

# Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 169

**bast**

# **Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten**

von

Martin Radenberg  
Sören Holzwarth

Ruhr-Universität Bochum  
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 169**

**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 07.0281**  
Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

### Fachbetreuung

Jan Ork  
Rolf Rabe  
Rudi Bull-Wasser

### 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](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-95606-659-7

Bergisch Gladbach, Dezember 2021

## Kurzfassung

Die Änderung des Arbeitsschutzes, in Form der [Expositionsbeschreibung, 2008], schreibt die Absenkung der Einbautemperaturen von Gussasphalt auf unter 230 °C vor. Eine Möglichkeit zur Verringerung der Einbautemperatur liegt in der Verwendung von viskositätsverändernden Zusätzen.

In den [ZTV Asphalt-StB 07/13] wird auf die Notwendigkeit zur Verwendung viskositätsveränderter Bindemittel hingewiesen, ohne dass es hierzu bisher eindeutige Bindemittelspezifikationen gibt. Der Verformungswiderstand erhöht sich durch die Verwendung meist erheblich, sodass zunehmend über eine hinreichende Kälteflexibilität diskutiert wird.

Mit diesem Forschungsvorhaben wurden Gussasphalte mit möglichst vielen am Markt vorhandenen viskositätsveränderten Bindemitteln bezüglich ihrer Kälteeigenschaften untersucht. Dafür wurde in einem ersten Schritt die Kälteempfindlichkeit der Bindemittel anhand von drei ausgewählten Prüfverfahren untersucht.

Die Asphaltuntersuchungen zur Ansprache des Kälteverhaltens wurden primär mit dem Dreipunkt-Biegezugversuch bei drei Temperaturen durchgeführt. Zur Validierung der Ergebnisse wurden vergleichende Untersuchungen mittels einaxialer Zug- und Abkühlversuche durchgeführt.

Eine Abhängigkeit zwischen der Kälteflexibilität der Asphalte und der Bindemittelhärte wurde analysiert.

Der Einfluss der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung auf die Kälteflexibilität wurde systematisch geprüft. Hierbei wurden Gesteinsgemischkonzepte festgestellt, die das Kälteverhalten verschlechtern können.

Eine Überlagerung der Einflüsse aus den Gemischkomponenten führte erwartungsgemäß zu Gussasphalten mit hoher Kälteempfindlichkeit.

Die vergleichende Betrachtung der kälteorientierten Prüfverfahren zeigte einen brauchbaren mathematischen Zusammenhang zwischen dem Verhältniswert  $Q_{II}$  aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch zu der gemessenen Bruchtemperatur im Abkühlversuch.

Für den Dreipunkt-Biegezugversuch wurde darüber hinaus eine hohe Messpräzision festgestellt.

## Abstract

The changed requirements of occupational safety, as implemented in the [Expositionsbeschreibung, 2008], specify the reduction of the installation temperatures of mastic asphalt below 230 °C. The usage of viscosity-modifying additives is one way to reduce the installation temperature.

The [ZTV Asphalt-StB 07/13] point out the need to use viscosity-modified binders, although there are no clear binder specifications for this purpose to date. The deformation resistance usually increases significantly, which today leads to an increasing discussion about a sufficient low-temperature flexibility.

The aim of this research project was to investigate mastic asphalt with as many existing viscosity-modified binders available on the market as possible for their low-temperature properties. In a first step, the sensibility to cold of the binders was investigated by means of three selected test methods.

Subsequently, the asphalt investigations to address the cold behavior were carried out primarily with the three-point bending tensile test at three temperatures. In order to validate the results, comparative investigations using uniaxial tensile and cooling tests should be performed.

A dependence between the cold flexibility of the asphalt and the binder hardness was analyzed

The influence of the granulometric properties of the aggregate was systematically tested as part of the asphalt investigations. On this occasion, aggregates which are vulnerable to cold were detected.

A superposition of the influences from the mixture components led as expected to mastic asphalts with high sensitivity to cold.

The comparative analysis of the cold-sensitive test methods showed a mathematical correlation between the ratio value  $Q_{II}$  from the three-point bending test to the measured breaking point temperature in the cooling test.

In addition, a high measuring precision was determined for the three-point bending tensile test.

## 1 Introduction and problem statement

In Germany, mastic asphalt construction is the standard method for heavily loaded highways in load class Bk100. It is the construction method with the highest expected useful life.

In the case of mastic asphalt, load transfer does not take place primarily over the stone skeleton, but also via the mortar phase. The sufficient stiffness of the mortar is therefore a basic requirement for a permanent use.

The changed requirements of occupational safety, as implemented in the [Expositionsbeschreibung, 2008], specify the reduction of the installation temperatures of mastic asphalt below 230 °C. The usage of viscosity-modifying additives is one way to reduce the installation temperature. The single or multiple modification of the binder causes a change in viscosity.

The "Additional technical terms of contract and guidelines for the construction of road surfacing from asphalt" [ZTV Asphalt-StB 07/13] point out the need to use viscosity-modified binders, although there are no clear binder specifications for this purpose to date. The deformation-resistance usually increases significantly by using viscosity-modifying additives, which today leads to an increasing discussion about a sufficient low-temperature flexibility. Table 2 of [ZTV Asphalt-StB 07/13] does not yet provide a clear specification for selecting a suitable binder for mastic asphalt. The recommendations for the classification of viscosity-modified binders [E KvB, 2016] are available, without these binders being assigned to a suitable application for mastic asphalt. In this context, reliable information on the low-temperature properties of the mastic asphalt made from these binders is missing.

The sufficient low-temperature flexibility of modified asphalts, which is to be observed critically, is investigated by a complex examination of the cryogenic tensile stresses and the uniaxial tensile strengths, which can only be detected by scientifically equipped road construction laboratories.

## 2 Objective

The aim of this research project was to investigate mastic asphalt with as many existing viscosity-modified binders available on the market as possible for their low-temperature properties. In accordance with a practical implementation of the laboratory tests, this should be done primarily with a simple test method (three-point bending test) according to the [Vorläufigen Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, August 1959] at three different temperatures. The results obtained with this method on 40 variants of differently composed cast ashes were evaluated with regard to plausibility and repeatability. Subsequently, those variants which cover the entire range of results of the three-point bending tests sufficiently well were selected for validation studies according to the [TP Asphalt-StB, Part 46A].

Against the background of the development of a practice-oriented instrument mastic asphalts produced in the laboratory as well as samples from the construction site were examined. For the latter, the composition of the mixture was additionally checked. In addition, mastic asphalt surfaces were included, which show cracks and thus indicate insufficient low-temperature flexibility. The cracks were documented and evaluated. From these results a statement about possible requirements for the test result should be derived.

## 3 Investigation program

The research project is divided into four project phases.

In the first project phase a material selection was made as the basis for the further investigation. In addition, a national and international comparison was made to record the experience of testing mastic asphalts using the three-point bending test or similar tests.

On the basis of the findings and results obtained from the binder-investigations, a selection of ten binders was made, which represent the range of results of the rheological-physical properties of the binder. For the investigations of the second project phase, a practical reference aggregate mixture was defined in the first project phase.

In the second phase of the project, mastic asphalts were produced with the ten selected binders and the reference aggregate mixture. Subsequently, tests of the deformation resistance and the low-temperature behavior

were carried out by means of a three-point bending test on the basis of the [Vorläufige Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, August 1959]. A sub-goal of the second work package was the investigation of the influence of the aggregate. A systematic variation of the parameters maximum grain size, filler as well as fine and coarse aggregate should provide information about the influencing factors.

The results obtained in the second work package for the low-temperature behavior were analyzed in the third work package by validating investigations by means of the complex low-temperature test method 'cooling test' and 'uniaxial tensile test' at four temperatures on dependencies and potentials of the simple test procedure.

In a final work package, practical samples were examined for deformation resistance and low-temperature behavior by the simplified method of the three-point bending test.

## 4 Results, Summary and outlook

Through targeted investigation of the components of the mixture and their interaction in the asphalt mixture, a comprehensive knowledge of the performance characteristics of mastic asphalts was obtained.

The analysis of the 40 selected binders with three test methods for assessing the sensitivity to cold showed a clear dependence on the binder hardness. Consequently, with increasing hardness, a reduced resistance to cold was demonstrated (Table 1).

**Table 1:** Selection of binders for further asphalt tests based on three evaluation criteria

binder	Selection and ongoing designation	Binder characteristics at -10 °C						ranking total
		BBR		DSR – T-Sweep		DSR - Relaxation		
		T <sub>authoritative</sub> [°C]	ranking [-]	Phase angle [°]	ranking [-]	tensile stress $\sigma_{60}$ [kPa]	ranking [-]	
15/25 VL	B1	-10,4	4	12,5	3	77,4	3	10
25/35 VL		-16,7	35	17,1	26	37,0	32	93
35/50 VL	B2	-16,9	36	20,2	40	28,8	39	115
15/25 VH		-12,1	10	14,8	11	69,1	10	31
25/35 VH	B3	-16,1	31	18,6	36	52,2	18	85
35/50 VH		-17,5	37	18,1	34	40,6	31	102
PmB 10/25 VL	B4	-11,3	7	13,6	8	75,0	4	19
PmB 25/45 VL		-14,8	23	17,4	28	60,4	12	63
PmB 10/25 VH		-13,7	20	15,9	14	51,0	21	55
PmB 25/45 VH		-15,6	28	16,1	16	52,2	19	63
15/25 A		-13,3	15	13,9	9	52,1	20	44
25/35 A		-15,1	24	16,3	18	50,4	22	64
35/50 A		-16,5	33	15,6	13	30,7	37	83
15/25 B	B5	-11,0	6	14,2	10	69,5	9	25
25/35 B		-14,5	22	16,8	22	50,0	24	68
35/50 B		-13,3	14	16,1	15	46,7	30	59
PmB 10/25 A		-12,7	12	17,1	27	52,7	17	56
PmB 25/45 A		-17,5	38	16,6	21	32,1	36	95
PmB 10/25 B		-9,6	2	17,9	32	72,7	7	41
PmB 25/45 B		-15,7	29	19,3	39	48,1	28	96
15/25 VL <sub>1,5</sub>		-12,5	11	13,0	5	56,5	13	29
15/25 VL <sub>3,0</sub>		-11,3	8	13,1	6	71,6	8	22
35/50 VL <sub>1,5</sub>		-15,5	26	17,0	25	48,2	27	78
35/50 VL <sub>3,0</sub>	B6	-14,0	21	16,4	19	50,2	23	63
PmB 10/25 VL <sub>1,5</sub>		-13,5	16	17,7	30	62,1	11	57
PmB 10/25 VL <sub>3,0</sub>		-13,0	13	17,4	29	78,8	2	44
PmB 25/45 VL <sub>1,5</sub>		-16,6	34	18,9	37	35,1	34	105
PmB 25/45 VL <sub>3,0</sub>		-15,2	25	18,0	33	47,4	29	87
15/25 VH <sub>1,5</sub>		-11,8	9	13,4	7	55,1	15	31
15/25 VH <sub>3,0</sub>	B7	-10,8	5	12,7	4	73,6	5	14
35/50 VH <sub>1,5</sub>		-16,5	32	16,8	23	36,7	33	88
35/50 VH <sub>3,0</sub>		-16,1	30	16,2	17	48,5	26	73
PmB 10/25 VH <sub>1,5</sub>		-15,6	27	17,9	31	53,6	16	74
PmB 10/25 VH <sub>3,0</sub>	B8	-13,7	19	16,9	24	56,2	14	57
PmB 25/45 VH <sub>1,5</sub>		-18,8	40	19,3	38	28,9	38	116
PmB 25/45 VH <sub>3,0</sub>	B9	-18,0	39	18,2	35	26,6	40	114
20/30+NA NV	B10	-9,8	3	11,7	1	80,5	1	5
30/45+NA NV		-13,7	18	15,4	12	32,7	35	65
25/55-55A+NA NV		-13,6	17	11,7	20	48,5	25	62
10/40-65+NA NV		-9,0	1	11,7	2	73,1	6	9

For the 40 binders, a numerical rating of 1 (highest cold sensitivity) to 40 (lowest cold sensitivity) was determined in all three experiments. The total allows a holistic evaluation of the test methods.

