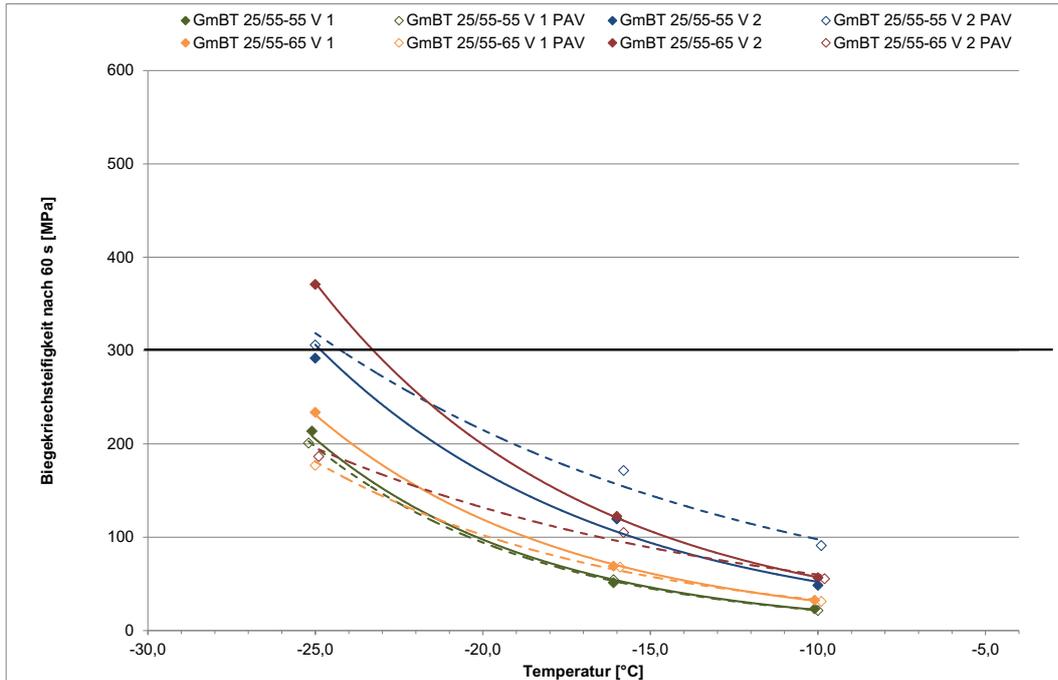


Abbildung 33: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung – Gummimodifizierte Bindemittel (GmBT) im Trockenverfahren

Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (DSR)

Der Tabelle 10 können die Ergebnisse der DSR-Prüfung (T-Sweep) als Zahlenwerte (Komplexer Schermodul G^* und Phasenwinkel δ in Abhängigkeit von der Prüftemperatur 30 - 90 °C) entnommen werden.

Neben Prüfungen am Bindemittel im Lieferzustand (PmB, GmB) bzw. nach Herstellung (GmBT) wurden die Bindemittel noch nach RTFOT- + PAV-Alterung in analoger Weise untersucht, vgl. Tabelle 11.

Die DSR-Prüfung (T-Sweep) wurde am polymermodifizierten Bindemittel jeweils mit zwei unterschiedlichen Spaltbreiten von 1 mm und 2 mm durchgeführt und am gummimodifizierten mit einer Spaltweite von 2 mm.

Zur Darstellung der Ergebnisse wurde das BLACK-Diagramm ausgewählt, in dem die jeweils zusammengehörigen Wertepaare von G^* und δ (Mittelwerte) für alle geprüften Temperaturstufen in einem einzigen x-y-Koordinatensystem in Abhängigkeit voneinander aufgetragen werden.

Tabelle 10: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer DSR-Prüfung

Bindemittel- sorte	Spalt- breite	Komplexer Schermodul G^* [Pa]						
		Phasenwinkel δ [°]						
		30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
25/55-55 A	1 mm	566.991	119.332	27.453	7.545	2.370	836	313
		64,3	68,2	70,2	73,8	77,7	81,3	85,6
	2 mm	557.636	117.157	26.990	7.378	2.269	819	278
		64,8	68,1	69,9	73,1	76,8	80,7	84,1
40/100-65 A	1 mm	538.319	103.877	22.480	5.947	1.874	725	313
		66,2	69,6	71,7	74,5	75,5	76,1	79,3
	2 mm	601.315	116.275	25.264	6.617	2.073	741	283
		64,9	69,0	70,1	72,3	74,1	75,4	81,5
GmB 25/55-55 V 1	2 mm	798.055	190.933	49.031	14.411	4.772	1.711	678
		56,3	58,1	59,9	64,6	70,4	74,4	76,6
GmB 25/55-65 V 1	2 mm	790.922	220.504	71.089	28.227	12.821	6.195	3.181
		49,9	49,7	47,4	47,5	50,0	52,7	52,3
GmB 25/55-55 V 2	2 mm	579.476	116.716	26.127	6.998	2.171	780	281
		64,9	68,6	70,0	72,7	75,5	78,1	82,8
GmB 25/55-65 V 2	2 mm	526.348	147.013	48.986	19.399	8.793	4.022	1.689
		55,6	53,6	51,8	50,9	51,6	55,5	61,2
GmBT 25/55-55 V 1	2 mm	268.253	82.338	28.266	11.266	4.858	2.291	1.270
		53,8	51,6	52,6	56,3	59,8	59,6	54,3
GmBT 25/55-65 V 1	2 mm	597.259	175.703	57.544	22.378	9.471	4.170	2.024
		50,1	49,1	48,7	51,9	57,0	60,4	59,5
GmBT 25/55-55 V 2	2 mm	972.044	247.117	64.705	19.245	6.439	2.410	1.038
		54,1	56,3	60,1	66,1	71,3	74,2	74,4
GmBT 25/55-65 V 2	2 mm	822.011	218.886	61.833	20.521	7.771	3.186	1.416
		52,8	54,6	56,7	60,8	65,3	68,9	71,6

Tabelle 11: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer DSR-Prüfung - nach RTFOT- + PAV-Alterung

Bindemittel- sorte	Spalt- breite	Komplexer Schermodul G^* [Pa]						
		Phasenwinkel δ [°]						
		30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
25/55-55 A	1 mm	3.159.977	797.780	186.158	48.168	13.942	4.366	1.419
		46,6	55,5	61,6	65,7	69,8	74,9	80,2
	2 mm	3.161.629	792.169	188.882	49.826	14.751	4.469	1.314
		47,8	55,9	61,7	65,8	69,7	74,6	79,8
40/100-65 A	1 mm	3.231.594	724.552	152.782	36.707	10.568	3.258	1.078
		48,9	58,4	64,0	67,6	72,3	77,8	82,7
	2 mm	3.177.780	710.007	153.831	37.278	10.573	3.184	988
		49,6	58,4	63,8	67,2	71,7	77,2	82,2
GmB 25/55-55 V 1	2 mm	2.460.611	684.388	181.824	52.847	17.425	6.318	2.322
		43,1	49,1	53,3	56,3	59,5	63,1	67,1
GmB 25/55-65 V 1	2 mm	1.357.928	389.652	114.950	39.993	16.534	7.509	3.603
		45,4	49,0	50,1	50,3	51,2	53,4	56,5
GmB 25/55-55 V 2	2 mm	2.439.529	730.802	222.242	73.593	27.399	10.968	4.664
		40,0	44,9	48,0	50,2	52,4	55,3	58,8
GmB 25/55-65 V 2	2 mm	1.539.552	429.601	127.165	43.914	17.978	8.323	3.621
		48,1	52,1	52,8	52,0	50,8	50,4	53,9
GmBT 25/55-55 V 1	2 mm	445.385	126.743	26.506	10.600	4.774	3.013	1.494
		53,0	53,4	52,9	54,5	57,3	58,8	61,5
GmBT 25/55-65 V 1	2 mm	1.073.045	314.034	89.179	31.806	13.200	5.905	2.729
		45,7	48,9	50,1	50,8	52,5	55,5	59,3
GmBT 25/55-55 V 2	2 mm	2.237.569	719.134	157.314	48.728	17.627	6.778	2.766
		44,6	49,9	53,9	56,2	59,1	62,9	67,1
GmBT 25/55-65 V 2	2 mm	1.698.350	471.570	128.613	41.021	15.097	6.080	2.540
		45,2	50,4	53,8	56,3	58,9	62,1	65,7

In der Abbildung 34 sind Ergebnisse der DSR-Prüfung als BLACK-Diagramm für die beiden polymermodifizierten Bindemittelsorten 25/55-55 A und 40/100-65 A im Lieferzustand und nach RTFOT- + PAV-Alterung dargestellt. Bei den beiden Bindemitteln sind im Lieferzustand sowie nach RTFOT- + PAV-Alterung die jeweils mit Spaltbreiten von 1 und 2 mm ermittelten

Werte für den Komplexen Schermodul und Phasenwinkel ähnlich.

Die aufgetragenen Kurvenverläufe im BLACK-Diagramm weisen typische Verläufe für polymermodifizierte Bindemittel auf.

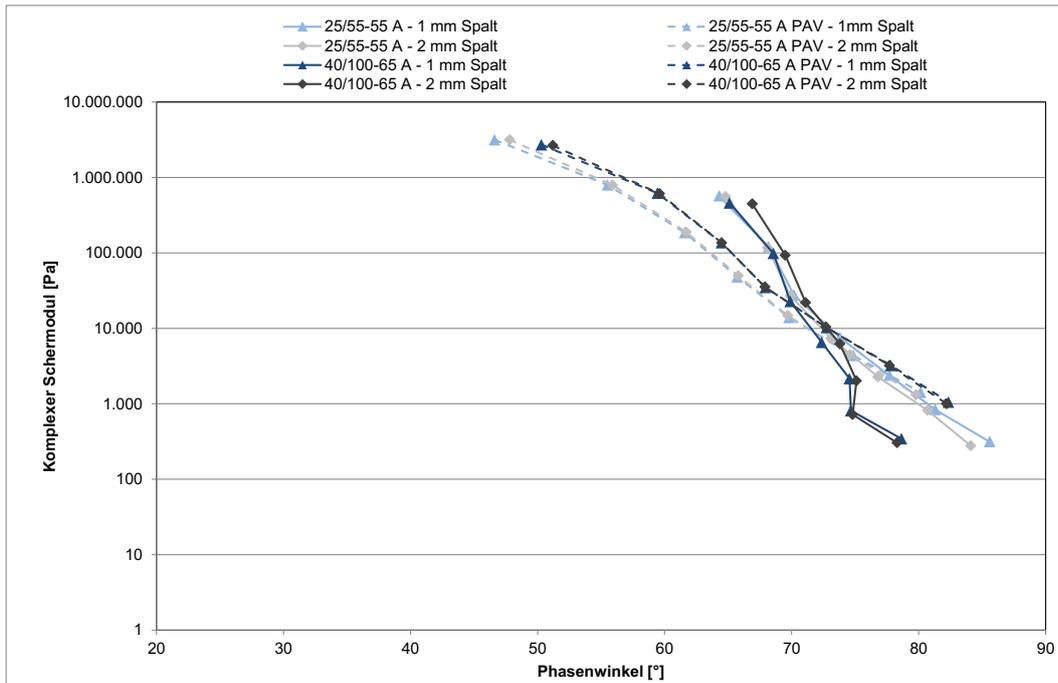


Abbildung 34: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (BLACK-Diagramm) vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung bei 1 mm und 2 mm Spaltweite – Polymermodifizierte Bindemittel (PmB)

Der Abbildung 35 sind die Ergebnisse der DSR-Prüfungen für die gummi-modifizierten Bindemittel (GmB) im Nassverfahren der Sorten 25/55-55 und 25/55-65 zu entnehmen.

Die Kurven der Bindemittelsorte GmB 25/55-55 der beiden Hersteller (V1 und V2) im Lieferzustand ähneln den Verläufen eines polymer-modifizierten Bindemittels. Nach RTFOT- + PAV-Alterung nehmen über den gesamten Prüftemperaturbereich die Werte für den Komplexen

Schermodul zu und die Werte für den Phasenwinkel ab.

Die gummi-modifizierten Bindemittel GmB 25/55-65 von Hersteller V1 und V2 weisen dagegen deutlich geringere Werte für den Phasenwinkel auf, wobei die geringsten Werte bei den Prüftemperaturen von 50 bzw. 60 °C zu konstatieren sind.

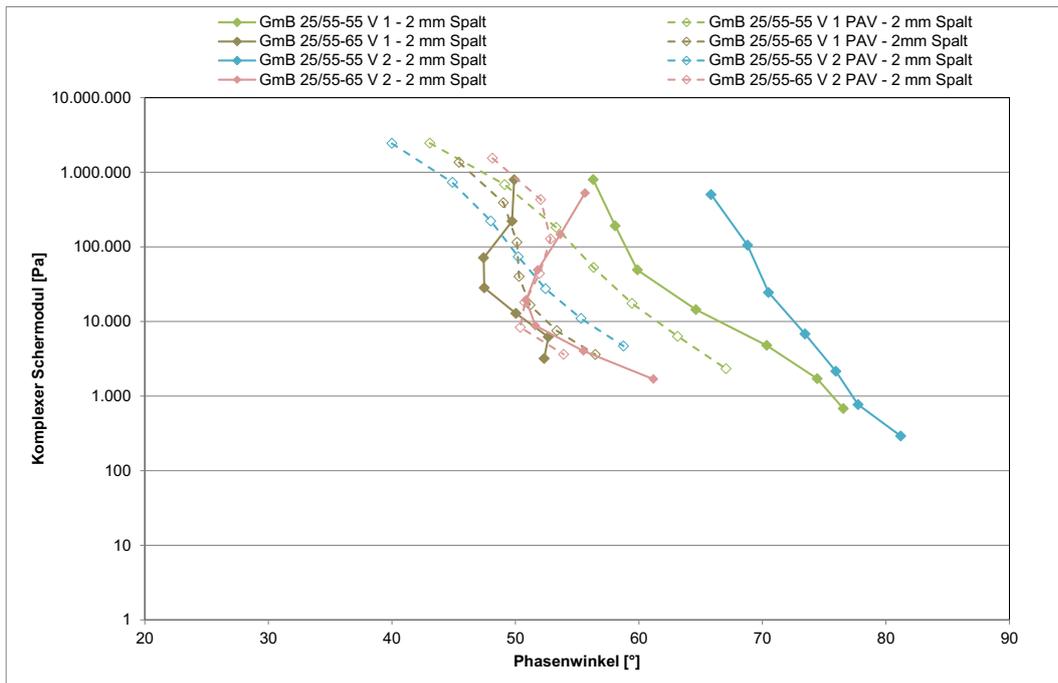


Abbildung 35: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (BLACK-Diagramm) vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung 2 mm Spaltweite – Gummi-modifizierte Bindemittel (GmB) im Nassverfahren

Die Abbildung 36 zeigt als BLACK-Diagramm dargestellt die Ergebnisse der DSR-Prüfung für die im Labormaßstab „im Trockenverfahren“ hergestellten gummimodifizierten Bindemittel.

Bei beiden gummimodifizierten Bindemittelvarianten GmBT 25/55-55 und 25/55-65, hergestellt mit dem Batch von Hersteller V2, nimmt mit zunehmender Prüftemperatur der Wert für den komplexen Schermodul zu und für den Phasenwinkel ab, wobei bei der „härteren“ Bindemittelsorte 25/55-65 insbesondere der Phasenwinkel geringere Werte aufweist. Nach RTFOT- + PAV-Alterung erhöhen sich die Werte für den Komplexen Schermodul und gleichzeitig verringern sich die Werte für den Phasenwinkel.

Bei den gummimodifizierten Bindemitteln GmBT 25/55-55 und 25/55-65 hergestellt mit dem Batch von Hersteller V1 werden mit zunehmender Prüftemperatur höhere Werte für den komplexen Schermodul gemessen. Eine eindeutige Tendenz der Größe des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Prüftemperatur gibt es nicht, woraus der S-förmige Verlauf der zugehörigen Kurve im BLACK-Diagramm resultiert. Nach RTFOT- + PAV-Alterung stellt sich besonders beim GmBT 25/55-65 V1 der Zusammenhang Abnahme des Wertes Phasenwinkel mit zunehmender Prüftemperatur ein.

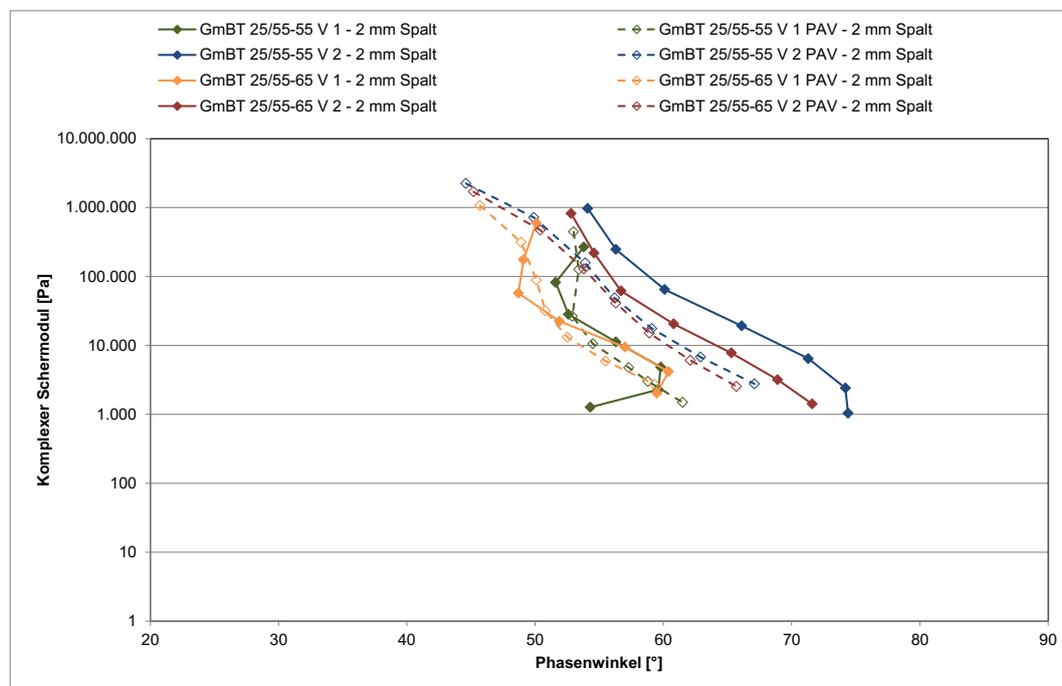


Abbildung 36: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (BLACK-Diagramm) vor Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung 2 mm Spaltweite – Gummimodifizierte Bindemittel (GmBT) im Trockenverfahren

Verformungsverhalten im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung der MSCR-Prüfung

In Tabelle 12 und Tabelle 13 sind die aus der MSCR-Prüfung ermittelten Kenngrößen „prozentuale Erholung (Rückformung) und akkumulierte Dehnung“ für die Bindemittel im Lieferzustand (PmB, GmB) bzw. nach Herstellung (GmBT) zu angeben.

Im Hinblick auf die derzeitige Überarbeitung der Arbeitsanleitung für die MSCR-Prüfung wurde neben den drei Laststufen 0,1, 1,6 und 3,2 kPa (Sweep) weiterhin die MSCR-Prüfung bei nur einer Laststufe von 3,2 kPa durchgeführt.

Der Wert für die akkumulierte Dehnung (ermittelt im Laststufen-Sweep sowie in der Einzelwertbestimmung) liegt für alle hier untersuchten gummimodifizierten Bindemittel im Original

unterhalb der ermittelten Werte für das PmB 25/55-55 A sowie für das PmB 40/100-65 A.

Die Spannweite der Werte für die prozentuale Erholung reicht von der Größenordnung des PmB 25/55-55 A bis zur Größenordnung der Werte für das PmB 40/100-65 A, wobei für die jeweilige „härtere“ GmB(T)-Variante 25/55-65 gegenüber der GmB(T)-Variante 25/55-55 die

„durchschnittliche prozentuale Erholung“ größer ist.

Nach RTFOT- + PAV-Alterung nimmt mit Ausnahme des polymermodifizierten Bindemittels 40/100-65 A der Wert für die durchschnittliche prozentuale Erholung zu und bei allen Varianten die akkumulierte Dehnung ab.

Tabelle 12: Verformungsverhalten im Dynamischen Scherrheometer – MSCR-Prüfung bei 60°C und 2 mm Spaltweite (und 1 mm Spaltweite bei polymermodifizierten Bindemitteln)

Variante	Ermittelt im Sweep (Laststufen)				Einzelwertbestimmung	
	Durchschnittlich prozentuale Erholung [%]			akk. Dehnung [mm]	Durchschnittlich prozentuale Erholung [%]	akk. Dehnung [mm]
	0,1 MPa	1,6 MPa	3,2 MPa		3,2 MPa	
25/55-55 A (1 mm Spalt)	38,3	32,4	24,6	38,8	27,0	28,9
25/55-55 A (2 mm Spalt)	31,8	25,7	18,8	43,1	23,3	26,8
40/100-65 A (1 mm Spalt)	56,7	54,1	40,0	41,6	55,9	20,2
40/100-65 A (2 mm Spalt)	73,1	73,5	64,1	23,4	67,0	13,3
GmB 25/55-55 V 1	43,1	31,1	22,6	21,8	26,2	13,0
GmB 25/55-65 V 1	89,0	82,6	79,0	1,4	77,0	1,2
GmB 25/55-55 V 2	57,8	45,9	36,1	14,3	35,6	10,2
GmB 25/55-65 V 2	94,5	60,7	43,0	8,1	41,9	6,8
GmBT 25/55-55 V 1	83,6	51,2	39,0	14,8	38,7	10,9
GmBT 25/55-65 V 1	84,1	72,4	67,3	3,0	65,6	2,2
GmBT 25/55-55 V 2	55,8	42,0	35,1	10,4	34,0	7,2
GmBT 25/55-65 V 2	64,6	51,2	44,7	7,7	42,9	5,5

Tabelle 13: Verformungsverhalten im Dynamischen Scherrheometer – MSCR-Prüfung bei 60°C und 2 mm Spaltweite (und 1 mm Spaltweite bei polymermodifizierten Bindemitteln) nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung

Variante	Ermittelt im Sweep (Laststufen)			Einzelwertbestimmung		
	Durchschnittlich prozentuale Erholung [%]			akk. Dehnung [mm]	Durchschnittlich prozentuale Erholung [%]	akk. Dehnung [mm]
	0,1 MPa	1,6 MPa	3,2 MPa		3,2 Pa	
25/55-55 A (1 mm Spalt)	48,6	48,4	47,5	3,6	46,4	2,5
25/55-55 A (2 mm Spalt)	49,0	48,9	47,9	3,5	46,8	2,2
40/100-65 A (1 mm Spalt)	46,1	45,9	45,4	3,9	37,1	4,0
40/100-65 A (2 mm Spalt)	46,3	46,1	45,7	3,8	37,0	4,1
GmB 25/55-55 V 1	74,7	73,5	74,6	1,2	72,8	0,9
GmB 25/55-65 V 1	86,0	85,9	86,8	0,7	84,7	0,5
GmB 25/55-55 V 2	83,3	84,6	85,6	0,4	83,7	0,3
GmB 25/55-65 V 2	80,1	74,1	70,9	2,3	69,3	1,7
GmBT 25/55-55 V 1	79,8	72,4	66,3	5,5	66,4	3,7
GmBT 25/55-65 V 1	83,3	82,8	83,0	1,2	80,0	1,0
GmBT 25/55-55 V 2	73,7	71,1	70,7	1,7	72,8	0,9
GmBT 25/55-65 V 2	76,4	75,2	75,2	1,4	72,0	1,2

4.2 Eigenschaften des Asphaltes

In den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.8 werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Kälteverhaltens, des Steifigkeitsverhaltens, des Ermüdungsverhaltens und des Verformungsverhaltens bei Wärme sowie zur Ermittlung des Korn- und Substanzverlust und zum Griffigkeitsverhalten dargestellt.

Untersucht wurden die folgenden Asphalte mit polymermodifizierten und gummimodifizierten Bindemitteln dargestellt:

- SMA 8 S und AC 16 B S jeweils mit
 - 25/55-55 A
 - GmB 25/55-55 (2 Varianten)
 - GmBT 25/55-55 (2 Varianten)
- PA 8 mit
 - 40/100-65 A
 - GmB 25/55-65 (2 Varianten)
 - GmBT 25/55-65 (2 Varianten)
- Rückstellproben SMA 8 S mit
 - 25/55-55 A
 - GmB-1 bis -6
- Rückstellproben AC 11 D S mit
 - 45/80-55
 - GmB-7

Die Versuche wurden jeweils mit einer zwei-, drei- bzw. mehrfachen Belegung durchgeführt. Bei den im Folgenden dargestellten Ergebnissen handelt es sich um die aus den jeweils vorliegenden Einzelwerten berechneten Mittelwerte bzw. gemittelten Verläufe.

Die an den einzelnen Probekörpern erzielten Versuchsergebnisse sind der der Forschungsarbeit beigefügten Datenbank zu entnehmen.

Zusätzlich werden in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.8 die Ergebnisse der mathematisch-statistischen Verfahren für die ermittelten Kenngrößen zusammengefasst. Die Grundlagen hierzu werden in Kapitel 3.2 beschrieben.

Die Ergebnisse der mit polymermodifizierten Bitumen hergestellten Asphalte werden in den folgenden Grafiken immer in schwarz dargestellt. Die blaue bzw. grüne Farbe repräsentiert die Ergebnisse der Asphaltvarianten, bei denen ein gummimodifiziertes Bitumen im Nassverfahren eingesetzt wurde und in roter Farbe sind die

Ergebnisse der Asphaltvarianten dargestellt, bei denen die Gummimodifizierung der Bindemittel „im Trockenverfahren“ (siehe hierzu Kapitel 2.1.1) erfolgte.

Bei den folgenden Darstellungen und der Auswertung der Ergebnisse werden die im Laboratorium hergestellten Asphalte und die Rückstellproben separat betrachtet. Weiterhin ist die Auswertung unterteilt in die Asphaltarten SMA 8 S, AC 16 B S und PA 8 (Labormischungen) bzw. SMA 8 S und AC 11 D S (Rückstellproben).

Die Ergebnistabellen der statistischen Auswertung sind wie folgt aufgebaut: In den ersten drei Spalten sind die Asphalteigenschaft/ Versuchstyp, die Asphaltart sowie die untersuchte Kenngröße aufgeführt. In der vierten Spalte befinden sich die Ergebnisse der einfachen Varianzanalyse bzw. des einfachen Mittelwertvergleichs. Die Bezeichnung „signifi.“ deutet darauf hin, dass sich mindestens einer der Asphalte hinsichtlich der untersuchten Kenngröße signifikant von den anderen unterscheidet. Die Abkürzung „n. signifi.“ bedeutet entsprechend, dass die Ergebnisse der verschiedenen Varianten sich nicht signifikant voneinander unterscheiden.

Für die weitere mathematisch-statistische Auswertung (Spalten „LSD-Test“) werden die Ergebnisse der Größe nach, beginnend mit dem höchsten Wert, geordnet. Wenn dabei die Unterschiede zwischen den Mittelwerten signifikant sind, dann werden die Varianten in getrennten Gruppen eingegliedert. Falls die Unterschiede der Varianten nicht statistisch signifikant sind, werden sie dementsprechend der gleichen homogenen Gruppe zugeordnet und gehören der gleichen Grundgesamtheit an.

4.2.1 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Kälteverhaltens

Zur Ansprache des Kälteverhaltens werden Abkühl- und Einaxiale Zugversuche durchgeführt. Im Folgenden wird nacheinander auf die Ergebnisse aus den Abkühlversuchen und den Einaxialen Zugversuchen eingegangen.

Dem Anhang II sind ergänzend für die untersuchten Asphaltvarianten noch eine grafische Darstellung mit Abkühlkurve, Zugfestigkeit

(Spline) und Zugfestigkeitsreserve in Anhängigkeit von der Temperatur zu entnehmen.

Abkühlversuch

In der Abbildung 37 bis Abbildung 40 sind die im Abkühlversuch ermittelten kryogenen Zugspannungsverläufe für die im Labor hergestellten Asphalte (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) dargestellt. Tabelle 14 bis

Tabelle 17 sind ergänzend die zugehörigen Werte für die Bruchspannung und die Bruchtemperatur zu entnehmen.

Bei den Verläufen der kryogenen Zugspannungen der Splittmastixasphalte SMA 8 S (Abbildung 37) fällt auf, dass mit Ausnahme der Variante mit GmBT 25/55-55 V1, diese praktisch eine Kurvenschar darstellen. Der Verlauf der kryogenen Zugspannungen des SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V1 ist vergleichsweise flacher, woraus am Versuche mit $-32,6\text{ °C}$ die mit Abstand niedrigste Bruchtemperatur resultiert. Für den SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A ist der tendenziell vergleichsweise geringste Wert für die Bruchspannung und größte Wert für die Bruchtemperatur zu konstatieren.

Tabelle 14: Bruchspannung und -temperatur für SMA 8 S

SMA 8 S mit	25/55-55 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Bruchspannung [MPa]	4,945	5,103	5,449	5,837	5,384
Bruchtemperatur [°C]	-21,3	-22,4	-25,0	-32,6	-24,2

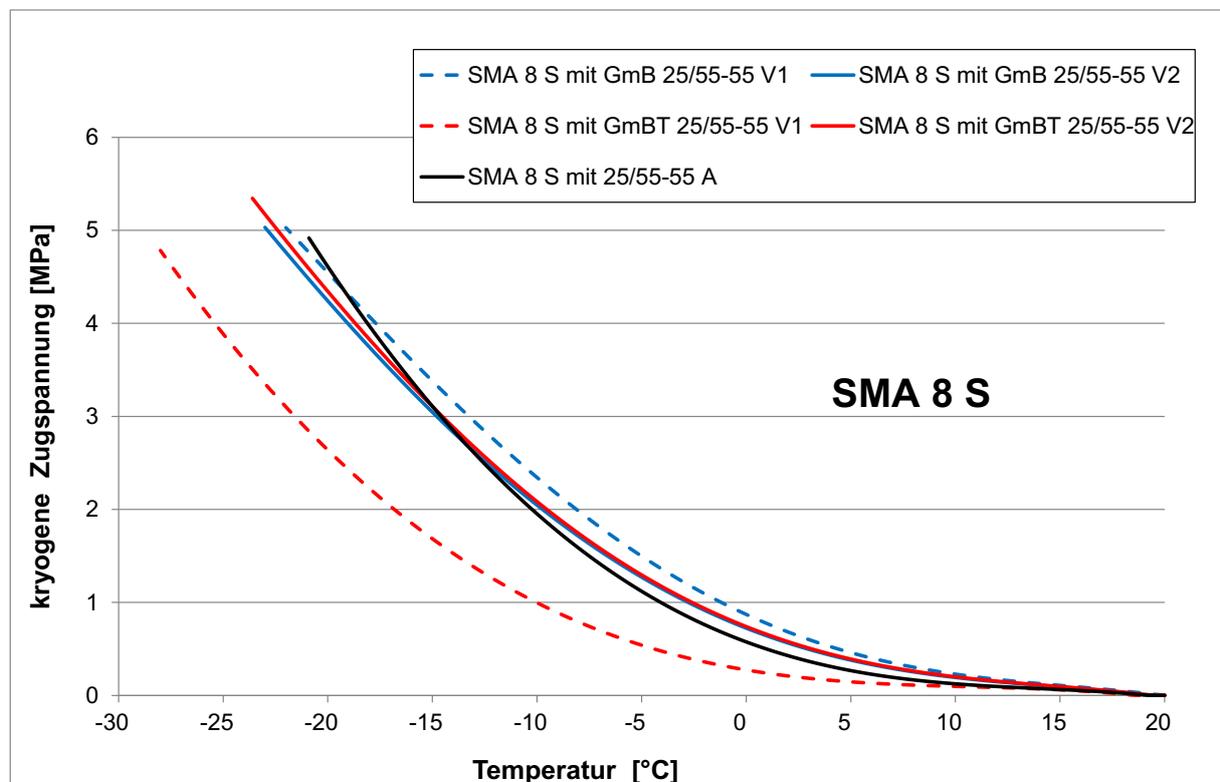


Abbildung 37: kryogene Zugspannungsverläufe - SMA 8 S

In Analogie zum Splittmastixasphalt SMA 8 S weist auch bei den Asphaltbindern AC 16 B S

die Variante mit GmBT 25/55-55 V1 den flachsten Kurvenlauf der kryogenen Zugspannungen

auf (Abbildung 38) und erreicht den vergleichsweise kleinsten Wert für die Bruchtemperatur. Im Vergleich zu den AC 16 B S-Varianten mit gummi-modifizierten Bindemitteln ist der

ermittelte Verlauf der kryogenen Zugspannungen des AC 16 B S mit polymer-modifiziertem Bindemittel 25/55-55 A eher steiler.

Tabelle 15: Bruchspannung und -temperatur für AC 16 B S

AC 16 B S mit	25/55-55 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Bruchspannung [MPa]	4,555	3,195	3,912	3,730	3,246
Bruchtemperatur [°C]	-20,8	-19,2	-23,2	-29,7	-21,0

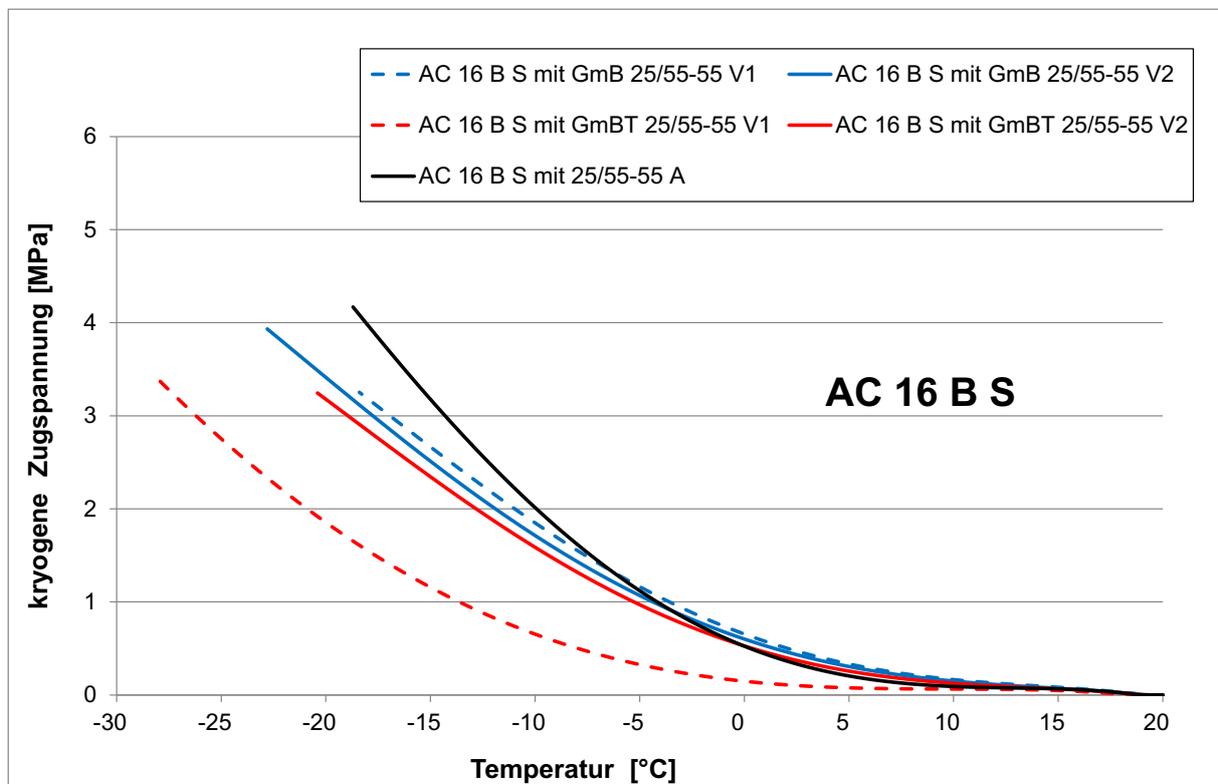


Abbildung 38: kryogene Zugspannungsverläufe - AC 16 B S

Die am Offenporigen Asphalt PA 8 ermittelten Zugspannungsverläufe sind in der Abbildung 39 dargestellt. Es ist eine eher geringe Spreizung der fünf Kurven zu erkennen. Unterschiede gibt

es zwischen den Werten für die Bruchtemperatur, vgl. Tabelle 16.

Tabelle 16: Bruchspannung und -temperatur für PA 8

PA mit	40/100-65 A	GmB 25/55-65 V1	GmB 25/55-65 V2	GmBT 25/55-65 V1	GmBT 25/55-65 V2
Bruchspannung [MPa]	1,170	1,208	1,305	1,679	1,473
Bruchtemperatur [°C]	-21,0	-21,4	-23,2	-29,1	-25,5

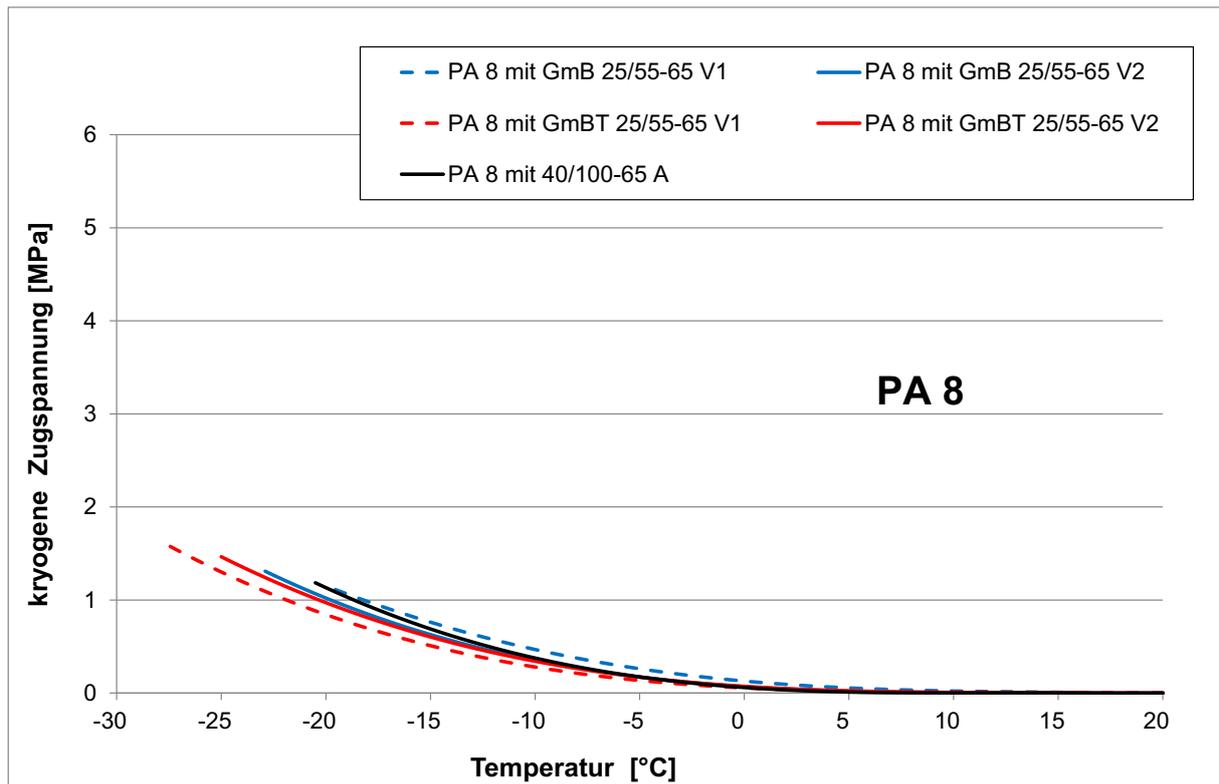


Abbildung 39: kryogene Zugspannungsverläufe - PA 8

Anhand der Gegenüberstellung der Verläufe der kryogenen Zugspannungen der SMA 8 S-Rückstellenproben (Abbildung 40) ist zu erkennen, dass der RS-SMA 8 S mit polymermodifiziertem 25/55-55 A den vergleichsweise steilsten Verlauf aufweist. Die Kurven (kryogenen Zugspannungsverläufe) für die sechs Varianten

mit gummi-modifizierten Bindemitteln liegen unterhalb der Kurve des SMA 8 S mit 25/55-55 A.