Color-coded are the ten binders selected for the asphalt tests. The investigations of the low-temperature behavior gave the results exemplified in Figure 1 in the three-point bending tensile test.

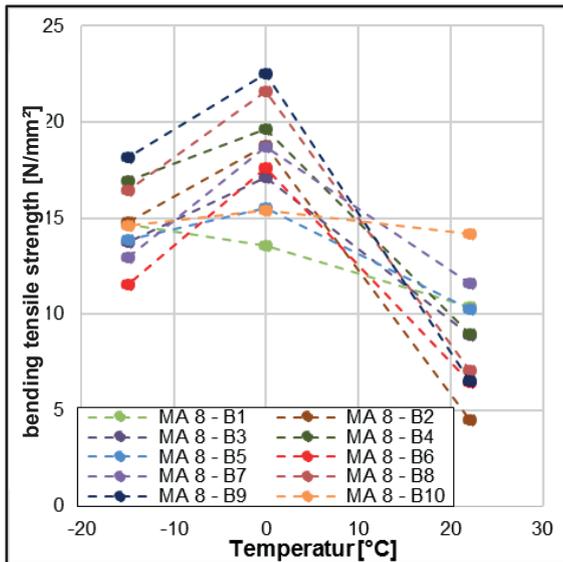


Figure 1: Course of the bending tensile strengths for cast ashes MA 8 with variation of the binder used

For the evaluation of the results of the three-point bending tensile test, reference was made to empirical values from the Berlin area and to the [Vorläufige Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, August 1959]. The evaluation of the experiments was carried out on the basis of the ratio QII from the bending tensile strength at 22 ° C to that at 0 ° C. Another criterion considered was the deflection of the specimens at 0 ° C.

Table 2 shows the measurement results. Blue marked are cold-prone mixed material variants

Table 2: Parameters from the three-point bending tensile test for MA 8 with variation of the binder used

variant	QII	Q III	deflection at 0 ° C
[n]	[-]	[-]	[mm]
MA 8 – B1	0,77	0,71	0,84
MA 8 – B2	0,24	0,30	0,97
MA 8 – B3	0,52	0,65	0,76
MA 8 – B4	0,46	0,53	0,91
MA 8 – B5	0,66	0,74	0,74
MA 8 – B6	0,37	0,56	0,84
MA 8 – B7	0,62	0,90	0,75
MA 8 – B8	0,33	0,43	1,09
MA 8 – B9	0,29	0,36	1,35
MA 8 – B10	0,92	0,97	0,42

It was found that binders which were previously classified as sensitive to cold led to increased crack formation in the asphalt. A useful correlation ( $R^2 = 0.68$ ) was found between the quotient Q II from the three-point flexural tensile test and the tensile stress  $\sigma_{60}$  after 60 minutes of relaxation in the DSR (Figure 2). Further clarification of the mathematical relationship should be made by further investigation.

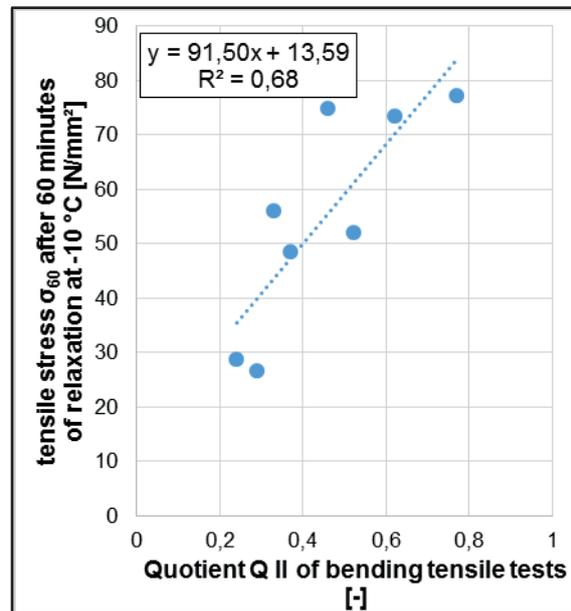


Figure 2: Mathematical connection of the low-temperature flexibility of binder to asphalt tests

For the investigation of the influence of aggregates, in a first step a variation of the largest grain was carried out using three binders. The results of the cold sensitivity are shown for the mastic asphalt MA 5 and MA 11 in Table 3.

**Table 3:** Parameters from the three-point bending tensile test for MA 5 and MA 11 with variation of the binder used

variant	QII	Q III	deflection at 0 °C
[n]	[-]	[-]	[mm]
MA 5 – B1	0,76	0,75	0,78
MA 5 – B4	0,47	0,56	0,80
MA 5 – B7	0,57	0,72	0,91
MA 11 – B1	0,88	0,89	0,65
MA 11 – B4	0,54	0,55	0,67
MA 11 – B7	0,64	0,66	1,04

The systematic investigation of the crushing sand (cs) / natural sand (ns) ratio, the influence of the fillers, fine and coarse aggregate was carried out on 14 variants. The composition of the test variants is summarized in Table 4.

**Table 4:** Variation of the rock components for MA 8

variant	Used filler	cs / ns ratio	used fine and coarse aggregate
[n]	[-]	[M.-%]	[-]
variant 1	KSFF	100/0	Diabas
variant 2	KSFF	80/20	Diabas
variant 3	KSFF	65/35	Diabas
variant 4	KSFF	50/50	Diabas
variant 5	KSFF	35/65	Diabas
variant 6	KSFR	65/35	Diabas
variant 7	DH	65/35	Diabas
variant 8	QH	65/35	Diabas
variant 9	KSFF	65/35	Grauwacke
variant 10	KSFF	65/35	Andesit
variant 11	KSFF	65/35	Basalt
variant 12	KSFR	65/35	Basalt
variant 13	DH	65/35	Basalt
variant 14	QH	65/35	Basalt

The investigation of the influence of the granulometric properties of the aggregates showed that the crushed sand / natural sand ratio has only a small influence on the sensitivity to cold. With the variation of the fillers as well as fine and coarse aggregate it was possible to detect rocks, which are sensitive to cold.

**Table 5:** Parameters from the three-point bending tensile test for MA 8 with variation of the rock components

variant	QII	Q III	deflection at 0 °C
[n]	[-]	[-]	[mm]
MA 8 – GV1	0,63	1,01	0,49
MA 8 – GV2	0,55	0,58	0,72
MA 8 – GV3	0,66	0,74	0,51
MA 8 – GV4	0,69	0,66	0,50
MA 8 – GV5	0,65	0,66	0,52
MA 8 – GV6	0,85	0,91	0,65
MA 8 – GV7	0,80	0,82	0,61
MA 8 – GV8	0,93	0,99	0,63
MA 8 – GV9	0,70	0,69	0,67
MA 8 – GV10	0,87	0,84	0,65
MA 8 – GV11	0,98	0,96	0,65
MA 8 – GV12	0,83	0,83	0,56
MA 8 – GV13	0,85	0,84	0,63
MA 8 – GV14	0,98	0,94	0,63

The evaluation was analyzed based on the measurements shown in Table 5.

A superposition of the influences from the mixture components led as expected to mastic asphalts with high sensitivity to cold. Based on the results of the three-point bending tensile test, it was confirmed that the binder can be expected as the primary cause of crack formation in the asphalt.

The analysis of the measurement precision of the three-point bending tensile test gave a high precision for the triple determination at the three test temperatures. There was a mean standard deviation < 3 % for all three temperatures with a maximum absolute deviation of the individual values from the mean of less than 10 %.

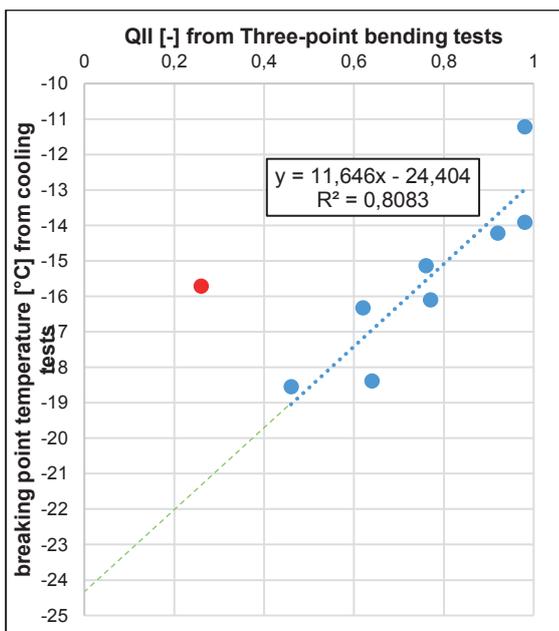
External testing of uniaxial tensile tests and cooling tests revealed that the selected asphalts were confirmed to be cold-susceptible. This assessment is based on the orientation values for the evaluation of the breaking point stress of mastic asphalt at -10 ° C and the breaking point temperature in the cooling test, which are defined in [AP TTV, Teil 1, 2012].

The orientation values for mastic asphalt of [AP TTV, Teil 1, 2012] refer to research activities from the years 1990 and 2002 and accordingly can only be transferred to a limited extent to mastic asphalt produced in accordance with [ZTV Asphalt-StB 07/13].

For a final analysis, correlations between the cold tests of different load conditions were investigated.

The comparative analysis of the cold-sensitive test methods showed a mathematical correlation between the ratio value QII from the three-point bending test to the measured breaking point temperature in the cooling test with a coefficient of determination of 0.81 (Figure 3). This useful to good correlation must be further supported by additional research. If the established relationship is confirmed, the next step would be to adjust the QII limit for assessing low-temperature flexibility to the different mixture compositions.

Both in the evaluation of the cooling tests, as well as in the reserve of the tensile strength the red marked variant is conspicuous. This mastic asphalt mixture contains a wax-modified 50/70 binder and has atypically high fracture temperatures. The result should be examined critically.



**Figure 3:** Correlation of test results from three-point bending tests and cooling tests

In the analysis of five cracked practice tracks, it was found that they could be classified as sensitive to cold during the investigation of the recovered binder as well as on the asphalt. All three binder tests as well as the three-point bending test were used for the evaluation.

In conclusion, it has been found that the mastic asphalt surface courselayer has undergone a change due to changes in occupational safety and health in 2008 and the associated mandatory use of viscosity modifying additives, which has led to higher resistance to deformation as well as higher risk of cracking.

On the basis of the test results obtained, it is necessary to examine whether adaptation of the [TL Asphalt-StB, 07/13] with respect to the binder to be used in the mastic asphalt should be carried out. A definite dependence between the crack formation and the binder hardness could be determined.

## Literature

**AP TTV, Teil 1, 2012:** Arbeitspapier Tieftemperaturverhalten von Asphalt, Teil 1: Zug- und Abkühlversuche; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2012

**E KvB, 2016:** Empfehlungen zur Klassifikation von viskositätsveränderten Bindemitteln; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2016

**Expositionsbeschreibung, 2008:** „Maschinelles Verarbeiten von Gussasphalt“, 2008

**TP Asphalt-StB, Teil 46 A:** Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 46 A: Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

**Vorläufiges Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit, August 1959:** Vorläufiges Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Fassung vom August 1959

**ZTV Asphalt-StB 07/13:** Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007, Fassung 2013

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b> .....	11	6.1.3	Grobe Gesteinskörnung.....	27
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	11	6.1.4	Bindemittel.....	29
<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen und Stand der Erkenntnisse</b> .....	12	6.2	Verformungswiderstand und Kälteflexibilität der Laborproben.....	46
3.1	Grundlagen zu Gussasphalt.....	12	6.2.1	Mischgutzusammensetzung der Prüfvarianten.....	46
3.2	Verformungswiderstand von Asphalt.....	13	6.2.2	Statischer Stempeldringversuch.....	47
3.2.1	Grundlagen des Verformungswiderstands.....	13	6.2.3	Dynamischer Stempeldringversuch.....	48
3.2.2	Prüfverfahren für den Verformungswiderstand.....	14	6.2.4	Dreipunkt-Biegezugversuch.....	51
3.3	Tieftemperaturverhalten von Asphalt.....	15	6.2.5	Auswahl von MA-Varianten für die Validierung der Biegezugprüfung.....	54
3.3.1	Kälteflexibilität von Asphalt.....	16	<b>7</b>	<b>Validierung der Biegezugprüfergebnisse mittels Prüfung des Tieftemperaturverhaltens durch Abkühl- und einaxiale Zugversuche</b> .....	56
3.3.2	Prüfverfahren für die Kälteflexibilität.....	17	<b>8</b>	<b>Validierung der Forschungsergebnisse anhand der Untersuchung von Praxisproben</b> .....	59
<b>4</b>	<b>Untersuchungsmaterialien</b> .....	20	8.1	Mischgutzusammensetzung und -kenngrößen.....	59
<b>5</b>	<b>Beschreibung des Untersuchungsprogramms</b> .....	22	8.1.1	Risshafte Praxisproben.....	59
5.1	Untersuchungsprogramm.....	22	8.1.2	Schadlose Praxisproben.....	60
5.2	Randbedingungen der Prüfungen.....	23	8.2	Verformungswiderstand der Gussasphalt-Praxisproben.....	61
5.2.1	Physikalische und rheologische Bindemittleigenschaften.....	23	8.2.1	Verformungswiderstand der risshaften Praxisproben.....	61
5.2.2	Gesteinskörnungseigenschaften.....	24	8.2.2	Verformungswiderstand schadloser Praxisproben.....	61
5.2.3	Mischgut- und Probenherstellung.....	24	8.3	Tieftemperaturverhalten der Gussasphalt-Praxisproben.....	62
5.2.4	Verformungswiderstand der Gussasphaltvarianten.....	24	8.3.1	Tieftemperaturverhalten schadhafter Praxisproben.....	62
5.2.5	Tieftemperaturverhalten der Gussasphaltvarianten.....	25	8.3.2	Tieftemperaturverhalten schadloser Praxisproben.....	63
5.3	Validierung der Forschungsergebnisse anhand von Untersuchung an Praxisproben.....	25	<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	64
5.3.1	Verformungswiderstand der Praxisproben.....	25	<b>10</b>	<b>Literatur</b> .....	66
5.3.2	Tieftemperaturverhalten der Praxisproben.....	25	<b>Bilder</b> .....	70	
<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Auswertung</b> .....	26	<b>Tabellen</b> .....	72	
6.1	Gemischkomponenten.....	26	<b>Anhang</b> .....	74	
6.1.1	Füller.....	26			
6.1.2	Feine Gesteinskörnung.....	27			



## 1 Einleitung und Problemstellung

Die Gussasphaltbauweise stellt in Deutschland die Bauweise mit der höchsten zu erwartenden Nutzungsdauer dar. Durch ihren im Verarbeitungstemperaturbereich vorhandenen Bindemittelüberschuss bildet sie eine dichte Struktur, welche als besonders verformungs- und alterungsbeständig gilt. Sie ist neben der Betondecke die Regelbauweise für hoch frequentierte Autobahnen in Belastungskategorie Bk100. Durch die hohlraumfreie Ausbildung ist sie als Bestandteil von Abdichtungen insbesondere im Brückenbau unverzichtbar. Veränderungen der Anforderungen aus Klima, Verkehrsaufkommen sowie Umweltschutz haben es notwendig gemacht, die Gussasphaltbauweise darauf anzupassen und zu optimieren. Insbesondere die hohe Verkehrszunahme bringt der Standfestigkeit von Gussasphaltschichten eine besondere Bedeutung zu.

Die Lastabtragung erfolgt beim Gussasphalt nicht primär über das Gesteinsgerüst, sondern auch über die Mörtelphase. Die hinreichende Steifigkeit des Mörtels ist somit Grundvoraussetzung für eine standfeste Bauweise. Um den oben genannten veränderten Anforderungen an Asphalt gerecht zu werden ist eine Optimierung des Gussasphalts sinnvoll. Diese Optimierung ist durch Anpassung der einzelnen Mischgutkomponenten möglich. So kann eine Anpassung der Sieblinie, eine Modifikation der Mörtelphase aber auch die Auswahl des zu verwendenden Bindemittels einen hohen Einfluss auf die resultierende Standfestigkeit haben. Der Verformungswiderstand kann durch die Mörtelmenge und die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen > 2 mm sowie die Menge und Kantenschärfe der Gesteinskörnung 0,063 bis 2 mm (Brechsand/Natursand) beeinflusst werden. Dabei ist insbesondere eine Veränderung der Viskosität im Gebrauchstemperaturbereich wünschenswert. Diese kann durch Zusätze wie Wachse, polymermodifizierte Bindemittel oder Naturasphalte bewirkt werden.

Die Änderung des Arbeitsschutzes, in Form der [Expositionsbeschreibung, 2008], schrieb die Absenkung der Einbautemperaturen von Gussasphalt auf unter 230 °C vor. Eine Möglichkeit zur Verringerung der Einbautemperatur liegt in der Verwendung von viskositätsverändernden Zusätzen. Die Ein- oder Mehrfachmodifizierung der Bindemittel bewirkt eine Veränderung der Viskosität.

In den [ZTV Asphalt-StB 07/13] wird auf die Notwendigkeit zur Verwendung viskositätsveränderter Bindemittel hingewiesen, ohne dass es hierzu bisher eindeutige Bindemittelspezifikationen gibt. Der Verformungswiderstand erhöht sich durch die Verwendung viskositätsverändernder Zusätze meist erheblich, sodass heute zunehmend Diskussionen

über eine hinreichende Kälteflexibilität auftreten. In der Tabelle 2 der [ZTV Asphalt-StB 07/13] fehlt eine eindeutige Angabe zur Auswahl einer zweckmäßigen Bindemittelsorte für Gussasphalte. Die Empfehlungen zur Klassifikation von viskositätsveränderten Bindemitteln [E KvB, 2016] liegen vor, ohne dass die Bindemittel bisher einer zweckmäßigen Anwendung für Gussasphalte zugeordnet sind. Es fehlen belastbare Informationen zu den Kälteeigenschaften, der mit diesen Bindemitteln hergestellten Gussasphalte. Die Überarbeitung der [TL Asphalt-StB 07/13] und der [ZTV Asphalt-StB 07/13] haben begonnen. Hierbei soll unter anderem auch die Tabelle 2 die notwendigen Informationen über viskositätsveränderte Bindemittel erhalten.

Die kritisch zu hinterfragende hinreichende Kälteflexibilität von modifizierten Asphalten wird durch eine komplexe Prüfung der kryogenen Zugspannungen und der Biegezugfestigkeit untersucht, welche ausschließlich von wissenschaftlich ausgestatteten Straßenlaboren durchgeführt werden können.

## 2 Zielsetzung

Mit diesem Forschungsvorhaben sollen Gussasphalte mit möglichst vielen am Markt vorhandenen viskositätsveränderten Bindemitteln bezüglich ihrer Kälteeigenschaften untersucht werden. Im Sinne einer praktikablen Umsetzung der Laboruntersuchungen sollte dies primär mit einem einfachen Prüfverfahren (Dreipunkt-Biegezugversuch) gemäß dem [Vorläufigen Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, August 1959] bei drei Temperaturen erfolgen. Die an einer großen Anzahl unterschiedlich zusammengesetzter Gussasphalte erzielten Ergebnisse mit diesem Verfahren werden hinsichtlich Plausibilität und Wiederholbarkeit ausgewertet. Anschließend werden ausgewählte Varianten, die den gesamten Ergebnisbereich der Dreipunkt-Biegezugversuche hinreichend gut abdecken für validierende Untersuchungen nach [TP Asphalt-StB, Teil 46A] ausgewählt.

Vor dem Hintergrund der Erarbeitung eines praxisbezogenen Instrumentariums werden sowohl im Labor hergestellte Gussasphalte, als auch Gussasphaltproben von der Baustelle untersucht. Bei Letzteren wird zusätzlich die Mischgutzusammensetzung überprüft. Zudem werden Gussasphaltflächen mit einbezogen, die Risse aufweisen und damit auf eine nicht ausreichende Kälteflexibilität hinweisen. Hierbei werden die Risse dokumentiert und bewertet. Aus diesen Ergebnissen soll eine Aussage über mögliche Anforderungswerte für das Prüfergebnis abgeleitet werden.

### 3 Theoretische Grundlagen und Stand der Erkenntnisse

#### 3.1 Grundlagen zu Gussasphalt

Der Begriff Gussasphalt bezeichnet ein Zwei-Phasen-Gemisch aus Bitumen und Gesteinskörnung. Hauptmerkmal des Gussasphaltes ist der hohe Anteil von Bindemittel und Füller, welcher als Mörtel bezeichnet wird. Die Kombination dieser beiden Mischgutkomponenten macht einen Massenanteil von knapp 50 % des gesamten Asphaltmischguts aus. Das korngestufte Mischgut ist so zusammengestellt, dass das beigefügte Bindemittel die Hohlräume der Gesteinskörnung vollständig ausfüllt. Im Einbautemperaturbereich ist der Bindemittelüberschuss aufgrund des Wärmeausdehnungskoeffizienten dafür maßgeblich, dass der Gussasphalt gieß- und streichfähig verarbeitet werden kann. Aufgrund dieser Eigenschaft muss der Gussasphalt nicht wie ein Walzasphalt durch die Verwendung von Walzen verdichtet werden. Eine typische Gussasphaltstruktur ist in Bild 1 dargestellt.

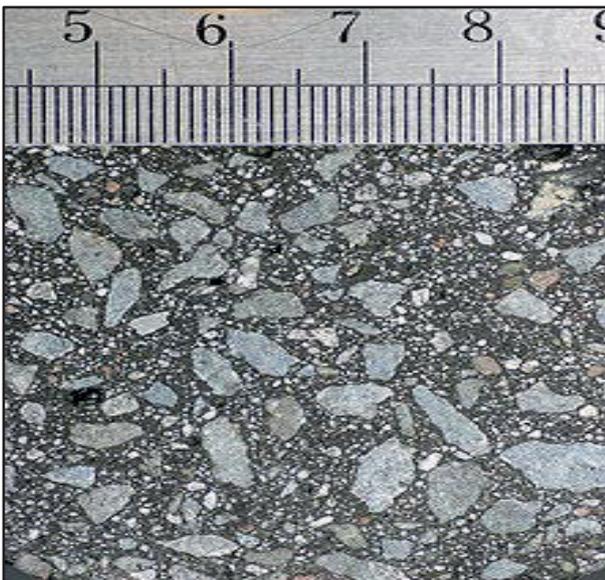


Bild 1: Gussasphalt-Probekörper im Querschnitt

Im Bereich der Gebrauchstemperatur ist der Bindemittelüberschuss durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten nur gering.

Der optimale Bindemittelüberschuss wird nach [Schellenberg, Schellenberg, 2001] mit 1,0 Vol.-% bei einer Temperatur von 240 °C empfohlen. Dieser Bindemittelüberschuss gilt als optimal hinsichtlich der hohen Wärmestandfestigkeit, wie auch einer ausreichender Verarbeitbarkeit. Diese Ergebnisse basieren auf Gussasphaltkonzepten ohne viskositätsverändernde Zusätze. Vor dem Hintergrund der Begrenzung der Verarbeitungstemperatur auf 230 °C und der nun vorgeschriebenen Verwendung

solcher Zusätze ist diese Empfehlung zu hinterfragen.