Mit vergleichsweise großem Abstand zu den anderen sechs Varianten weist der SMA 8 S mit GmB 1 den kleinsten Wert für die Bruchtemperatur auf.

Tabelle 17: Bruchspannung und -temperatur für Rückstellproben (SMA 8 S)

RS – SMA 8 S mit	25/55-55 A	GmB 1	GmB 2	GmB 3	GmB 4	GmB 5	GmB 6
Bruchspannung [MPa]	3,970	4,893	4,162	4,026	4,632	4,481	4,456
Bruchtemperatur [°C]	-18,5	-26,8	-20,9	-20,5	-21,1	-21,2	-21,6

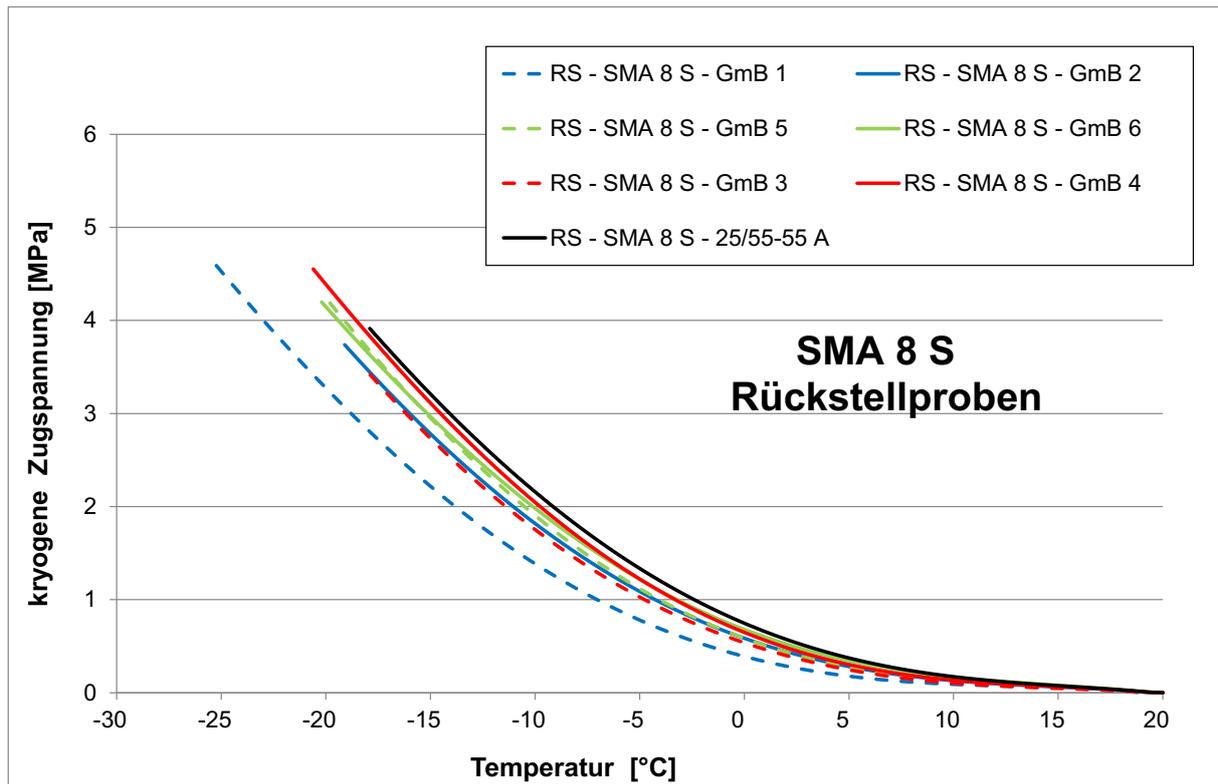


Abbildung 40: kryogene Zugspannungsverläufe ermittelt am SMA 8 S (Rückstellproben) mit PmB bzw. GmB

Für die Rückstellproben AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel und gummi-modifiziertem Bindemittel sind ähnliche Verläufe der kryogenen Zugspannungen zu konstatieren (siehe Abbildung 41), wobei der AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel 45/80-55 zunächst mit abnehmender Temperatur einen flacheren Verlauf aufweist und ab etwa -5 °C steiler gegenüber dem AC 11 D S mit GmB 7 ansteigt. Am Versuchsende weisen die beiden hier gegenübergestellten AC 11 D S Bruchtemperaturen in praktisch gleicher Größenordnung auf.

Tabelle 18: Bruchspannung und -temperatur für Rückstellproben (AC 11 D S)

RS – AC 11 D S mit	45/80-55	GmB 7
Bruchspannung [MPa]	5,533	5,057
Bruchtemperatur [°C]	-23,9	-23,8

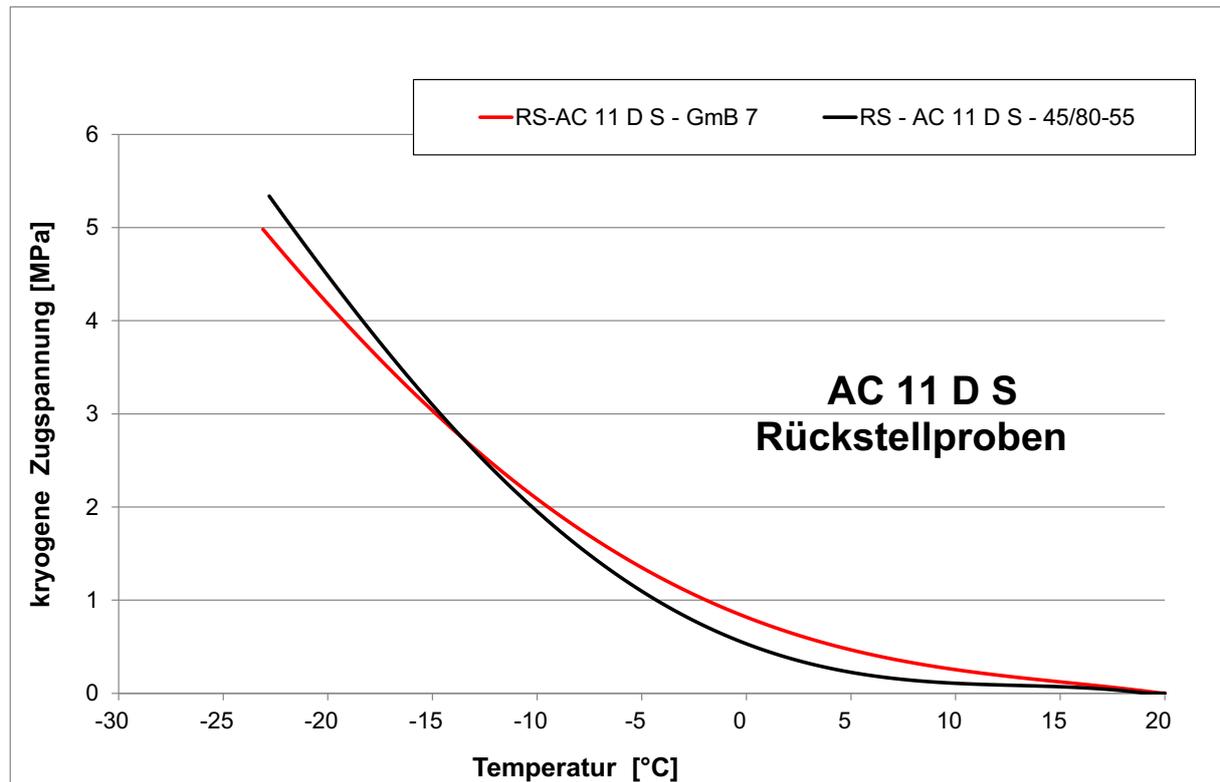


Abbildung 41: kryogene Zugspannungsverläufe ermittelt am AC 11 D S (Rückstellproben) mit PmB bzw. GmB

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 42 bis Abbildung 47) sind die Kenngrößen Bruchspannung und Bruchtemperatur für die im Labor hergestellten Asphalte als Balkendiagramm vergleichend zusammengestellt. Weiter sind in der Tabelle 19 für die beiden zuvor genannten Kenngrößen die Ergebnisse der mathematisch-statistischen Auswertung dargestellt.

Aus der mathematisch-statistischen Auswertung ergibt sich, dass sich der Wert für die Bruchtemperatur beim SMA 8 S sowie AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V1 jeweils signifikant von den anderen untersuchten Varianten unterscheidet und auch jeweils allein einer anderen homogenen Gruppe angehört. Für die SMA 8 S- und AC 16 B S-Variante mit GmBT 25/55-55 V1 werden jeweils die geringsten Werte für die Bruchtemperatur ermittelt. Eine Erklärung hierfür könnte u. a. das bei der Labor Mischung GmBT 25/55-55 V1 verwendete weichere Grundbitumen der Sorte 70/100 sein.

Beim PA 8 ist für die Variante mit GmBT 25/55-65 V1 ein signifikant geringerer Wert für die Bruchtemperatur gegenüber den anderen vier Varianten zu konstatieren und eine Zuordnung

in eine getrennte homogene Gruppe vorzunehmen.

Zwischen den Werten für die Bruchspannung konnte bei keiner der hier betrachteten Asphaltarten (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) eine Unterscheidung in homogene Gruppen statistisch nachgewiesen werden.

Anhand der Kenngrößen Bruchtemperatur bzw. Bruchspannung können keine signifikanten Unterschiede zwischen den Asphalten mit polymermodifiziertem Bindemittel und mit gummi-modifizierten Bindemitteln und auch nicht zwischen der Art der Gummimodifizierung (Nassverfahren bzw. Trockenverfahren) festgestellt werden.

Eine Gegenüberstellung der Werte für die Bruchtemperatur und Bruchspannung können für die Rückstellproben SMA 8 S Abbildung 48 und Abbildung 49 entnommen werden.

Mithilfe mathematisch-statistischer Verfahren (Tabelle 20) werden keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Rückstellproben SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel und gummimodifizierten Bindemitteln ermittelt.

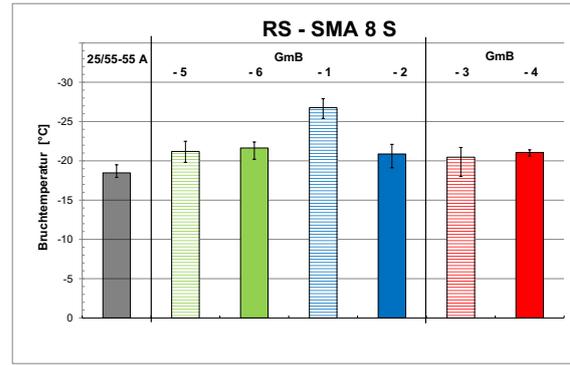


Abbildung 48: Bruchtemperatur - Rückstellproben (SMA 8 S)

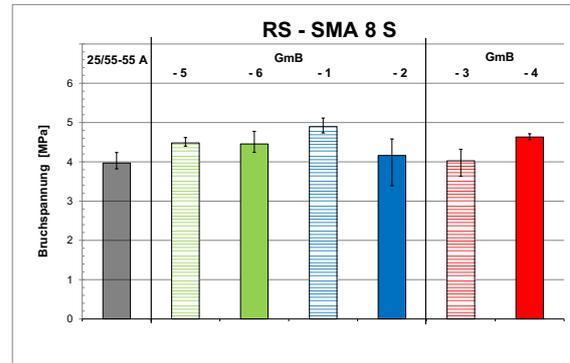


Abbildung 49: Bruchspannung - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 20: Statistische Auswertung Bruchtemperatur und Bruchspannung - Rückstellproben (SMA 8 S)

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB), RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6		einfache Varianz- analyse	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> PmB </div> <div style="text-align: center;"> GmB-1 GmB-5 GmB-3 </div> <div style="text-align: center;"> LSD-Test GmB-2 GmB-6 GmB-4 </div> </div>
			<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 22%;">1. Gruppe</div> <div style="width: 22%;">2. Gruppe</div> <div style="width: 22%;">3. Gruppe</div> <div style="width: 22%;">4. Gruppe</div> </div>
Abkühlversuch	Bruchtemperatur [°C]	signifi.	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 22%; text-align: center;">tief >>> hoch</div> <div style="width: 22%; text-align: center;">groß >>> klein</div> </div>
	Bruchspannung [MPa]	signifi.	

In Abbildung 50 und Abbildung 51 sind für die Rückstellproben AC 11 D S die Kenngrößen Bruchtemperatur und Bruchspannung als Balkendiagramme gegenübergestellt. Der Tabelle 21 ist die statistische Auswertung zu entnehmen. Anhand des einfachen Mittelwertvergleichs sind keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Kenngrößen Bruchtemperatur und Bruchspannung zu konstatieren.

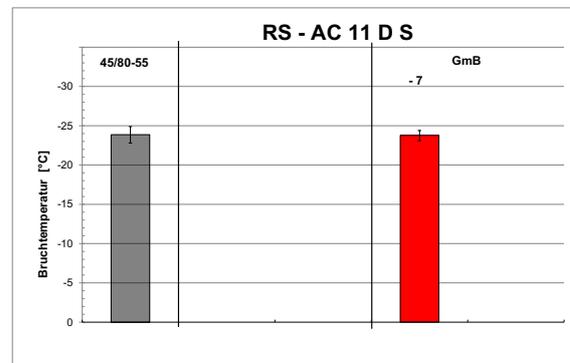


Abbildung 50: Bruchtemperatur - Rückstellproben (AC 11 D S)

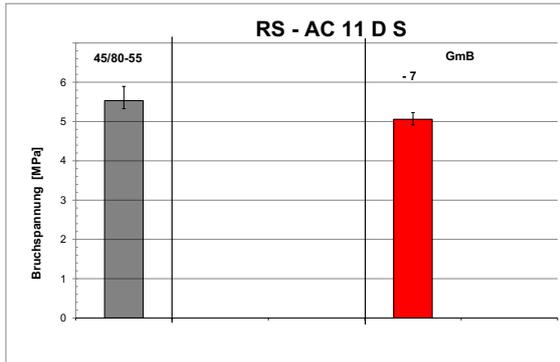


Abbildung 51: Bruchspannung - Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 21: Statistische Auswertung Bruchtemperatur und Bruchspannung (Rückstellproben AC 11 DS)

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB)		einfacher Mittelwertvergleich	Reihung Mittelwert	
RS - AC 11 D S mit GmB-7			■ PmB	■ GmB-7
Abkühlversuch	Bruchtemperatur [°C]	nicht signifikant	■ tief >>> hoch	
	Bruchspannung [MPa]	nicht signifikant	■ groß >>> klein	

Einaxiale Zugversuche

Die mit Einaxialen Zugversuchen bei verschiedenen Prüftemperaturen (-25, -10, 5, 20 °C) bestimmten Werte für die Zugfestigkeit sowie für die Bruchdehnung sind Tabelle 22 bis Tabelle 24 für die im Labor hergestellten Asphalte (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) zu entnehmen. Die ausgehend von den vier erfassten Werten für die Zugfestigkeiten ermittelten Verläufe (Spline-Funktionen) sind in Abbildung 52 bis Abbildung 56 dargestellt.

Aus Tabelle 22 und Abbildung 52 kann für die Splittmastixasphalte SMA 8 S entnommen werden, dass im positiven Temperaturbereich bei

den untersuchten Asphaltvarianten in der Größenordnung ähnliche Zugfestigkeitswerte ermittelt werden, mit Ausnahme des SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V1 mit vergleichsweise geringeren Werten. Im negativen Temperaturbereich ist insgesamt eine deutlichere Differenzierung anhand der Werte für die Zugfestigkeit zu erkennen, wobei hier der SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A die vergleichsweise geringsten Werte für die Zugfestigkeit und für die Bruchdehnung aufweist. Bei der Prüftemperatur 20 °C ist dagegen für den SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A der größte Wert für die Bruchdehnung zu konstatieren.

Tabelle 22: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für SMA 8 S

Variante	Zugfestigkeit [MPa] bei verschiedenen Temperaturen				Bruchdehnung [%] bei verschiedenen Temperaturen			
	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C
SMA 8 S mit 25/55-55 A	0,958	3,532	5,898	5,056	7,893	2,505	0,492	0,266
SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1	1,301	4,275	5,941	5,340	4,232	1,840	0,540	0,592
SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V2	1,207	3,909	6,642	6,190	4,155	1,913	0,967	0,334
SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V1	0,900	2,423	6,718	6,899	7,565	3,579	1,624	0,402
SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V2	1,087	3,876	6,996	5,609	6,113	1,937	0,750	0,538

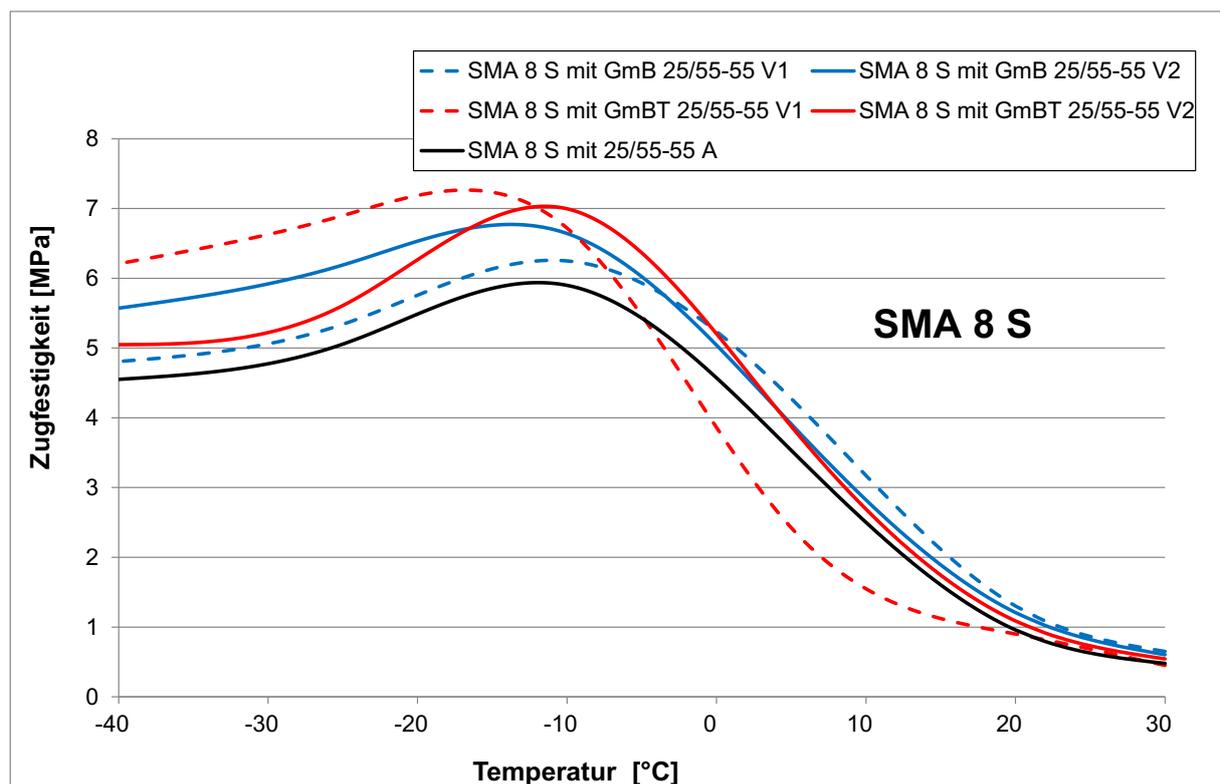


Abbildung 52: Zugfestigkeitsverläufe - SMA 8 S

In Tabelle 23 und Abbildung 53 sind für die Asphaltbinder AC 16 B S die Ergebnisse aus den Einaxialen Zugversuchen zusammengestellt. Bei den positiven Temperaturen, insbesondere bei 5 °C, weist der AC 16 B S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A die vergleichsweise größten Zugfestigkeitswerte auf. Im

tieferen Temperaturbereich nähern sich die Zugfestigkeitsverläufe der AC 16 B S mit gummi-modifizierten Bindemitteln teilweise an. Auffällig sind die Werte für die Zugfestigkeiten des AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V1. Im positiven Temperaturbereich sind im Vergleich zu den anderen Varianten für den AC 16 B S mit

GmBT 25/55-55 V1 die vergleichsweise geringsten Werte für die Zugfestigkeit und im Bereich tiefer Temperaturen die vergleichsweise größten Werte für die Zugfestigkeit festzustellen. Für den AC 16 B S mit 25/55-55 A ist bei 20° C gegenüber den Varianten mit

gummimodifizierten Bindemitteln (mit Ausnahme des AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V1) der vergleichsweise größte Wert für die Bruchdehnung zu konstatieren, dagegen wird bei -25 °C für den AC 16 B S mit 25/55-55 A der vergleichsweise geringste Wert ermittelt.

Tabelle 23: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für AC 16 B S

Variante	Zugfestigkeit [MPa] bei verschiedenen Temperaturen				Bruchdehnung [‰] bei verschiedenen Temperaturen			
	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C
AC 16 B S mit 25/55-55 A	1,022	4,398	4,461	4,319	4,163	1,986	0,334	0,274
AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V1	0,957	3,293	4,328	3,463	2,147	0,941	0,394	0,587
AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V2	0,938	2,867	4,835	4,091	2,469	1,093	0,445	0,365
AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V1	0,433	1,532	4,788	4,937	4,899	2,175	1,242	0,398
AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V2	1,007	2,929	4,101	3,905	2,747	1,050	0,418	0,409

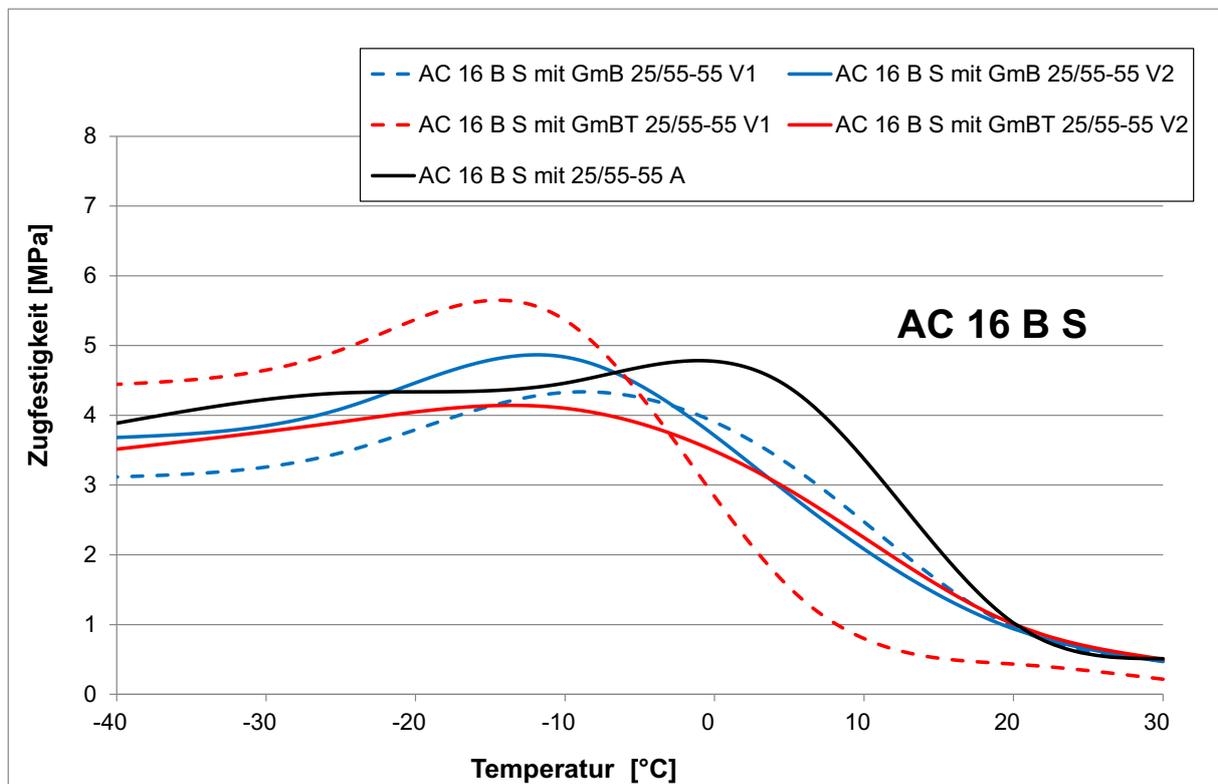


Abbildung 53: Zugfestigkeitsverläufe AC 16 B S

Der Tabelle 24 können für die Offenporigen Asphalte PA 8 die ermittelten Werte für die Zugfestigkeit und Bruchdehnung entnommen werden. In Abbildung 54 sind die zugehörigen Zugfestigkeitsverläufe dargestellt. Mit Ausnahme

des PA 8 mit GmBT 25/55-65 V1, für den im Temperaturbereich unter 0 °C vergleichsweise höhere Werte für die Zugfestigkeit dokumentiert sind, sind die Zugfestigkeitswerte der anderen PA 8-Varianten ähnlich.

Tabelle 24: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für PA 8

Variante	Zugfestigkeit [MPa] bei verschiedenen Temperaturen				Bruchdehnung [%] bei verschiedenen Temperaturen			
	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C
PA 8 mit 40/100-65 A	0,119	0,951	1,419	1,359	9,367	2,672	0,399	0,150
PA 8 mit GmB 25/55-65 V1	0,265	0,941	1,298	1,425	2,530	1,201	0,286	0,171
PA 8 mit GmB 25/55-65 V2	0,135	0,858	1,501	1,511	7,016	2,303	0,356	0,210
PA 8 mit GmBT 25/55-65 V1	0,173	0,727	2,033	2,135	5,746	2,369	0,758	0,334
PA 8 mit GmBT 25/55-65 V2	0,201	0,882	1,556	1,639	7,667	2,510	0,412	0,189

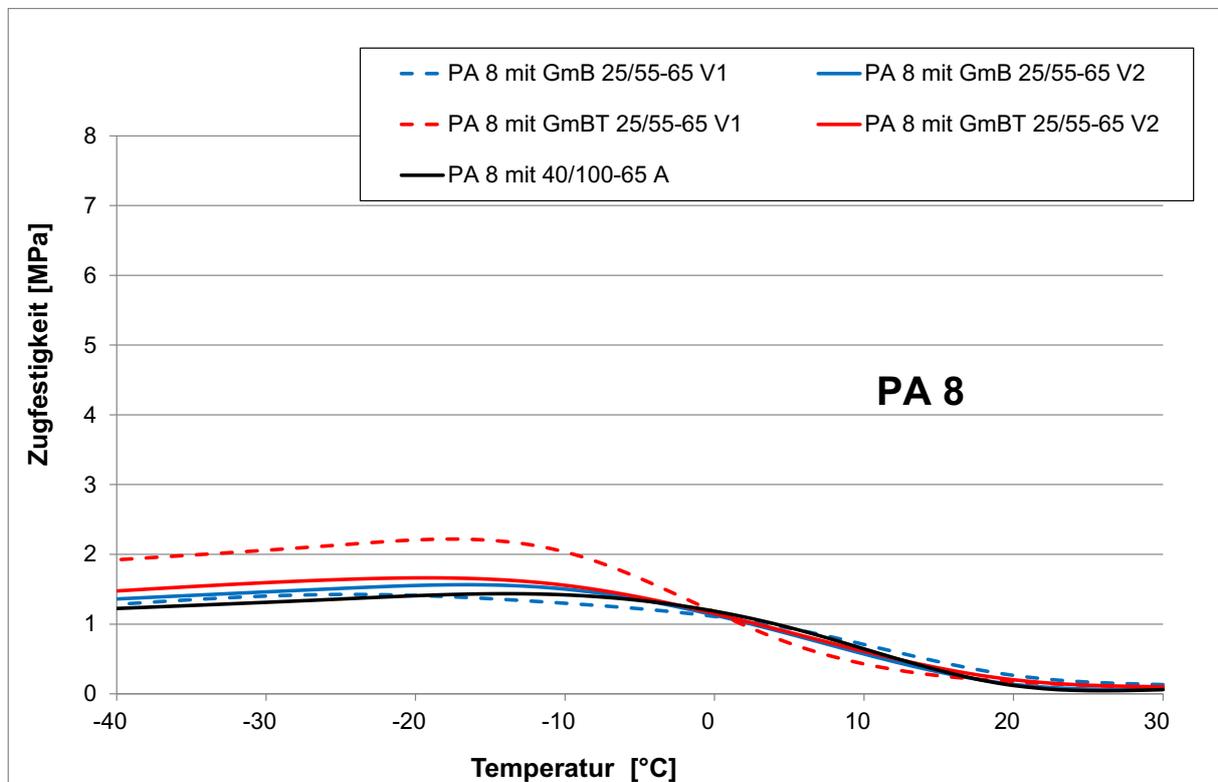


Abbildung 54: Zugfestigkeitsverläufe - PA 8

Für die Rückstellproben SMA 8 S sind in Tabelle 25 und Abbildung 55 die mit Einaxialen Zugversuchen ermittelten Werte für die Zugfestigkeit und für die Bruchdehnung dargestellt. Aus der grafischen Darstellung der Zugfestigkeiten kann entnommen werden, dass insbesondere bei Temperaturen unter 10 °C sich die Zugfestigkeiten zwischen den hier untersuchten

RS-SMA 8 S unterscheiden. Der RS-SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel weist in diesem Temperaturbereich die vergleichsweise geringsten Werte für die Zugfestigkeit auf, wobei der RS-SMA 8 S mit GmB 3 auf praktisch gleichem Niveau liegt. Die übrigen fünf Varianten weisen teilweise deutlich größere Zugfestigkeiten auf.

Tabelle 25: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für Rückstellproben (SMA 8 S)

Variante	Zugfestigkeit [MPa] bei verschiedenen Temperaturen				Bruchdehnung [%] bei verschiedenen Temperaturen			
	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C
RS – SMA 8 S – 25/55-55 A	1,237	4,053	4,444	3,886	4,991	2,206	0,396	0,294
RS – SMA 8 S – GmB 1	0,700	3,551	6,698	5,806	7,379	3,078	1,507	0,581
RS – SMA 8 S – GmB 2	0,964	4,073	6,219	4,655	5,780	2,402	0,624	0,282
RS – SMA 8 S – GmB 3	0,944	3,866	4,422	4,037	4,536	1,907	0,388	0,357
RS – SMA 8 S – GmB 4	0,992	4,673	5,572	4,017	5,149	2,055	0,886	0,222
RS – SMA 8 S – GmB 5	0,893	3,559	5,271	4,351	4,898	2,311	0,558	0,283
RS – SMA 8 S – GmB 6	0,953	3,623	5,232	4,279	4,532	2,254	0,675	0,270

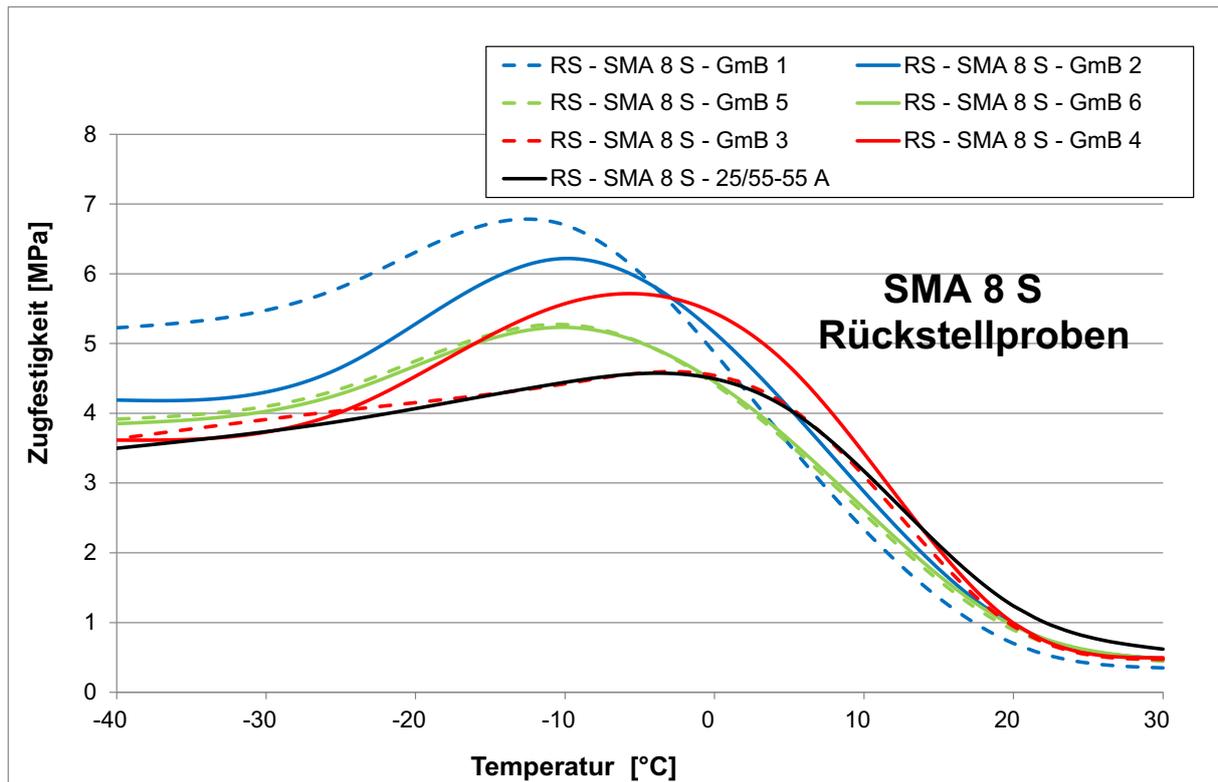


Abbildung 55: Zugfestigkeitsverläufe Rückstellproben (SMA 8 S)

In Tabelle 26 und Abbildung 56 sind für die Rückstellproben AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel 45/80-55 und mit gummi-modifiziertem Bindemittel (GmB 7) die Ergebnisse der Zugversuche zu entnehmen. Für den

AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel 45/80-55 sind über alle Prüftemperaturen größere Werte für die Zugfestigkeit sowie für die Bruchdehnung gegenüber der Variante mit GmB 7 zu konstatieren.

Tabelle 26: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für AC 11 D S (Rückstellproben)

Variante	Zugfestigkeit [MPa] bei verschiedenen Temperaturen				Bruchdehnung [%] bei verschiedenen Temperaturen			
	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C	+20 °C	+5 °C	-10 °C	-25 °C
RS – AC 11 D S – 45/80-55	1,101	5,490	6,501	6,156	7,034	2,876	0,475	0,358
RS – AC 11 D S – GmB 7	1,142	3,592	6,043	5,434	3,223	1,701	0,619	0,328

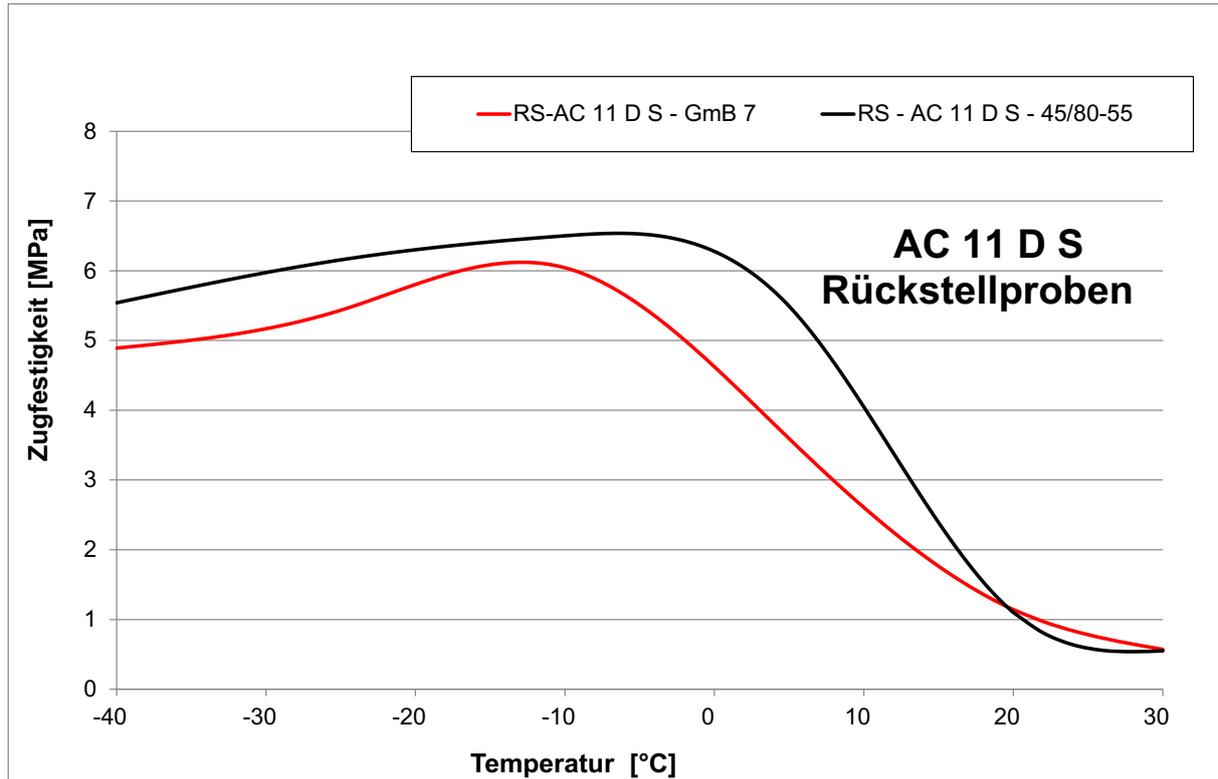


Abbildung 56: Zugfestigkeitsverläufe AC 11 D S

In nachfolgender Abbildung 57 bis Abbildung 59 sind für die im Labor hergestellten Asphalte (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) die Zugfestigkeitswerte in Form von Balkendiagrammen zusammenfassend gegenübergestellt. In der Tabelle 27 sind die Ergebnisse der mathematisch-statistischen Auswertung zusammengefasst.

Bei den Splittmastixasphalten SMA 8 S können zwischen den untersuchten Varianten bei den Prüftemperaturen -10 °C und 20 °C keine signifikanten Unterschiede und bei den Prüftemperaturen -25 °C und 5 °C signifikante Unterschiede festgestellt werden. Anhand des LSD-Tests kann eine Einteilung in unterschiedliche Gruppen jedoch nur bei der Prüftemperatur von 5 °C getroffen werden. Bei -25 °C unterscheiden sich voraussichtlich signifikant voneinander die Variante mit dem größten und die Variante mit dem kleinsten Wert für die Zugfestigkeit.

Zwischen den Zugfestigkeitswerten ermittelt an den Asphaltbindern AC 16 B S werden bei allen Prüftemperaturen signifikante Unterschiede festgestellt. Eine Einteilung in unterschiedliche homogene Gruppen kann hier mit Ausnahme bei der Prüftemperatur von -10 °C, vorgenommen werden. Auffällig ist bei den Ergebnissen

für die Asphaltbinder, dass bei dem AC 16 B S mit GmBT V1 bei den Prüftemperaturen -25 und -10 °C die signifikant größten Werte für die Zugfestigkeiten ermittelt werden und bei den Prüftemperaturen 5 und 20 °C die signifikant kleinsten Werte.

Bei dem Offenporigen Asphalt PA 8 können auch bei allen Prüftemperaturen signifikante Unterschiede nachgewiesen werden, immer einhergehend mit der Aufteilung in unterschiedliche homogene Gruppen. Der PA 8 mit GmBT V1 ist bei allen Prüftemperaturen jeweils allein einer Gruppe zugeordnet und somit signifikant unterschiedlich von den übrigen Varianten.

Anhand der statistischen Auswertung der Werte für die Zugfestigkeit können jeweils zwischen den untersuchten Asphaltvarianten mit polymermodifiziertem Bindemittel und gummi-modifizierten Bindemitteln überwiegend keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Ausschließlich der AC 16 B S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A weist bei der Prüftemperatur 5 °C signifikant höhere Zugfestigkeiten gegenüber den Varianten mit gummi-modifizierten Bindemitteln auf.

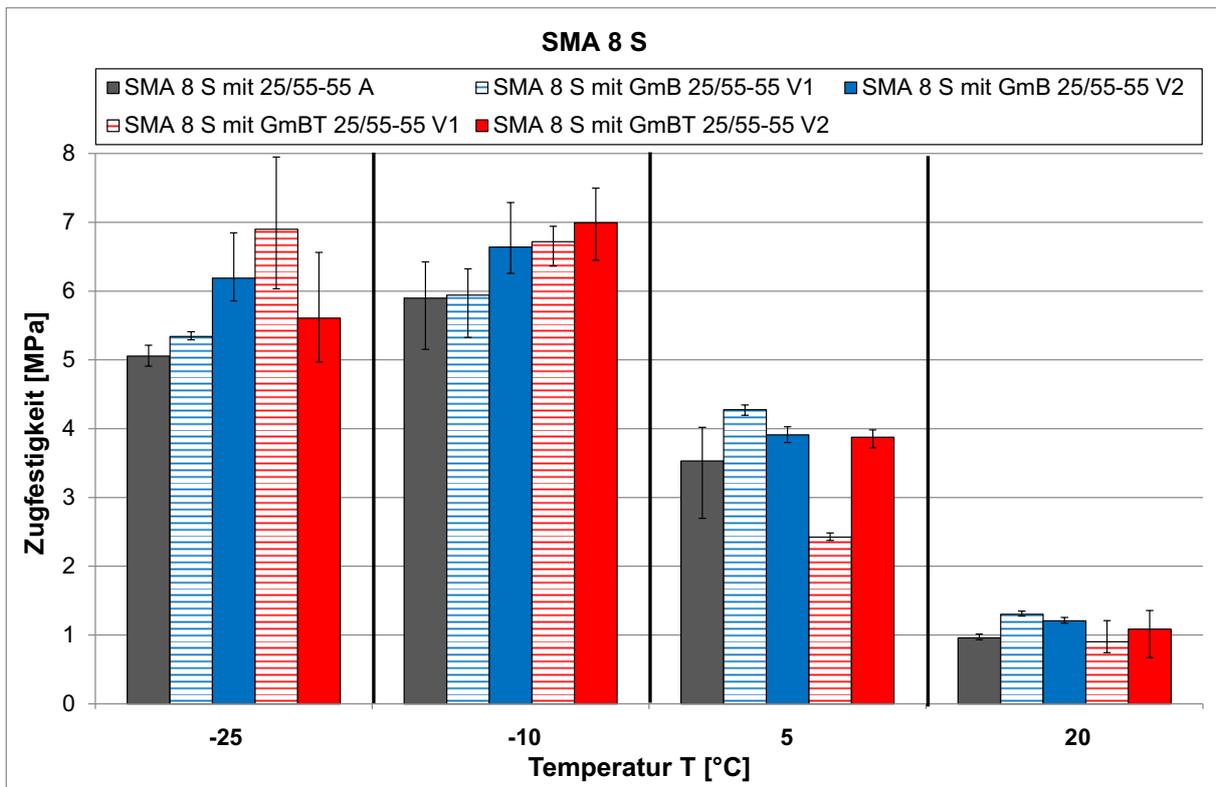


Abbildung 57: Zugfestigkeiten bei verschiedenen Prüftemperaturen - SMA 8 S

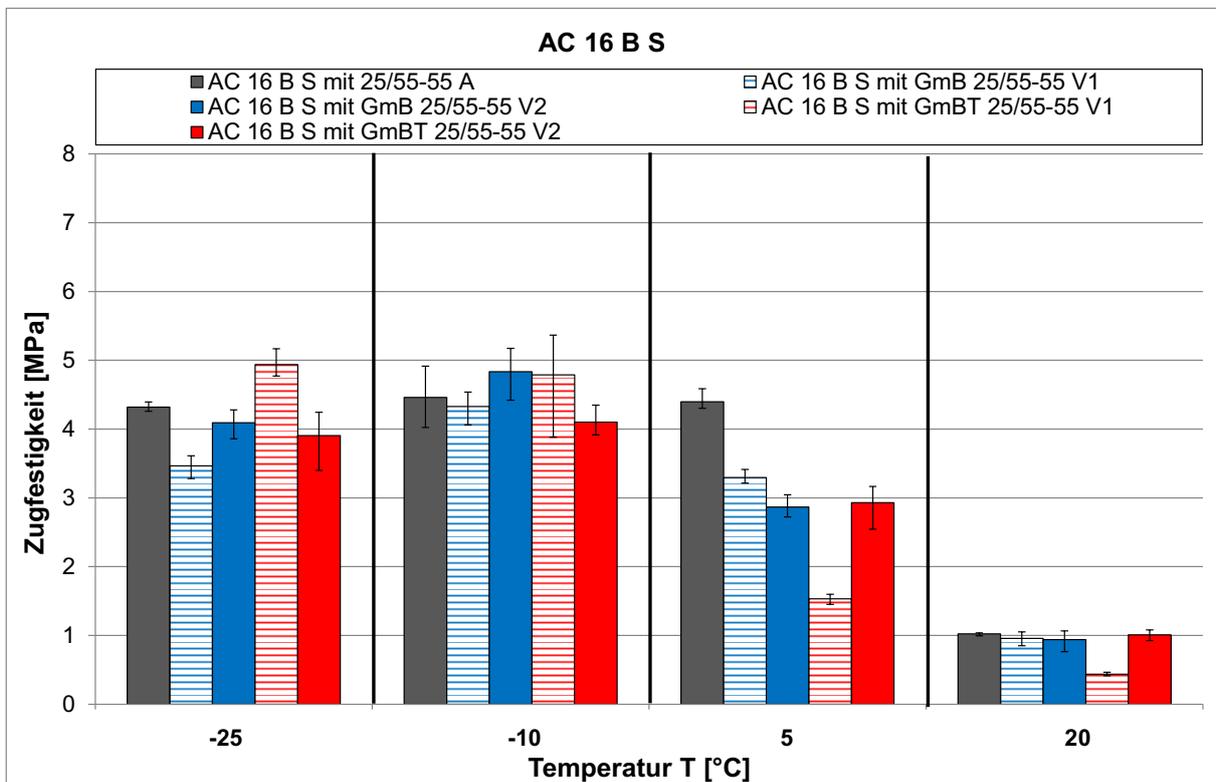


Abbildung 58: Zugfestigkeiten bei verschiedenen Prüftemperaturen - AC 16 B S

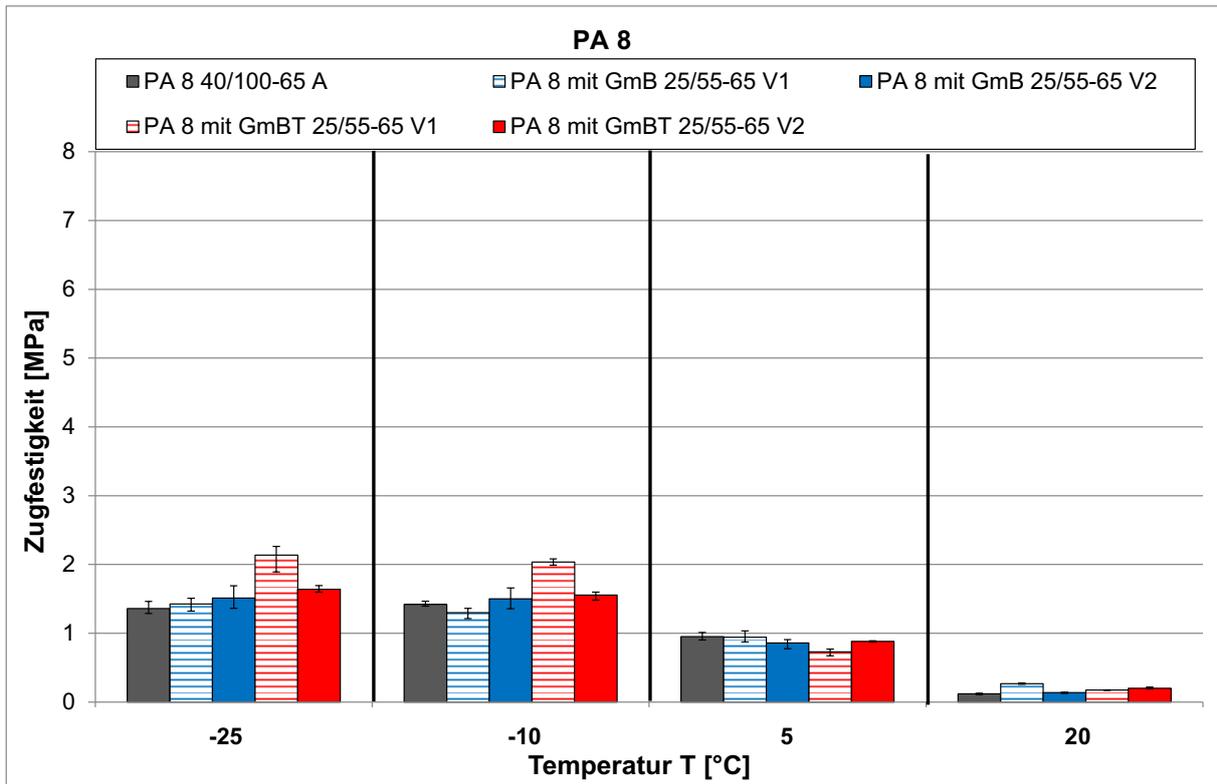


Abbildung 59: Zugfestigkeiten bei verschiedenen Prüftemperaturen - PA 8

Tabelle 27: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Zugfestigkeit (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8)

SMA 8 S mit 25/55-55 A, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55 AC 16 B S mit 25/55-55 A, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55 PA 8 mit 40/100-65 A, GmB 25/55-65, GmBT 25/55-65		einfache Varianz- analyse	LSD-Test																		
			1. Gruppe		2. Gruppe		3. Gruppe		4. Gruppe												
			PmB	GmB V1	GmBT V1	GmB V2	GmBT V2														
			hoch >>> gering																		
Zugversuch	SMA 8 S Zugfestigkeit [MPa] bei -25 °C	signifi.	█	█	█	█															
	AC 16 B S Zugfestigkeit [MPa] bei -25 °C	signifi.					█	█	█	█											
	PA 8 Zugfestigkeit [MPa] bei -25 °C	signifi.									█	█	█	█							
	SMA 8 S Zugfestigkeit [MPa] bei -10 °C	n. signifi.	█	█	█	█															
	AC 16 B S Zugfestigkeit [MPa] bei -10 °C	signifi.					█	█	█	█											
	PA 8 Zugfestigkeit [MPa] bei -10 °C	signifi.									█	█	█	█							
	SMA 8 S Zugfestigkeit [MPa] bei 5 °C	signifi.																			
	AC 16 B S Zugfestigkeit [MPa] bei 5 °C	signifi.																			
	PA 8 Zugfestigkeit [MPa] bei 5 °C	signifi.																			
	SMA 8 S Zugfestigkeit [MPa] bei 20 °C	n. signifi.																			
	AC 16 B S Zugfestigkeit [MPa] bei 20 °C	signifi.																			
	PA 8 Zugfestigkeit [MPa] bei 20 °C	signifi.																			

In der Abbildung 60 sind zusammenfassend die Werte für die Zugfestigkeit der Rückstellproben SMA 8 S dargestellt. Der Tabelle 28 können die Ergebnisse der mathematisch-statistischen Auswertung entnommen werden, aus der für die einzelnen Prüftemperaturen zwischen den untersuchten Varianten signifikante

Unterschiede entnommen werden können. Eine Einteilung in unterschiedliche homogene Gruppen kann bei den Zugfestigkeitswerten aller Prüftemperaturen vorgenommen werden, wobei jedoch die Zuordnung der Varianten zu homogenen Gruppen zwischen den Prüftemperaturen nicht identisch ist. So unterscheidet sich

der RS-SMA 8 S mit GmB 1 bei -25 und -10 °C signifikant von den anderen Varianten mit einer höheren Zugfestigkeit. Bei 5 °C dagegen hat der RS-SMA 8 S mit GmB 4 die signifikant höchste Zugfestigkeit und bei 20 °C ist das der

Fall für den RS-SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A.

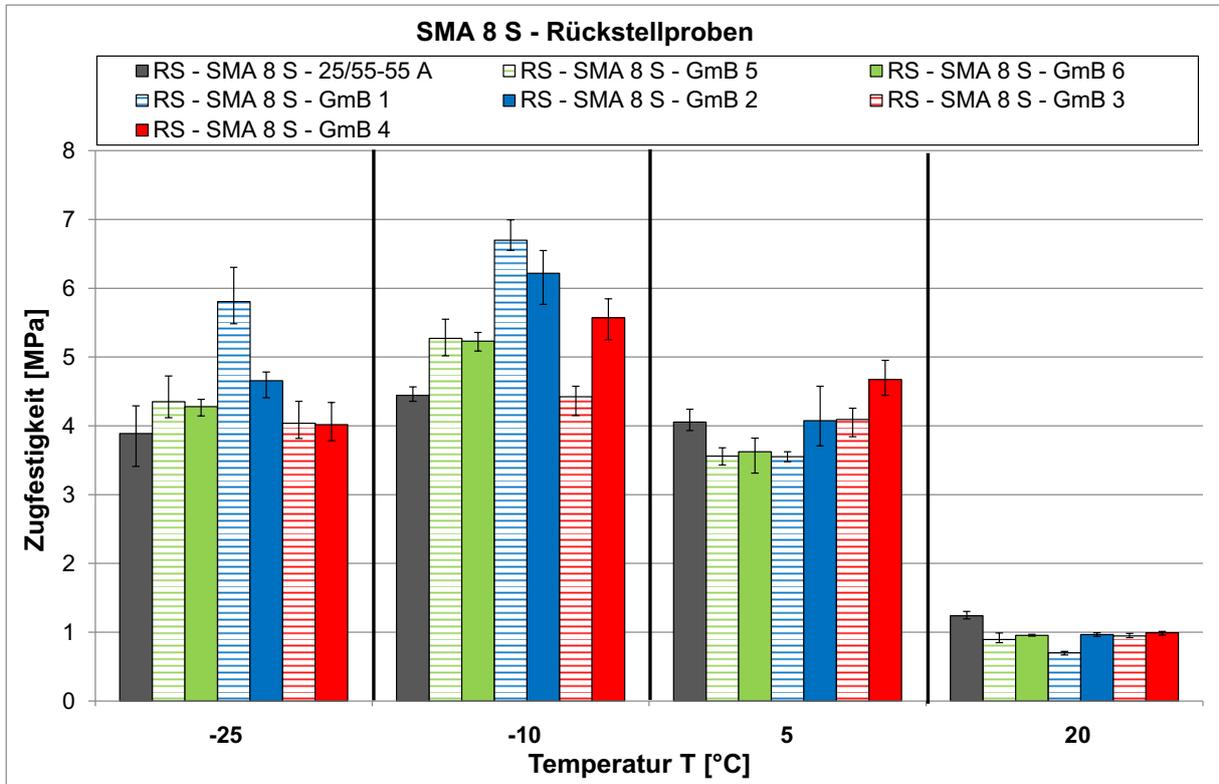


Abbildung 60: Zugfestigkeit ermittelt bei verschiedenen Temperaturen an Rückstellproben(SMA 8 S)

Tabelle 28: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Zugfestigkeit (RS – SMA 8 S)

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB), RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6		einfache Varianz- analyse	LSD-Test			
			1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe
Zugversuch	Zugfestigkeit [MPa]	signifi.	hoch >>> gering			
	Zugfestigkeit [MPa]	signifi.	hoch >>> gering			
	Zugfestigkeit [MPa]	signifi.	hoch >>> gering			
	Zugfestigkeit [MPa]	signifi.	hoch >>> gering			

Die an den Rückstellproben AC 11 D S mit polymermodifiziertem und mit gummimodifiziertem Bindemittel ermittelten Zugfestigkeitswerte (Abbildung 61 und Tabelle 29) unterscheiden

sich nach Durchführung eines einfachen Mittelwertvergleichs ausschließlich bei der Prüftemperatur 5 °C signifikant voneinander.

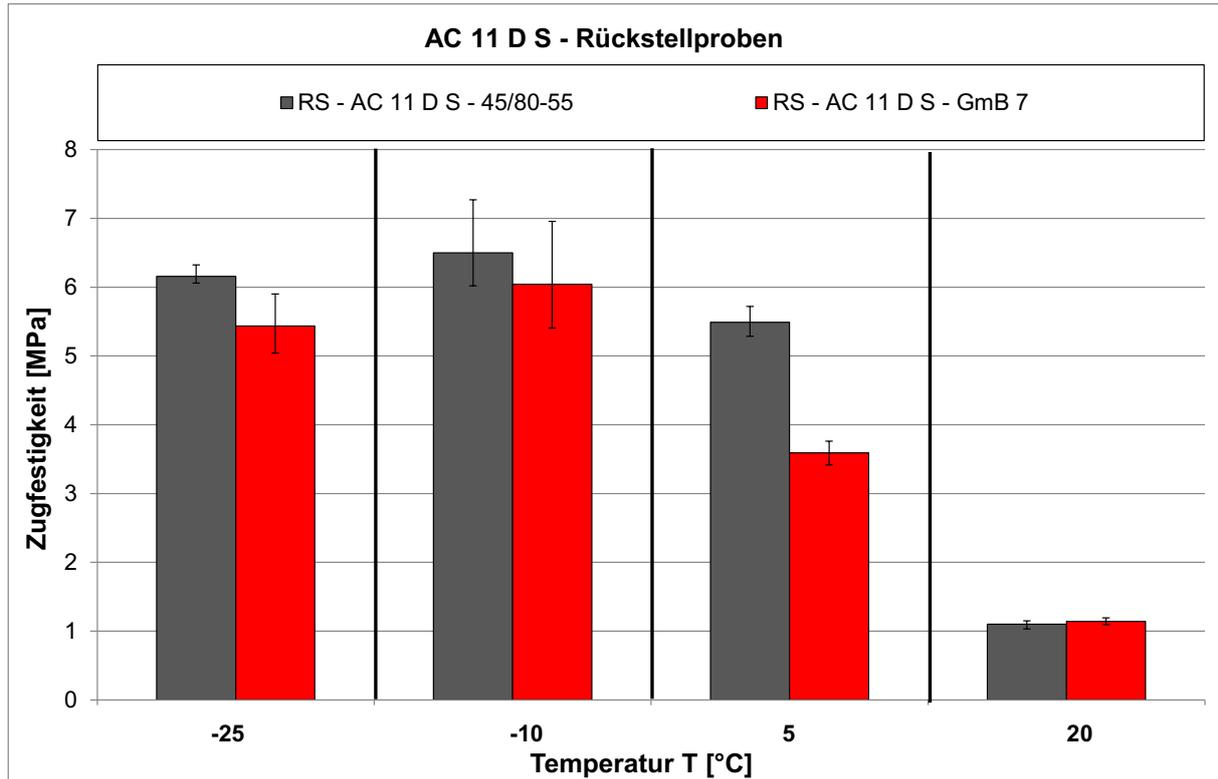


Abbildung 61: Zugfestigkeit ermittelt bei verschiedenen Temperaturen an Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 29: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Zugfestigkeit (RS – AC 11 D S)

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB)		einfacher Mittelwert- vergleich	Reihung Mittelwert	
RS - AC 11 D S mit GmB-7			 PmB	 GmB-7
			hoch >>> gering	
Zugversuch	Zugfestigkeit [MPa] bei -25 °C	nicht signifikant		
	Zugfestigkeit [MPa] bei -10 °C	nicht signifikant		
	Zugfestigkeit [MPa] bei 5 °C	signifikant		
	Zugfestigkeit [MPa] bei 20 °C	nicht signifikant		

In Analogie zu der Auswertung der Werte für die Zugfestigkeit, werden weiterhin die mittels Zugversuch bestimmten Bruchdehnungen ausgewertet. In Abbildung 62 bis Abbildung 64 sind für die vier Prüftemperaturen die Werte für die Bruchdehnung der im Labor hergestellten Asphalte (SMA 8 S, AC 16 B S, PA S) gegenübergestellt. Die zugehörigen Ergebnisse der angewandten mathematisch-statistischen Verfahren finden sich in Tabelle 30.

Für die Splittmastixasphalte SMA 8 S werden signifikante Unterschiede der Werte für die Bruchdehnung bei den Prüftemperaturen -10 °C, 5 °C und 20 °C nachgewiesen, wobei

eine Unterteilung in unterschiedliche homogene Gruppen anhand der Ergebnisse des LSD-Tests nur bei den Prüftemperaturen -10 und 5 °C möglich ist. Bei diesen beiden Temperaturen weist der SMA 8 S mit GmBT V1 die signifikant größten Werte für die Bruchdehnung auf, die anderen vier Splittmastixasphalte gehören hier einer homogenen Gruppe an.

Auch bei den Asphaltbindern AC 16 B S werden signifikante Unterschiede zwischen den Werten der Bruchdehnung bei den Prüftemperaturen -10 °C, 5 °C und 20 °C erkannt und es kann eine Einteilung in homogene Gruppe, mit Ausnahme der Prüftemperatur von -25 °C, vorgenommen

werden. Die Zuordnung der fünf Asphaltbindervarianten zu den einzelnen homogenen Gruppen ist jedoch bei den Prüftemperaturen unterschiedlich, wobei der AC 16 B S mit GmBT V1 immer der Gruppe mit den höchsten Bruchdehnungen angehört.

Bei den Offenporigen Asphalten können aufgrund der Kenngröße Bruchdehnung bei allen Prüftemperaturen signifikante Unterschiede ermittelt und unterschiedliche homogene Gruppen gebildet werden. Von den PA 8-Varianten hat der PA 8 mit GmBT V1 den signifikant größten Wert der Bruchdehnung bei den

Prüftemperaturen -25 °C und -10 °C , der jeweils allein der ersten homogenen Gruppe zugeordnet ist. Bei der Prüftemperatur 20 °C weist der PA 8 mit polymermodifiziertem Bindemittel 40/100-65 A den signifikant höchsten Wert für die Bruchdehnung auf.

Anhand der statistischen Auswertung der Werte für die Bruchdehnung können jeweils zwischen den untersuchten Asphaltvarianten mit polymermodifiziertem Bindemittel und gummi-modifizierten Bindemitteln überwiegend keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden.

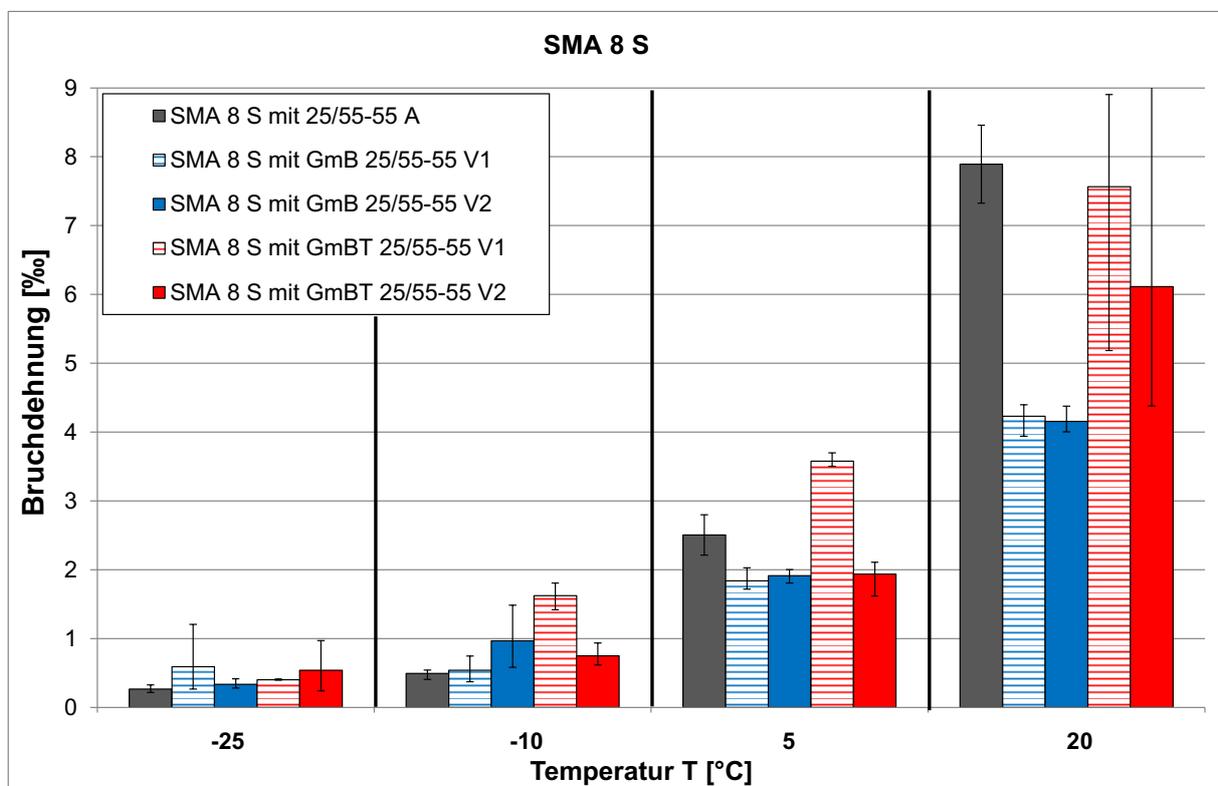


Abbildung 62: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - SMA 8 S

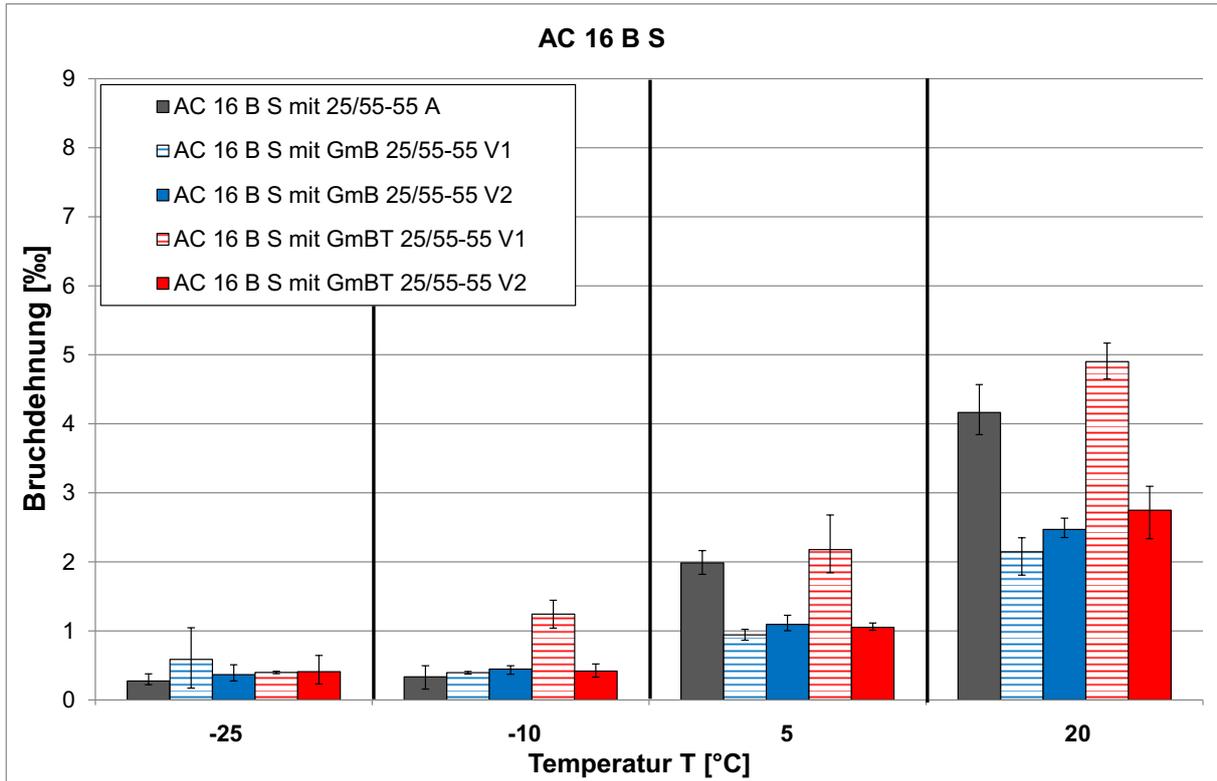


Abbildung 63: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - AC 16 B S

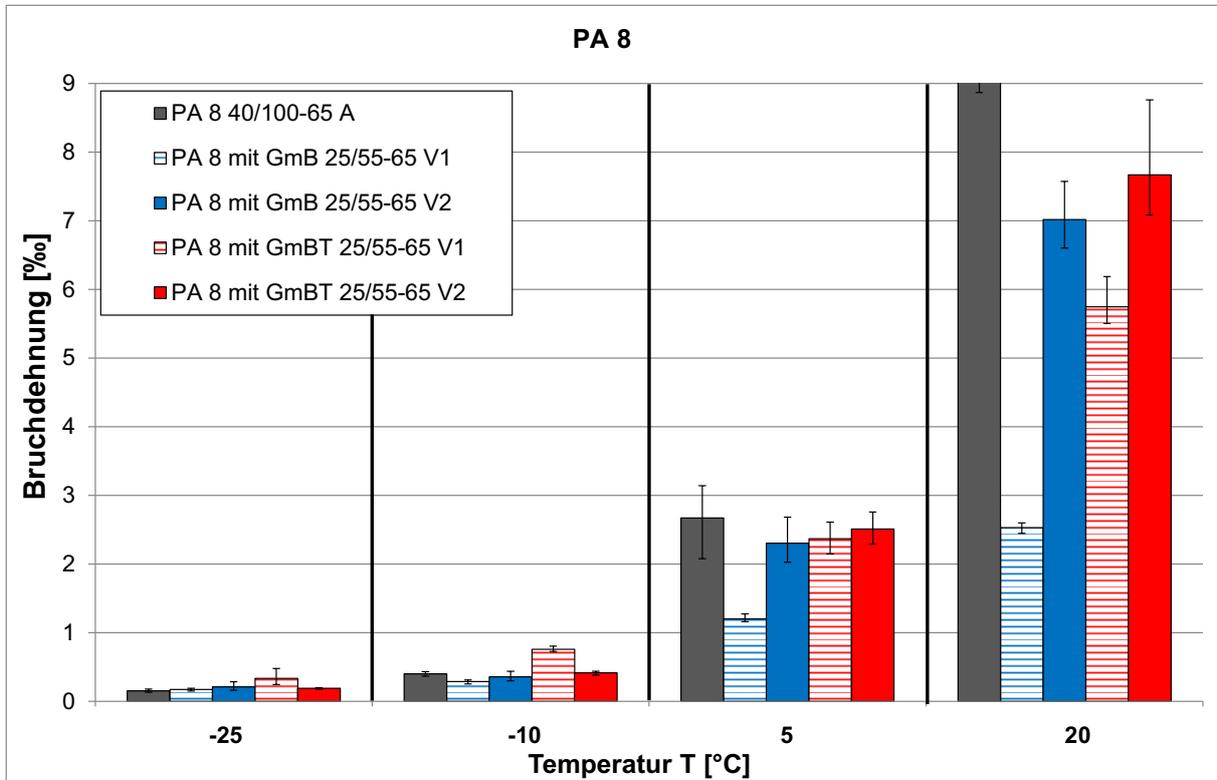


Abbildung 64: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - PA 8

Tabelle 30: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Bruchdehnung (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8)

SMA 8 S mit 25/55-55 A, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55 AC 16 B S mit 25/55-55 A, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55 PA 8 mit 40/100-65 A, GmB 25/55-65, GmBT 25/55-65		einfache Varianz- analyse	LSD-Test			
			1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe
			hoch >>> gering			
SMA 8 S	Bruchdehnung [‰] bei -25 °C	n. signifi.	■ PmB ■ GmB V1 ■ GmBT V1	■ GmB V2 ■ GmBT V2		
AC 16 BS	Bruchdehnung [‰] bei -25 °C	n. signifi.				
PA 8	Bruchdehnung [‰] bei -25 °C	signifi.				
SMA 8 S	Bruchdehnung [‰] bei -10 °C	signifi.				
AC 16 BS	Bruchdehnung [‰] bei -10 °C	signifi.				
PA 8	Bruchdehnung [‰] bei -10 °C	signifi.				
SMA 8 S	Bruchdehnung [‰] bei 5 °C	signifi.				
AC 16 BS	Bruchdehnung [‰] bei 5 °C	signifi.				
PA 8	Bruchdehnung [‰] bei 5 °C	signifi.				
SMA 8 S	Bruchdehnung [‰] bei 20 °C	signifi.				
AC 16 BS	Bruchdehnung [‰] bei 20 °C	signifi.				
PA 8	Bruchdehnung [‰] bei 20 °C	signifi.				

In der Abbildung 65 sind die Werte für die Bruchdehnungen für die Rückstellproben SMA 8 S zusammenfassend dargestellt. Aus den Ergebnissen der angewandten mathematisch-statistischen Verfahren (Tabelle 31) geht hervor, dass es zwischen den Werten für die

Bruchdehnung bei -25° C keine signifikanten Unterschiede gibt. Bei den weiteren drei Prüftemperaturen wurden signifikante Unterschiede erkannt, wobei hier immer der RS-SMA 8 S mit GmB 1 den signifikant größten Wert für die Bruchdehnung hat.

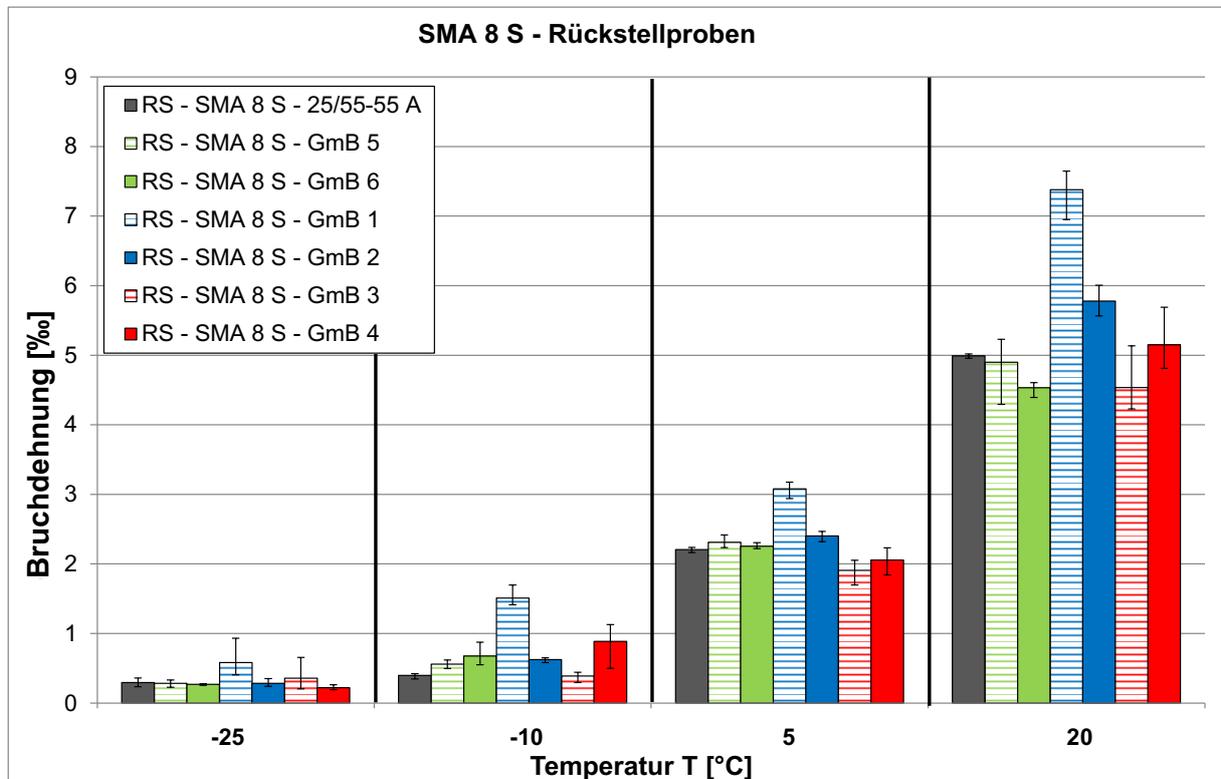


Abbildung 65: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 31: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Bruchdehnung (Rückstellproben (SMA 8 S))

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB), RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6	einfache Varianz- analyse	LSD-Test																																								
		1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe																																					
Zugversuch	Bruchdehnung [%] bei -25 °C	n. signifi.																																								
	Bruchdehnung [%] bei -10 °C	signifi.																																								
	Bruchdehnung [%] bei 5 °C	signifi.																																								
	Bruchdehnung [%] bei 20 °C	signifi.																																								

Die an den Rückstellproben AC 11 D S mit polymermodifiziertem und gummi-modifiziertem Bindemittel ermittelten Werte für die Bruchdehnung (Abbildung 66 und Tabelle 32) unterscheiden sich nach Durchführung eines einfachen Mittelwertvergleichs signifikant bei den

Prüftemperaturen 20 und 5 °C, wobei hier größere Werte der Bruchdehnung für den AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel zu konstatieren sind. Die Werte für die Bruchdehnung bei den Prüftemperaturen 10 und -25 °C sind dagegen nicht signifikant.