In Bild 2 ist der Zusammenhang des Bindemittelüberschuss zum Bindemittelgehalt in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

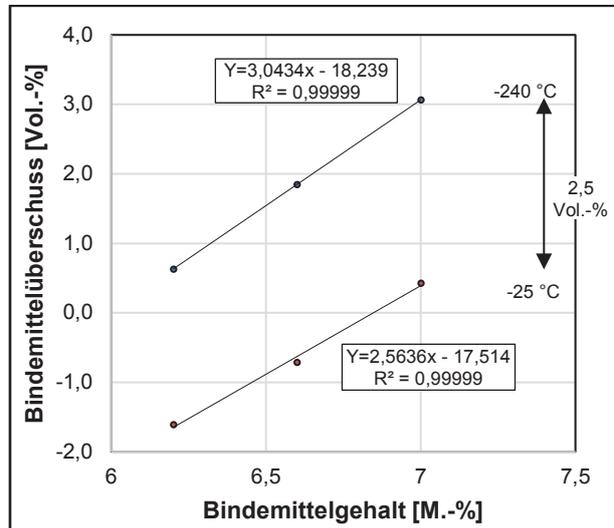


Bild 2: Zusammenhang Bindemittelüberschuss zum Bindemittelgehalt in Abhängigkeit von der Temperatur [Schellenberg, Schellenberg, 2001]

Da die groben Gesteinskörnungen durch den überschüssigen Bindemittelanteil kein verbundenes Korngerüst bilden, findet die Lastabtragung hauptsächlich über die Mörtelphase statt. Eine hinreichende Steifigkeit der Mörtelphase ist somit die Voraussetzung für einen hohen Verformungswiderstand.

Ein weiterer Vorteil für den Einsatz auf hoch belasteten Straßenabschnitten ist die hohe Griffigkeit, welche einen Gussasphalt auszeichnet. Diese wird durch Abstreuen und Einwalzen von Gesteinskörnungen mit Korngrößen > 2 mm erreicht. Neben der Griffigkeit wird durch dieses Verfahren eine hohe Abriebfestigkeit erzeugt.

Ursprünglich wurde der Gussasphalt bei sehr hohen Herstellungstemperaturen von 220 °C bis 250 °C hergestellt und eingebaut.

Die Verwendung von Wachsen im Gussasphalt gewann durch die erstmalige Festsetzung von Luftgrenzwerten für Dämpfe und Aerosole aus Bitumen bei der Heißverarbeitung im Herbst 1996 an Bedeutung.

In einer Forschungsarbeit von [Großhans, 1985] wurden Erfahrungen bei der Modifizierung von Gussasphalt mit Romontanwachs (Romonta) gesammelt. Es wurden die Vorteile sowie die Grenzen der Wachszugabe ermittelt.

[Großhans, 2014] schildert anschaulich die Risiken, welche bei der Gussasphaltverwendung durch den Einsatz von Wachsen entstehen können. Der Einsatz von Wachsmodifikation wird nach aktuellem Stand der Technik aber als notwendig angesehen. Diese Modifikation hat dazu geführt, dass die Eigenschaften von Gussasphalten sowohl im Verarbeitungstemperaturbereich wie auch im Gebrauchstemperaturbereich einer Veränderung unterzogen wurden.

Die Verwendung von härteren Bindemitteln führt grundsätzlich zu einer Erhöhung der Verformungsbeständigkeit von Asphalt. Die Verwendung von viskositätsverändernden Additiven bzw. wachsmodifizierter Bindemittel erhöht die resultierende Steifigkeit zusätzlich.

Negative Folgen der Wachsmodifikation können nach [Großhans, 2014] somit durch die aus der zunehmenden Härte resultierende schlechtere Rissflexibilität, das verringerte Klebeverhalten und Probleme beim Schichtenverbund sein.

Zur Reduktion der Rissneigungsgefahr muss folglich die Zugabe von Wachsen auf ein maximales Zugabemaß beschränkt oder die Bindemittel einem eindeutigen Verwendungszweck zugeordnet werden.

Die Performance-Eigenschaften von Gussasphalt sind im Wesentlichen abhängig von der Mörtelphase. Die Qualität und Menge des Füllers beeinflusst die Eigenschaften von Gussasphalt daher in einem hohen Maße. Nach [Schellenberg, Schellenberg, 2003] sollten in hochfrequentierten Deckschichten ausschließlich Kalksteinmehle unter Zugabe von Kalkhydrat verwendet werden. Das Kalksteinmehl führt dabei zu einer besseren Verarbeitbarkeit und Haftung. Das Kalkhydrat bewirkt durch seine versteifende Eigenschaft eine bessere Verformungsbeständigkeit des Asphalts.

Als Kriterium zur Bewertung der Einsatzmöglichkeit feiner Gesteinskörnungen in Gussasphalt wird die innere Reibung, dokumentiert durch den Fließkoeffizienten, angeführt. Dieser ist abhängig von der Kornform, Kantigkeit und Oberflächenbeschaffenheit und beeinflusst somit die Verformungsbeständigkeit. Nach [Hofko et al., 2016] soll der Einsatz von ausschließlich Rundkorn eine weitere Temperaturabsenkung bei der Herstellung ermöglichen, ohne dabei negative Auswirkungen auf den Widerstand gegen bleibende Verformungen zu haben. Die positiven Resultate unter Verwendung von rundkörnigen feinen Gesteinskörnungen mit niedrigen Fließkoeffizienten wurde in [Wörner et al., 2008] nachgewiesen.

## 3.2 Verformungswiderstand von Asphalt

### 3.2.1 Grundlagen des Verformungswiderstands

Eine Asphaltdeckschicht aus Gussasphalt gilt bei dynamischen Lasteintragungen als sehr verformungsbeständig und findet mit dieser positiven Eigenschaft große Einsatzmöglichkeiten in hoch belasteten Verkehrsbereichen.

Der Verformungswiderstand von Gussasphalt ist dabei von mehreren Einflussfaktoren abhängig, die sich generell in zwei Gruppen unterteilen lassen. Allgemein können diese Gruppen als äußere und kompositionelle Einflussfaktoren definiert werden. Dabei zählen die Temperatur, die Verkehrsbelastung sowie die topographischen Gegebenheiten zu den äußeren Einflüssen, während die Bindemittelsorte, die Füllerart, das Füller-Bitumen-Verhältnis, der Bindemittelanteil sowie die Misch- und Verweilzeit zum Bereich der kompositionellen Faktoren gehören.

Nach der [RaB-A06] besitzt der Gussasphalt thermoviskose Eigenschaften. Im Wesentlichen sind diese Eigenschaften durch das Bindemittel beeinflusst, welches sich im niedrigen Temperaturbereich wie ein elastischer Festkörper verhält und bei hohen Temperaturen ein zunehmend viskoses Verhalten aufweist.

[Blumer, 1975] beschreibt anhand der Theorie von COULOMB das temperaturabhängige Verformungsverhalten von Asphalt. Die Theorie besagt, dass der Verformungswiderstand sowohl durch einen Kohäsionsanteil wie auch durch die innere Reibung beeinflusst wird. Die innere Reibung ist dabei abhängig von der temperaturbeständigen Reibung zwischen der Gesteinskörnung und der Viskosität der flüssigen Bestandteile. Die wichtigen Einflussfaktoren bezüglich der temperaturabhängigen Verformung sind deshalb die Kohäsion und Viskosität der flüssigen Phase.

Die irreversible Verformung aus Verkehrsbelastung lässt sich mit der Formel (Gl. 1) von [Francken et al., 2006] abschätzen.

$$\varepsilon_{irr} = \left( \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2 * E_{irr}(V, T)} * \frac{N}{450 * V} \right)^{0,25} \quad (\text{Gl. 1})$$

mit: V = Geschwindigkeit  
T = Temperatur  
N = Anzahl der Lastwechsel  
E<sub>irr</sub> = irreversibler Verformungsmodul  
σ<sub>v</sub>, σ<sub>h</sub> = Vertikal- und Horizontalspannung

Die Verformung ist maßgeblich von der Anzahl der Lastwechsel abhängig. Die Zunahme der Verformung ist mit steigender Belastungsdauer deutlich zu erkennen. Deren Intensität nimmt jedoch mit zunehmender Belastungsdauer ab.

Bei der Wahl der Bitumensorte ist zu beachten, dass härtere Bindemittel sich hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit positiv auswirken. Weichere Bindemittel hingegen sind positiv hinsichtlich der Kälteeigenschaften zu beurteilen. Eine bezüglich beider Eigenschaften ausgewogene Bindemittelauswahl ist von hoher Bedeutung.

Die Modifikation der Bindemittel durch Polymere, Naturasphalt und weitere Additive wurde in [Renken et al., 2003] behandelt. Es wurde festgestellt, dass die Viskositätsveränderung die Bindemittel härter und somit verformungsbeständiger macht. Bezüglich der Zugabe von Polymerzusätzen konnte nach [Späth, 1978] festgestellt werden, dass diese die rheologischen Eigenschaften im Bitumen verbessern. Sie vergrößern den Plastizitätsbereich und verbessern somit die temperaturabhängigen kohäsiven Eigenschaften des Asphalts. Dem Auftreten von Rissen oder Spurrinnen kann somit durch den Einsatz von Polymeren positiv entgegengewirkt werden. Allerdings ist bei den hohen Verarbeitungstemperaturen von Gussasphalt eine Schädigung der Polymere (Degradation) nicht auszuschließen.

Nach [Schellenberg, Schellenberg, 2003] hat auch der Füller einen großen Anteil an der Verformungsbeständigkeit des Asphalts. Die Autoren heben besonders das Kalksteinmehl mit dessen positiver Wirkung hervor. Vorteile, welche durch Verwendung von Kalksteinmehl erzeugt werden, zeigen sich zum einen durch den Kalzium-Ionenüberschuss, welcher in den sogenannte Zwischengitterplätzen des quellfähigen Materials den Netzebenenabstand reduziert und zum anderen begünstigen Kalzium-Ionen den Aufbau von stabilen Haftbrücken auch zwischen saurem Gestein und dem im Bindemittel befindlichen Erdölsäuren.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der Füller und das Bindemittel die wesentlichen Komponenten zur Optimierung der Gussasphaltsteifigkeit sind.

### 3.2.2 Prüfverfahren für den Verformungswiderstand

Zur Prüfung des Verformungsverhaltens von Asphalt werden drei in der [TP Asphalt-StB 07/16] definierte Prüfverfahren nachfolgend kurz beschrieben.

Eine mögliche Kenngröße wird durch den Spurbildungsversuch gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 22] zur Bestimmung der Spurrinnentiefe ermittelt.

Für die Untersuchung wird ein Probekörper mit einem 50 mm breiten Gummirad dynamisch unter einem Auflagegewicht von 700 N belastet. Der Versuch wird mit einer konstanten Frequenz von 53 Überrollungen pro Minute durchgeführt. Die Prüftemperatur wird dabei konstant gehalten und die Luft kontinuierlich umgewälzt. Der Versuch gilt als beendet, wenn 20.000 Überrollungen oder eine erreichte Spurrinnentiefe von 20 Prozent der Plattendicke erreicht wurden.

Für Gussasphalt ist der Spurbildungsversuch allerdings umstritten und gilt nicht als Regelprüfung.

Ein weiteres Prüfverfahren für den Verformungswiderstand stellt die Eindringtiefe an Gussasphaltwürfeln gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 20] dar. Dies ist die Regelprüfung zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Gussasphalt.

Die Eindringtiefe wird mittels eines statisch belasteten Prüfstempels in einen Asphalt-Probekörper (Würfel) ermittelt.

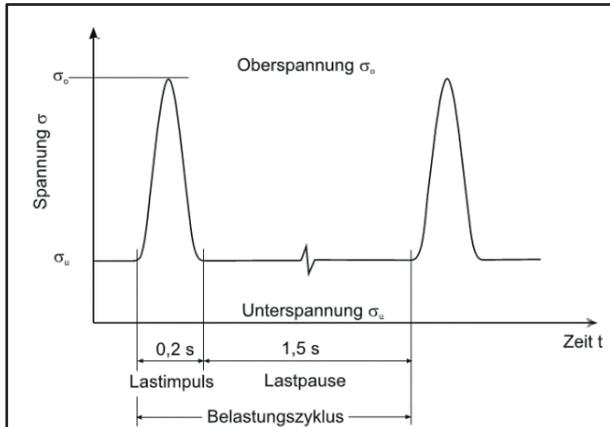
Der Probewürfel wird für die Untersuchung senkrecht zur Einfüllrichtung eingespannt und für eine Zeitdauer von 60 Minuten auf die Prüftemperatur temperiert.

Der Prüfstempel wird zentrisch auf die Probe aufgesetzt und mit einer Vorkraft zehn Minuten lang belastet. Anschließend wird die Prüfung durchgeführt und die Eindringtiefe nach 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120 und 300 Minuten erfasst. Als Ergebnis der Untersuchung kann eine Zeit-Eindringkurve gezeichnet werden.

In der [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1] ist mit dem dynamischen Stempeleindringversuch an Gussasphalt ein weiteres Prüfverfahren für die Bestimmung des Widerstandes gegen bleibende Verformungen definiert. Diese Prüfung wird bei Gussasphalten angewendet, die für hohe Belastungsklassen vorgesehen sind (BK100 bis BK32).

Beim dynamischen Stempeleindringversuch wird ein zylindrischer Probekörper mit einer Druck-Schwellbelastung beaufschlagt. Es werden mehrere Belastungszyklen simuliert und die zugehörige bleibende Verformung unter der oberen Lastplatte

messtechnisch erfasst. Das Prinzip des Spannungsverlaufs während einer Impulsbelastung ist in Bild 3 dargestellt.



**Bild 3:** Darstellung eines Belastungszyklus im dynamischen Stempelleindringversuch [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1]

Die Kenngröße, welche der Bewertung des Verformungswiderstandes dient, ist die Stempelleindringtiefe nach 2.500 Belastungszyklen oder die zugehörige Lastwechselzahl bei Erreichen des Abbruchkriteriums bei einer Eindringtiefe von 5 mm.

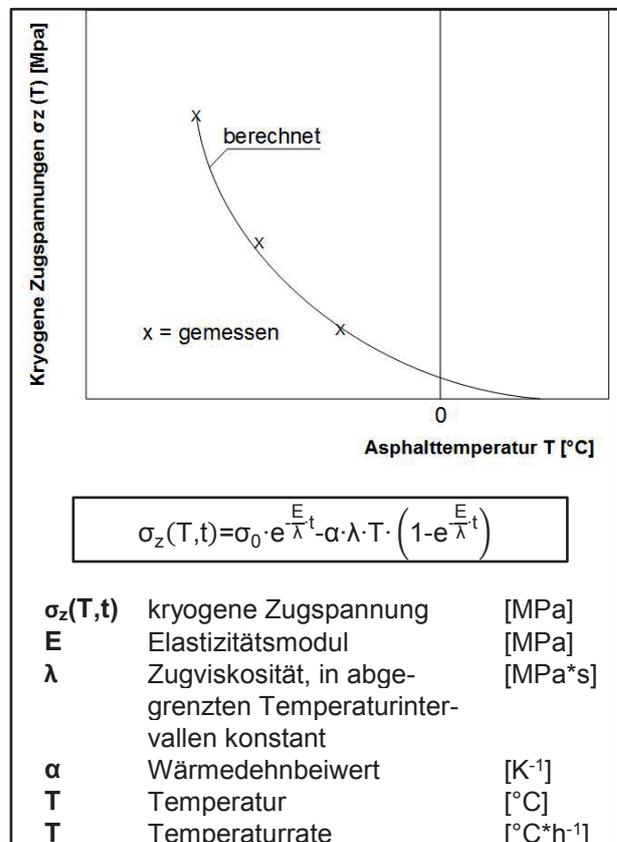
Die Versuchsdurchführung erfolgt bei 50 °C und einer vorangegangenen Temperierung in einer Wärmekammer. Der Einbau des Probekörpers erfolgt so, dass der Prüfstempel zentrisch auf die bei der Probekörperherstellung unten liegende Seite aufgesetzt.

### 3.3 Tieftemperaturverhalten von Asphalt

#### 3.3.1 Kälteflexibilität von Asphalt

Eine der wichtigsten Gebrauchseigenschaften einer Asphaltbefestigung ist die Rissresistenz bei Kälte, die im Wesentlichen durch das Relaxationsvermögen des bitumenhaltigen Baustoffgemisches beeinflusst wird. Hiermit kann eine temperaturinduzierte Zugspannung durch Dehnung abgebaut werden. Im Asphaltkörper entstehen bei tiefen Temperaturen durch die Verhinderung des thermischen Schrumpfens abkühlungsbedingte kryogene Zugspannungen. Diese können mathematisch unter Verwendung von Materialkenngrößen der Mischgutkomponenten in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet werden. Bild 4 stellt den Verlauf und die mathematischen Abhängigkeiten der Kenngrößen der kryogenen Spannungen bei tiefen Temperaturen dar.

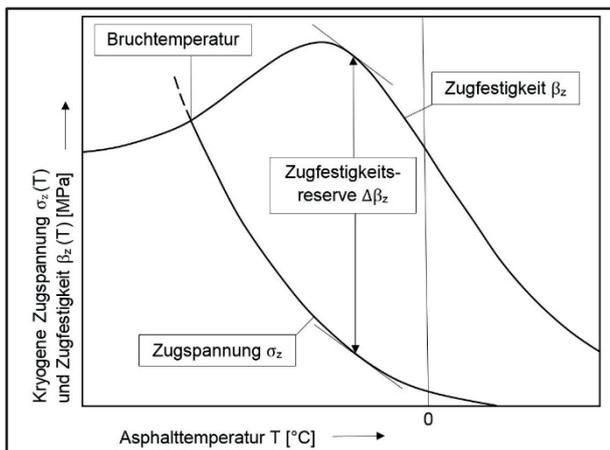
Nennenswerte kryogene Zugspannungen entstehen erst bei tiefen Temperaturen. Bei hohen Temperaturen verhindert der hohe viskose Steifigkeitsanteil des Bindemittels die Entstehung der Spannungen im Asphalt. Mit abnehmender Temperatur entsteht zunehmend ein Wettbewerb zwischen Relaxation und Zugspannung.



**Bild 4:** Kryogene Zugspannung in Abhängigkeit von der Temperatur (Zeit) im Asphalt [Arand, 1996]

Folglich können lange und kalte Winter mit häufigen Temperaturschwankungen zahlreiche Schäden an der Straßenbefestigung erzeugen. Durch die vermehrt auftretenden starken Temperaturgradienten und Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes erhöhen sich auch die resultierenden kryogenen Zugspannungen. Eine Möglichkeit zur Verringerung solcher Straßenschäden ist der Einsatz geeigneter Mörtelgemische mit hohem Relaxationsvermögen. Mit zunehmender Bitumenhärte nimmt sowohl bei Straßenbaubitumen als auch bei elastomermodifizierten Bitumen die Höhe der thermisch induzierten Zugkräfte zu. Auch die viskositätsverändernden Zusätze, welche nach aktuellem Stand der Technik im Bereich des Gussasphalts als notwendig anzusehen sind, führten zu einer Erhöhung solcher Spannungen.

Ein wesentlicher Kennwert zur Beurteilung der Rissempfindlichkeit eines Asphalttes ist die Zugfestigkeit. Rissbildung tritt auf, wenn die kryogenen Zugspannungen die Höhe der Zugfestigkeit des Asphalttes erreichen. Dieser temperaturabhängige Zusammenhang kann grafisch dargestellt werden. Die Temperatur bei Erreichen dieses Zusammenhangs ist die Bruchtemperatur. Der Verlauf der Zugfestigkeit, der kryogenen Zugspannungen und der resultierenden Bruchtemperatur ist in [Arand, 1996] exemplarisch aufgeführt und wird in Bild 5 dargestellt.

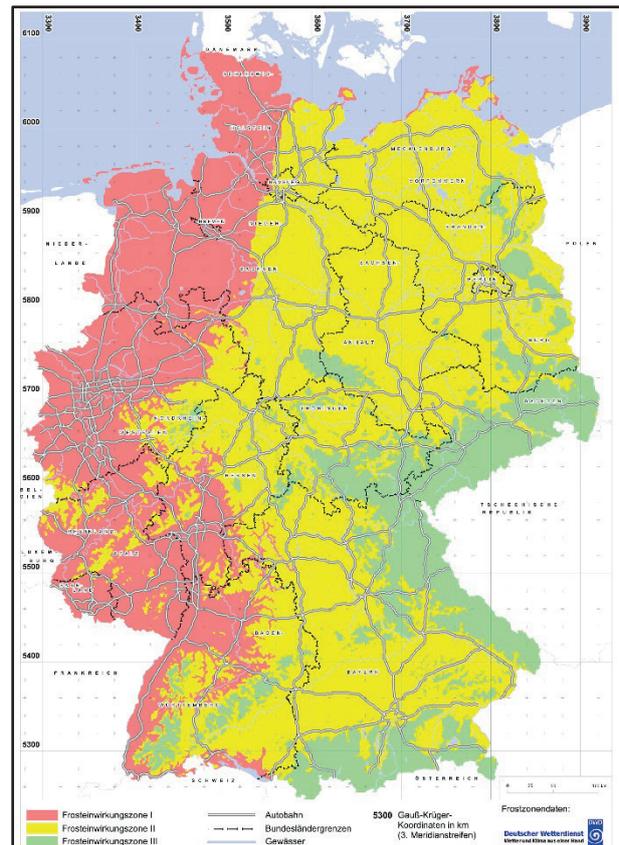


**Bild 5:** Kryogene Zugspannung und -festigkeit von Asphalt in Abhängigkeit von der Temperatur im Asphalt [Arand, 1996]

Die im Asphalt vorhandene Zugfestigkeitsreserve ist die Differenz zwischen kryogenen Zugspannungen und der Zugfestigkeit. Diese Kenngröße stellt die aus dem Verkehr zusätzlich aufnehmbare Zugspannung dar.

Die Abschätzung der Rissempfindlichkeit von Asphalt kann anhand der Bruchtemperatur und der Kartierung der Frosteinwirkungszonen in Deutschland gemäß [RStO 2012] vorgenommen werden (Bild 6).

Das Arbeitspapier Tieftemperaturverhalten von Asphalt, Teil 1: Zug- und Abkühlversuche [AP TTV, Teil 1, 2012] liefert Orientierungswerte zur Beurteilung der Bruchtemperatur von Asphaltbeton. Eine ausreichende Kälteflexibilität von Asphaltbetondeckschichten kann angenommen werden, wenn die Bruchtemperatur nicht höher als  $-15\text{ °C}$  in der Frosteinwirkungszone I,  $-20\text{ °C}$  in der Frosteinwirkungszone II und  $-25\text{ °C}$  in Frosteinwirkungszone III ist.



**Bild 6:** Kartierung der Frosteinwirkungszonen [BAST, 2016]

Ein Gussasphalt weist im Allgemeinen eine hohe Beständigkeit gegen Tieftemperaturrisse auf. Die guten Kälteeigenschaften sind abhängig von zwei im Gussasphalt vorhandenen Eigenschaften.

Zum einen besitzt dieser im Vergleich zu anderen Bauweisen hohe Bindemittelgehalte. Die Relaxation ist, wie zuvor beschrieben, eine Kenngröße für die Kältebeständigkeit und bei hohen Anteilen des Bindemittels wirkt sich diese günstig auf das Tieftemperaturverhalten des Asphaltpakets aus. Zum anderen ist der Gussasphalt annähernd hohlraumfrei. Hierdurch wird eine große effektive Querschnittsfläche erzeugt, welche für eine bessere Verzahnung und somit für einen Anstieg der Zugfestigkeit sorgt. [Hofko et al., 2016]

Mit Einführung der Anforderungen an den Arbeitsschutz war die Verwendung von viskositätsverändernden Zusätzen für den Einbau von Gussasphaltbefestigungen notwendig. Laut [Renken, 2013] wirkt sich diese Modifikation jedoch negativ auf die Kälteeigenschaften des Asphalts aus. Die Wachzugabe führt zu einer Verhärtung des Bindemittels und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus [Kaluza, 2011] zu einer damit einhergehenden Verminderung des Relaxationspotentials.