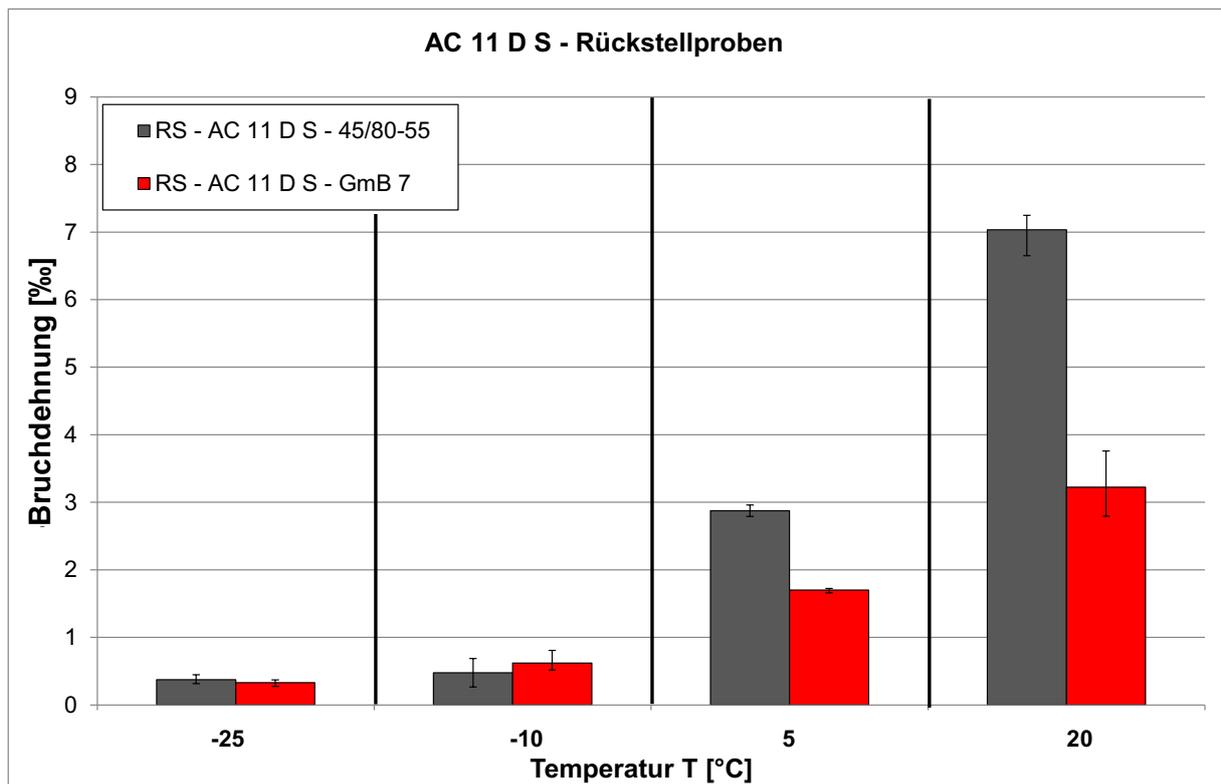


Abbildung 66: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 32: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Bruchdehnung (Rückstellproben (AC 11 D S))

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB) RS - AC 11 D S mit GmB-7		einfacher Mittelwert- vergleich	Reihung Mittelwert PmB GmB-7
			hoch >>> gering
Zugversuch	Bruchdehnung [‰] bei -25 °C	nicht signifikant	
	Bruchdehnung [‰] bei -10 °C	nicht signifikant	
	Bruchdehnung [‰] bei 5 °C	signifikant	
	Bruchdehnung [‰] bei 20 °C	signifikant	

Zugfestigkeitsreserve

Im Folgenden (Abbildung 67 bis Abbildung 71) sind die Verläufe der rechnerisch ermittelten Zugfestigkeitsreserven dargestellt. Weiterhin sind in Tabelle 33 bis Tabelle 37 die Werte für die maximale Zugfestigkeitsreserve sowie die

zugehörige Temperatur zusammengefasst. Eine statistische Auswertung entsprechend Kapitel 3.2 wurde hier nicht vorgenommen, da für die Zugfestigkeitsreserve nur (berechnete) Einzelwerte zur Verfügung stehen.

Tabelle 33: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für SMA 8 S

SMA 8 S mit	25/55-55 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Maximale Zugfestigkeitsreserve (max. ZFR) [MPa]	4,309	4,472	4,776	5,774	5,119
zur maximalen ZFR zugehörige Temperatur [°C]	-5,1	-3,2	-6,4	-11,6	-6,7

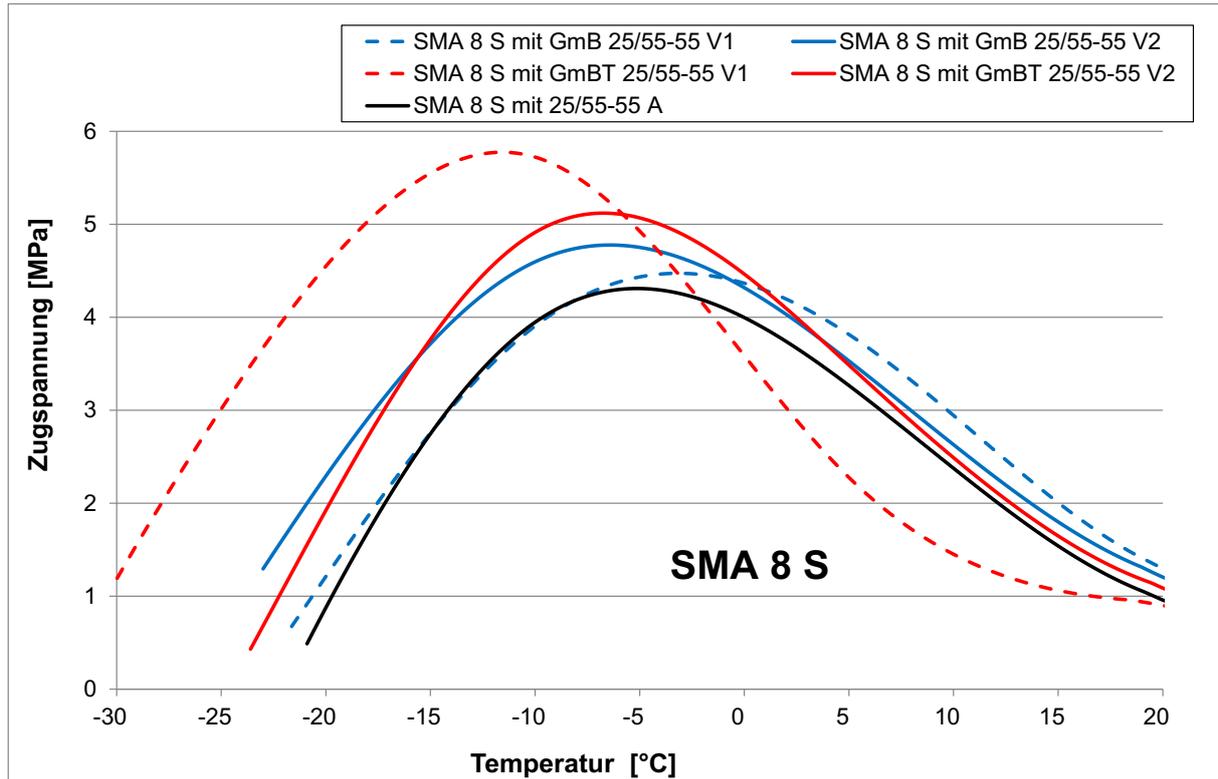


Abbildung 67: Zugfestigkeitsreserve - SMA 8 S

Tabelle 34: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für AC 16 B S

AC 16 B S mit	25/55-55 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Maximale Zugfestigkeitsreserve (max. ZFR) [MPa]	4,332	3,213	3,364	4,746	2,984
zur maximalen ZFR zugehörige Temperatur [°C]	2,2	-0,5	-5,4	-11,3	-1,8

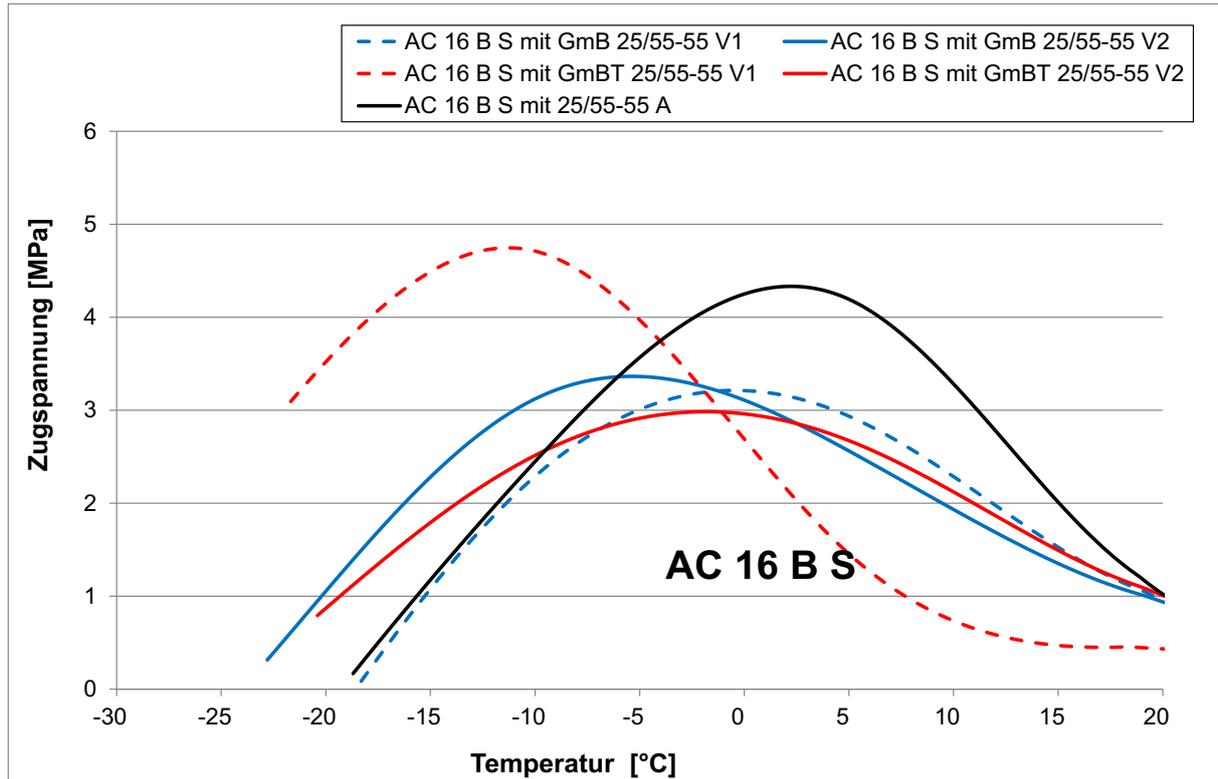


Abbildung 68: Zugfestigkeitsreserve - AC 16 B S

Tabelle 35: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für PA 8

PA 8 mit	40/100-65 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Maximale Zugfestigkeitsreserve (max. ZFR) [MPa]	1,170	0,985	1,188	1,767	1,233
zur maximalen ZFR zugehörige Temperatur [°C]	-3,8	-1,5	-6,7	-11,4	-7,6

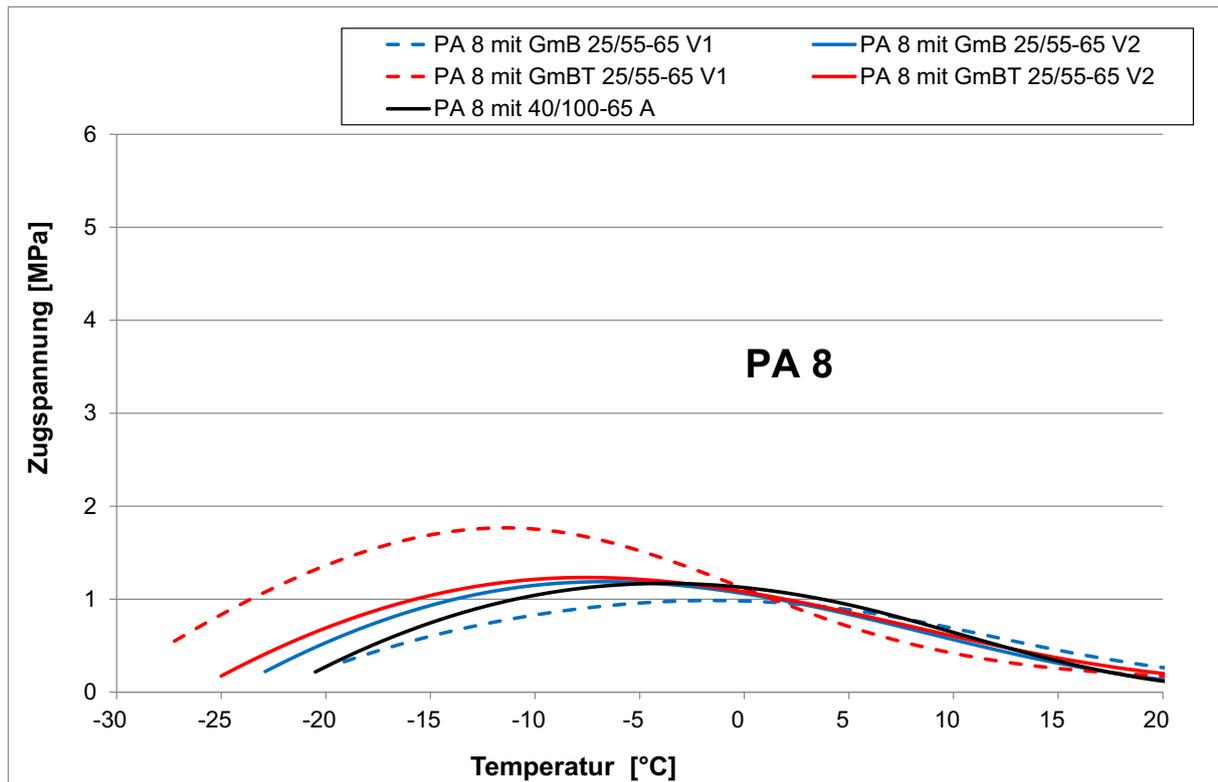


Abbildung 69: Zugfestigkeitsreserve - PA 8

Tabelle 36: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für Rückstellproben (SMA 8 S)

RS SMA 8 S mit	25/55-55 A	GmB 1	GmB 2	GmB 3	GmB 4	GmB 5	GmB 6
Maximale Zugfestigkeitsreserve (max. ZFR) [MPa]	3,797	5,384	4,906	4,030	4,792	3,939	3,851
zur maximalen ZFR zugehörige Temperatur [°C]	2,0	-8,0	-4,7	1,4	-0,4	-3,2	-2,8

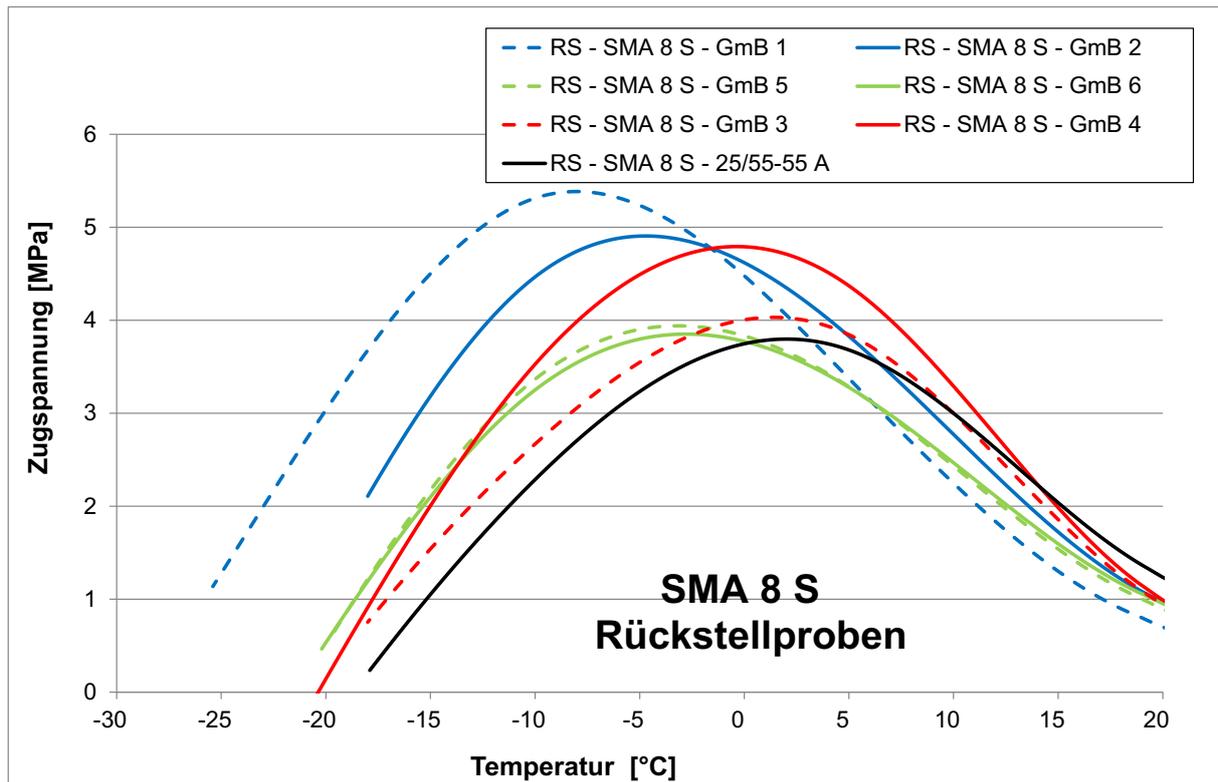


Abbildung 70: Zugfestigkeitsreserve - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 37: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für Rückstellproben (AC 11 D S)

AC 11 D S mit	45/80-55	GmB 7
Maximale Zugfestigkeitsreserve (max. ZFR) [MPa]	4,187	5,747
zur maximalen ZFR zugehörige Temperatur [°C]	-6,0	-0,3

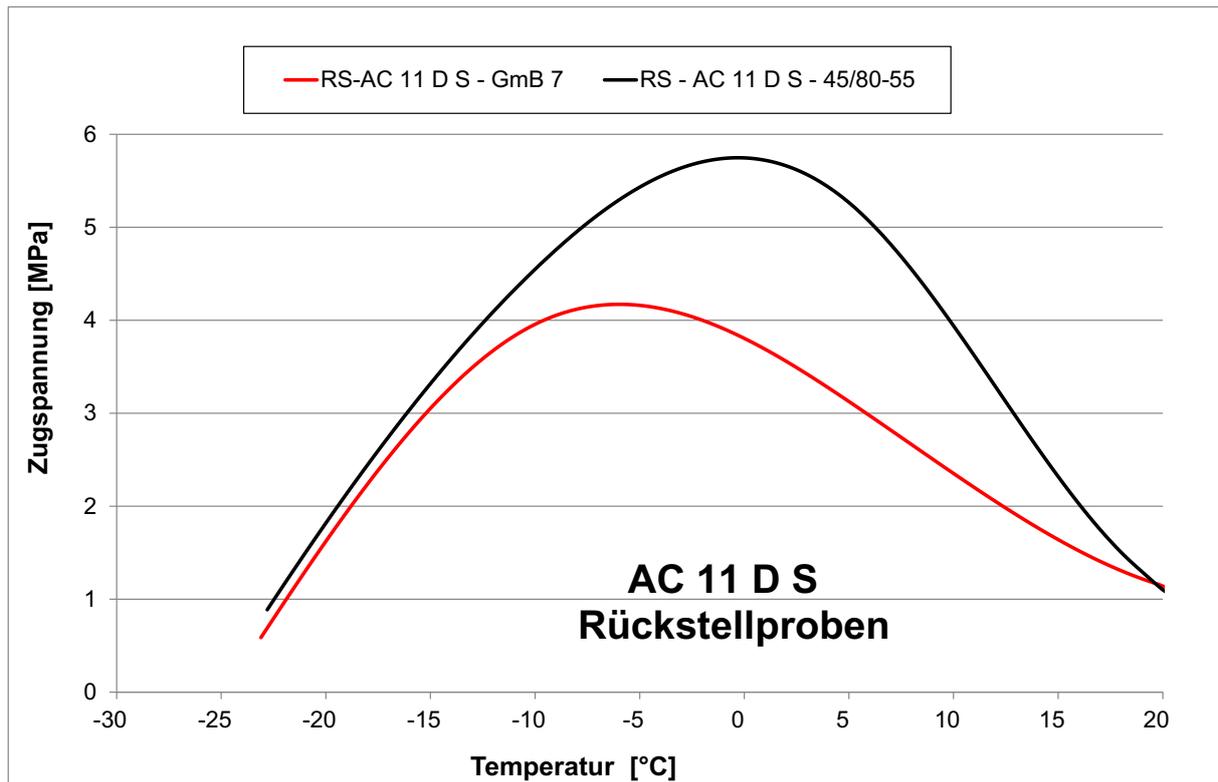


Abbildung 71: Zugfestigkeitsreserve -Rückstellproben (AC 11 D S)

4.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Steifigkeitsverhaltens

Für die untersuchten Asphalte wurden anhand der Messergebnisse die prognostizierten Steifigkeitsmoduln bei einer Frequenz von 10 Hz ermittelt.

Für die im Labor hergestellten Asphalte (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) können die rechnerisch ermittelten Steifigkeitsmoduln Tabelle 38 bis Tabelle 40 entnommen werden. Die zugehörigen temperaturabhängigen Steifigkeitsverläufe sind in Abbildung 72 bis Abbildung 74 dargestellt.

Bei den Steifigkeitsmoduln der Splittmastixasphalte SMA 8 S (Tabelle 38, Abbildung 72) weisen im hohen Temperaturbereich die untersuchten Varianten in der Größenordnung eher ähnliche Steifigkeitsmoduln auf. Der SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V1 hat mit abnehmender Temperatur vergleichsweise geringere Steifigkeiten gegenüber den anderen SMA 8 S-Varianten. Eine Erklärung hierfür könnte u. a. das bei der Labormischung GmBT 25/55-55 V1 verwendete weichere Grundbitumen der Sorte 70/100 sein. Im Temperaturbereich zwischen 10 und 0 °C fällt noch der SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1 auf, für den hier vergleichsweise größere Steifigkeitsmoduln gegenüber den anderen SMA 8 S zu konstatieren sind.

Tabelle 38: Prognostizierte Steifigkeitsmoduln - SMA 8 S

Variante	Steifigkeitsmoduln [MPa] in Abhängigkeit von der Temperatur und bei 10 Hz							
	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	35 °C	50 °C
SMA 8 S mit 25/55-55 A	23.254	21.994	18.913	13.532	10.434	7.530	1.797	214
SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1	26.604	26.163	24.124	17.946	13.486	9.336	3.141	1.971
SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V2	25.973	23.408	19.044	13.400	10.561	7.967	2.441	374
SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V1	22.256	19.376	14.503	9.007	6.682	4.819	1.656	538
SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V2	28.355	25.229	20.499	14.777	11.925	9.277	3.258	572

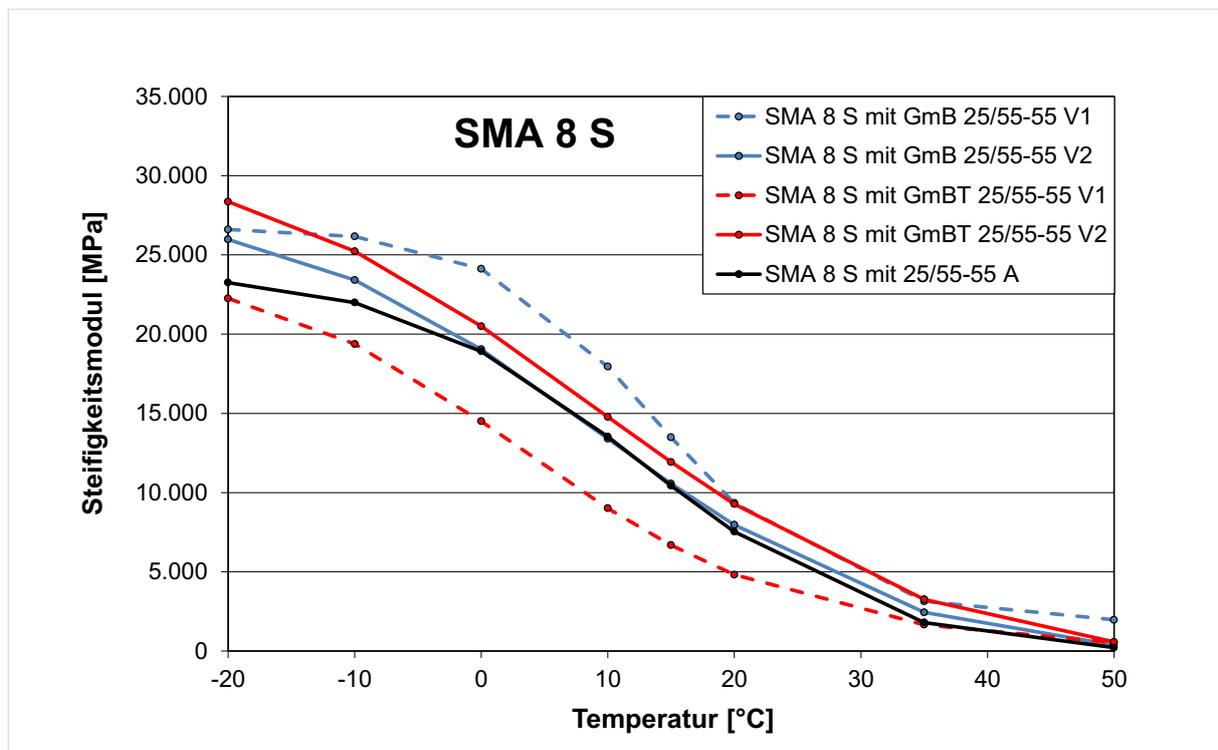


Abbildung 72: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen SMA 8 S - Varianten

Bei den prognostizierten Steifigkeitsmoduln für die untersuchten Asphaltbinder (Tabelle 39, Abbildung 73) sind für den AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V1 über den dargestellten Temperaturbereich die gegenüber den weiteren vier Varianten teilweise deutlich geringsten Werte für die Steifigkeitsmoduln festzustellen. Eine Erklärung dafür könnte auch hier u. a. das bei der Labormischung GmBT 25/55-55 V1 verwendete weichere Grundbitumen der Sorte 70/100 sein.

Die weiteren vier untersuchten Asphaltbindervarianten weisen zwischen etwa 20 und 50 °C in der Größenordnung ähnliche Steifigkeitsmoduln auf. Bei Temperaturen unter 20 °C ändert sich zwischen den AC 16 B S das temperaturabhängige Steifigkeitsverhalten und so nimmt beispielsweise beim AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V2 der Steifigkeitsmoduln vergleichsweise überproportional zu.

Tabelle 39: Prognostizierte Steifigkeitsmoduln - AC 16 B S

Variante	Steifigkeitsmoduln [MPa] in Abhängigkeit von der Temperatur und bei 10 Hz							
	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	35 °C	50 °C
AC 16 B S mit 25/55-55 A	25.861	24.378	21.055	15.546	12.380	9.348	2.924	457
AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V1	27.596	24.841	20.931	16.103	13.519	10.939	3.973	721
AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V2	34.376	31.743	25.219	15.616	11.283	7.928	3.012	1.742
AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V1	19.874	17.428	13.525	8.913	6.759	4.880	1.137	132
AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V2	33.533	25.375	18.612	13.063	10.682	8.532	3.250	619

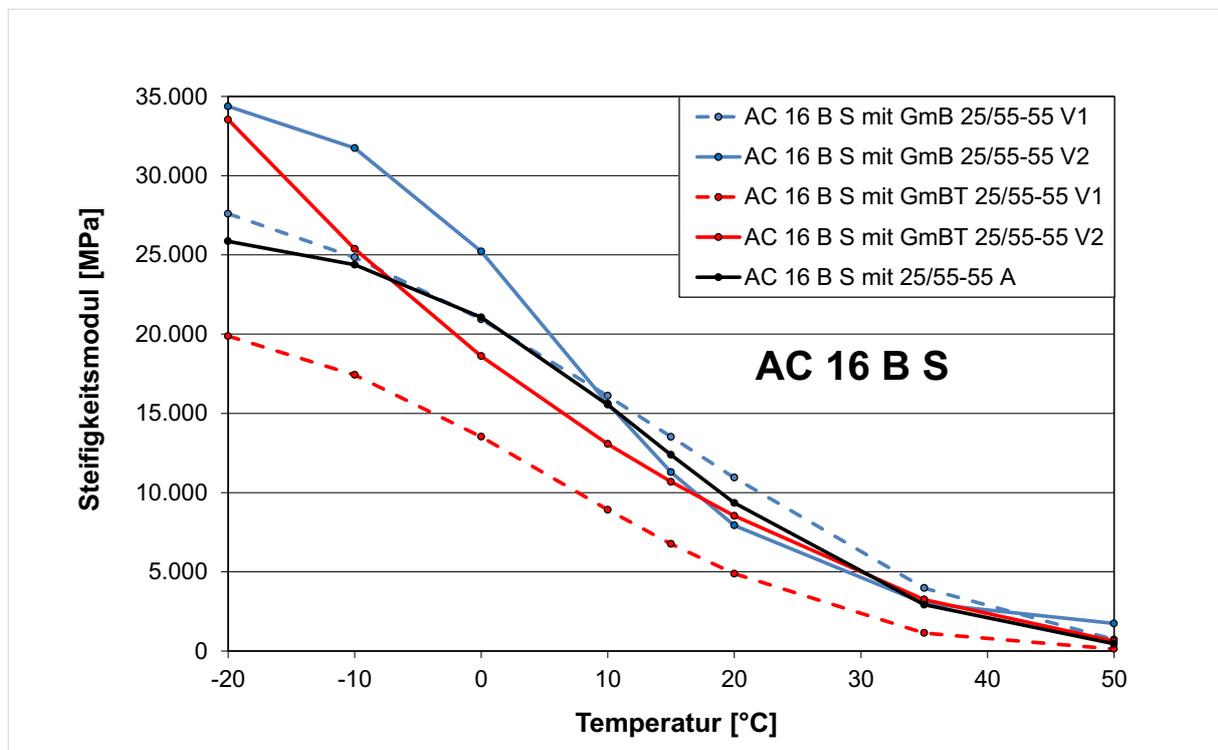


Abbildung 73: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen AC 16 B S - Varianten

Tabelle 40 und Abbildung 74 können die Steifigkeitsmoduln für die Offenporigen Asphalte PA 8 entnommen werden. Für die fünf PA 8 mit polymermodifiziertem Bindemittel und mit gummodifizierten Bindemitteln werden in der

Größenordnung insgesamt ähnliche Steifigkeitsmoduln ermitteln. Mit abnehmender Temperatur nimmt eine Differenzierung der Werte für den Steifigkeitsmodul tendenziell zu.

Tabelle 40: Prognostizierte Steifigkeitsmoduln - PA 8

Variante	Steifigkeitsmoduln [MPa] in Abhängigkeit von der Temperatur und bei 10 Hz							
	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	35 °C	50 °C
PA 8 mit 40/100-65 A	8.711	8.356	7.153	4.628	3.210	2.024	276	19
PA 8 mit GmB 25/55-65 V1	9.013	8.478	7.128	4.845	3.621	2.548	668	88
PA 8 mit GmB 25/55-65 V2	10.090	9.789	8.501	5.324	3.514	2.090	309	23
PA 8 mit GmBT 25/55-65 V1	11.987	10.303	7.276	4.007	2.748	1.814	423	49
PA 8 mit GmBT 25/55-65 V2	10.579	9.179	7.014	4.516	3.361	2.354	336	24

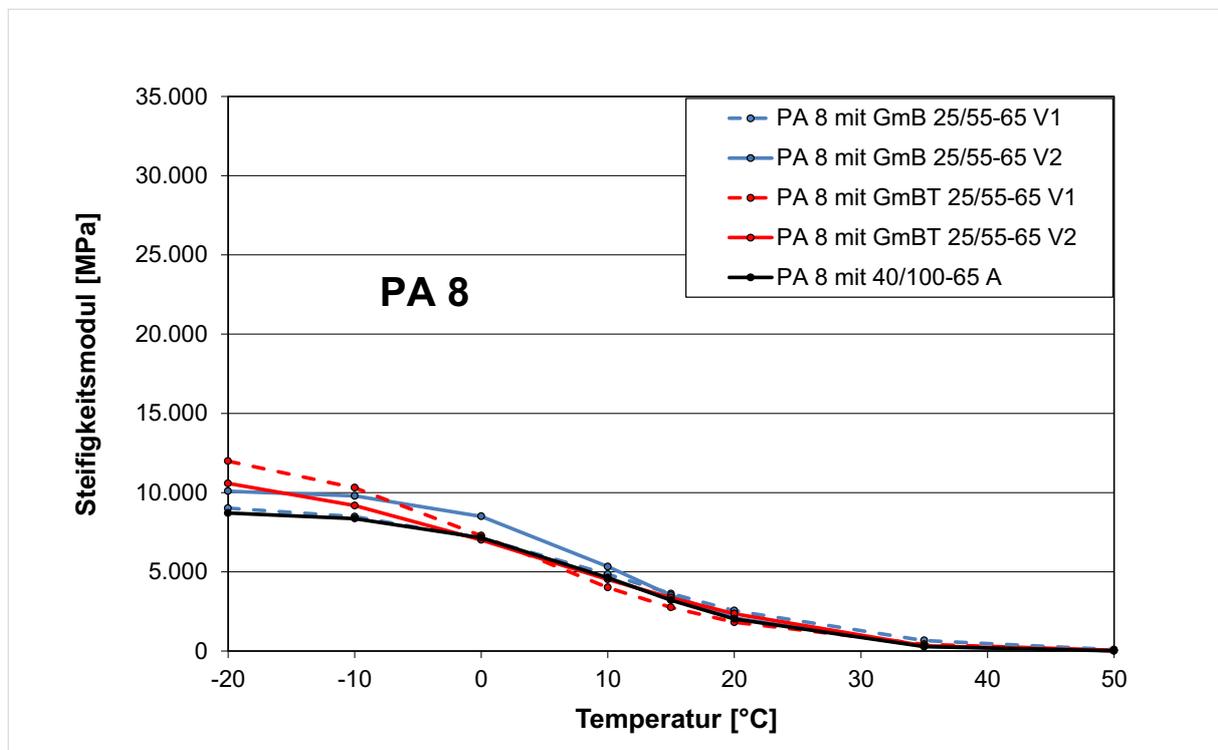


Abbildung 74: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen PA 8 - Varianten

Für die statistische Auswertung wird auf die Messwerte bei 10 Hz zurückgegriffen. In Abbildung 75 bis Abbildung 77 sind die Werte als Balkendiagramme dargestellt. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung (basierend auf den Messwerten) können Tabelle 41 entnommen werden.

Zwischen den Splittmastixasphalten sind signifikante Unterschiede hinsichtlich der Steifigkeitsmoduln bei allen Prüftemperaturen (-10, 0,

10, 20 °C) zu konstatieren und nach Durchführung des LSD-Tests erfolgt eine Einteilung in unterschiedliche homogene Gruppen, wobei immer der SMA 8 S mit gummodifiziertem Bindemittel GmBT 25/55-55 V1 die signifikant geringsten Werte aufweist.

Auch die Steifigkeitsmoduln der Asphaltbinder weisen signifikante Unterschiede bei allen Prüftemperaturen auf. Für den AC 16 B S mit gummodifiziertem Bindemittel GmBT 25/55-55 V1

sind dabei immer die signifikant geringsten Steifigkeitswerte zu konstatieren.

Zwischen den Steifigkeitsmoduln der untersuchten Offenporigen Asphalte PA 8 wurden bei allen Prüftemperaturen signifikante Unterschiede ermittelt, eine Einteilung in unterschiedliche homogene Gruppen ist jedoch nur für die

Steifigkeitsmoduln bei 10 °C möglich. Der PA 8 mit gummi-modifiziertem Bindemittel GmBT 25/55-65 V2 ist bei 10 °C mit dem signifikant größten Wert einer anderen homogenen Gruppe zuzuordnen.