[Arand, 1996] stellt Erkenntnisse aus einer systematischen Variation der Korngrößenverteilung, des Bindemittel- sowie des Brechsandanteils dar. Es konnte festgestellt werden, dass diese Parameter die Bruchtemperatur nur im geringfügigen Maß beeinflussen. Die Viskosität des Bindemittels wurde als dominante Komponente eindeutig identifiziert. Somit kommt der Betrachtung des Bindemittels eine besondere Bedeutung zu.

Ursprünglich wurde die Beurteilung des Kälteverhaltens von Bindemitteln durch den Brechpunkt nach Fraaß vorgenommen. Dieses Verfahren ist jedoch insbesondere zur Beurteilung von modifizierten Bindemitteln kein aussagekräftiges Prüfverfahren.

Die in Bending Beam Rheometer (BBR)-Versuchen ermittelten Biegebiegesteifigkeiten stellen ein mögliches Kriterium zur Bewertung der Kälteflexibilität des Bindemittels dar. Dafür werden die Temperaturen bei der Biegebiegesteifigkeit von 300 MPa und bei einem  $m$ -Wert von 0,3 ermittelt.

Die Bewertung der Kälteflexibilität von Asphalt kann grundsätzlich als korrelierend mit der des Bindemittels angesehen werden. Nach [Schellenberg, Schellenberg, 2015] ist eindeutig festzustellen, dass der Rissbildung nicht durch Zugfestigkeits-, sondern vielmehr durch Dehnungsreserven begegnet werden muss, welche ermöglichen, dass durch die Relaxation Spannungen durch Dehnung abgebaut werden können.

Die Kälteeigenschaften von Asphalt können dabei durch verschiedene Prüfverfahren untersucht werden, die in Kapitel 3.3.2 beschrieben werden.

### 3.3.2 Prüfverfahren für die Kälteflexibilität

Die Rissempfindlichkeit von Asphalt kann über unterschiedliche Prüfverfahren angesprochen werden. Bild 7 gibt einen Überblick über die gängigen Versuchsmethoden.

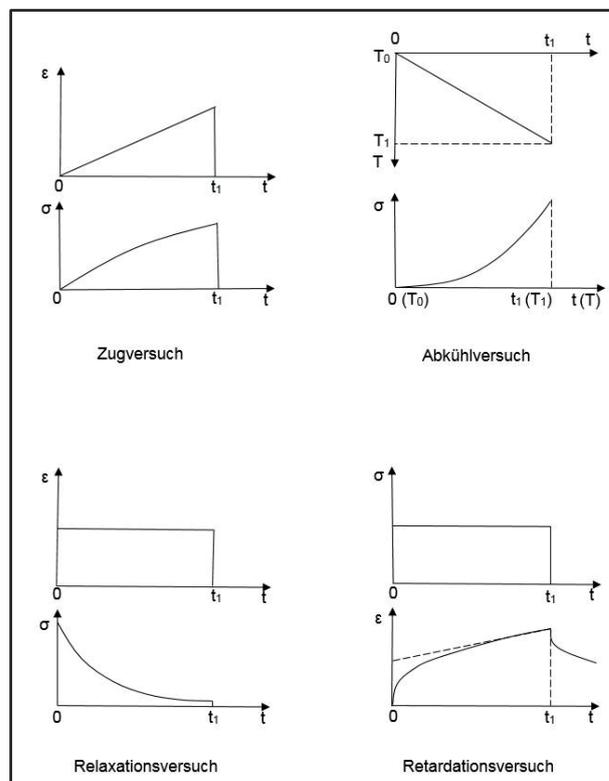


Bild 7: Versuche zur Ansprache des thermo-rheologischen Verhaltens von Asphalten [Arand, 1996]

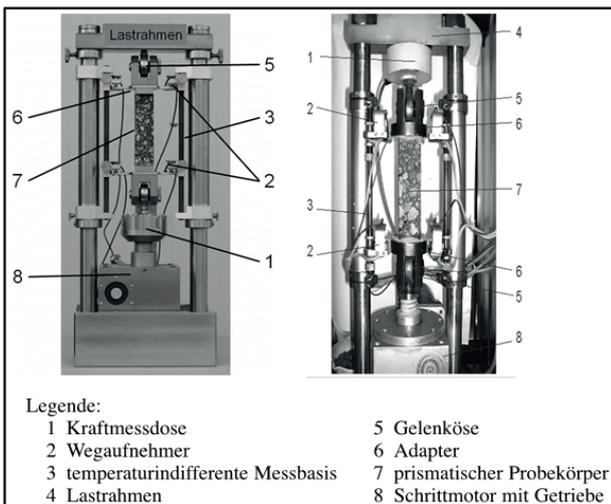
Die vier dargestellten Versuchsmethoden dienen unterschiedlichen Zwecken. Der einaxiale Zugversuch und der Abkühlversuch stellen Versuche dar, welche die in der Praxis auf Asphalt einwirkenden Einflussfaktoren abbilden sollen. Der Relaxationsversuch und der Retardationsversuch stellen Versuche dar, welche überwiegend der Erfahrungssammlung und wissenschaftlichen Zwecken dienen [Arand, 1996].

Der einaxiale Zugversuch ist ein in der [TP Asphalt-StB, Teil 46 A] beschriebenes Prüfverfahren zur Bestimmung der Kälteeigenschaften. Hierbei wird ein Probekörper bei konstanter Temperatur und konstanter Zuggeschwindigkeit so lange auseinander gezogen, bis dieser reißt. Die im Asphalt erzeugten Spannungen werden aufgezeichnet und die Spannung beim Riss wird als Zugfestigkeit dokumentiert. Als weitere Kenngröße kann aus dem Versuch die korrespondierende Bruchdehnung bei der untersuchten Prüftemperatur ermittelt werden.

Der Abkühlversuch ist das zweite in der [TP Asphalt-StB, Teil 46 A] definierte Prüfverfahren zur Ermittlung der Kälteeigenschaften, hierbei wird ein Probekörper in eine Prüfeinrichtung eingespannt und anschließend einer Belastung durch Temperaturreduktion ausgesetzt. Seine Länge wird dabei konstant gehalten, das Schrumpfen somit unterbunden. Der Abkühlprozess erzeugt im Asphalt bei ausreichend tiefen Temperaturen kryogene Zugspannungen. Diese entstehen, wie in der Praxis, durch die Verhinderung des thermischen Schrumpfens. Als Ergebnis des Abkühlversuchs wird der Verlauf der kryogenen Spannungen über die Temperatur und die Bruchspannung bei der Bruchtemperatur dokumentiert.

Die Kombination des einaxialen Zugversuchs und des Abkühlversuchs wird, wie in Bild 5 dargestellt, ausgewertet.

Bild 8 zeigt eine Prüfeinrichtung zur Durchführung von einaxialen Zug- und Abkühlversuchen.

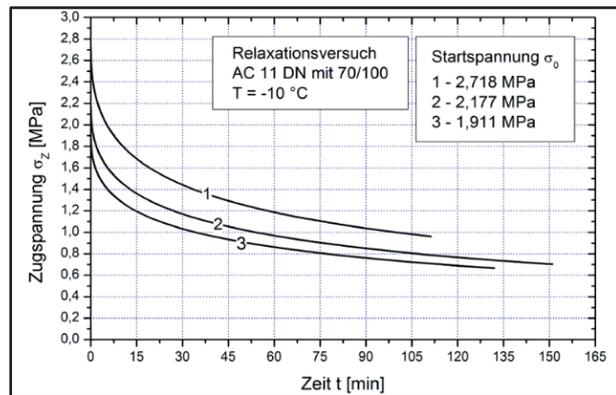


**Bild 8:** Prüfeinrichtung zur Durchführung Einaxialer Zug- und Abkühlversuche [TP Asphalt-StB, Teil 46 A]

Das Kälteverhalten von Asphalt kann somit durch die komplexe Kombination aus einaxialen Zugversuchen und dem Abkühlversuch untersucht werden. Der Zusammenhang der ermittelten Kenngrößen ist in Kapitel 3.3.1 dargestellt.

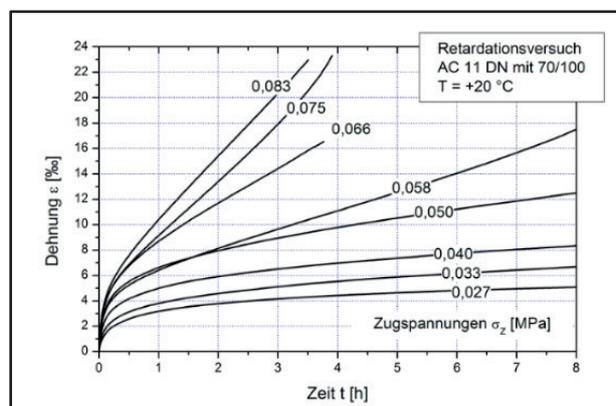
Nachteilig an dieser Vorgehensweise ist der vergleichsweise hohe Prüfaufwand.

Beim Relaxationsversuch (Bild 9) wird ein Asphaltprobekörper spannungsfrei auf die Prüftemperatur abgekühlt. Belastet wird der Probekörper durch eine Dehnung bei konstanter Probekörperlänge. Die durch die spontane Dehnung erzeugte Spannung liegt bei 70 % der Zugfestigkeit und reduziert sich mit zunehmender Belastungszeit durch die Relaxationsfähigkeit des Asphalts.



**Bild 9:** Relaxationsspannungen am AC 11 DN unter Variation der Startspannung [Büchler, 2010]

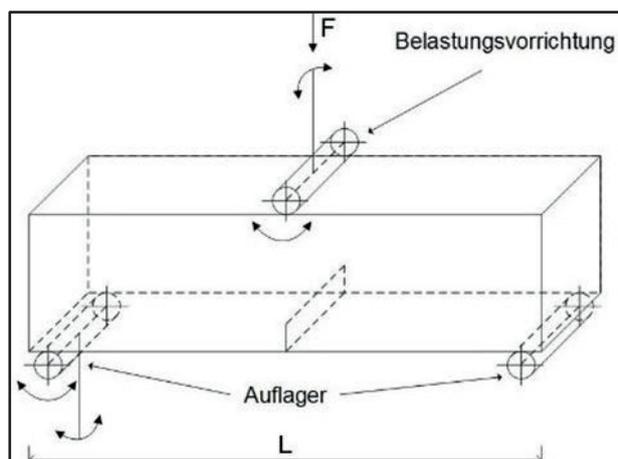
Der Retardationsversuch wird auch als Zugkriechversuch bezeichnet. Für die Versuchsdurchführung wird ein Probekörper unter spannungsfreien Randbedingungen auf die Prüftemperatur herabgekühlt. Anschließend wird eine konstante Spannung aufgebracht, welche 10 % bis 70 % der Zugfestigkeit entsprechen soll. Gemessen wird die Längenänderung des Probekörpers. Der Abbruch des Versuchs erfolgt nach acht Stunden Belastungsdauer oder bei Überschreitung des Messbereichs der Wegaufnehmer. Ergebnis der Untersuchung ist der Verlauf der Dehnung über die Zeit. Bild 10 stellt exemplarisch den Verlauf am Beispiel eines Asphaltbeton AC 11 D N dar.



**Bild 10:** Retardationsverlauf – Dehnungsverläufe für verschiedene Zuspannungen am Beispiel eines AC 11 DN [Büchler, 2010]

Nach dem [Vorläufigen Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, August 1959] gibt es ein weiteres Prüfverfahren, welches für die Beurteilung der Rissempfindlichkeit entwickelt wurde.