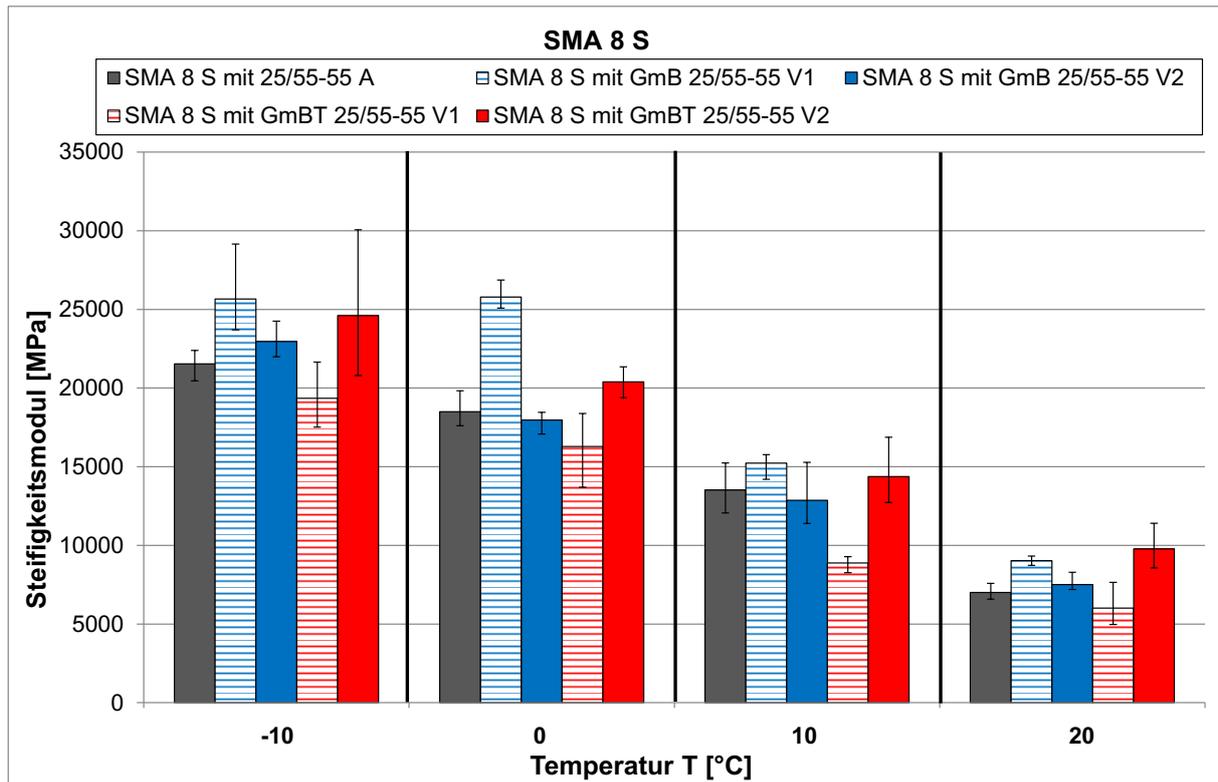


Abbildung 75: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - SMA 8 S

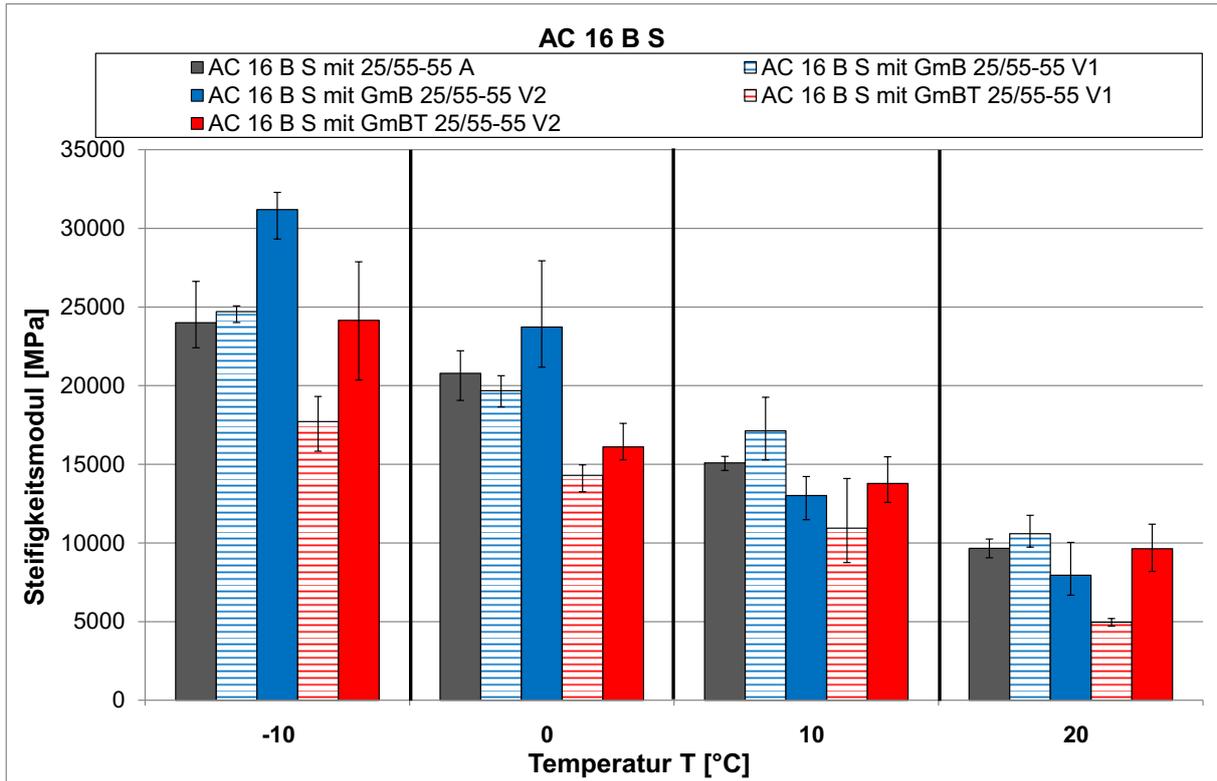


Abbildung 76: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - AC 16 B S

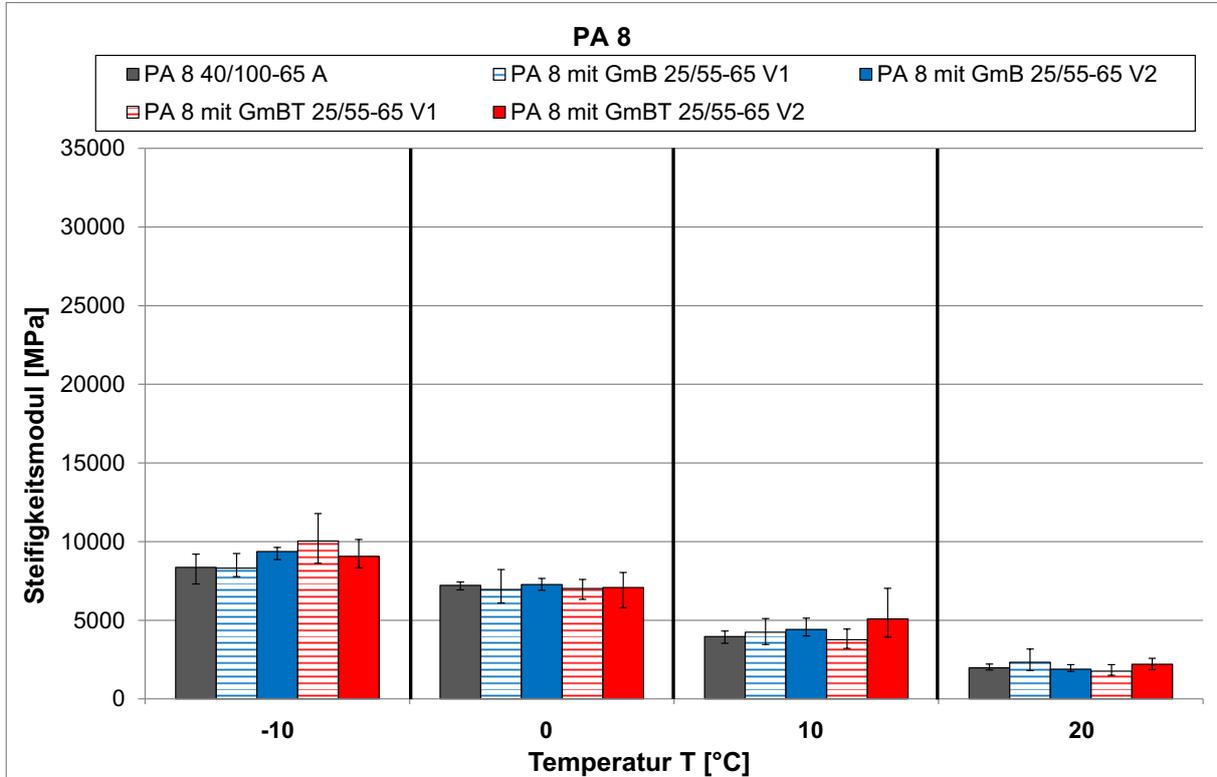


Abbildung 77: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - PA 8

Tabelle 41: Ergebnisse der statistischen Auswertung – Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8)

SMA 8 S mit 25/55-55 A, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55 AC 16 B S mit 25/55-55 A, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55 PA 8 mit 40/100-65 A, GmB 25/55-65, GmBT 25/55-65		einfache Varianz- analyse	LSD-Test															
			1. Gruppe				2. Gruppe				3. Gruppe				4. Gruppe			
			hoch >>> gering															
Spaltzug- Schwellversuch (Steifigkeit)	SMA 8 S Steifigkeit [MPa] bei -10 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	AC 16 BS Steifigkeit [MPa] bei -10 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	PA 8 Steifigkeit [MPa] bei -10 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	SMA 8 S Steifigkeit [MPa] bei 0 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	AC 16 BS Steifigkeit [MPa] bei 0 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	PA 8 Steifigkeit [MPa] bei 0 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	SMA 8 S Steifigkeit [MPa] bei 10 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	AC 16 BS Steifigkeit [MPa] bei 10 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	PA 8 Steifigkeit [MPa] bei 10 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	SMA 8 S Steifigkeit [MPa] bei 20 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	AC 16 BS Steifigkeit [MPa] bei 20 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															
	PA 8 Steifigkeit [MPa] bei 20 °C	signifi.	[LSD-Test Matrix]															

Aus Tabelle 42 und Abbildung 78 können die prognostizierten Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz für die Rückstellproben SMA 8 S entnommen werden. Die temperaturabhängigen

Steifigkeitsmoduln der insgesamt sieben untersuchten Varianten bilden praktisch eine Kurvenschar.

Tabelle 42: Prognostizierte Steifigkeitsmoduln - SMA 8 S (Rückstellproben)

Variante	Steifigkeitsmodul [MPa] in Abhängigkeit von der Temperatur und bei 10 Hz							
	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	35 °C	50 °C
RS – SMA 8 S – 25/55-55 A	21.829	20.107	16.695	11.849	9.375	7.163	2.833	1.098
RS – SMA 8 S – GmB 1	23.743	21.066	16.259	10.331	7.633	5.377	1.327	164
RS – SMA 8 S – GmB 2	20.962	19.378	16.759	13.107	11.031	8.913	3.211	578
RS – SMA 8 S – GmB 3	25.755	22.166	17.632	12.749	10.401	8.214	2.961	534
RS – SMA 8 S – GmB 4	22.602	21.435	18.786	14.185	11.389	8.586	2.155	270
RS – SMA 8 S – GmB 5	24.426	20.659	15.638	10.479	8.219	6.279	2.368	491
RS – SMA 8 S – GmB 6	23.385	20.013	15.818	11.345	9.200	7.201	2.379	393

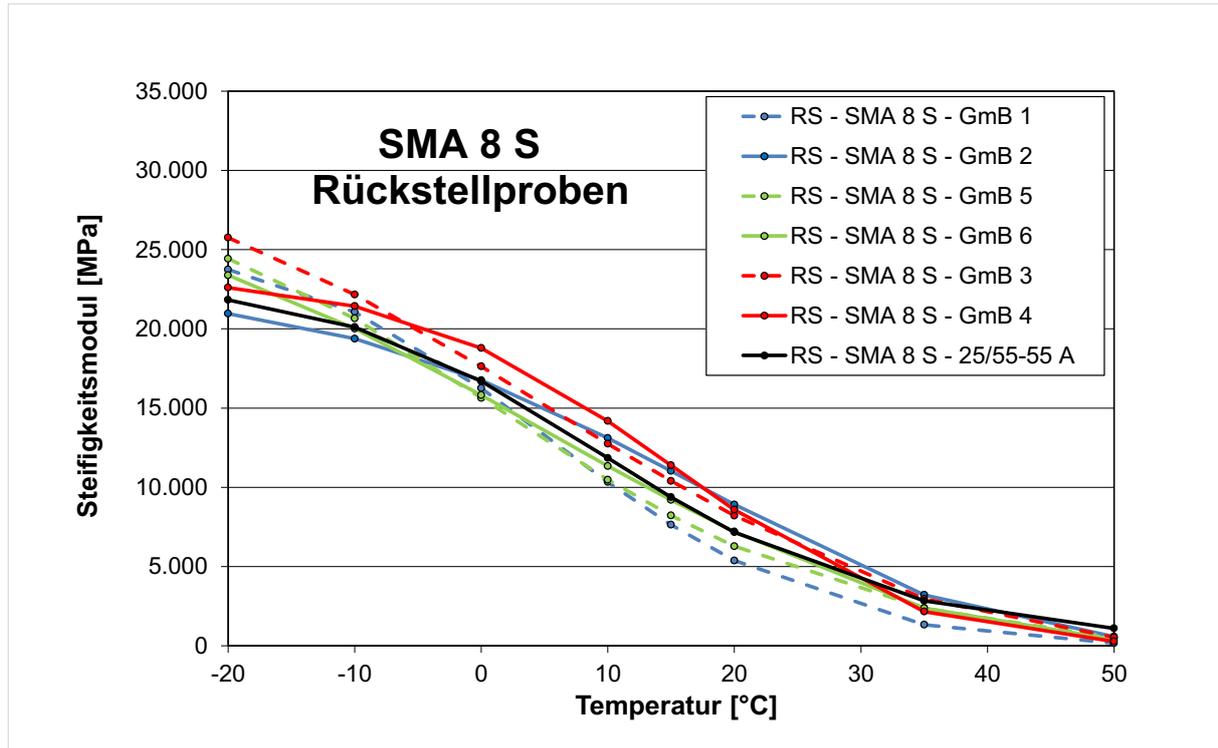


Abbildung 78: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen RS SMA 8 S - Varianten

In Abbildung 79 sind für die Rückstellproben SMA 8 S die Messwerte der Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz zusammenfassend dargestellt, die bei der statistischen Auswertung berücksichtigt wurden. Aus den Ergebnissen der statistischen Auswertung (Tabelle 43) geht hervor, dass es signifikante Unterschiede zwischen den Steifigkeitsmoduln der RS SMA 8 S-Varianten gibt.

Eine Einteilung in jeweils vier unterschiedliche homogene Gruppen kann bei den Prüftemperaturen 0, 10 und 20 °C vorgenommen werden, wobei die Zuordnung der Varianten in homogene Gruppen bei den drei Prüftemperaturen unterschiedlich ist.

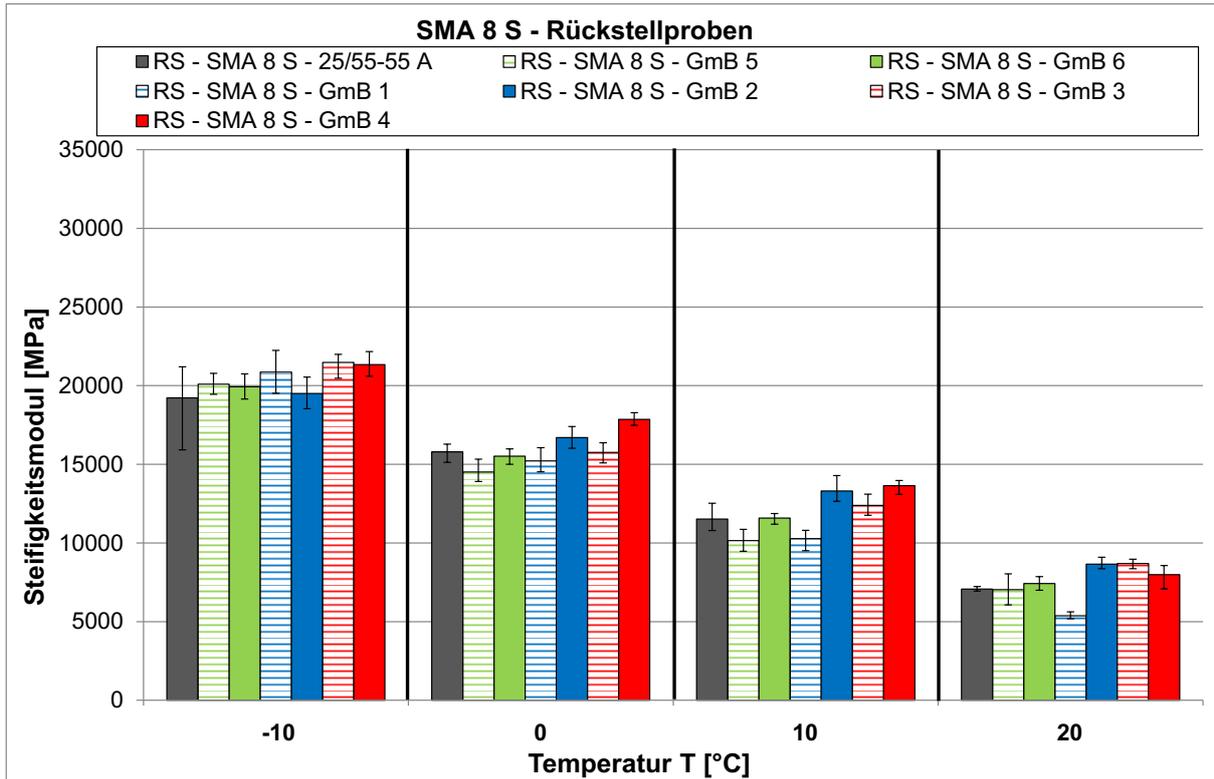


Abbildung 79: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 43: Ergebnisse der statistischen Auswertung – Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz (Rückstellproben (SMA 8 S))

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB), RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6	einfache Varianz- analyse	LSD-Test					
		PmB	GmB-1	GmB-5	GmB-3	GmB-2	GmB-6
		hoch >>> gering					
Spaltzug- Schwellversuch (Steifigkeit)	Steifigkeit [MPa] bei -10	signifi.					
	Steifigkeit [MPa] bei 0 °C	signifi.					
	Steifigkeit [MPa] bei 10 °C	signifi.					
	Steifigkeit [MPa] bei 20 °C	signifi.					

In Tabelle 44 und Abbildung 80 sind die Steifigkeitsmoduln für die beiden AC 11 D S mit polymer- bzw. mit gummimodifiziertem Bindemittel gegenübergestellt. Mit Ausnahme bei den

hohen Temperaturen (35, 50 °C), weist der AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel 45/80-55 höhere Werte für den Steifigkeitsmodul gegenüber der Variante mit GmB 7.

Tabelle 44: Prognostizierte Steifigkeitsmoduln - AC 11 D S (Rückstellproben)

Variante	Steifigkeitsmoduln [MPa] in Abhängigkeit von der Temperatur und bei 10 Hz							
	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	15 °C	20 °C	35 °C	50 °C
RS – AC 11 D S – 45/80-55	28.674	26.503	22.026	15.346	11.809	8.581	2.118	261
RS – AC 11 D S – GmB 7	24.436	21.960	17.609	12.109	9.486	7.205	2.796	975

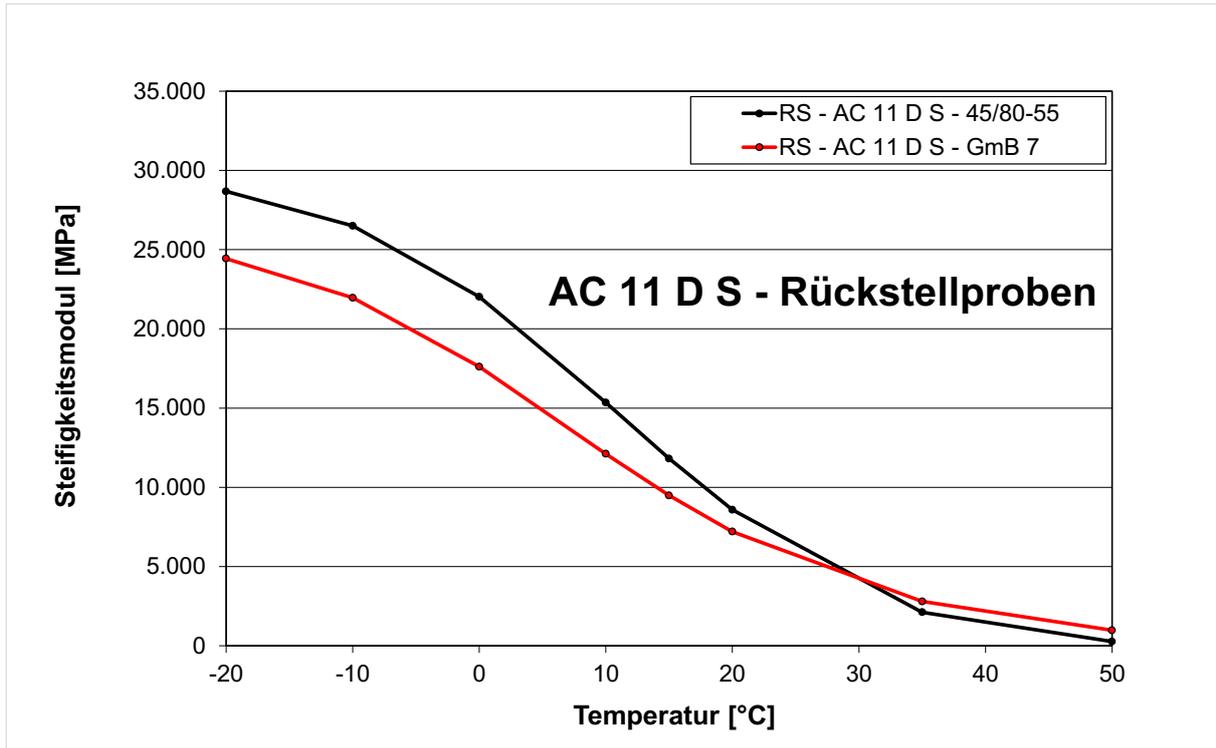


Abbildung 80: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen RS AC 11 D S - Varianten

In Abbildung 81 sind für die Rückstellproben AC 11 D S die Messwerte der Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz zusammenfassend dargestellt, die bei dem einfachen Mittelwertvergleich berücksichtigt wurden. Der einfache Mittelwert führt zu dem Ergebnis, dass es bei allen vier

Prüftemperaturen signifikante Unterschiede zwischen den Steifigkeitsmoduln des RS AC 11 D S mit polymer- bzw. mit gummi-modifiziertem Bindemittel gibt, wobei die Steifigkeitsmoduln des RS AC 11 D S mit polymer-modifiziertem Bindemittel 45/80-55 größer sind.

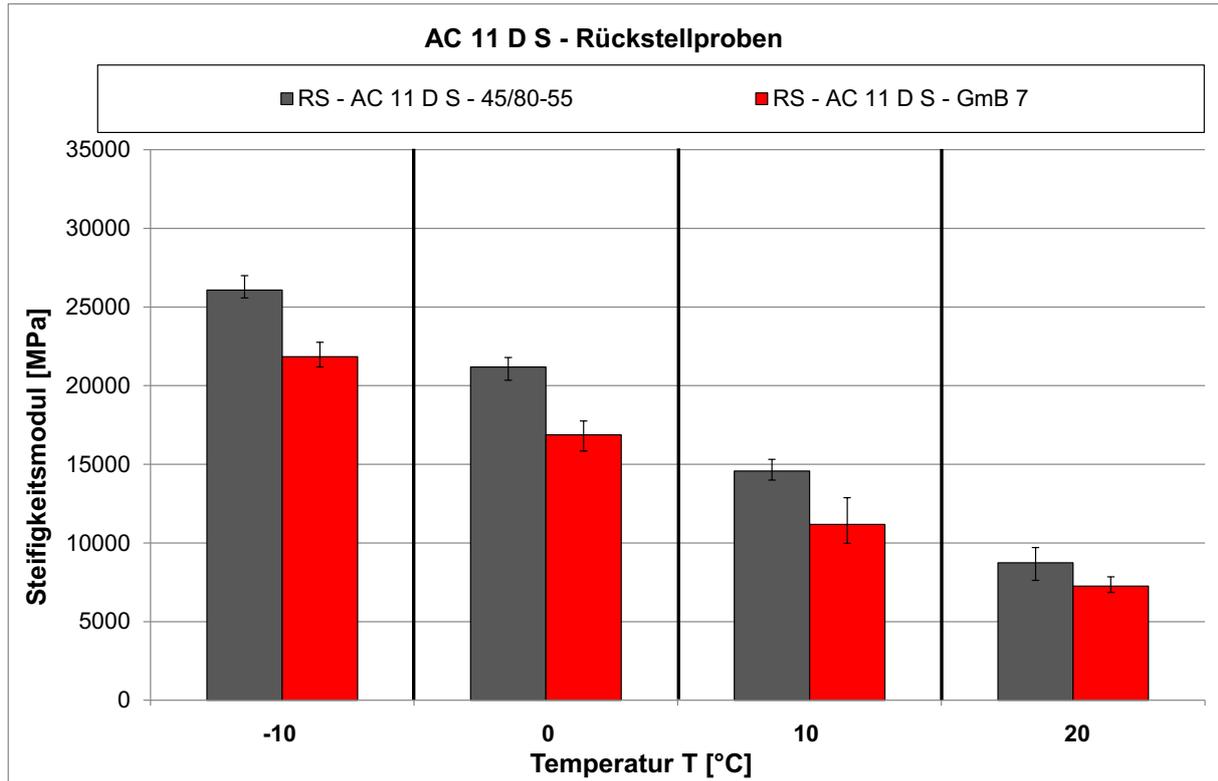


Abbildung 81: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 45: Ergebnisse der statistischen Auswertung – Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz (Rückstellproben (AC 11 D S))

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB) RS - AC 11 D S mit GmB-7		einfacher Mittelwert- vergleich	Reihung Mittelwert ■ PmB ■ GmB-7
			hoch >>> gering
Spaltzug- Schwellversuch (Steifigkeit)	Steifigkeit [MPa] bei -10	signifikant	■ ■
	Steifigkeit [MPa] bei 0 °C	signifikant	■ ■
	Steifigkeit [MPa] bei 10	signifikant	■ ■
	Steifigkeit [MPa] bei 20	signifikant	■ ■

4.2.3 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Ermüdungsverhaltens

Untersuchungen zur Ansprache des Ermüdungsverhaltens wurden an allen Asphaltarten mit dem Spaltzug-Schwellversuch durchgeführt. An zwei ausgewählten Splittmastixasphalten wurde desweiterm das Ermüdungsverhalten mittels Zug-Schwellversuch angesprochen.

Spaltzug-Schwellversuch

Für die untersuchten Asphalte sind die Ermüdungsfunktionen in den nachfolgenden Abbildungen angegeben. Weiterhin sind den

Abbildungen die jeweils zugehörigen mathematischen Funktionen zu entnehmen. Zur übersichtlicheren Darstellung wurden bei den Ermüdungskurven hier nur die Trendlinien dargestellt und nicht die Ergebnisse (Punkte) der einzelnen Versuche. Die im Ermüdungsversuch ermittelten Wertepaare (elastische Anfangsdehnung; Lastwechselzahl) können dem Anhang III entnommen werden.

Eine Auswertung der Kenngrößen elastische Anfangsdehnung und Lastwechselzahl ist mit den in Kapitel 3.2 genannten mathematisch-statistischen Verfahren nicht möglich, da bei den Ermüdungsversuchen der zu vergleichenden Varianten unterschiedliche Oberspannungen gewählt wurden. Um dennoch einen Vergleich

zwischen den einzelnen Varianten einer Asphaltart mit unterschiedlichen Bindemitteln (polymermodifiziertem, gummimodifizierten Bindemittel(n)) zu ermöglichen, wurden abschließend Rankings für die erreichte Lastwechselzahl N_{Makro} bei $\epsilon_{\text{anf.,elast.}}=0,1\%$ aufgestellt.

In der Abbildung 82 sind die Ermüdungsfunktionen für die Splittmastixasphalte SMA 8 S dargestellt. Zwischen den untersuchten Varianten

sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Der SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A liegt über den gesamten Dehnungsbereich betrachtet zwischen den Splittmastixasphalten mit gummimodifizierten Bindemitteln. Auffällig beim SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A ist die vergleichsweise geringste Steigung der Ermüdungskurve. Die Ermüdungskurven der verschiedenen SMA 8 S-Varianten schneiden sich aufgrund unterschiedlicher Steigungsmaße.

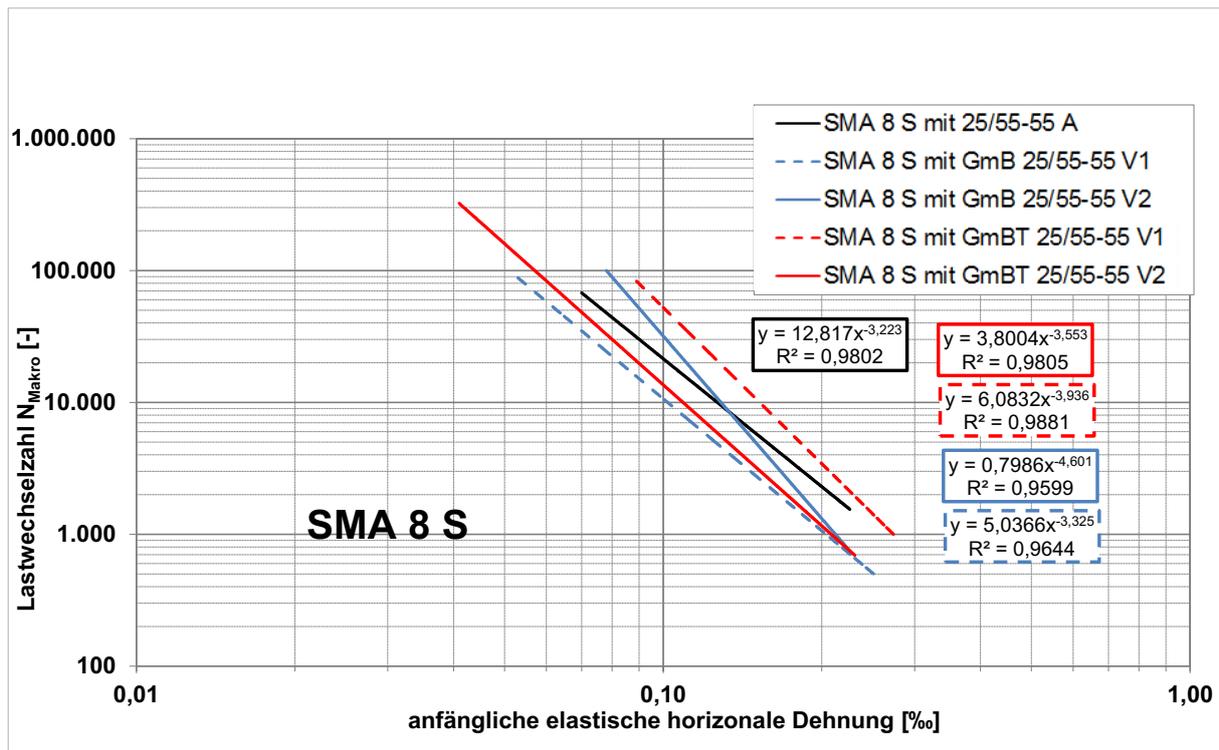


Abbildung 82: Ermüdungsfunktionen - SMA 8 S

Anhand der Ermüdungsfunktionen für den Asphaltbinder AC 16 B S (Abbildung 83) ist zu erkennen, dass die Asphaltbinder mit GmBT 25/55-55 bei gleicher Anfangsdehnung tendenziell mehr Lastwechsel ertragen als die

Asphaltbinder mit GmB 25/55-55. Der AC 16 B S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A liegt dabei zwischen den beiden hier untersuchten Varianten mit GmBT 25/55-55 (V1 und V2).

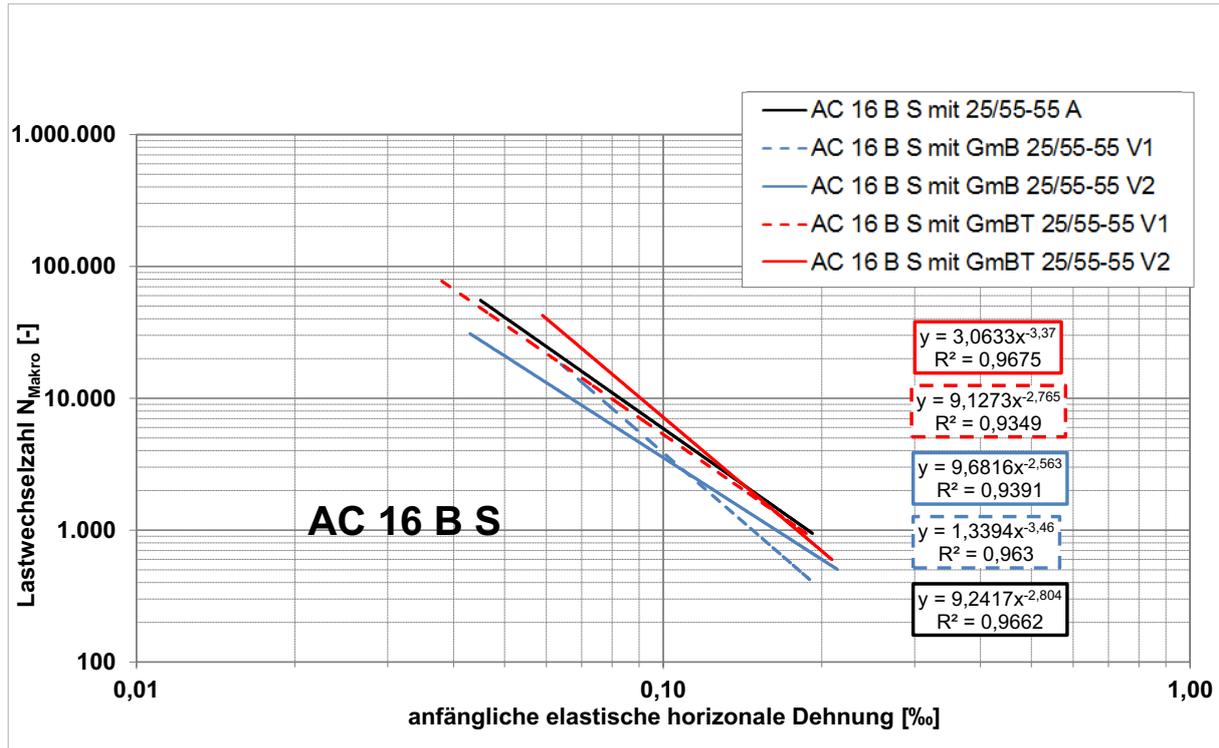


Abbildung 83: Ermüdungsfunktionen - AC 16 B S

Abbildung 84 zeigt die Ermüdungskurven für die Offenporigen Asphalte PA 8. Die Ermüdungsfunktion des PA 8 mit 40/100-65 A hat dabei einen ähnlichen Verlauf (Steigung) wie die Ermüdungskurven der Varianten mit GmBT 25/55-65 V1 sowie GmBT 25/55-65 V2.

Der PA 8 mit GmB 25/55-65 V2 kann bei gleicher Anfangsdehnung nur eine geringere Lastwechselzahl ertragen. Der PA 8 mit GmB 25/55-65 V1 fällt aufgrund der vergleichsweise großen Steigung auf und liegt daher bei einer Anfangsdehnung von etwa unter 0,07 sogar über alle anderen Kurven.

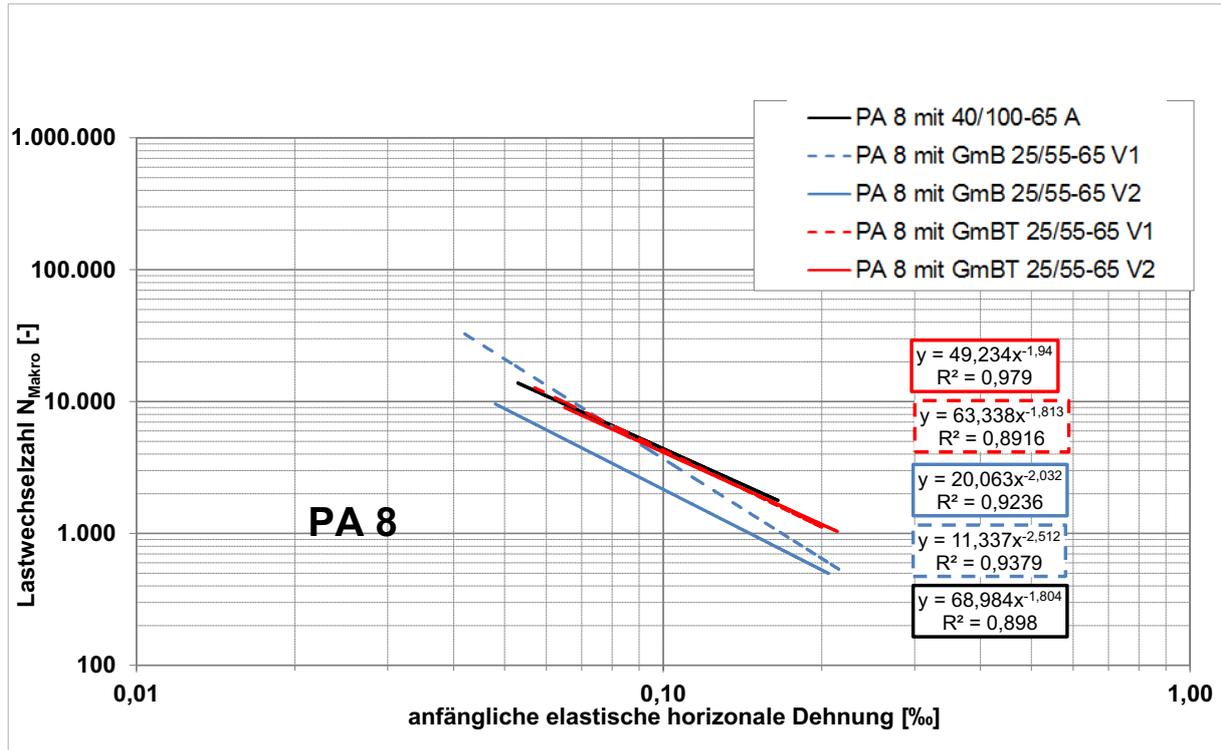


Abbildung 84: Ermüdungsfunktionen - PA 8

Der Tabelle 46 sind für die im Labor hergestellten Asphalte (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) die bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ rechnerisch ermittelten Lastwechselzahlen zu entnehmen. Ergänzend sind in Abbildung 85 bis Abbildung 87 die bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ rechnerisch

ermittelten Lastwechselzahlen als Balkendiagramm dargestellt.

Der Tabelle 47 können die Rankings für die Lastwechselzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ entnommen werden.

Tabelle 46: Lastwechselzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ (SMA 8 S, AC 16 B S und PA 8)

SMA 8 S mit	25/55-55 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Lastwechselanzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰	21.418	10.645	31.866	52.497	13.578
AC 16 B S mit	25/55-55 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Lastwechselanzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰	5.885	3.863	3.540	5.313	7.181
PA 8 mit	40/100-65 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Lastwechselanzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰	4.393	3.686	2.160	4.118	4.288

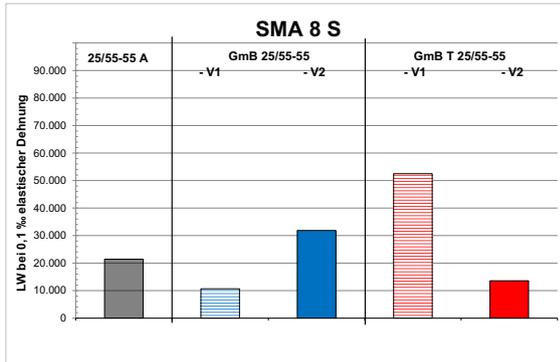


Abbildung 85: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - SMA 8 S

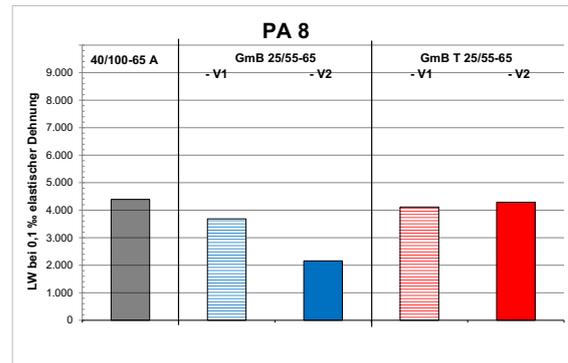


Abbildung 87: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - PA 8

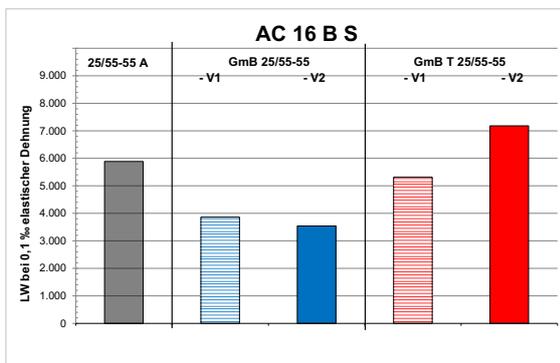


Abbildung 86: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - AC 16 B S

Tabelle 47: Ranking der verschiedenen Varianten – Lastwechselzahl N_{Makro} bei $\epsilon_{anf., elast} = 0,1 ‰$ – SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8

SMA 8 S mit 25/55-55 A , GmB 25/55-55 , GmBT 25/55-55		
AC 16 B S mit 25/55-55 A , GmB 25/55-55 , GmBT 25/55-55		
PA 8 mit 40/100-65 A , GmB 25/55-65 , GmBT 25/55-65		
		hoch >>> gering
Spaltzug-	SMA 8 S Lastwechselzahl N_{Makro} [-] bei $\epsilon_{anf., elast} = 0,1 ‰$	
Schwellversuch	AC 16 B S Lastwechselzahl N_{Makro} [-] bei $\epsilon_{anf., elast} = 0,1 ‰$	
(Ermüdung)	PA 8 Lastwechselzahl N_{Makro} [-] bei $\epsilon_{anf., elast} = 0,1 ‰$	

In der Abbildung 88 sind für die Rückstellproben SMA 8 S die Ermüdungskurven dargestellt. Der RS-SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel weist hier mit Abstand das günstigste Ermüdungsverhalten über den gesamten dargestellten Dehnungsbereich auf.

In Tabelle 48 und Abbildung 89 sind die rechnerisch ermittelten Lastwechselzahlen bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ dargestellt. Tabelle 49 kann ergänzend das zugehörige Ranking der Lastwechselzahlen bei der elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ entnommen werden.