Das Prinzip der Messeinrichtung ist in Bild 11 dargestellt.



**Bild 11:** Prinzipskizze Versuchsaufbau des Dreipunkt-Biegezugversuchs [nach tunnel-online 1/2011]

Dieser Versuch stellt eine experimentell einfach und schnell zu realisierende Alternative zu den komplexen Prüfmethode des Abkühl- und des einaxialen Zugversuchs dar. Inwieweit eine ausreichend differenzierende Beurteilung der Rissempfindlichkeit möglich ist, ist zu ermitteln.

Die Biegezugprüfung an Gussasphalten findet insbesondere im Raum Berlin seit vielen Jahren Anwendung. Die prüftechnische Ansprache des Rissverhaltens im Rahmen von Erstprüfungen, Kontrollprüfungen und Schadensuntersuchungen ist die Grundlage für einen umfangreichen Bewertungshintergrund. Der Arbeitskreis „Laboriumstechnik 7.6.4“ hat dies zum Anlass genommen, sich seit dem Jahr 2008 mit diesem Prüfverfahren zu beschäftigen. Es wird angestrebt, die Biegezugprüfung als Ergänzung zu den wissenschaftlich komplexen Prüfungen des Tieftemperaturverhaltens gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 46 A] als praktikable, schnelle und qualitative Prüfung mittels einer Arbeitsanleitung zu standardisieren.

Für die Untersuchungen werden Asphaltprismen mit den Abmessungen 160x40x40 mm hergestellt und senkrecht zur Einfüllrichtung unter Aufbringung einer Biegebeanspruchung bei drei Temperaturen geprüft. Für die Temperierung ist ein Wasserbad zu verwenden.

Die Biegebeanspruchung erfolgt in einer Prüfpresse mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/min. Die Prüfung wird bei 22 °C, bei 0 °C und bei -15 °C durchgeführt. Die beim Bruch vorhandene Last wird

als Höchstlast (Bruchlast) definiert und mit dem bis zum Erreichen der Höchstlast zurückgelegten Weg als Verformung des Probekörpers erfasst und für die Berechnung der Kenngrößen verwendet.

Die Prüfung ist innerhalb von 60 Sekunden nach der Entnahme aus der Klimakammer zu beenden.

Das Ergebnis dieser Untersuchung wird in Form der Biegezugfestigkeit  $\sigma_B$  in N/mm<sup>2</sup> sowie der Durchbiegung D in mm unter Angabe der Prüftemperatur dokumentiert. Die Entwicklung der Kraft und Durchbiegung bis zum Bruch ist in Bild 12 dargestellt.

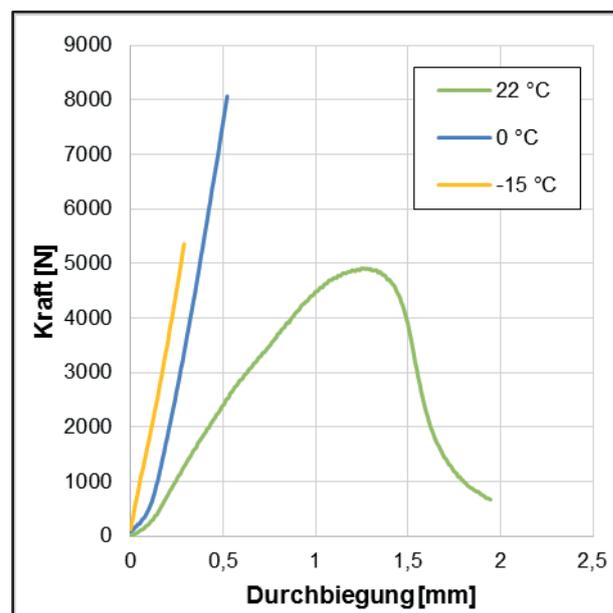
Die Biegezugfestigkeit wird mit der Gleichung 2 berechnet.

$$\frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2} = \sigma_B \quad (\text{Gl. 2})$$

mit:

- $\sigma_B$  = Biegezugfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>
- P = Höchstlast (Bruchlast) in N
- L = Länge (Stützweite) in mm
- b = Breite des Prüfkörpers in mm
- h = Höhe des Prüfkörpers in mm

Die Bewertung der Messgrößen erfolgt anhand der Quotienten Q II und Q III. Q II ergibt sich als Quotient aus der Biegezugfestigkeit bei 22 °C und der Biegezugfestigkeit bei 0 °C, während Q III den Quotienten aus Biegezugfestigkeit bei 22 °C zu der Biegezugfestigkeit bei -15 °C ermittelt.



**Bild 12:** Kraft-Weg-Verlauf bei der Biegezugprüfung

Die Rissicherheit gilt als ausreichend, wenn der Quotient Q II  $\leq 0,6$  und die Durchbiegung des Probekörpers bei der Biegezugfestigkeit von 0 °C  $\geq 0,3$  mm ist. Der Quotient QIII dient der Erfahrungssammlung.

## 4 Untersuchungsmaterialien

In dieser Forschungsarbeit erfolgt die Materialauswahl anhand von Referenzprojekten und Voruntersuchungen, welche im Rahmen von Forschungstätigkeiten und studentischen Arbeiten an der Ruhr-Universität Bochum entstanden sind [Radenberg, Gehrke, 2015] und [Carkci, 2012]. Der Praxisbezug der eingesetzten Materialien steht bei den Untersuchungen im Vordergrund, sodass für die Materialauswahl Bauunternehmen kontaktiert wurden, um häufig verwendete Mischgutkonzepte auszuwählen.

Die derzeitige Klassifikation der viskositätsveränderten Bindemittel lässt insgesamt 14 verschiedene Bindemittelsorten (8 nur mit viskositätsverändernden Zusätzen und 6 mit Doppelmodifikation (Polymer+Wachs)) erwarten, die allerdings nicht alle für die Anwendung im Gussasphalt geeignet sind. Vergleichsweise „weiche“ Sorten sind dem Einsatz in Walzasphalten vorbehalten.

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge und vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung wurden von den 14 Sorten 10 viskositätsveränderte Bindemittelsorten in das Untersuchungsprogramm mit einbezogen. Diese haben eine Sortenbezeichnung in Abhängigkeit von der resultierenden Penetrationsspanne und der Wachsart.

Eine Auflistung der verwendeten Bindemittel ist in Tab. 1 dargestellt.

**Tab. 1:** Sortenbezeichnungen für viskositätsveränderte Bindemittel

Viskositätsveränderte Bindemittel	Viskositätsveränderte polymermodifizierte Bindemittel
15 / 25 VL	PmB 10 / 25 VL
15 / 25 VH	PmB 10 / 25 VH
25 / 35 VL	PmB 25 / 45 VL
25 / 35 VH	PmB 25 / 45 VH
35 / 50 VL	
35 / 50 VH	

Dabei war zu beachten, dass es von einigen Sorten durchaus Bindemittelkonzepte mit unterschiedlichen viskositätsveränderten Zusätzen gibt.

Die Klassifizierung in „L“ und „H“ erfolgt gemäß [E KvB, 2016] anhand der Phasenübergangstemperatur. Bindemittel mit einer Phasenübergangstemperatur kleiner 100 °C werden mit L (low phase transition temperature) kategorisiert, während solche mit einer Temperatur größer 100 °C der Kategorie H (high phase transition temperature) zugeordnet werden. Die mit „L“ bezeichneten Sorten werden mit Fischer-Tropsch-Wachs oder einem

speziellen Montanwachs hergestellt und den mit „H“ bezeichneten Bindemitteln wird ein Fettsäureamid oder ein anderes spezielles Montanwachs zugegeben.

Durch die Vielfalt der Zusätze ergibt sich eine Anzahl von insgesamt 20 verschiedenen viskositätsveränderten Bindemitteln, die sich durch mehrere Hersteller mit gleichem Zusatz noch erweitern ließe. Mit Montanwachs veränderte Bindemittel mussten im Labor hergestellt werden, da es hiervon keine lieferfertigen Produkte gibt. Zudem wurden jeweils acht weitere Bindemittelgemische mit einem Fischer-Tropsch-Wachs und einem Fettsäureamid mit jeweils zwei unterschiedlichen Wachsanteilen (1,5 und 3,0 M.-%) im Labor hergestellt. Vier weitere Bindemittel wurden mit Naturasphalt und Wachs modifiziert und in das Untersuchungsprogramm einbezogen. Aufgrund dieser Auswahl ergaben sich die nachfolgenden 40 Bindemittel:

### 10 Fertigbindemittel:

15/25 VL, 25/35 VL, 35/50 VL, 15/25 VH, 25/35 VH, 35/50 VH, PmB 10/25 VL, PmB 25/45 VL, PmB 10/25 VH, PmB 25/45 VH

### 10 laborhergestellte Bindemittelgemische mit Montanwachs (VH-Varianten mit Montanwachs A, VL-Varianten mit Montanwachs B):

15/25 VL, 25/35 VL, 35/50 VL, 15/25 VH, 25/35 VH, 35/50 VH, PmB 10/25 VL, PmB 25/45 VL, PmB 10/25 VH, PmB 25/45 VH

### 8 laborhergestellte Bindemittelgemische mit unterschiedlichem FT-Wachsgehalt:

15/25 VL<sub>1,5</sub>, 35/50 VL<sub>1,5</sub>, PmB 10/25 VL<sub>1,5</sub>, PmB 25/45 VL<sub>1,5</sub>, 15/25 VL<sub>3,0</sub>, 35/50 VL<sub>3,0</sub>, PmB 10/25 VL<sub>3,0</sub>, PmB 25/45 VL<sub>3,0</sub>

### 8 laborhergestellte Bindemittelgemische mit unterschiedlichem Amid-Wachsgehalt:

15/25 VH<sub>1,5</sub>, 35/50 VH<sub>1,5</sub>, PmB 10/25 VH<sub>1,5</sub>, PmB 25/45 VH<sub>1,5</sub>, 15/25 VH<sub>3,0</sub>, 35/50 VH<sub>3,0</sub>, PmB 10/25 VH<sub>3,0</sub>, PmB 25/45 VH<sub>3,0</sub>

### 4 laborhergestellte Bindemittelgemische mit Bindemittel aus Naturasphalt + Wachs:

20/30+NA NV, 30/45+NA NV, 25/55-55A+NA NV, 10/40-65A+NA NV

Der große Umfang an Voruntersuchungen der Bindemittel wird als sehr wichtig angesehen, da in den derzeitigen Diskussionen um die Rissempfindlichkeit von Gussasphalten zumeist das Bindemittel und hier primär die Zusätze im Bindemittel als kausal vermutet werden.

Bei der Auswahl geeigneter Additive wurde sowohl beim Fischer-Tropsch-Wachs wie auch beim Amidwachs auf Praxisprodukte zurückgegriffen, welche sich in jahrelanger Erfahrungssammlung bewährt haben.

Als Fettsäureamid wurde ein auf Fettsäurederivaten basierendes, niedermolekulares Modifizierungsadditiv, welches die Adhäsions- und Verdichtungseigenschaften des Mischguts positiv beeinflussen soll, verwendet.

Als Montanwachs kamen zwei Produkte zum Einsatz. Es wurde ein Produkt, welches bevorzugt in Gussasphalt verwendet wird, sowie eines, welches bevorzugt für den Einsatz im Walzasphalt und bei der Bitumenmodifizierung eingesetzt wird, ausgewählt.

Das eine Produkt, welches bevorzugt im Gussasphalt verwendet wird, wirkt dabei ähnlich einem Fettsäureamid und kann für die mit „H“-bezeichneten Sorten eingesetzt werden, während das zweite Montanwachs ähnlich dem Fischer-Tropsch-Wachs wirkt und somit den „L“-bezeichneten Sorten zugeordnet werden kann.