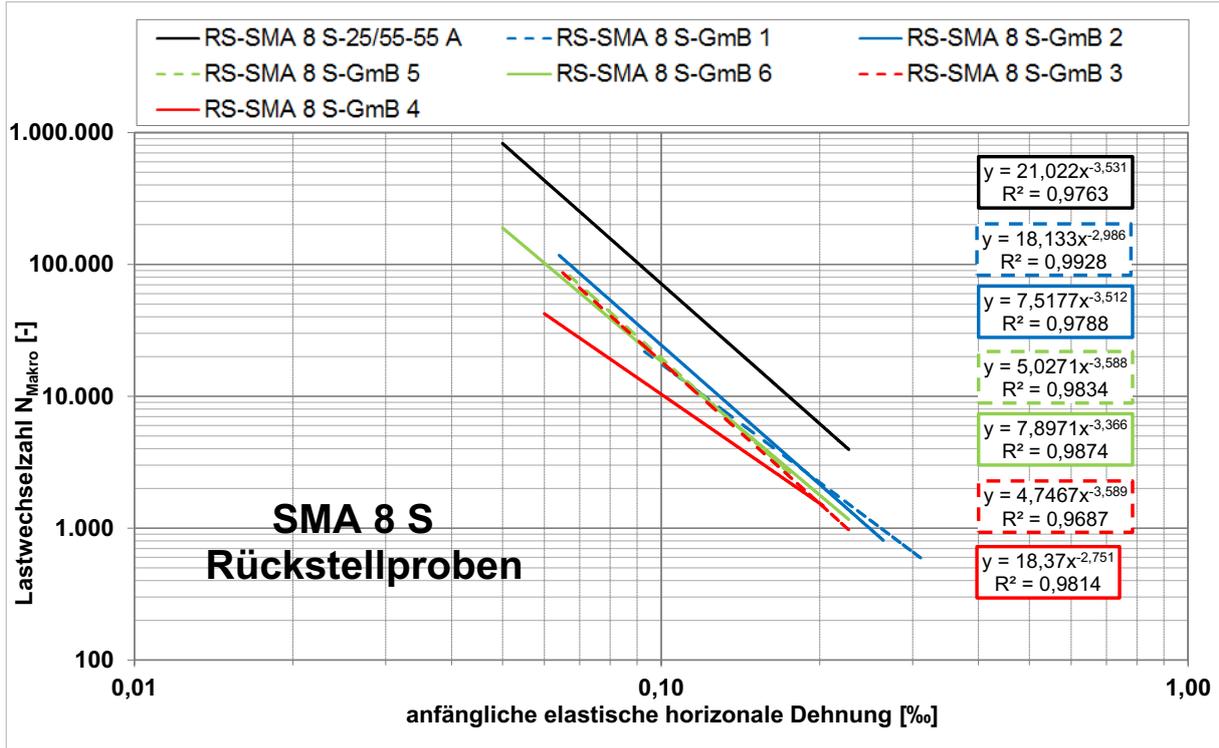


Abbildung 88: Ermüdungsfunktionen - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 48: Lastwechselzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ (SMA 8 S – Rückstellproben)

SMA 8 S (Rückstellproben)	RS SMA 8 S 25/55-55 A	RS SMA 8 S GmB 1	RS SMA 8 S GmB 2	RS SMA 8 S GmB 3	RS SMA 8 S GmB 4	RS SMA 8 S GmB 5	RS SMA 8 S GmB 6
Lastwechselanzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰	71.396	17.558	24.439	18.424	10.354	19.468	18.343

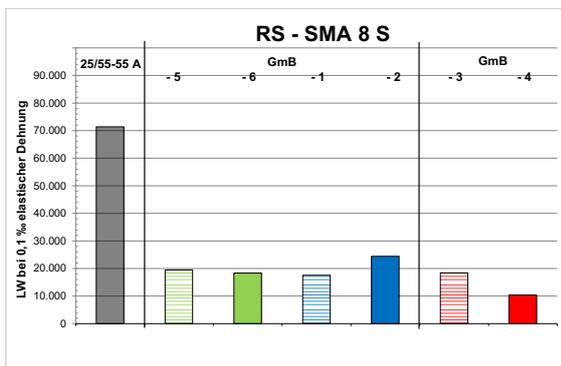


Abbildung 89: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 49: Ranking der verschiedenen Varianten – Lastwechselzahl N_{Makro} bei $\epsilon_{\text{anf., elast}}=0,1\text{‰}$ – RS SMA 8 S

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB), RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6	
Spaltzug-Schwellversuch Lastwechselzahl N_{Makro} [-] bei $\epsilon_{\text{anf., elast}}=0,1\text{‰}$ (Ermüdung)	<p style="text-align: center;">hoch >>> gering</p>

Die Abbildung 90 zeigt die Ermüdungskurven für die Rückstellproben AC 11 D S. Die Ermüdungskurven der Varianten mit polymermodifiziertem und gummi-modifiziertem Bindemittel schneiden sich, daraus resultiert, dass bei einer

Anfangsdehnung von 0,1 ‰ der AC 11 DS mit GmB 7 mehr Lastwechsel erträgt (siehe auch Tabelle 50 und Abbildung 91 sowie Tabelle 51).

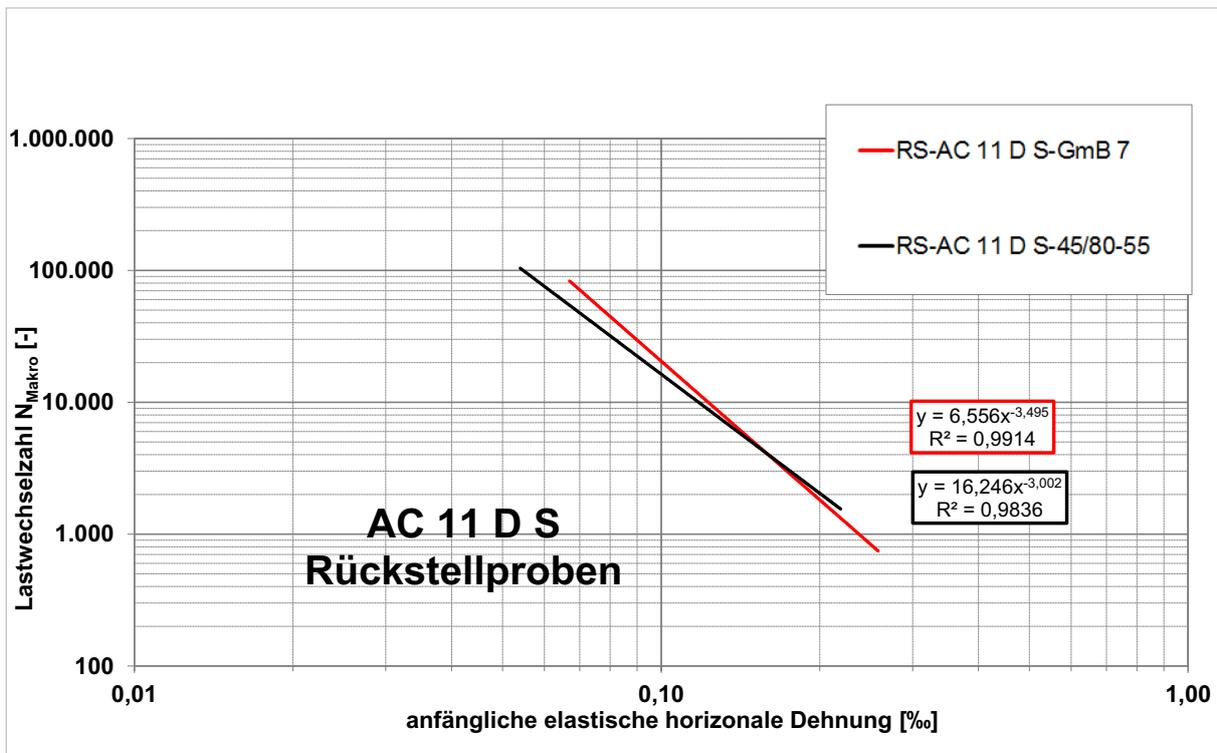


Abbildung 90: Ermüdungsfunktionen für AC 11 D S (Rückstellproben)

Tabelle 50: Lastwechselzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ (AC 11 D S – Rückstellproben)

AC 11 D S (Rückstellproben)	RS AC 11 D S 45/80-55	RS AC 11 D S GmB 7
Lastwechselanzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰	16.321	20.495

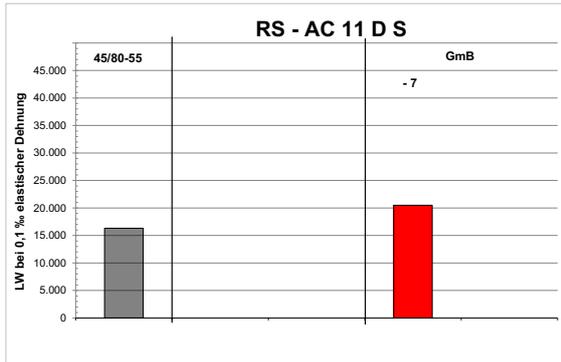


Abbildung 91: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 51: Ranking der verschiedenen Varianten – Lastwechselzahl N_{Makro} bei $\epsilon_{anf., elast}=0,1 ‰$ – RS AC 11 D S

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB), RS - AC 11 D S mit GmB-7		PmB GmB-7
Spaltzug-Schwellversuch (Ermüdung)	Lastwechselzahl N_{Makro} [-] bei $\epsilon_{anf., elast}=0,1 ‰$	hoch >>> gering

Einaxialer Zug-Schwellversuch

Einaxiale Zug-Schwellversuche wurden an dem SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A und an dem SMA 8 S mit gummodifiziertem Bindemittel GmB 25/55-55 V1 durchgeführt. Die Ergebnisse der Einaxialen Zug-Schwellversuche (Darstellung der akkumulierten bleibenden Dehnung in Abhängigkeit der aufgebracht Lastwechsel) sind in Abbildung 92 bis Abbildung 94 für die drei Prüftemperaturen 20, 5, -10 °C dargestellt.

Bei einer Prüftemperatur von 20 °C wird für den SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1 eine höhere Lastwechselzahl bei ähnlicher Dehnung am Versuchsende gegenüber dem SMA 8 S mit 25/55-55 A ermittelt.

Bei 5 °C werden dagegen am SMA 8 S mit 25/55-55 A deutlich höhere Lastwechsel am Versuchsende gegenüber dem SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1 erreicht, wobei gleichzeitig am Versuchsende auch die Dehnung größer gegenüber der Variante mit gummodifiziertem Bindemittel ist.

Auch bei -10 °C als Prüftemperatur werden für den SMA 8 S mit 25/55-55 A höhere Lastwechsel am Versuchsende gegenüber dem SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1 ermittelt.

Anhand der Ergebnisse des durchgeführten Mittelwertvergleichs (Tabelle 52) kann abschließend konstatiert werden, dass bei 20 °C und 5 °C die erkannten Unterschiede signifikant sind.

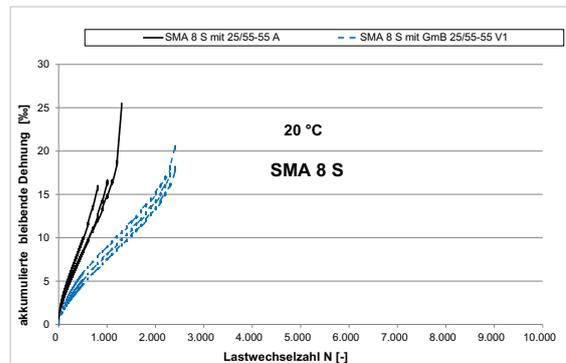


Abbildung 92: Ergebnisse der Einaxialen Zug-Schwellversuche bei 20 °C

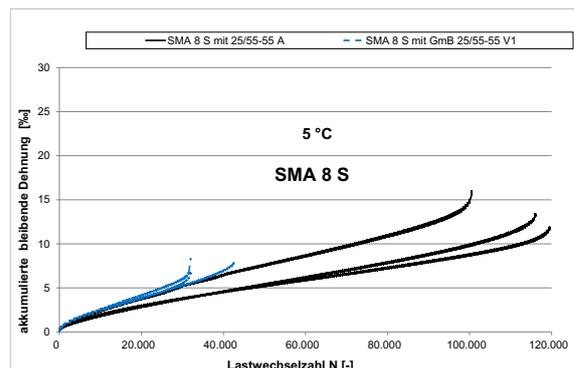


Abbildung 93: Ergebnisse der Einaxialen Zug-Schwellversuche bei 5°C

Abbildung 94: Ergebnisse der Einaxialen Zug-Schwellversuche bei -10°C

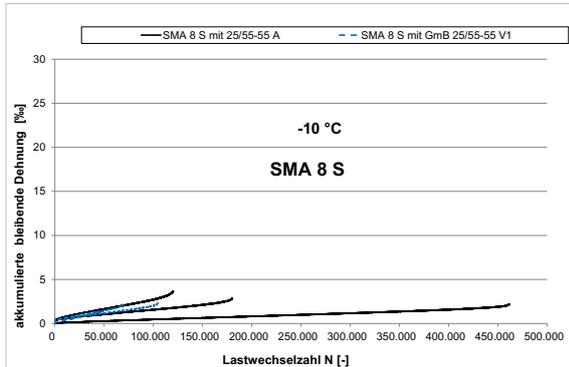


Tabelle 52: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Einaxialen Zug-Schwellversuche, SMA 8 S

SMA 8 S mit 25/55-55 A , GmB 25/55-55		einfacher Mittelwertvergleich	Reihung der Mittelwerte PmB GmB V1 hoch >>> gering
Zug-Schwellversuch (Ermüdung)	SMA 8 S	Lastwechselzahl bei 20 °C	signifi.
		Lastwechselzahl bei 5 °C	signifi.
		Lastwechselzahl bei -10 °C	n. signifi.

4.2.4 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Verformungsverhaltens bei Wärme

Zur Ansprache des Verformungswiderstands bei Wärme wurden Einaxiale Druck-Schwellversuche (SMA 8 S, AC 16 B S, Rückstellproben SMA 8 S, Rückstellproben AC 11 D S) sowie Dynamische Eindringversuche (PA 8) durchgeführt.

Einaxialer Druckschwellversuch

In der Tabelle 53 sind für die Splittmastixasphalte SMA 8 S die Kenngrößen

Lastimpulszahl, Dehnung und Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende dargestellt. Bei den fünf SMA 8 S-Varianten wurde kein Wendepunkt in der Impulskriechkurve (Abbildung 95) erkannt. Die Dehnungsrate sowie die Dehnung am Versuchsende ist beim SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V1 vergleichsweise am größten und beim SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V2 am geringsten.

Tabelle 53: Ergebnisse (Mittelwerte) der Einaxialen Druckschwellversuche für SMA 8 S

Variante	Lastimpulszahl im Wendepunkt bzw. am Versuchsende	Dehnung im Wendepunkt bzw. am Versuchsende	Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende
	\overline{nW} bzw. Ende [-]	$\overline{\epsilon W}$ bzw. Ende [‰]	$\overline{\epsilon W}^*$ bzw. Ende [‰*10 ⁻⁴ /n]
SMA 8 S mit 25/55-55 A	10.000	18,45	2,91
SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1	10.000	17,80	3,92
SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V2	10.000	13,68	1,71
SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V1	10.000	21,94	4,09
SMA 8 S mit GmBT 25/55-55 V2	10.000	14,63	2,61

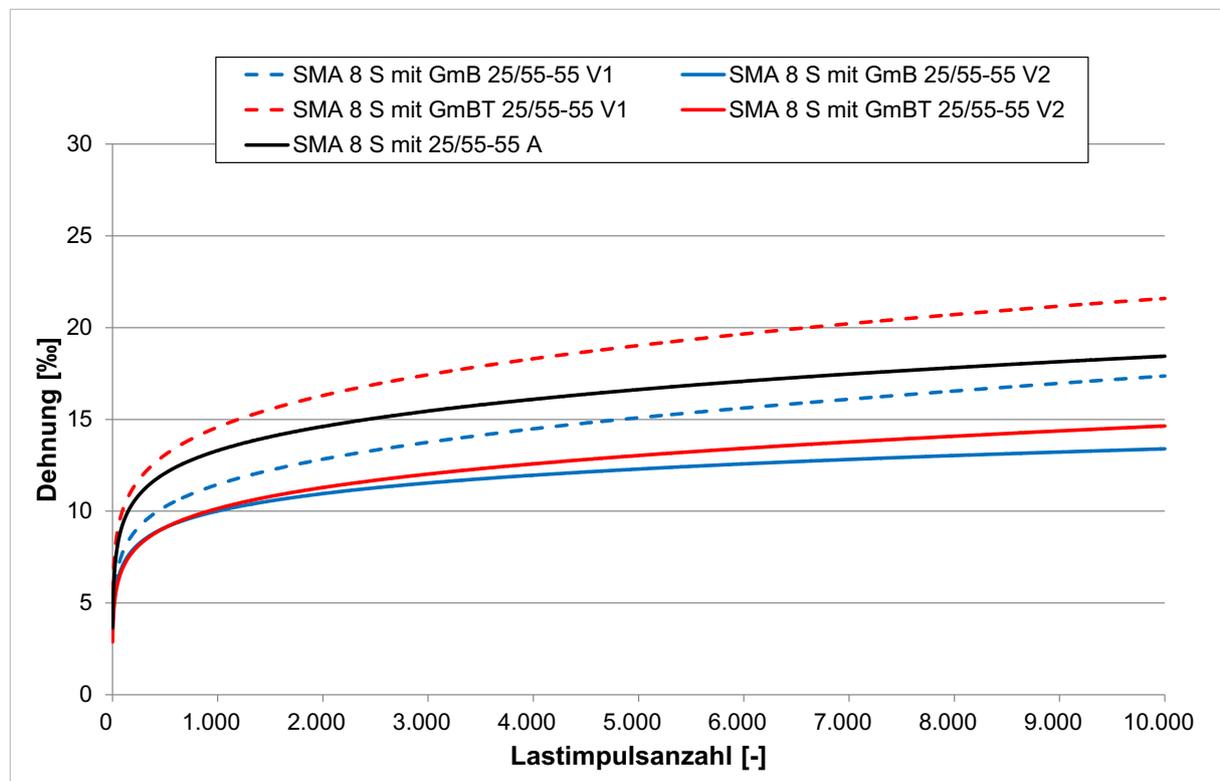


Abbildung 95: Impulskriechkurve für SMA 8 S

Für die Asphaltbinder AC 16 B S sind die Ergebnisse der Druck-Schwellversuche Tabelle 54 und Abbildung 96 zu entnehmen. Für die AC 16 B S-Varianten mit GmB 25/55-55 V1 und V2 (Fertigprodukte) wird kein Wendepunkt in der Impulskriechkurve erkannt. Die AC 16 B S mit „im Trockenverfahren“ hergestellten gummimodifizierten Bindemitteln (GmBT 25/55-55 V1 und

V2) sowie mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A weisen Wendepunkte auf. Dabei hat der AC 16 B S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A die größte Dehnungsrate im Wendepunkt.

Tabelle 54: Ergebnisse (Mittelwerte) der Einaxialen Druckschwellversuche für AC 16 B S

Variante	Lastimpulszahl im Wendepunkt bzw. am Versuchsende ΠW bzw. Ende [-]	Dehnung im Wendepunkt bzw. am Versuchsende εW bzw. Ende [‰]	Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende εW^* bzw. Ende [‰*10 ⁻⁴ /n]
AC 16 B S mit 25/55-55 A	1.910	15,34	32,80
AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V1	10.000	14,28	3,76
AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V2	10.000	12,04	2,36
AC 16 B S mit GmBT 25/55-55 V1	2.874	12,89	15,13
AC 16 B S S mit GmBT 25/55-55 V2	4.593	13,51	11,16

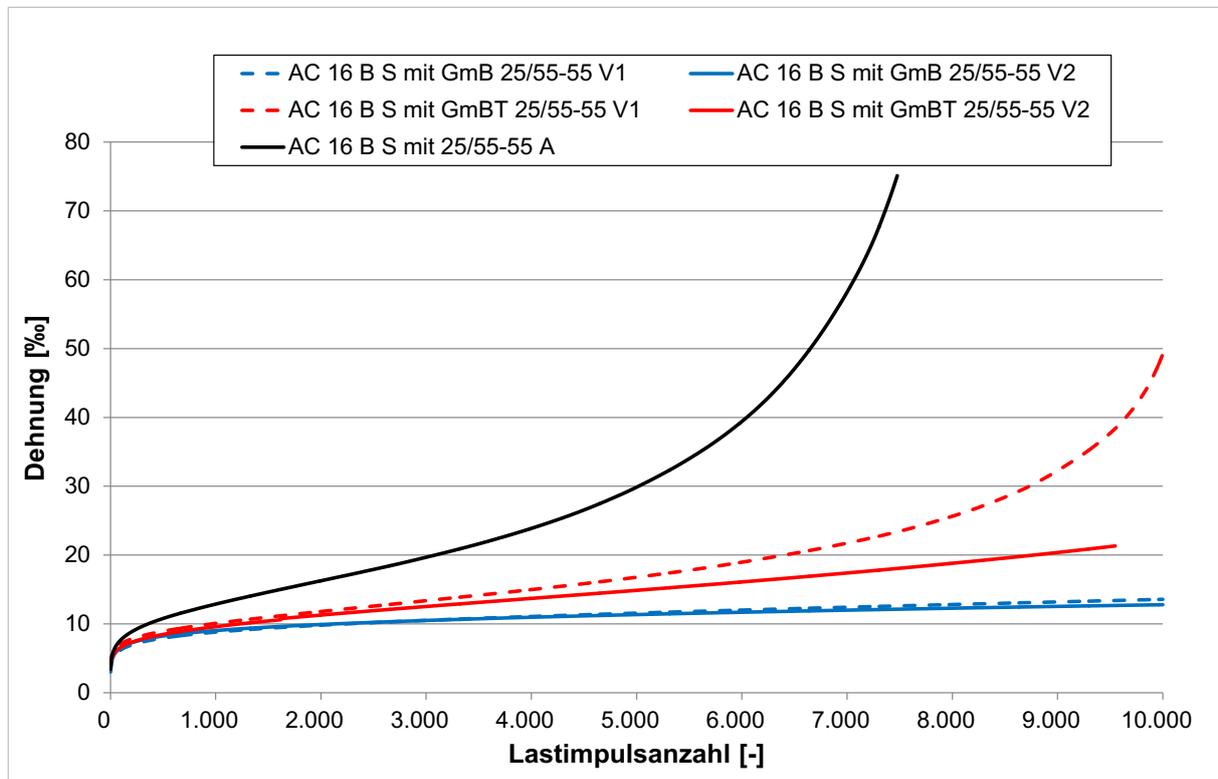


Abbildung 96: Impulskriechkurve für AC 16 B S

Die bei der statistischen Auswertung herangezogenen Kenngrößen Dehnungsrate beim SMA 8 S und AC 16 B S und die Anzahl Lastimpulse beim AC 16 B S sind in Abbildung 97 bis Abbildung 99 als Balkendiagramme dargestellt.

Varianten nicht. Die Impulskriechkurve der SMA 8 S Rückstellprobe mit polymermodifiziertem Bindemittel weist einen Wendepunkt mit einem

vergleichsweise geringeren Wert für die Dehnungsrate auf.

Tabelle 56: Ergebnisse (Mittelwerte) der Einaxialen Druckschwellversuche für SMA 8 S

Variante	Lastimpulszahl im Wendepunkt bzw. am Versuchsende	Dehnung im Wendepunkt bzw. am Versuchsende	Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende
	n_W bzw. Ende [-]	ϵ_W bzw. Ende [%]	$\dot{\epsilon}_W^*$ bzw. Ende [% $\cdot 10^{-4}/n$]
RS – SMA 8 S – 25/55-55 A	5.559	19,59	13,65
RS – SMA 8 S – GmB 1	1.792	18,69	22,09
RS – SMA 8 S – GmB 2	10.000	15,91	3,98
RS – SMA 8 S – GmB 3	3.393	19,10	23,91
RS – SMA 8 S – GmB 4	10.000	21,39	6,70
RS – SMA 8 S – GmB 5	1.105	19,17	64,46
RS – SMA 8 S – GmB 6	3.341	19,34	20,31

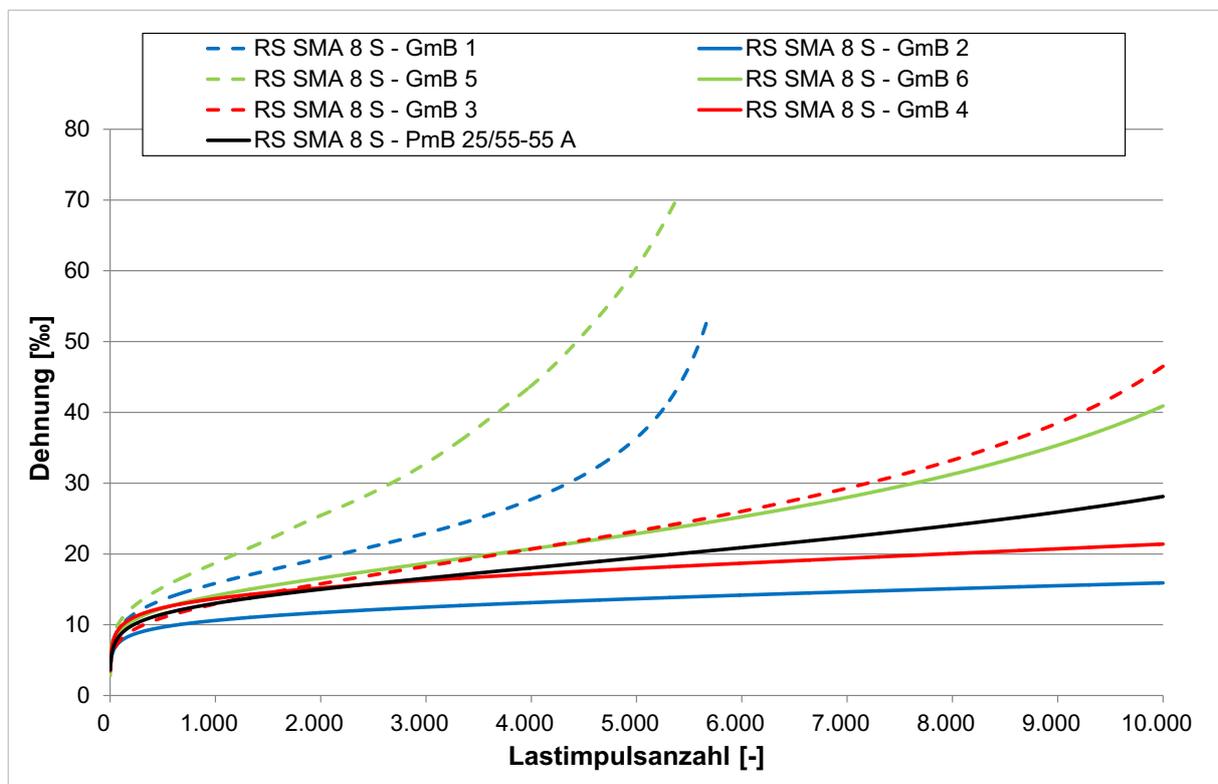


Abbildung 100: Impulskriechkurve für Rückstellproben (SMA 8 S)

Die statistisch ausgewerteten Kenngrößen Dehnungsrate und Lastimpulszahl sind für die Rückstellproben SMA 8 S in Abbildung 101 und Abbildung 102 zusammenfassend als Balkendiagramme dargestellt. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die Rückstellproben (SMA 8 S) sind der Tabelle 57 zusammengestellt.

Für die Rückstellproben SMA 8 S konnten hinsichtlich der ermittelten Dehnungsraten im Wendepunkt bzw. am Versuchsende signifikante Unterschiede festgestellt werden, wobei hier mit Ausnahme des RS-SMA 8 S mit GmB 5, die anderen Varianten alle einer homogenen Gruppe angehören. Die Auswertung der Lastimpulszahl im Wendepunkt bzw. am Versuchsende ergibt vier homogene Gruppen.

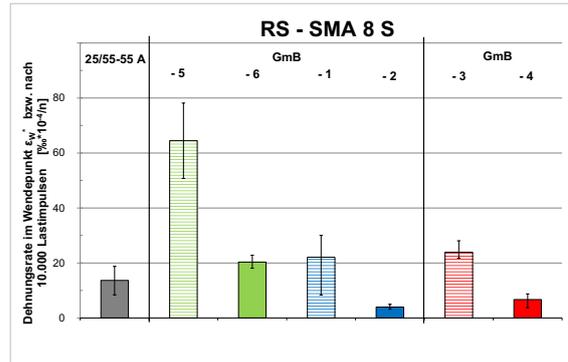


Abbildung 101: Dehnungsrate - Rückstellproben (SMA 8 S)

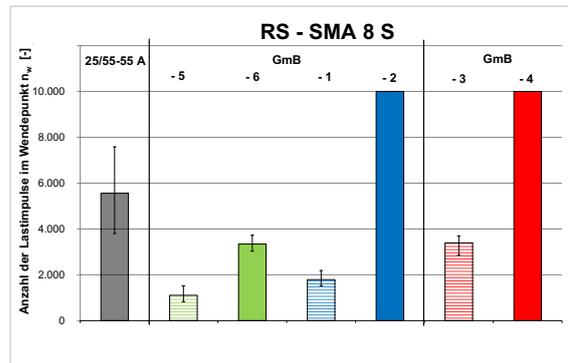


Abbildung 102: Lastimpulszahl im Wendepunkt - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 57: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Druck-Schwellversuchen (Rückstellproben (SMA 8 S))

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB),		einfache Varianzanalyse	LSD-Test GmB-2 (blue), GmB-6 (green), GmB-4 (red)		
RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6					
		1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe
Druck-schwellversuch	Dehnungsrate [$\% \cdot 10^{-4} / n$]	gering >>> hoch			
	Anzahl der Lastimpulse im Wendepunkt bzw. nach 10.000 Lastimpulsen [-]	hoch >>> gering			
		signifi.			
		signifi.			

Tabelle 58 sowie Abbildung 103 sind die Ergebnisse der Druck-Schwellversuche an den AC 11 D S Rückstellproben zu entnehmen. Die Impulskriechkurve für den AC 11 D S mit 45/80-55 weist einen Wendepunkt auf, die

Impulskriechkurve für den AC 11 D S mit GmB 7 hat keinen Wendepunkt.

Tabelle 58: Ergebnisse (Mittelwerte) der Einaxialen Druckschwellversuche für Rückstellproben (AC 11 D S)

Variante	Lastimpulszahl im Wendepunkt bzw. am Versuchsende $\dot{\epsilon}_W$ bzw. Ende [-]	Dehnung im Wendepunkt bzw. am Versuchsende ϵ_W bzw. Ende [‰]	Dehnungsrate im Wendepunkt bzw. am Versuchsende $\dot{\epsilon}_W^*$ bzw. Ende [‰ $\cdot 10^{-4}/n$]
RS – AC 11 D S – 45/80-55	4.818	18,81	8,59
RS – AC 11 D S – GmB 7	10.000	14,54	2,28

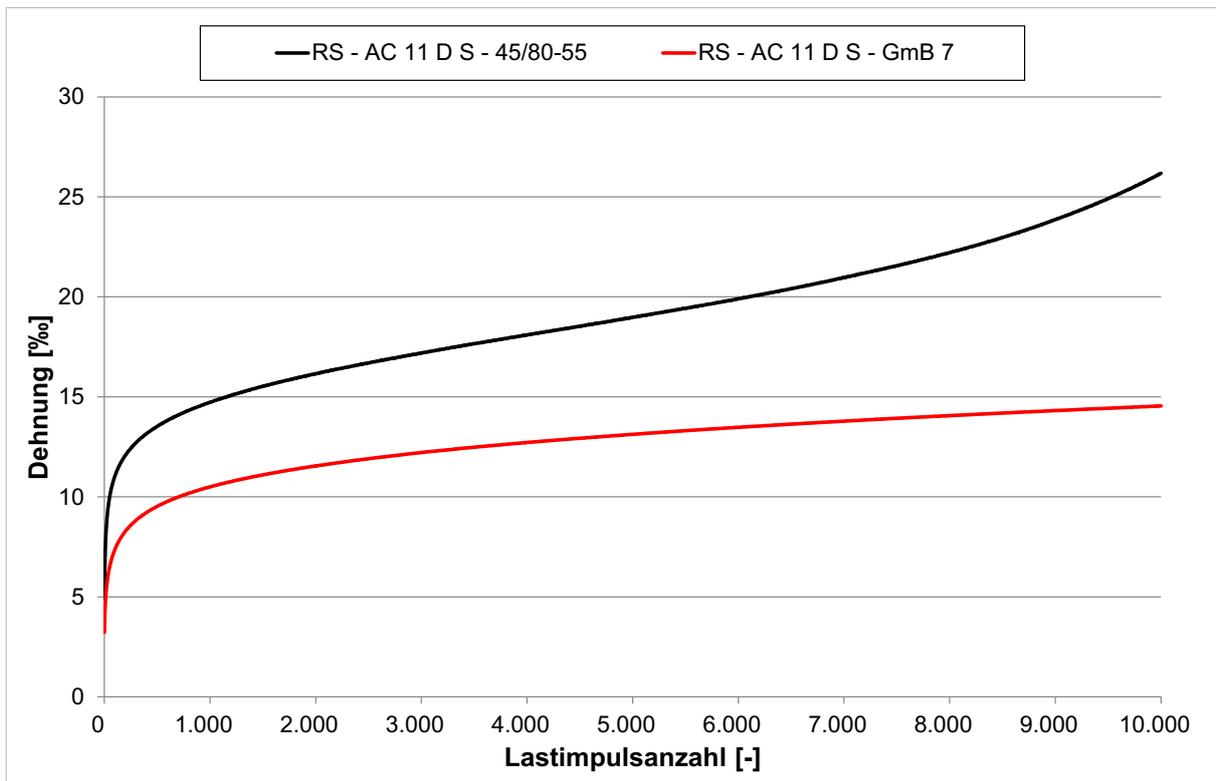


Abbildung 103: Impulskriechkurve für Rückstellproben (AC 11 D S)

Die Größen der Dehnungsrate sowie die Anzahl der Lastimpulse im Wendepunkt bzw. am Versuchsende sind für die beiden AC 11 D S- Rückstellproben in Abbildung 104 bzw. Abbildung 105 gegenübergestellt.

Anhand des einfachen Mittelwertvergleiches (Tabelle 59) werden anhand beider Kenngrößen signifikante Unterschiede zwischen dem AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel und dem AC 11 D S mit gummi-modifiziertem Bindemittel nachgewiesen.

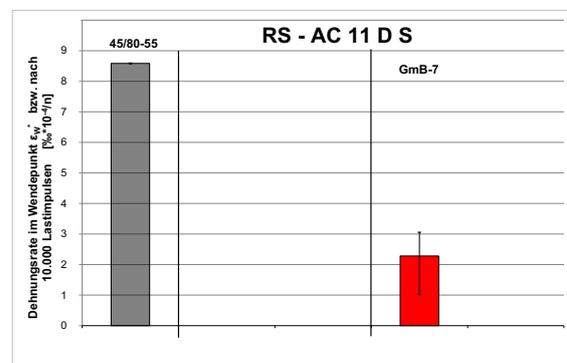


Abbildung 104: Dehnungsrate - Rückstellproben (AC 11 D S)

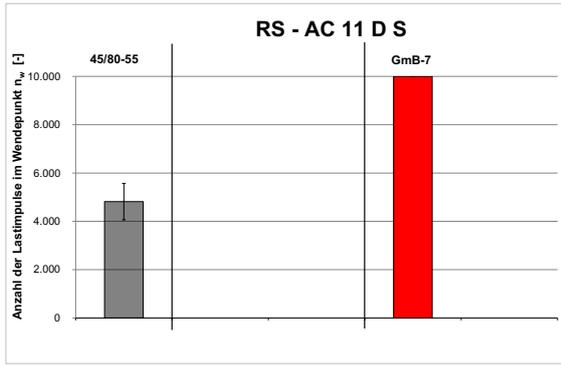


Abbildung 105: Lastimpulszahl im Wendepunkt - Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 59: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Druck-Schwellversuchen (Rückstellproben (AC 11 D S))

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB) RS - AC 11 D S mit GmB-7		einfacher Mittelwert- vergleich	Reihung Mittelwert PmB GmB-7
Druck- schwellversuch	Dehnungsrate [%*10 ⁻⁴ /n]	signifi.	gering >>> hoch
	Anzahl der Lastimpulse im Wendepunkt bzw. nach 10.000 Lastimpulsen [-]	signifi.	hoch >>> gering

Dynamischer Eindringversuch

Bei allen fünf untersuchten Offenporigen Asphalten wurde der Dynamische Eindringversuch vorzeitig, vor Erreichen von 10.000 Belastungszyklen, bei Erreichen einer Eindringtiefe von 5 mm beendet. Die Verformungskurven

sind in der Abbildung 106 dargestellt. Die Anzahl der aufgebrauchten Lastwechselanzahl bei einer Eindringtiefe von 5 mm kann der Tabelle 60 und der Abbildung 107 entnommen werden.

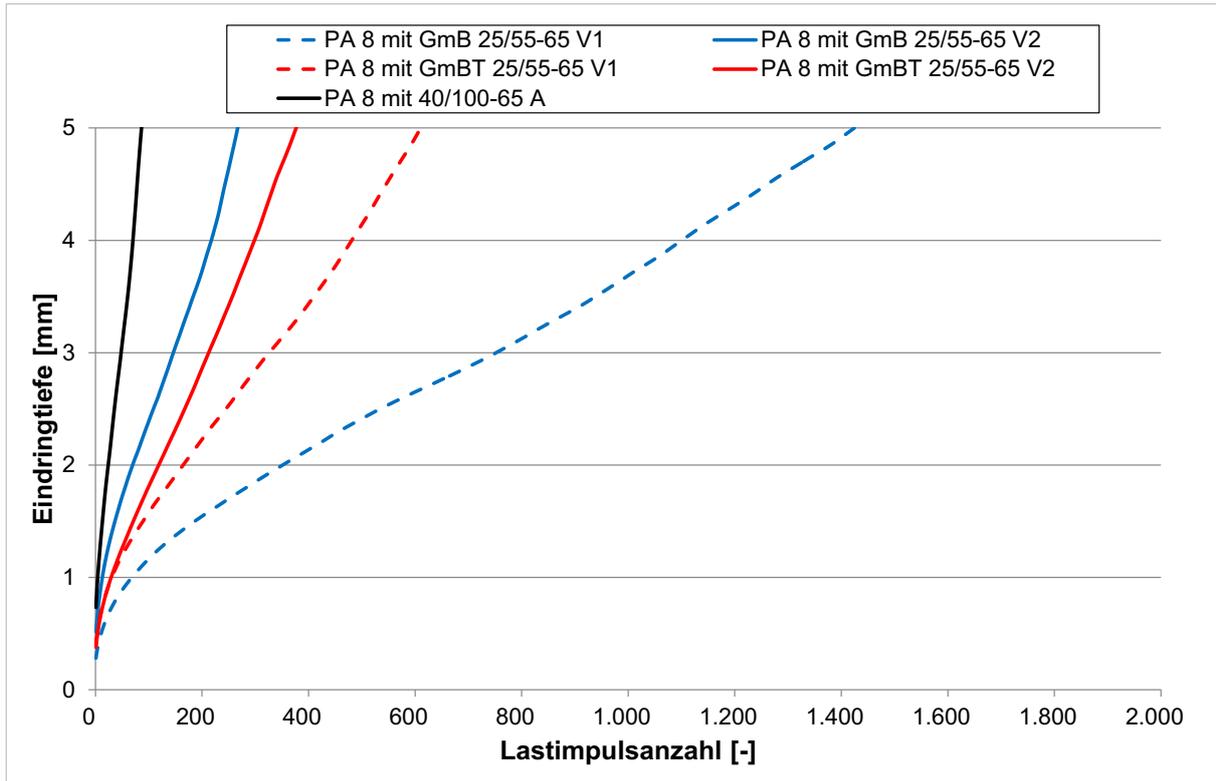


Abbildung 106: Verformungskurven (Dynamischer Eindringversuch) für PA 8

Tabelle 60: Ergebnisse (Mittelwerte) der Dynamischen Eindringversuche - PA 8

PA 8 mit	40/100-65 A	GmB 25/55-55 V1	GmB 25/55-55 V2	GmBT 25/55-55 V1	GmBT 25/55-55 V2
Lastwechselanzahl bei einer Eindringtiefe von 5 mm	117	1.405	267	617	425

Die Lastwechselanzahl bei einer Eindringtiefe von 5 mm wurde statistisch ausgewertet (Tabelle 61). Anhand der Lastwechselanzahl wurden signifikante Unterschiede zwischen den fünf PA 8-Varianten erkannt. Basierend auf den Ergebnissen des LSD-Tests ist der PA 8 mit GmB 25/55-65 V1 einer unterschiedlichen homogenen Gruppe zuzuordnen als die anderen vier Offenporigen Asphalte.

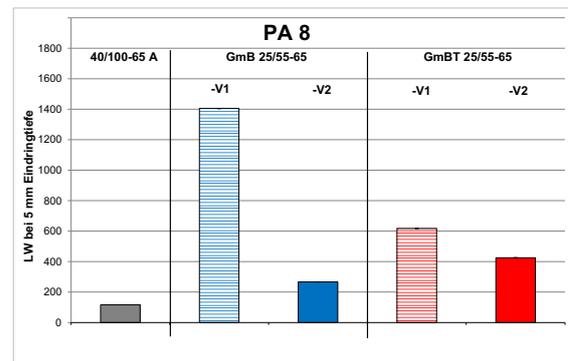


Abbildung 107: Lastwechselanzahl bei 5 mm Eindringtiefe - PA 8

Tabelle 61: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Dynamischen Eindringversuchen (PA 8)

PA 8 mit 40/100-65 A, GmB 25/55-65, GmBT 25/55-65		einfache Varianz- analyse				
			1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe
Dynamischer Eindringversuch	Anzahl Lastwechsel bei 5 mm Eindringt.	signifi.	hoch >>> gering			

4.2.5 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Verformungsverhaltens bei Wärme und der Dauerhaftigkeit (Spurbildungsversuch)

Spurbildungsversuche wurden an den im Labor hergestellten Asphalten der Sorten SMA 8 S und AC 16 B S sowie an den Rückstellproben (SMA 8 S, AC 11 D S) durchgeführt.

In der Tabelle 62 sind für die Splittmastixasphalte SMA 8 S die nach 20.000 Belastungszyklen ermittelten Werte für die absolute sowie für die proportionale Spurrinnentiefe angegeben. Weiter sind in der Abbildung 108 die Verläufe der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Belastungszyklen grafisch dargestellt. Die Spurrinnentiefe nimmt bei dem SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A mit Zunahme der Belastungszyklenanzahl proportional stärker (steiler) zu als die Varianten mit gummi-modifizierten Bindemitteln, was am Versuchende (20.000 Zyklen) auch einen größeren Wert für die absolute sowie für die proportionale Spurrinnentiefe zur Folge hat.

Die Verläufe der Spurrinnentiefe des SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1 und mit GmBT 25/55-55 V1 sowie die Verläufe der Spurrinnentiefe des SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V2 und mit GmBT 25/55-55 V2 sind jeweils sehr ähnlich.

Tabelle 62: Absolute und proportionale Spurrinnentiefe nach 20.000 Zyklen für SMA 8 S

SMA 8 S mit	absolute Spurrinnentiefe [mm]	proportionale Spurrinnentiefe [%]
25/55-55 A	3,9	9,6
GmB 25/55-55 V1	2,4	6,0
GmB 25/55-55 V2	1,9	4,8
GmBT 25/55-55 V1	2,4	5,9
GmBT 25/55-55 V2	1,9	4,7

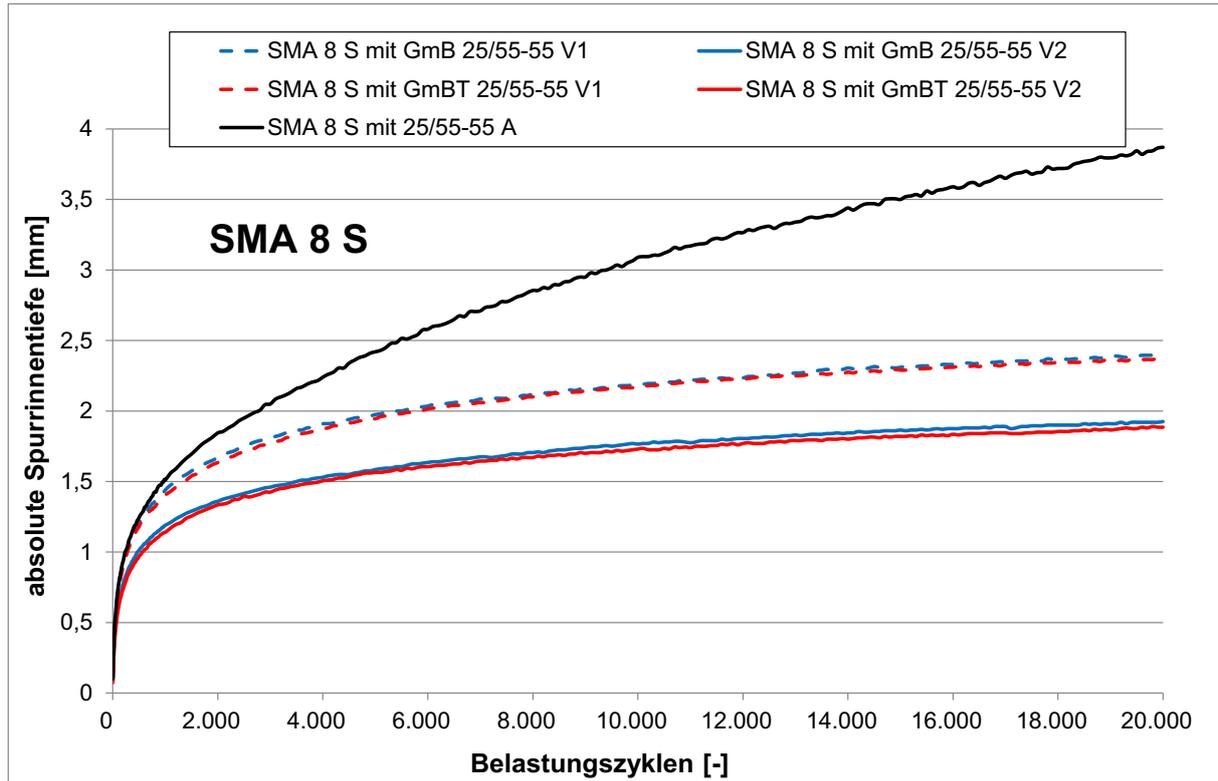


Abbildung 108: Verlauf der Spurrinntiefe für SMA 8 S

Der Tabelle 63 können für die Asphaltbinder AC 16 B S die Werte für die absolute und proportionale Spurrinntiefe nach 20.000 Zyklen entnommen werden. Die Abbildung 109 zeigt die zugehörigen Verläufe der Spurrinntiefe über den gesamten Versuch. Dabei weist der Asphaltbinder mit GmBT 25/55-55 V 2, gefolgt vom AC 16 B S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A tendenziell größere Spurrinntiefen gegenüber den weiteren drei Asphaltbindern mit gummi-modifizierten Bindemitteln auf.

Tabelle 63: Absolute und proportionale Spurrinntiefe nach 20.000 Zyklen für AC 16 B S

AC 16 B S mit	absolute Spurrinntiefe [mm]	proportionale Spurrinntiefe [%]
25/55-55 A	2,2	3,7
GmB 25/55-55 V1	1,5	2,5
GmB 25/55-55 V2	1,4	2,3
GmBT 25/55-55 V1	1,6	2,7
GmBT 25/55-55 V2	2,5	4,1

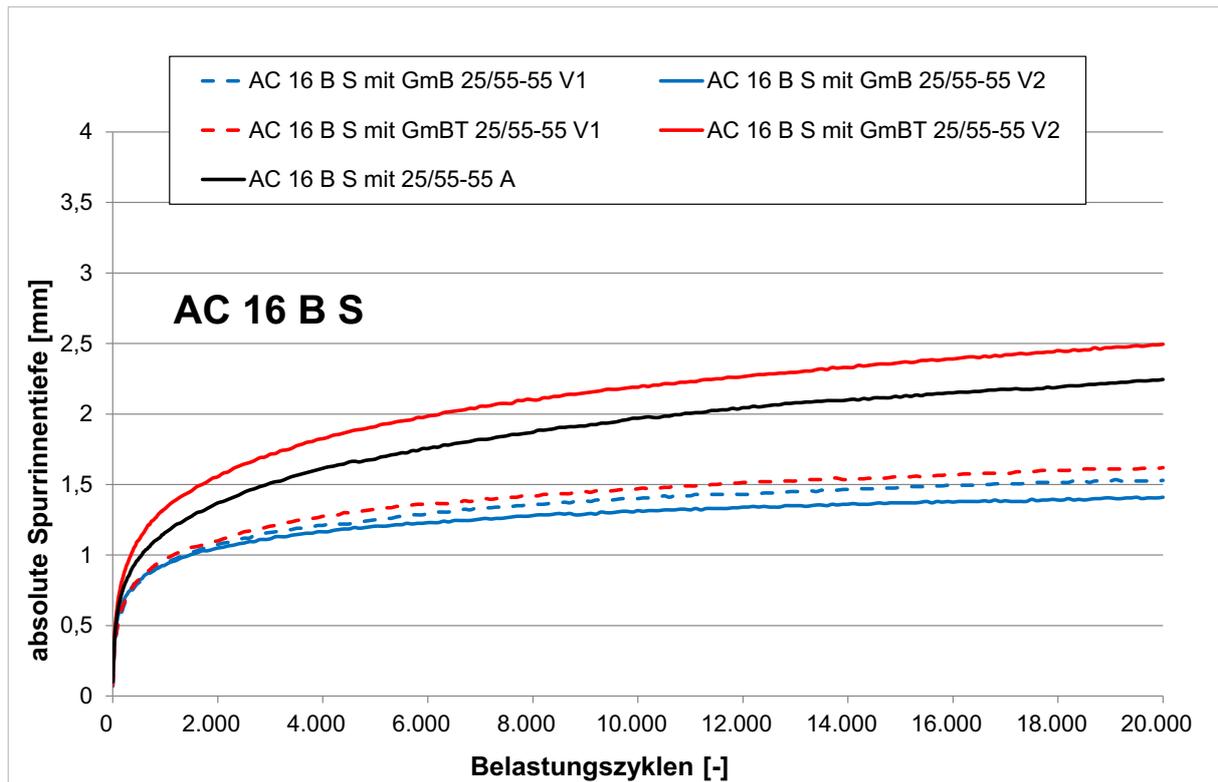


Abbildung 109: Verlauf der Spurrinnentiefe für AC 16 B S

In Abbildung 110 und Abbildung 111 sind die aus den Spurbildungsversuchen für die statistische Auswertung herangezogene Kenngröße „absolute Spurrinnentiefe nach 20.000 Zyklen“ zusammenfassend als Balkendiagramm dargestellt.

Bei den für die absolute Spurrinnentiefe ermittelten Werten können zwischen den fünf Splittmastixasphalten SMA 8 S signifikante Unterschiede festgestellt werden. Der SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A mit einem größeren Wert für die absolute Spurrinnentiefe ist einer anderen homogenen Gruppen als die vier SMA 8 S mit gummimodifizierten Bindemitteln zuzuordnen.

Zwischen fünf Asphaltbindern mit polymermodifiziertem Bindemittel und gummimodifizierten Bindemitteln gibt es keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Werte der absoluten Spurrinnentiefe.

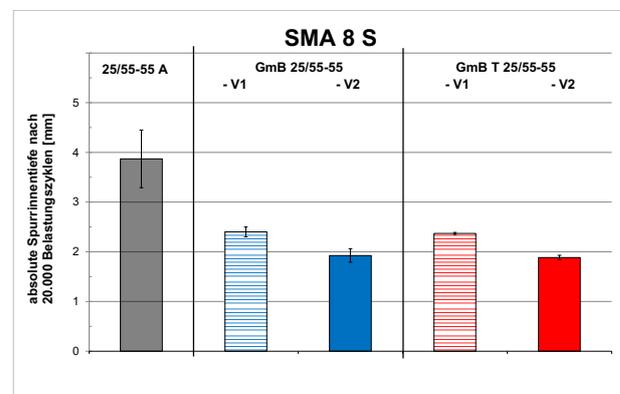


Abbildung 110: Absolute Spurrinnenriefe am Versuchsende - SMA 8 S

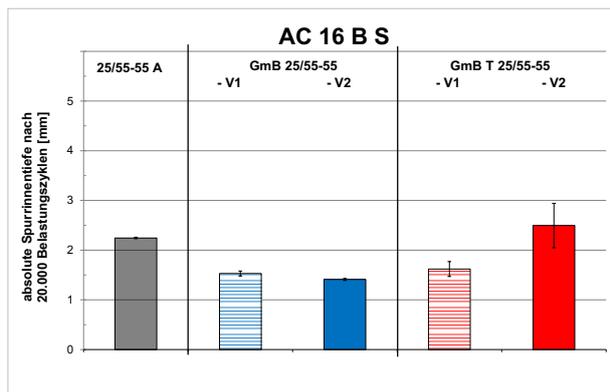


Abbildung 111: Absolute Spurrinnentiefe am Versuchsende - AC 16 B S

Tabelle 64: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Spurbildungsversuchen (SMA 8 S, AC 16 B S)

SMA 8 S mit 25/55-55 A, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55 AC 16 B S mit 25/55-55 A, GmB 25/55-55, GmBT 25/55-55		einfache Varianzanalyse	LSD-Test			
			PmB	GmB V1 GmBT V1	GmB V2 GmBT V2	
			1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe
			gering >>> hoch			
Spurbildungsversuch	SMA 8 S Spurrinnentiefe [mm]	signifi.	■	■	■	
	AC 16 B S Spurrinnentiefe [mm]	n. signifi.	■	■	■	

Die für die Rückstellproben SMA 8 S ermittelten Werte für die absolute Spurrinnentiefe und die proportionale Spurrinnentiefe am Versuchsende (20.000 Zyklen) sind in der Tabelle 65 zusammengefasst. Der Verlauf der Spurrinnentiefe in Abhängigkeit der Belastungszyklen ist in der Abbildung 112 grafisch dargestellt. Der SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A weist die vergleichsweise geringsten Werte für die absolute Spurrinnentiefe auf.

Tabelle 65: Absolute und proportionale Spurrinnentiefe nach 20.000 Zyklen für Rückstellproben(SMA 8 S)

RS – SMA 8 S mit	absolute Spurrinnentiefe [mm]	proportionale Spurrinnentiefe [%]
25/55-55 A	1,5	3,5
GmB 1	2,2	5,5
GmB 2	1,8	4,4
GmB 3	2,3	5,7
GmB 4	2,5	6,2
GmB 5	1,9	4,4
GmB 6	2,0	4,7

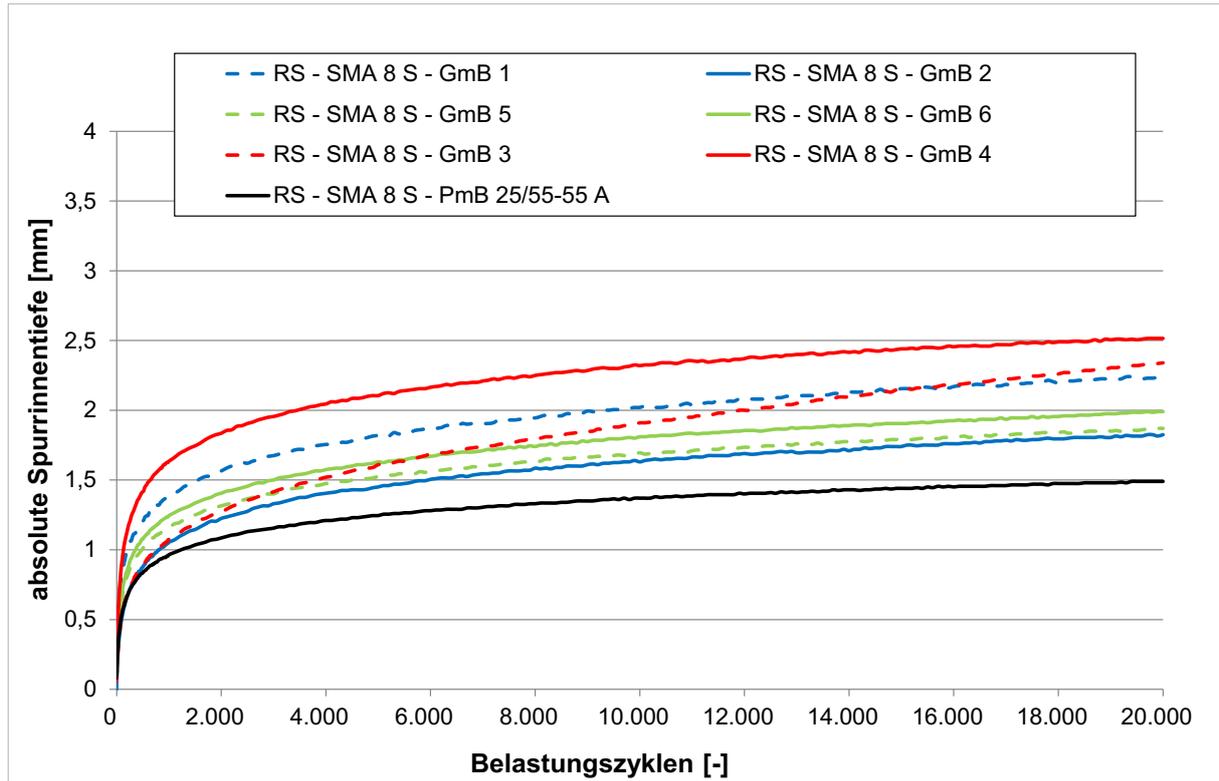


Abbildung 112: Verlauf der Spurrinnentiefe für Rückstellproben (Rückstellproben (SMA 8 S))

In der Abbildung 113 sind die an den Rückstellproben SMA 8 S ermittelten Werte für die absolute Spurrinnentiefe nach 20.000 Zyklen, für die statistische Auswertung (Tabelle 66) zusammengefasst. Anhand der angewandten mathematischen Verfahren können signifikante Unterschiede hinsichtlich der Kenngröße absolute Spurrinnentiefe zwischen den sieben Rückstellproben mit polymermodifiziertem Bindemittel und gummi-modifizierten Bindemitteln festgestellt werden und eine Einteilung in zwei unterschiedliche homogene Gruppe vorgenommen werden. Signifikante Unterschiede zwischen der Variante mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A und den Varianten mit gummi-modifizierten Bindemitteln gibt es nicht.

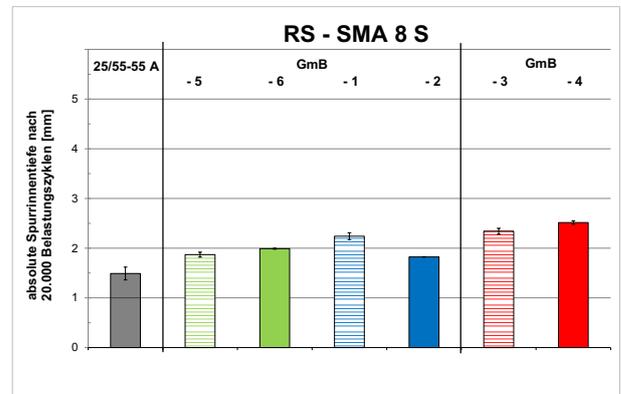


Abbildung 113: Absolute Spurrinnentiefe am Versuchsende - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 66: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Spurbildungsversuchen (Rückstellproben (SMA 8 S))

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB), RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6	einfache Varianz- analyse	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> PmB </div> <div style="text-align: center;"> GmB-1 GmB-5 GmB-3 </div> <div style="text-align: center;"> GmB-2 GmB-6 GmB-4 </div> </div>	LSD-Test
Spurbildung	signifi.	<div style="display: flex; justify-content: space-between; width: 100%;"> <div style="width: 25%; text-align: center;">1. Gruppe</div> <div style="width: 25%; text-align: center;">2. Gruppe</div> <div style="width: 25%; text-align: center;">3. Gruppe</div> <div style="width: 25%; text-align: center;">4. Gruppe</div> </div>	gering >>> hoch

In Tabelle 67 und Abbildung 114 sind die Ergebnisse der Spurbildungsversuche an den Rückstellproben AC 11 D S dargestellt.

Tabelle 67: Absolute und proportionale Spurrinnentiefe nach 20.000 Zyklen für Rückstellproben(AC 11 D S)

RS – AC 11 D S mit	absolute Spurrinnentiefe [mm]	proportionale Spurrinnentiefe [%]
45/80-55	2,5	6,0
GmB 7	1,9	4,5

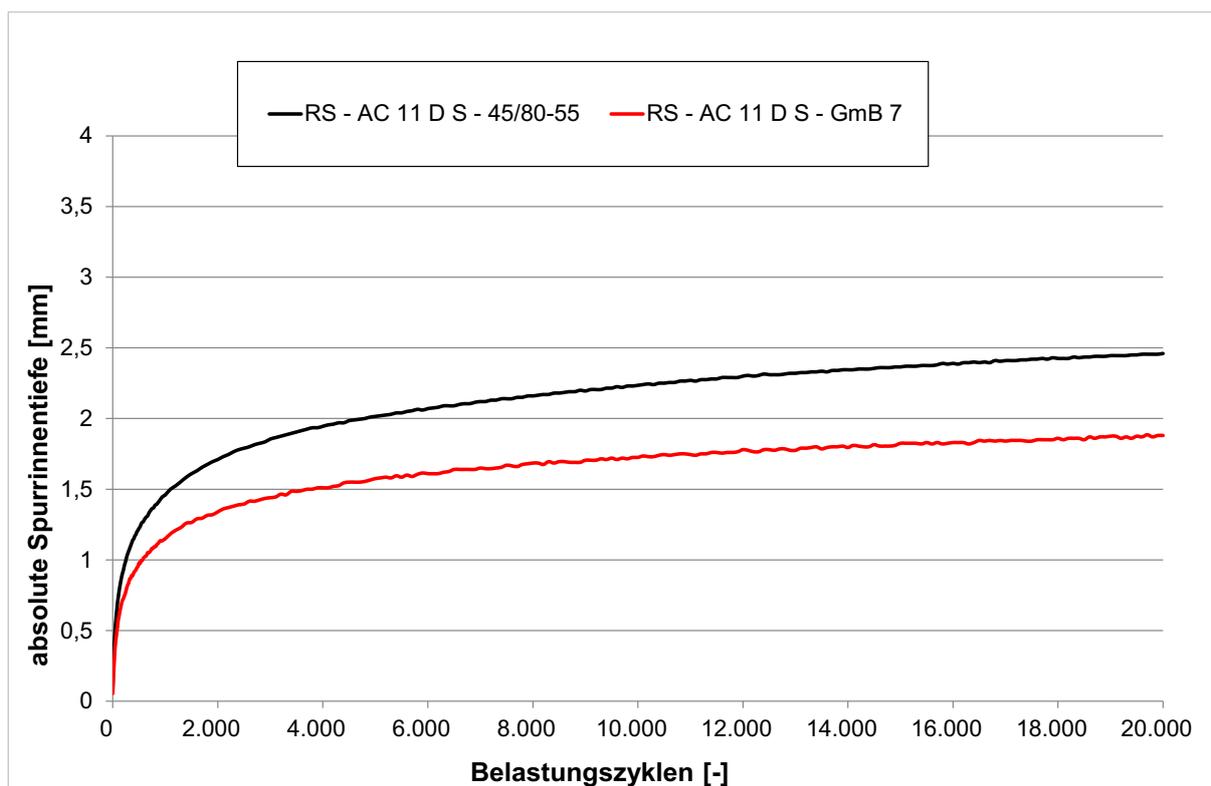


Abbildung 114: Verlauf der Spurrinnentiefe für Rückstellproben (AC 11 DS)

Für die Kenngröße absolute Spurrinnentiefe wird ein einfacher Mittewertvergleich durchgeführt, aus dem hervorgeht, dass es signifikante Unterschiede zwischen dem AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel 45/80-55 und mit gummi-modifiziertem Bindemittel (GmB 7) gibt. Der Wert für die absolute Spurrinnentiefe ist beim AC 11 D S mit GmB 7 geringer.

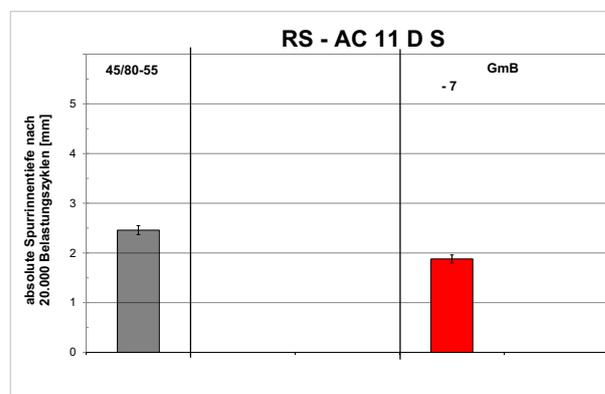


Abbildung 115: Absolute Spurrinnentiefe am Versuchsende - Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 68: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Spurbildungsversuchen (Rückstellproben (AC 11 D S))

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB)	einfacher Mittelwert- vergleich	Reihung Mittelwert	
RS - AC 11 D S mit GmB-7		 PmB	 GmB-7
		gering >>> hoch	
Spurbildung Spurrinntiefe [mm]	signifi.		

4.2.6 Ergebnisse zur Ermittlung des Kornverlusts

Für die im Labor hergestellten Asphalte (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8) sind Tabelle 69 bis Tabelle 71 sowie Abbildung 116 bis Abbildung 118 die ermittelten prozentualen Werte für den Kornverlust zu entnehmen.

Tabelle 69: Kornverlust für SMA 8 S

SMA 8 S mit	Kornverlust [%]
25/55-55 A	3,02
GmB 25/55-55 V1	2,16
GmB 25/55-55 V2	3,46
GmBT 25/55-55 V1	2,04
GmBT 25/55-55 V2	3,60

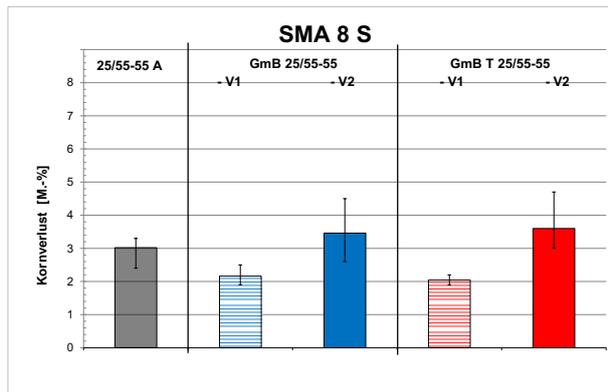


Abbildung 116: Kornverlust - SMA 8 S

Tabelle 70: Kornverlust für AC 16 B S

AC 16 B S mit	Kornverlust [%]
25/55-55 A	5,22
GmB 25/55-55 V1	6,24
GmB 25/55-55 V2	3,85
GmBT 25/55-55 V1	5,40
GmBT 25/55-55 V2	5,34

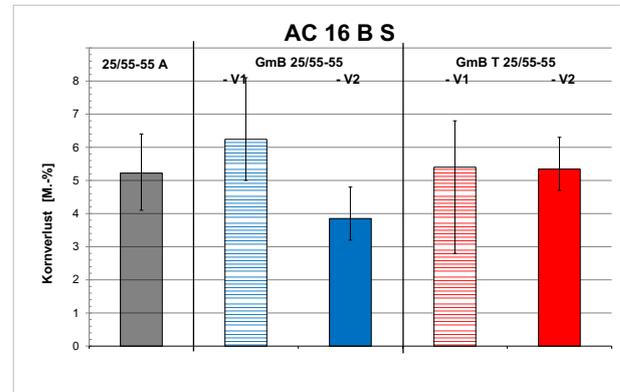


Abbildung 117: Kornverlust - AC 16 B S

Tabelle 71: Kornverlust für PA 8

PA 8 mit	Kornverlust [%]
40/100-65 A	13,26
GmB 25/55-65 V1	20,82
GmB 25/55-65 V2	23,80
GmBT 25/55-65 V1	10,30
GmBT 25/55-65 V2	18,38

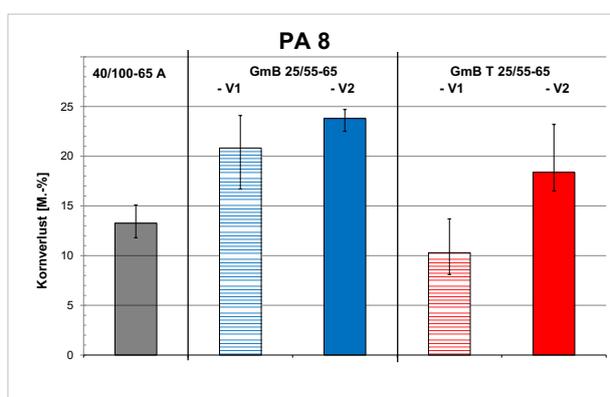


Abbildung 118:Kornverlust - PA 8

Anhand der Ergebnisse der statischen Auswertung (Tabelle 72) kann konstatiert werden, dass es hinsichtlich der Kenngröße Kornverlust signifikante Unterschiede zwischen den fünf untersuchten Splittmastixasphalten SMA 8 S gibt und diese in zwei unterschiedliche homogene Gruppen eingeteilt werden können. Es können jedoch weder zwischen den Varianten mit gummodifizierten Bindemitteln und der Variante mit polymermodifiziertem Bindemittel signifikante Unterschiede erkannt werden, noch zwischen den Varianten mit gummodifiziertem Bindemittel, die im Nassverfahren bzw. „im Trockenverfahren“ hergestellt wurden.

Bei den Asphaltbindern AC 16 B S sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Werten für den Kornverlust nachzuweisen.

Für den Kornverlust beim PA 8 werden signifikante Unterschiede zwischen den fünf Varianten festgestellt und es kann eine Einteilung in zwei unterschiedliche Gruppen basierend auf dem Ergebnis des LSD-Tests vorgenommen werden. Auch hier gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Offenporigen Asphaltten mit polymermodifiziertem bzw. gummodifizierten Bindemitteln sowie in Abhängigkeit der Herstellung des gummodifizierten Bindemittels.

Tabelle 72: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Kornverluste - SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8

SMA 8 S mit 25/55-55 A , GmB 25/55-55 , GmBT 25/55-55 AC 16 B S mit 25/55-55 A , GmB 25/55-55 , GmBT 25/55-55 PA 8 mit 40/100-65 A , GmB 25/55-65 , GmBT 25/55-65		einfache Varianzanalyse	LSD-Test					
			PmB	GmB V1	GmB V2			
				GmBT V1	GmBT V2			
			1. Gruppe		2. Gruppe		3. Gruppe	4. Gruppe
			gering >>> hoch					
Kornverlust	SMA 8 S Kornverlust [M.-%]	signifi.	[Legend: PmB, GmB V1, GmBT V1, GmB V2, GmBT V2]					
	AC 16 B S Kornverlust [M.-%]	n. signifi.	[Legend: PmB, GmB V1, GmBT V1, GmB V2, GmBT V2]					
	PA 8 Kornverlust [M.-%]	signifi.	[Legend: PmB, GmB V1, GmBT V1, GmB V2, GmBT V2]					

Tabelle 73 und Abbildung 119 sind die Werte für den Kornverlust der Splittmastixasphalt-Rückstellproben SMA 8 S zu entnehmen.

Aus den zugehörigen Ergebnissen der statistischen Auswertung (Tabelle 74) geht hervor, dass es zwischen den Werten der sieben untersuchten Rückstellproben für den Kornverlust signifikante Unterschiede gibt und diese in zwei unterschiedliche homogene Gruppen mit vier bzw. drei Varianten einteilt werden können. Signifikante Unterschiede zwischen den

Rückstellproben mit gummodifizierten Bindemitteln und der Probe mit polymermodifiziertem Bindemittel 25/55-55 A gibt es somit nicht.

Tabelle 73: Kornverlust für Rückstellproben (SMA 8 S)

Variante	Kornverlust [%]
RS – SMA 8 S – 25/55-55 A	4,42
RS – SMA 8 S – GmB 1	2,12
RS – SMA 8 S – GmB 2	4,10
RS – SMA 8 S – GmB 3	2,54
RS – SMA 8 S – GmB 4	2,82
RS – SMA 8 S – GmB 5	2,92
RS – SMA 8 S – GmB 6	4,16

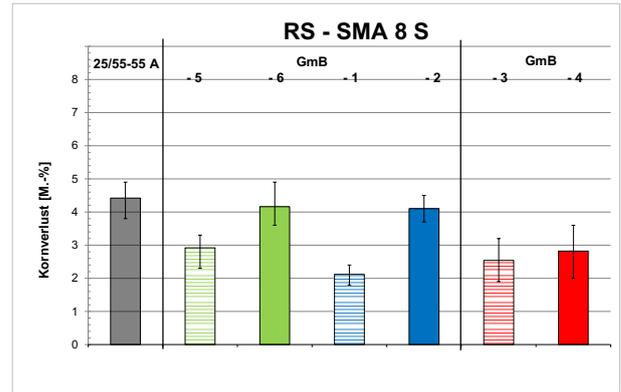


Abbildung 119: Kornverlust - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 74: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Kornverluste - Rückstellproben (SMA 8 S)

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB), RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6	einfache Varianz- analyse	<table border="0"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>1. Gruppe</td> <td>2. Gruppe</td> <td>3. Gruppe</td> <td>4. Gruppe</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>									1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe			LSD-Test
	1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe													
Kornverlust	Kornverlust [M.-%]	signifi.	gering >>> hoch														

Für die Rückstellproben AC 11 D S sind die Werte für den Kornverlust in Tabelle 75 und Abbildung 120 zusammengestellt.

Der einfache Mittelwertvergleich für den Kornverlust der beiden Rückstellproben AC 11 D S ergibt, dass es signifikante Unterschiede zwischen dem AC 11 D S mit polymermodifiziertem Bindemittel 45/80-55 und dem AC 11 D S mit gummi-modifiziertem Bindemittel (GmB 7) gibt, wobei der Kornverlust beim AC 11 D S mit GmB 7 signifikant geringer ist.

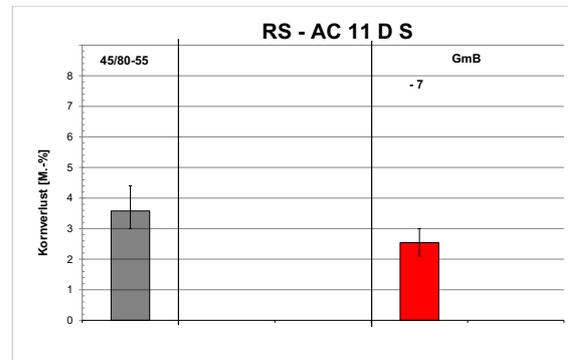


Abbildung 120: Kornverlust - Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 75: Kornverlust für Rückstellproben (AC 11 D S)

Variante	Kornverlust [%]
RS – AC 11 D S – 45/80-55	3,58
RS – AC 11 D S – GmB 7	2,54

Tabelle 76: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Kornverlust - Rückstellproben (AC 11 D S)

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB)	einfacher Mittelwert- vergleich	Reihung Mittelwert	
RS - AC 11 D S mit GmB-7		PmB	GmB-7
Kornverlust	Kornverlust [M.-%]	gering >>> hoch	
		 	

4.2.7 Ergebnisse zur Ermittlung des Substanzverlusts am Offenporigen Asphalt

Darmstadt Scuffing Device (DSD)

Die für die fünf Offenporigen Asphalte PA 8 ermittelten Werte für den Substanzverlust mittels DSD-Verfahren sind in Tabelle 77 und Abbildung 121 dargestellt. Die statistische Auswertung (Tabelle 78) dieser Werte ergibt, dass es signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten PA 8 gibt, wobei anhand des LSD-Tests eine Einteilung in zwei unterschiedliche homogene Gruppen vorgenommen werden kann. Der PA 8 mit polymermodifiziertem Bindemittel 40/100-65 A gehört dabei zusammen mit dem PA 8 mit GmB 25/55-65 V1 der homogenen Gruppe mit signifikant geringeren Werten für den Substanzverlust an.

Tabelle 77: Substanzverlust (DSD) für PA 8

Variante	Substanzverlust [g]
PA 8 mit 40/100-65 A	197,5
PA 8 mit GmB 25/55-65 V1	140,8
PA 8 mit GmB 25/55-65 V2	261,6
PA 8 mit GmBT 25/55-65 V1	288,4
PA 8 mit GmBT 25/55-65 V2	289,1

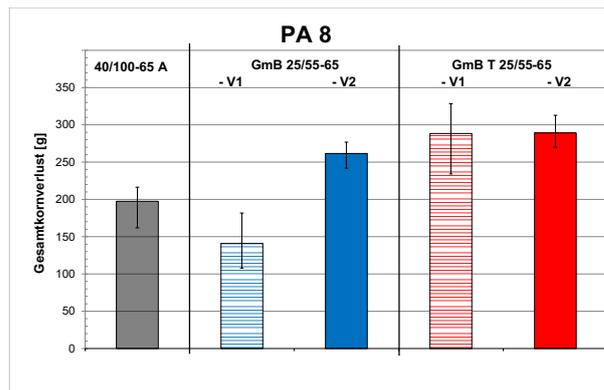


Abbildung 121: Substanzverlust (DSD) - PA 8

Tabelle 78: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Substanzverlust (DSD) - PA 8

PA 8 mit 40/100-65 A, GmB 25/55-65, GmBT 25/55-65		einfache Varianz- analyse	LSD-Test															
			1. Gruppe				2. Gruppe				3. Gruppe				4. Gruppe			
Substanz- verlust	Testverfahren DSD	signifi.	gering >>> hoch															

Aachener Raveling Tester (ARTE)

Die mit dem ARTE bestimmten Werte für den Substanzverlust können Tabelle 79 und Abbildung 122 entnommen werden. Anhand der Ergebnisse der statistischen Auswertung ist zu konstatieren, dass es signifikante Unterschiede zwischen den Werten für den Kornverlust zwischen dem PA 8 mit polymermodifiziertem Bindemittel 40/100-65 A und den vier PA 8-Varianten mit gummi-modifizierten Bindemitteln gibt. Der PA 8 mit 40/100-65 A ist nach Durchführung des LSD-Tests mit dem geringsten Wert für den Substanzverlust allein einer homogenen Gruppe zuzuordnen. Die vier Offenporigen Asphalte mit gummi-modifizierten Bindemitteln gehören alle gemeinsam einer weiteren homogenen Gruppe an.

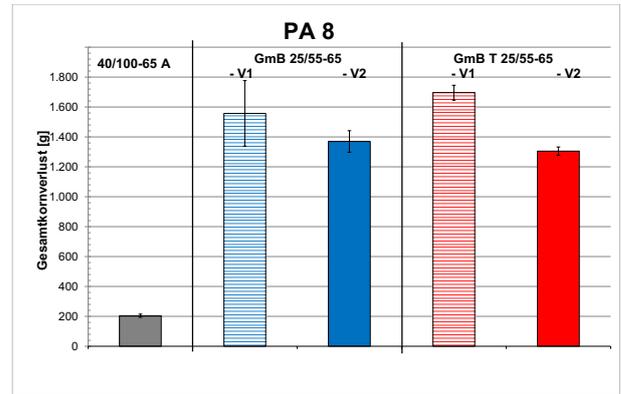
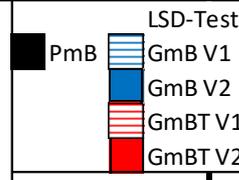
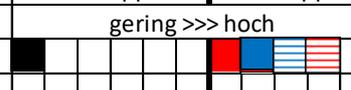


Abbildung 122: Substanzverlust (ARTE) - PA 8

Tabelle 79: Substanzverlust (ARTE) für PA 8

Variante	Substanz- verlust [g]
PA 8 mit 40/100-65 A	204,1
PA 8 mit GmB 25/55-65 V1	1556,8
PA 8 mit GmB 25/55-65 V2	1369,7
PA 8 mit GmBT 25/55-65 V1	1695,4
PA 8 mit GmBT 25/55-65 V2	1305,1

Tabelle 80: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Substanzverlust (ARTe) - PA 8

PA 8 mit 40/100-65 A, GmB 25/55-65, GmBT 25/55-65		einfache Varianz- analyse																
				1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe											
Substanz- verlust	Testverfahren ARTe	signifi.	gering >>> hoch															
																		

4.2.8 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ansprache des Griffigkeitsverhaltens

In Tabelle 81 bis Tabelle 83 und Abbildung 123 bis Abbildung 125 sind die ermittelten SRT-Werte für die im Labor hergestellten Asphaltvarianten der Sorten SMA 8 S, AC 16 B S und PA 8 zusammengefasst.

Tabelle 81: Ergebnisse der SRT-Messung für SMA 8 S

SMA 8 S mit	SRT-Wert [SRT-Einheiten]
25/55-55 A	74
GmB 25/55-55 V1	77
GmB 25/55-55 V2	79
GmBT 25/55-55 V1	73
GmBT 25/55-55 V2	81

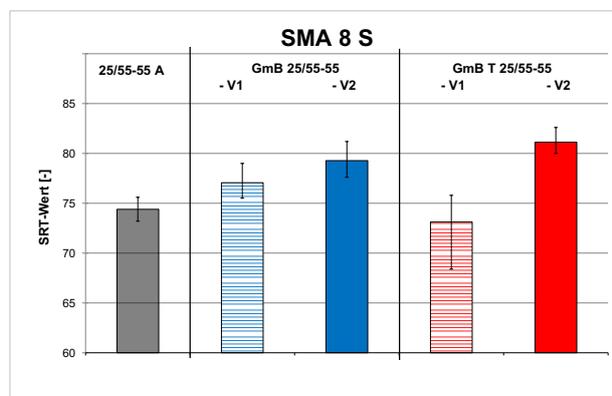


Abbildung 123: SRT-Werte - SMA 8 S

Tabelle 82: Ergebnisse der SRT-Messung für AC 16 B S

AC 16 B S mit	SRT-Wert [SRT-Einheiten]
25/55-55 A	71
GmB 25/55-55 V1	82
GmB 25/55-55 V2	81
GmBT 25/55-55 V1	77
GmBT 25/55-55 V2	80

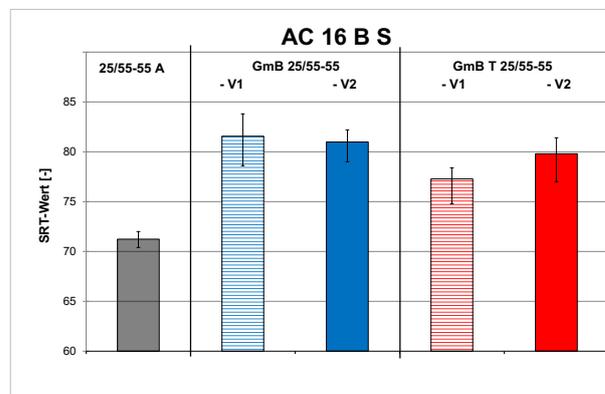


Abbildung 124: SRT-Werte - AC 16 B S

Tabelle 85: Ergebnisse der SRT-Messung für SMA 8 S (Rückstellproben)

RS – SMA 8 S mit	SRT-Wert [SRT-Einheiten]
25/55-55 A	72
GmB 1	67
GmB 2	70
GmB 3	72
GmB 4	70
GmB 5	74
GmB 6	75

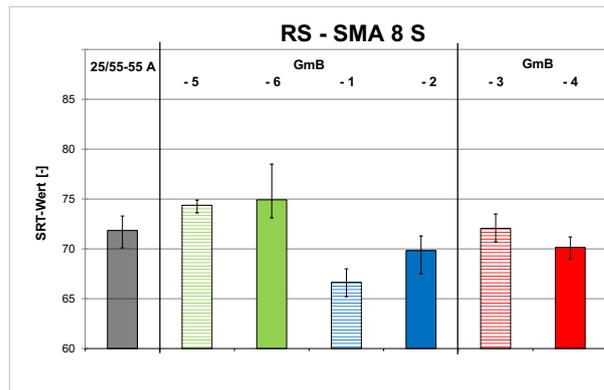


Abbildung 126: SRT-Werte - Rückstellproben (SMA 8 S)

Tabelle 86: Ergebnisse der statistischen Auswertung für SRT-Werte (Rückstellproben (SMA 8 S))

RS - SMA 8 S mit 25/55-55 A (PmB), RS - SMA 8 S mit GmB-1 bis -6	einfache Varianz- analyse	LSD-Test			
		1. Gruppe	2. Gruppe	3. Gruppe	4. Gruppe
Griffigkeit	signifi.	hoch >>> gering			

Aus Tabelle 87 und Abbildung 127 sind die SRT-Werte für die beiden Rückstellproben AC 11 D S zu entnehmen. Anhand des einfachen Mittelwertvergleichs sind die SRT-Werte für den RS - AC 11 D S mit 45/80-55 und für den RS - AC 11 D S mit GmB 7 als signifikant unterschiedlich einzustufen. Dabei ist der SRT-Wert für den RS - AC 11 D S mit GmB 7 signifikant größer.

Tabelle 87: Ergebnisse der SRT-Messung für Rückstellproben (AC 11 D S)

RS - AC 11 D S mit	SRT-Wert [SRT-Einheiten]
45/80-55	73
GmB 7	78

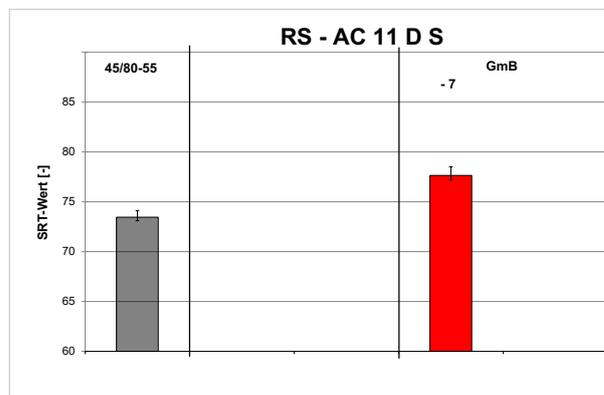


Abbildung 127: SRT- Werte - Rückstellproben (AC 11 D S)

Tabelle 88: Ergebnisse der statistischen Auswertung für SRT-Werte (Rückstellproben (AC 11 D S))

RS - AC 11 D S mit 45/80-55 (PmB) RS - AC 11 D S mit GmB-7	einfacher Mittelwert- vergleich	Reihung Mittelwert ■ PmB ■ GmB-7
Griffigkeit SRT [-]	signifikant	hoch >>> gering ■ ■

4.2.9 Auswirkung der Verwendung gummi-modifizierter bzw. polymermodifizierter Bindemittel auf die Nutzungsdauer

Zur Abschätzung des Einflusses auf die Nutzungsdauer bei Verwendung von Asphalten mit gummi- bzw. mit polymermodifiziertem Bindemittel in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht wird eine Beispielrechnung (rechnerische Dimensionierung gemäß RDO Asphalt 09) mit der Software „PaDesTo - Dimensionierung von Asphaltbefestigungen für Verkehrsflächen [3]“ durchgeführt.

Als Verkehrsbelastung werden 50,0 Mio. äquivalente 10 t-Achsübergänge angesetzt. Entsprechend der Verkehrsbelastung wird folgender Regelaufbau gemäß RStO 12 für eine Belastungsklasse Bk100 gewählt:

- 4 cm Asphaltdeckschicht
- 8 cm Asphaltbinderschicht
- 22 cm Asphalttragschicht

Für den frostsicheren Oberbau wird eine Dicke von 80 cm angenommen. Weiter werden folgende Verformungskennwerte auf den ungebundenen Schichten angesetzt:

$$E_{v2, FSS} = 120 \text{ MPa}$$

$$E_{v2, Planum} = 45 \text{ MPa}$$

Weiter wird Zone 1 gemäß Temperaturzonenkarte (RDO Asphalt 09) angenommen.

Es wird der Ermüdungsstatus für vier Aufbauvarianten berechnet:

1. SMA 8 S mit 25/55-55 A
AC 16 B S mit 25/55-55 A
2. SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V1
AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V1
3. SMA 8 S mit GmB 25/55-55 V2
AC 16 B S mit GmB 25/55-55 V2

4. Kalibrierasphalt der Asphaltdeckschicht gemäß RDO Asphalt 09
Kalibrierasphalt der Asphaltbinderschicht gemäß RDO Asphalt 09

Für die Asphalttragschicht wird bei allen vier Aufbauten immer der Kalibrierasphalt der Asphalttragschicht gemäß RDO Asphalt 09 verwendet.

Aus der Tabelle 89 können für die vier Aufbauvarianten die unter Berücksichtigung der zuvor genannten Randbedingungen/ Eingangswerte ermittelten Werte für den Ermüdungsstatus des Asphaltes entnommen werden.

Tabelle 89: Ermüdungsstatus Asphalt

Aufbau / Bindemittel	Ermüdungsstatus [%]
1. 25/55-55 A	95,9
2. GmB 25/55-55 V1	75,2
3. GmB 25/55-55 V2	91,0
4. <i>Kalibrierasphalte</i>	116,9

Im Vergleich zum „Kalibrier“-Aufbau (4) können für den Aufbau 1 mit polymermodifiziertem Bindemittel in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht sowie für die Aufbauten 2 und 3 mit gummi-modifiziertem Bindemittel in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht jeweils geringere Werte für den Ermüdungsstatus des Asphaltes ermittelt werden.

An dieser Stelle sei darauf hinzuweisen, dass bei den Dimensionierungsberechnungen zum Nachweis „Ermüdung Asphalt“ hier ausschließlich der Einfluss der Performance-Eigenschaften „Steifigkeit“ von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten berücksichtigt wird.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Asphalten mit gummimodifizierten Bindemitteln und mit polymermodifiziertem Bindemittel vergleichend untersucht. Dafür wurden Untersuchungen zur Ansprache des Kälteverhaltens, des Steifigkeitsverhaltens, des Ermüdungsverhaltens und des Verformungsverhaltens bei Wärme sowie zur Ermittlung des Korn- und Substanzverlust und zum Griffigkeitsverhalten durchgeführt.

Dafür wurden im Laboratorium Asphalte der Sorten SMA 8 S, AC 16 B S und PA 8 jeweils mit vier gummimodifizierten Bindemitteln und einem polymermodifiziertem Bindemittel hergestellt.

Als gummimodifizierte Bindemittel wurden jeweils zwei im Nassverfahren (im Großmaßstab) hergestellte Fertigprodukte (GmB) und zwei im Laboratorium „im Trockenverfahren“ gemischte gummimodifizierte Bindemittel (GmBT) (Vorgehen vgl. Kapitel 2.1.1) verwendet.

An den für die Labormischungen eingesetzten Bindemitteln wurden konventionelle Bindemittelkenndaten ermittelt sowie das Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR) und zum Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (DSR) bestimmt.

Weiterhin wurden durch den Auftraggeber überreichte Rückstellproben untersucht. Dabei handelte es sich um sieben Proben der Asphaltmischgutsorten SMA 8 S (6 Varianten mit GmB(T) und 1 Variante mit PmB) sowie zwei Rückstellproben der Sorte AC 11 D S (1 Variante mit GmB(T) und 1 Variante mit PmB).

Die Ergebnisse der Asphaltuntersuchungen sind in dem Kapitel 4.2 dargestellt. Im Hinblick auf eine Bewertung der einzelnen Asphalteeigenschaften bzw. ermittelten Kenngrößen wurden mathematisch-statistische Verfahren (einfache Varianzanalyse mit nachgeschaltetem LSD-Test bzw. einfacher Mittelwertvergleich) angewandt.

Signifikante Unterschiede zwischen den Asphalten einer Sorte wurden beispielsweise bei den Kälteeigenschaften festgestellt, wobei hier sowohl bei den Splittmastixasphalten SMA 8 S als auch bei den Asphaltbindern AC 16 B S

jeweils die Variante mit dem gummimodifiziertem Bindemittel GmBT 25/55-55 V1 ein günstigeres Kälteverhalten (z.B. signifikant geringste Bruchtemperatur) gegenüber den weiteren Varianten sowohl mit gummimodifizierten Bindemitteln als auch mit polymermodifiziertem Bindemittel aufweist. Auch bei den Steifigkeiten unterscheidet sich jeweils die Variante mit GmBT 25/55-55 V1 beim SMA 8 S sowie AC 16 B S signifikant - mit geringeren Steifigkeitsmoduln - von den übrigen Varianten. Eine Erklärung hierfür könnte u. a. das bei der Labormischung verwendete weichere Grundbitumen der Sorte 70/100 sein.

Weiterhin weist beispielsweise der Asphaltbinder AC 16 B S mit polymermodifiziertem Bindemittel ermittelt mit dem Druck-Schwellversuch das ungünstigste Verformungsverhalten bei Wärme (signifikant größter Wert für die Dehnungsrate) auf. Mittels der Ergebnisse des Spurbildungsversuchs, wo der AC 16 B S anhand der Kenngröße Spurrinntentiefe zwischen den Varianten mit gummimodifizierten Bindemitteln einzuordnen ist, konnte das allerdings nicht belegt werden. Umgekehrt wurde für den Splittmastixasphalt SMA 8 S mit polymermodifiziertem Bindemittel der signifikant höchste Wert für die Spurrinntentiefe ermittelt und anhand der Ergebnisse des Druck-Schwellversuchs (Kenngröße Dehnungsrate) findet sich die Variante zwischen den Varianten mit gummimodifizierten Bindemitteln.

Das Griffigkeitsverhalten der Asphalte (Labormischungen) mit polymermodifiziertem Bindemittel kann als tendenziell bzw. signifikant ungünstiger im Vergleich zu den jeweiligen Varianten mit gummimodifizierten Bindemitteln eingeordnet werden. Die für die im Laboratorium hergestellten Splittmastixasphalte erkannten signifikanten Unterschiede im Griffigkeitsverhalten können anhand der Rückstellproben der Sorte SMA 8 S jedoch nicht belegt werden.

Zusammenfassend können anhand der statistischen Auswertung der untersuchten Asphalteeigenschaften abschließend nicht durchgängig signifikante Unterschiede (Vor- bzw. Nachteile) zwischen den Asphalten einer Sorte mit den hier eingesetzten gummimodifizierten Bindemitteln und mit dem eingesetzten polymermodifizierten Bindemittel über allen untersuchten Asphalteeigenschaften erkannt werden.

Fazit:

Daher konnte das Ziel diese Forschungsvorhabens erreicht werden, eine mögliche Gleichwertigkeit der Gebrauchseigenschaften von Asphalten unter Verwendung gummimodifizierter Bindemittel und polymermodifizierter Bindemittel nachzuweisen.

6 Regelwerke und Literatur

6.1 Regelwerke

- AL DSR-Prüfung (T-Sweep) Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhalten von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung im Temperatursweep, Ausgabe 2014, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- AL MSCR-Prüfung (DSR) Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test), Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- AL Sp-Asphalt 09 Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhalten von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung, Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- DIN CEN/TS 12697-50 Asphalt - Prüfverfahren - Teil 50: Widerstand gegen Oberflächenverschleiß, Ausgabe 2016-11, Beuth Verlag
- DIN EN 14771 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit - Biegebalkenrheometer (BBR), Ausgabe 2012-08, Beuth Verlag
- DIN EN 12697-24 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung, Ausgabe 2012-08, Beuth Verlag
- DIN EN 12697-26 Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit, Ausgabe 2012-06, Beuth Verlag
- RDO Asphalt 09 Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten, Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- RStO 12 Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- E GmBA Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten, Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TP Asphalt-StB Technische Prüfvorschriften für Asphalt Teil 17 Kornverlust von Probekörpern aus Offenporigem Asphalt, Ausgabe 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TP Asphalt-StB Technische Prüfvorschriften für Asphalt Teil 22 Spurbildungsversuch, Ausgabe 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TP Asphalt-StB Technische Prüfvorschriften für Asphalt Teil 25 A 1 Dynamischer Stempeleindringversuch an Walzasphalten, Ausgabe 2010, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TP Asphalt-StB Technische Prüfvorschriften für Asphalt Teil 25 B 1 Einaxialer Druck-Schwellversuch - Bestimmung des Verformungsverhalten von Walzasphalten bei Wärme, Ausgabe 2012, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TP Asphalt-StB Technische Prüfvorschriften für Asphalt Teil 46 A Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch, Ausgabe 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TL Bitumen-StB 07/13 Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen, Ausgabe 2007/Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TL Griff-StB (SRT) Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil Messverfahren SRT, Ausgabe 2004, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TL RmB-StB By Technische Lieferbedingungen für Gummimodifizierte Bitumen, Ausgabe 2010, Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren

6.2 Literatur und Software

- [1] SACHS, L.: Angewandte Statistik. Springer-Verlag, Berlin, 5. Auflage, 1976
- [2] EISENHART, C.: Assumptions underlying the Analyses of Variance. Biometrics 3, 1951
- [3] PaDesTo - Pavement Design Tool Version 2008.15 - U2.2

Bilder

Abbildung 1: Begriffe bei der Modifizierung von Bitumen und Asphalt mit Gummi [E GmBA]..13	
Abbildung 2: Gummi-Batch.....14	
Abbildung 3: Varianten der Mischgutart AC 16 B S.....16	
Abbildung 4: Varianten der Mischgutart SMA 8 S.....16	
Abbildung 5: Varianten der Mischgutart PA 816	
Abbildung 6: Prinzipskizze Bending Beam Rheometer17	
Abbildung 7: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung von $T_{y=300}$ und $T_{m-Wert=0,3}$17	
Abbildung 8: Prinzipskizze DSR-Prüfung18	
Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung Phasenwinkel in Abhängigkeit von der Temperatur18	
Abbildung 10: Beispielhafte Darstellung Komplexer Schermodul in Abhängigkeit von der Temperatur18	
Abbildung 11: Prinzipskizze MSCR-Prüfung .19	
Abbildung 12: Beispielhafte Darstellung einer Dehnungs-Erholungskurve über drei Laststufen20	
Abbildung 13: Prüfvorrichtung mit eingebauten Probekörpern für Abkühl- bzw. Zugversuche 20	
Abbildung 14: Darstellung der Ergebnisse von Abkühl- und Zugversuchen.....21	
Abbildung 15: Prüfvorrichtung mit eingebautem Probekörper für den Spaltzug-Schwellversuch21	
Abbildung 16: Hauptkurve – Steifigkeitsmodul in Abhängigkeit der Temperatur (Faktor α_T) und der Frequenz (f)22	
Abbildung 17: Beispielhafte Darstellung der prognostizierten Steifigkeitsmodul22	
Abbildung 18: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse eines Ermüdungsversuches22	
Abbildung 19: Beispielhafte Darstellung einer dehnungsbasierten Ermüdungsfunktion.....23	
Abbildung 20: Prüfvorrichtung mit eingebautem Probekörper für Zug-Schwellversuch23	
Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung der akkumulierten Dehnung in Abhängigkeit der Lastwechselzahl.....23	
Abbildung 22: Prüfvorrichtung mit eingebautem Probekörper für Druck-Schwellversuche.....24	
Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung einer Impulskriechkurve (ohne Wendepunkt).....24	
Abbildung 24: Prüfvorrichtung mit eingebautem Probekörper für Dynamische Eindringtiefe....24	
Abbildung 25: Prüfvorrichtung für Spurbildungsversuche..... 25	
Abbildung 26: LA-Trommel..... 25	
Abbildung 27: DSD (hier ohne Sicherheitskäfig) [TU Darmstadt] 26	
Abbildung 28: ARTe [RWTH Aachen] 26	
Abbildung 29: SRT-Gerät 26	
Abbildung 30: Aufbau der Datenbank 27	
Abbildung 31: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung – Polymermodifizierte Bindemittel (PmB) 35	
Abbildung 32: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung – Gummimodifizierte Bindemittel (GmB) im Nassverfahren..... 36	
Abbildung 33: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung – Gummimodifizierte Bindemittel (GmBT) im Trockenverfahren 37	
Abbildung 34: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (BLACK-Diagramm) vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung bei 1mm und 2 mm Spaltweite – Polymermodifizierte Bindemittel (PmB) 40	
Abbildung 35: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (BLACK-Diagramm) vor und nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung 2 mm Spaltweite – Gummimodifizierte Bindemittel (GmB) im Nassverfahren..... 41	
Abbildung 36: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer (BLACK-Diagramm) vor Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung 2 mm Spaltweite – Gummimodifizierte Bindemittel (GmBT) im Trockenverfahren 42	
Abbildung 37: kryogene Zugspannungsverläufe - SMA 8 S 46	
Abbildung 38: kryogene Zugspannungsverläufe - AC 16 B S..... 47	
Abbildung 39: kryogene Zugspannungsverläufe - PA 8 48	
Abbildung 40: kryogene Zugspannungsverläufe ermittelt am SMA 8 S (Rückstellproben) mit PmB bzw. GmB 49	
Abbildung 41: kryogene Zugspannungsverläufe ermittelt am AC 11 D S (Rückstellproben) mit PmB bzw. GmB 50	

Abbildung 42: Bruchtemperatur - SMA 8 S ...51	Abbildung 70: Zugfestigkeitsreserve - Rückstellproben (SMA 8 S) 72
Abbildung 43: Bruchspannung - SMA 8 S.....51	Abbildung 71: Zugfestigkeitsreserve - Rückstellproben (AC 11 D S)..... 73
Abbildung 44: Bruchtemperatur - AC 16 B S.51	Abbildung 72: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen SMA 8 S - Varianten 74
Abbildung 45: Bruchspannung - AC 16 B S ..51	Abbildung 73: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen AC 16 B S - Varianten..... 75
Abbildung 46: Bruchtemperatur - PA 851	Abbildung 74: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen PA 8 - Varianten 76
Abbildung 47: Bruchspannung - PA 8.....51	Abbildung 75: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - SMA 8 S..... 77
Abbildung 48: Bruchtemperatur - Rückstellproben (SMA 8 S)52	Abbildung 76: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - AC 16 B S... 78
Abbildung 49: Bruchspannung - Rückstellproben (SMA 8 S)52	Abbildung 77: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - PA 8 78
Abbildung 50: Bruchtemperatur - Rückstellproben (AC 11 D S).....52	Abbildung 78: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen RS SMA 8 S - Varianten 80
Abbildung 51: Bruchspannung - Rückstellproben (AC 11 D S).....53	Abbildung 79: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - Rückstellproben (SMA 8 S) 81
Abbildung 52: Zugfestigkeitsverläufe - SMA 8 S54	Abbildung 80: Steifigkeitsverläufe der verschiedenen RS AC 11 D S - Varianten.... 82
Abbildung 53: Zugfestigkeitsverläufe AC 16 B S55	Abbildung 81: Steifigkeitsmoduln ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - Rückstellproben (AC 11 D S)..... 83
Abbildung 54: Zugfestigkeitsverläufe - PA 8..56	Abbildung 82: Ermüdungsfunktionen - SMA 8 S 84
Abbildung 55: Zugfestigkeitsverläufe Rückstellproben (SMA 8 S)58	Abbildung 83: Ermüdungsfunktionen - AC 16 B S 85
Abbildung 56: Zugfestigkeitsverläufe AC 11 D S59	Abbildung 84: Ermüdungsfunktionen - PA 8. 86
Abbildung 57: Zugfestigkeiten bei verschiedenen Prüftemperaturen - SMA 8 S.60	Abbildung 85: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - SMA 8 S..... 87
Abbildung 58: Zugfestigkeiten bei verschiedenen Prüftemperaturen - AC 16 B S60	Abbildung 86: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - AC 16 B S 87
Abbildung 59: Zugfestigkeiten bei verschiedenen Prüftemperaturen - PA 8.....61	Abbildung 87: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - PA 8..... 87
Abbildung 60: Zugfestigkeit ermittelt bei verschiedenen Temperaturen an Rückstellproben(SMA 8 S)62	Abbildung 88: Ermüdungsfunktionen - Rückstellproben (SMA 8 S) 88
Abbildung 61: Zugfestigkeit ermittelt bei verschiedenen Temperaturen an Rückstellproben (AC 11 D S).....63	Abbildung 89: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - Rückstellproben (SMA 8 S) 88
Abbildung 62: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - SMA 8 S64	Abbildung 90: Ermüdungsfunktionen für AC 11 D S (Rückstellproben) 89
Abbildung 63: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - AC 16 B S ...65	Abbildung 91: Lastwechselanzahl bei 0,1 ‰ elastischer Anfangsdehnung - Rückstellproben (AC 11 D S) 90
Abbildung 64: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - PA 865	Abbildung 92: Ergebnisse der Einaxialen Zug- Schwellversuche bei 20°C 90
Abbildung 65: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - Rückstellproben (SMA 8 S)66	Abbildung 93: Ergebnisse der Einaxialen Zug- Schwellversuche bei 5°C 91
Abbildung 66: Bruchdehnung ermittelt bei verschiedenen Temperaturen - Rückstellproben (AC 11 D S).....67	Abbildung 94: Ergebnisse der Einaxialen Zug- Schwellversuche bei -10°C 91
Abbildung 67: Zugfestigkeitsreserve - SMA 8 S69	
Abbildung 68: Zugfestigkeitsreserve - AC 16 B S70	
Abbildung 69: Zugfestigkeitsreserve - PA 8 ..71	

Abbildung 95: Impulskriechkurve für SMA 8 S	92	Abbildung 122: Substanzverlust (ARTe) - PA 8	110
Abbildung 96: Impulskriechkurve für AC 16 B S.....	93	Abbildung 123: SRT-Werte - SMA 8 S.....	111
Abbildung 97: Dehnungsrate - SMA 8 S.....	94	Abbildung 124: SRT-Werte - AC 16 B S	111
Abbildung 98: Dehnungsrate - AC 16 B S.....	94	Abbildung 125: SRT-Werte - PA 8.....	112
Abbildung 99: Lastimpulszahl im Wendepunkt - AC 16 B S.....	94	Abbildung 126: SRT-Werte - Rückstellproben (SMA 8 S).....	113
Abbildung 100: Impulskriechkurve für Rückstellproben (SMA 8 S).....	95	Abbildung 127: SRT- Werte - Rückstellproben (AC 11 D S)	113
Abbildung 101: Dehnungsrate - Rückstellproben (SMA 8 S).....	96		
Abbildung 102: Lastimpulszahl im Wendepunkt - Rückstellproben (SMA 8 S).....	96		
Abbildung 103: Impulskriechkurve für Rückstellproben (AC 11 D S).....	97		
Abbildung 104: Dehnungsrate - Rückstellproben (AC 11 D S).....	97		
Abbildung 105: Lastimpulszahl im Wendepunkt - Rückstellproben (AC 11 D S)	98		
Abbildung 106: Verformungskurven (Dynamischer Eindringversuch) für PA 8	99		
Abbildung 107: Lastwechselanzahl bei 5 mm Eindringtiefe - PA 8	99		
Abbildung 108: Verlauf der Spurrinnentiefe für SMA 8 S	101		
Abbildung 109: Verlauf der Spurrinnentiefe für AC 16 B S.....	102		
Abbildung 110: Absolute Spurrinnenriefe am Versuchsende - SMA 8 S	102		
Abbildung 111: Absolute Spurrinnentiefe am Versuchsende - AC 16 B S.....	103		
Abbildung 112: Verlauf der Spurrinnentiefe für Rückstellproben (Rückstellproben (SMA 8 S))	104		
Abbildung 113: Absolute Spurrinnentiefe am Versuchsende - Rückstellproben (SMA 8 S)	104		
Abbildung 114: Verlauf der Spurrinnentiefe für Rückstellproben (AC 11 DS).....	105		
Abbildung 115: Absolute Spurrinnentiefe am Versuchsende - Rückstellproben (AC 11 D S)	105		
Abbildung 116: Kornverlust - SMA 8 S.....	106		
Abbildung 117: Kornverlust - AC 16 B S.....	106		
Abbildung 118:Kornverlust - PA 8.....	107		
Abbildung 119: Kornverlust - Rückstellproben (SMA 8 S).....	108		
Abbildung 120: Kornverlust - Rückstellproben (AC 11 D S)	108		
Abbildung 121: Substanzverlust (DSD) - PA 8	109		

Tabellen

Tabelle 1: Zusammensetzungen der im Trockenverfahren hergestellten Gummimodifizierten Bindemittel	14	Bruchtemperatur und Bruchspannung (SMA 8 S, AC 16 B S und PA 8)	51
Tabelle 2: Zusammensetzung der Mischgutart AC 16 B S	15	Tabelle 20: Statistische Auswertung Bruchtemperatur und Bruchspannung - Rückstellproben (SMA 8 S)	52
Tabelle 3: Zusammensetzung der Mischgutart SMA 8 S	15	Tabelle 21: Statistische Auswertung Bruchtemperatur und Bruchspannung (Rückstellproben AC 11 DS).....	53
Tabelle 4: Zusammensetzung der Mischgutart PA 8.....	16	Tabelle 22: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für SMA 8 S	54
Tabelle 5: Bindemittelkennwerte nach TL Bitumen 07/13, Tabelle 2.....	30	Tabelle 23: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für AC 16 B S.....	55
Tabelle 6: Bindemittelkennwerte nach TL Bitumen 07/13, Tabelle 2 (nach RTFOT-Alterung).....	31	Tabelle 24: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für PA 8	56
Tabelle 7: Bindemittelkennwerte nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung	32	Tabelle 25: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für Rückstellproben (SMA 8 S).....	57
Tabelle 8: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer.....	33	Tabelle 26: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen für AC 11 D S (Rückstellproben)	58
Tabelle 9: Verhalten bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung	34	Tabelle 27: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Zugfestigkeit (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8).....	61
Tabelle 10: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer DSR-Prüfung	38	Tabelle 28: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Zugfestigkeit (RS – SMA 8 S).....	62
Tabelle 11: Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer DSR-Prüfung - nach RTFOT- + PAV-Alterung.....	39	Tabelle 29: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Zugfestigkeit (RS – AC 11 D S).....	63
Tabelle 12: Verformungsverhalten im Dynamischen Scherrheometer – MSCR-Prüfung bei 60°C und 2 mm Spaltweite (und 1 mm Spaltweite bei polymermodifizierten Bindemitteln).....	43	Tabelle 30: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Bruchdehnung (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8)	66
Tabelle 13: Verformungsverhalten im Dynamischen Scherrheometer – MSCR-Prüfung bei 60°C und 2 mm Spaltweite (und 1 mm Spaltweite bei polymermodifizierten Bindemitteln) nach Beanspruchung durch RTFOT- und PAV-Alterung.....	44	Tabelle 31: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Bruchdehnung (Rückstellproben (SMA 8 S))	67
Tabelle 14: Bruchspannung und -temperatur für SMA 8 S	46	Tabelle 32: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Zugversuchen – Bruchdehnung (Rückstellproben (AC 11 D S))	68
Tabelle 15: Bruchspannung und -temperatur für AC 16 B S	47	Tabelle 33: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für SMA 8 S.....	68
Tabelle 16: Bruchspannung und -temperatur für PA 8.....	48	Tabelle 34: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für AC 16 B S ..	69
Tabelle 17: Bruchspannung und -temperatur für Rückstellproben (SMA 8 S)	48	Tabelle 35: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für PA 8.....	70
Tabelle 18: Bruchspannung und -temperatur für Rückstellproben (AC 11 D S).....	49	Tabelle 36: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für Rückstellproben (SMA 8 S)	71
Tabelle 19: Statistische Auswertung		Tabelle 37: Maximale Zugfestigkeitsreserve und zugehörige Temperatur für Rückstellproben (AC 11 D S).....	72
		Tabelle 38: Prognostizierte Steifigkeitsmoduln - SMA 8 S.....	74

Tabelle 39: Prognostizierte Steifigkeitsmodul - AC 16 B S.....	75	(Rückstellproben (SMA 8 S)).....	96
Tabelle 40: Prognostizierte Steifigkeitsmodul - PA 8.....	76	Tabelle 58: Ergebnisse (Mittelwerte) der Einaxialen Druckschwellversuche für Rückstellproben (AC 11 D S).....	97
Tabelle 41: Ergebnisse der statistischen Auswertung – Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8).....	78	Tabelle 59: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Druck-Schwellversuchen (Rückstellproben (AC 11 D S)).....	98
Tabelle 42: Prognostizierte Steifigkeitsmoduln - SMA 8 S (Rückstellproben)	79	Tabelle 60: Ergebnisse (Mittelwerte) der Dynamischen Eindringversuche - PA 8.....	99
Tabelle 43: Ergebnisse der statistischen Auswertung – Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz (Rückstellproben (SMA 8 S)).....	81	Tabelle 61: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Dynamischen Eindringversuchen (PA 8).....	100
Tabelle 44: Prognostizierte Steifigkeitsmoduln - AC 11 D S (Rückstellproben)	81	Tabelle 62: Absolute und proportionale Spurrinntiefe nach 20.000 Zyklen für SMA 8 S.....	100
Tabelle 45: Ergebnisse der statistischen Auswertung – Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz (Rückstellproben (AC 11 D S)).....	83	Tabelle 63: Absolute und proportionale Spurrinntiefe nach 20.000 Zyklen für AC 16 B S.....	101
Tabelle 46: Lastwechselzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ (SMA 8 S, AC 16 B S und PA 8)	86	Tabelle 64: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Spurbildungsversuchen (SMA 8 S, AC 16 B S).....	103
Tabelle 47: Ranking der verschiedenen Varianten – Lastwechselzahl N_{Makro} bei $\epsilon_{anf., elast}=0,1 \text{ ‰}$ – SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8.....	87	Tabelle 65: Absolute und proportionale Spurrinntiefe nach 20.000 Zyklen für Rückstellproben(SMA 8 S)	103
Tabelle 48: Lastwechselzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ (SMA 8 S – Rückstellproben).....	88	Tabelle 66: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Spurbildungsversuchen (Rückstellproben (SMA 8 S)).....	104
Tabelle 49: Ranking der verschiedenen Varianten – Lastwechselzahl N_{Makro} bei $\epsilon_{anf., elast}=0,1 \text{ ‰}$ – RS SMA 8 S.....	89	Tabelle 67: Absolute und proportionale Spurrinntiefe nach 20.000 Zyklen für Rückstellproben(AC 11 D S).....	105
Tabelle 50: Lastwechselzahl bei einer elastischen Anfangsdehnung von 0,1 ‰ (AC 11 D S – Rückstellproben).....	89	Tabelle 68: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Spurbildungsversuchen (Rückstellproben (AC 11 D S)).....	106
Tabelle 51: Ranking der verschiedenen Varianten – Lastwechselzahl N_{Makro} bei $\epsilon_{anf., elast}=0,1 \text{ ‰}$ – RS AC 11 D S.....	90	Tabelle 69: Kornverlust für SMA 8 S.....	106
Tabelle 52: Ergebnisse der statistischen Auswertung der Einaxialen Zug-Schwellversuche, SMA 8 S	91	Tabelle 70: Kornverlust für AC 16 B S	106
Tabelle 53: Ergebnisse (Mittelwerte) der Einaxialen Druckschwellversuche für SMA 8 S	92	Tabelle 71: Kornverlust für PA 8.....	107
Tabelle 54: Ergebnisse (Mittelwerte) der Einaxialen Druckschwellversuche für AC 16 B S.....	93	Tabelle 72: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Kornverluste - SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8	107
Tabelle 55: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Druck-Schwellversuchen (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8).....	94	Tabelle 73: Kornverlust für Rückstellproben (SMA 8 S).....	108
Tabelle 56: Ergebnisse (Mittelwerte) der Einaxialen Druckschwellversuche für SMA 8 S	95	Tabelle 74: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Kornverluste - Rückstellproben (SMA 8 S)	108
Tabelle 57: Ergebnisse der statistischen Auswertung von Druck-Schwellversuchen		Tabelle 75: Kornverlust für Rückstellproben (AC 11 D S)	108
		Tabelle 76: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Kornverlust - Rückstellproben (AC 11 D S)	109
		Tabelle 77: Substanzverlust (DSD)für PA 8	109
		Tabelle 78: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Substanzverlust (DSD) - PA 8	110

Tabelle 79: Substanzverlust (ARTe) für PA 8	110
Tabelle 80: Ergebnisse der statistischen Auswertung für Substanzverlust (ARTe) - PA 8	111
Tabelle 81: Ergebnisse der SRT-Messung für SMA 8 S	111
Tabelle 82: Ergebnisse der SRT-Messung für AC 16 B S	111
Tabelle 83: Ergebnisse der SRT-Messung für PA 8	112
Tabelle 84: Ergebnisse der statistischen Auswertung für SRT-Werte (SMA 8 S, AC 16 B S, PA 8)	112
Tabelle 85: Ergebnisse der SRT-Messung für SMA 8 S (Rückstellproben)	113
Tabelle 86: Ergebnisse der statistischen Auswertung für SRT-Werte (Rückstellproben (SMA 8 S))	113
Tabelle 87: Ergebnisse der SRT-Messung für Rückstellproben (AC 11 D S)	113
Tabelle 88: Ergebnisse der statistischen Auswertung für SRT-Werte (Rückstellproben (AC 11 D S))	114
Tabelle 89: Ermüdungsstatus Asphalt	114

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt

für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze Klein, Gehlen, Kränkel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirskawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

Büchler, Wüstuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

Villaret, Augter, Kayser, Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

Beckedahl, Schrödter, Koppers, Mansura, Reutter, Thelen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

Schipek, Steffen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

Cudmani, Henzinger, Birle, Barka

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Geh-

len, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

Rigo, Unterderweide

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

Kathmann, Schroeder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

Böhm, Eickschen, Hermerschmidt, Müller, Pierkes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß,

Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

Cudmani, Heyer, Birle, Möller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

Weise, Oesch, Wilsch, Sigmund, Hüniger, Kositz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

Demon, Reiche, Haas, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder,

Riwe

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbaupasphalt

Gehrke, Stephan, Weigel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

Radenberg, Twer, Louis, Buscham

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tielmann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Trag-schichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

Villaret, Beckenbauer, Riwe, Tschernack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

Michaelides, Koukoulidou, Birle, Heyer, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Breitenbücher, Buckenhüskes, Radenberg, Twer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 178: Ringversuch zum statischen Spaltzugversuch nach AL Sp-Beton

Weise, Hüsken, Niedack-Nad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 179: Die neue Autobahnverwaltung des Bundes – das Straßenrecht der Verkehrswende

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 180: Entwicklung eines aktuellen Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung gemäß den RDO Beton

Kathmann, Hermes, Kucera, Stöver, Neumann, Lehmkuhl, Pfeifer € 14,50

2023

S 181: Möglichkeiten und Grenzen des Georadarverfahrens

Hülsbömer, Weißelborg, Gogolin, Mörchen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 182: Optimierung der Anwendbarkeit der Probabilistik in der Dimensionierung und Substanzbewertung von Betonstraßen

Neumann, Liu, Blasl, Reinhardt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 183: Potenzialuntersuchung zum Einsatz von Asphalt-einlagen

Mollenhauer, Wetekam, Wistuba, Büchler, Al-Qudsi, Falchetto, Kollmus, Trifunović, Schmalz, Ziegler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 184: Generelle Methodik zur Abschnittsbildung bei der Erhaltung kommunaler Straßen

Berthold, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 185: Potenzialanalyse – Prozesssichere Herstellung lärm- armer Straßen in Betonbauweise OPB – Offenporiger Beton

Freudenstein, Bollin, Eger, Klein, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 186: Praxisgerechte Anforderungen an den Polierwiderstand feiner Gesteinskörnungen

Oeser, Schulze, Benninghoff, Renken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 187: Überprüfung der Geotextilrobustheitsklassen hinsichtlich neuer Produktentwicklungen

Zanzinger in Vorbereitung

S 188: Untersuchungen an einer CEM III-Versuchsstrecke auf der BAB A7 bei Wörrnitz

Kuhnshch in Vorbereitung

S 189: Optimierung der Zusammensetzung Offenporiger Asphalte zur Verbesserung des Nutzungsverhaltens

Radenberg, Breddemann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 190: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung an Bauweisen mit Betondecke der Belastungsklasse Bk100

Ressel, Engel, Ferraro, Alber, Garrecht, Mielich, Wellner, Kamratowsky, Kraft
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 191: Vergleich der Gebrauchseigenschaften von Asphalten mit Polymermodifiziertem Bindemittel und Gummimodifizierten Bindemitteln mit unterschiedlichen Gummianteil

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher, Schindler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.