Die systematische Optimierung von Gussasphaltvarianten aus der Praxis stand im Vordergrund dieses Forschungsprojekts. Die Auswahl der zu untersuchenden Füller geht somit auf die Forschungsprojekte [Radenberg, Gehrke, 2015], erste Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt [Radenberg, Holzwarth, 2016], Informationen aus [Schellenberg, Schellenberg, 2003] und auf langjährige Erfahrungswerte von Einbaufirmen und Mischwerken zurück. Im Zuge der Auswahl geeigneter Gesteinskörnungen wurden in acht über Deutschland verteilten Bundesländern Einbaufirmen, Mischwerke und Prüfeinrichtungen bezüglich in der Praxis regelmäßig verwendeten Gesteinsarten befragt und die Ergebnisse ausgewertet und einbezogen.

Den im Gussasphalt am häufigsten eingesetzte Füller stellt dabei das Kalksteinmehl dar. Es wurden zwei Kalksteinfüller mit verschiedenen versteifenden Eigenschaften berücksichtigt. Ergänzend wurden mit Füllern aus Quarz und Diabas zwei weitere Gesteinsarten im Forschungsprojekt untersucht.

Die untersuchten Füller sollten hinsichtlich ihrer versteifenden Eigenschaft, beurteilt anhand der Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel ( $\Delta RuK$ ) in Anlehnung an [DIN EN 13179-1], eine möglichst große Spannweite aufweisen.

Die Gesteinsarten und die Gewinnungsstätten der verwendeten Füller sind in Tab. 2 aufgeführt und im nachfolgenden Text mit den Bezeichnungen, gemäß Spalte 1, abgekürzt.

**Tab. 2:** Auswahl projektbezogener Füller

Bez.	Füllerart	Gewinnungsstätte
KSFF	Kalksteinfüller	Flandersbach
KSFR	Kalksteinfüller	Rüdersdorf
DH	Diabas	Halbeswig
QH	Quarz	Haltern

Die Auswahl der groben Gesteinskörnung  $> 2$  mm umfasste vier Gesteinsarten, welche häufig und regelmäßig bei der Herstellung von Gussasphaltschichten zum Einsatz kommen.

Die verwendeten groben Gesteinskörnungen sind in Tab. 3 aufgelistet.

**Tab. 3:** Auswahl projektbezogener grober Gesteinskörnung

Gesteinsart	Gewinnungsstätte
Diabas	Halbeswig
Basalt	Nickenich
Andesit	Hellberg
Grauwacke	Listertal

Die Auswahl der feinen Gesteinskörnung erfolgte ebenfalls unter Berücksichtigung von Forschungsergebnissen aus [Radenberg, et al, 2012], [Radenberg, Gehrke, 2015] und [Hofko, et al., 2015]. Für den Einsatz in Gussasphaltschichten können sowohl ungebrochene wie auch gebrochene Gesteinskörnungen zum Einsatz kommen.

Die untersuchten feinen Gesteinskörnungen sind in Tab. 4 aufgezählt.

**Tab. 4:** Auswahl projektbezogener feiner Gesteinskörnung

Natur-sande	Körnung	Gewinnungsstätte
Diabas	0/2 mm	Halbeswig
Basalt	0/2 mm	Nickenich
Andesit	0/2 mm	Hellberg
Natursand	0/2 mm	Wesseling

## 5 Beschreibung des Untersuchungsprogramms

### 5.1 Untersuchungsprogramm

Das Forschungsprojekt ist in vier Projektphasen unterteilt. Das Flussdiagramm in Bild 13 stellt das Untersuchungsprogramm zur Erreichung des Forschungsziels zusammenfassend dar.

In der ersten Projektphase wurde als Basis für die tiefere Untersuchung eine Materialauswahl getroffen. Außerdem erfolgte ein nationaler und internationaler Vergleich zur Erfassung der Erfahrungen zur Prüfung von Gussasphalten mit dem Dreipunkt-Biegezugversuch oder ähnlichen Versuchen.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse aus den Bindemittel- und Gesteinsuntersuchungen wurde eine Auswahl von zehn Bindemitteln getroffen, welche das Ergebnisspektrum der rheologisch-physikalischen Eigenschaften der Bindemittel repräsentativ abbildet. Für die Untersuchungen der zweiten Projektphase wurde in der ersten Projektphase ein praxispasstes Referenz-Gesteinskörnungsgemisch definiert.

In der zweiten Projektphase wurden im Zuge einer studentischen Arbeit [Büteröwe, 2017] mit den zehn

ausgewählten Bindemitteln und dem Referenz-Gesteinskörnungsgemisch Gussasphalte hergestellt und anschließend Prüfungen des Verformungswiderstands und des Tieftemperaturverhaltens mittels Dreipunkt-Biegezugversuch in Anlehnung an das [Vorläufige Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, August 1959] durchgeführt. Ein Teilziel des zweiten Arbeitspakets war die Untersuchung des Gesteinskörnungseinflusses. Eine systematische Variation der Parameter Größtkorn, Füller sowie feine und grobe Gesteinskörnung sollte Aufschluss über die Einflussfaktoren liefern.

Die im zweiten Arbeitspaket gewonnenen Untersuchungsergebnisse für das Tieftemperaturverhalten wurden im dritten Arbeitspaket durch validierende Untersuchungen mittels der komplexen Tieftemperaturprüfverfahren (TTV) Abkühl- und einaxialer Zugversuch bei vier Temperaturen auf Abhängigkeiten und Potentiale des einfachen Prüfverfahrens analysiert.

In einem letzten Arbeitspaket wurden Praxisproben hinsichtlich des Verformungswiderstands und des Tieftemperaturverhaltens durch das vereinfachte Verfahren des Dreipunkt-Biegezugversuchs untersucht.

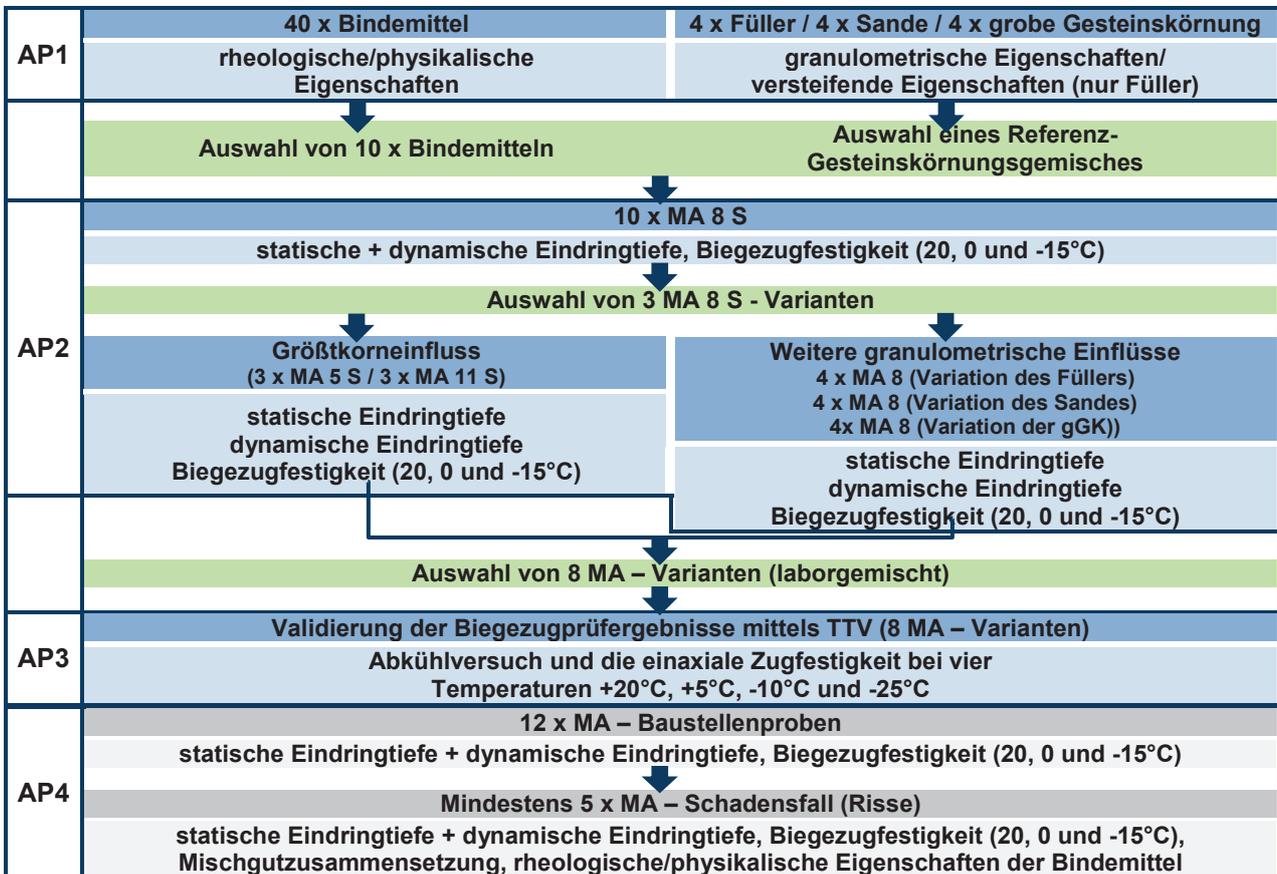


Bild 13: Flussdiagramm des Untersuchungsprogramms

## 5.2 Randbedingungen der Prüfungen

### 5.2.1 Physikalische und rheologische Bindemittleigenschaften

Die Untersuchung der physikalischen und rheologischen Bindemittleigenschaften erfolgte nach den klassischen Methoden des Erweichungspunktes Ring und Kugel gemäß [DIN EN 1427] sowie der Nadelpenetration gemäß [DIN EN 1426]. Des Weiteren wurde die Biegekriechsteifigkeit mit dem BBR gemäß [DIN EN 14771] und die Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels mittels Dynamischen Scherrheometer gemäß der Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Temperatursweep [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)], untersucht.

Ergänzend zu diesen Untersuchungen wurde die Phasenübergangstemperatur für die viskositätsveränderten Bindemittel mittels DSR gemäß der Arbeitsanleitung DSR-Prüfung bei einer konstanten Scherrate [AL DSR-Prüfung (konstante Scherrate)] durchgeführt.

Als Erweiterung wurde ein weiterer am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum entwickelter Versuch durchgeführt. Dieser diente der Bestimmung der Bindemittel-Relaxation.

Bei diesem Laborversuch wird bei einer Temperatur von  $-10\text{ °C}$  eine Normalkraft in Höhe von 10 N (entspricht  $0,20\text{ N/mm}^2$  Zugspannung) auf eine zylindrische Bindemittelprobe (H: 5 mm; D: 8 mm) aufgebracht (siehe Bild 14) und bis 10 % Dehnung (0,5 mm) konstant gehalten. Anschließend wird für 40 Minuten die Normalkraft nicht mehr nachkorrigiert, sodass durch Relaxation ein Spannungsabbau stattfinden kann. Die Tab. 5 zeigt eine Zusammenstellung der Prüfungsrandbedingungen des Relaxationsversuches.

Ein Teil der Untersuchungen erfolgte dabei im Rahmen einer studentischen Abschlussarbeit [Papadopoulos, 2017].

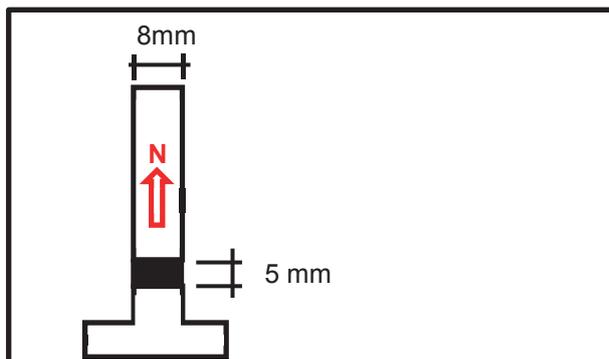


Bild 14: Schematischer Versuchsaufbau „Relaxationsverhalten“

Tab. 5: Prüfparameter zur Bestimmung der Relaxationseigenschaften mit dem DSR

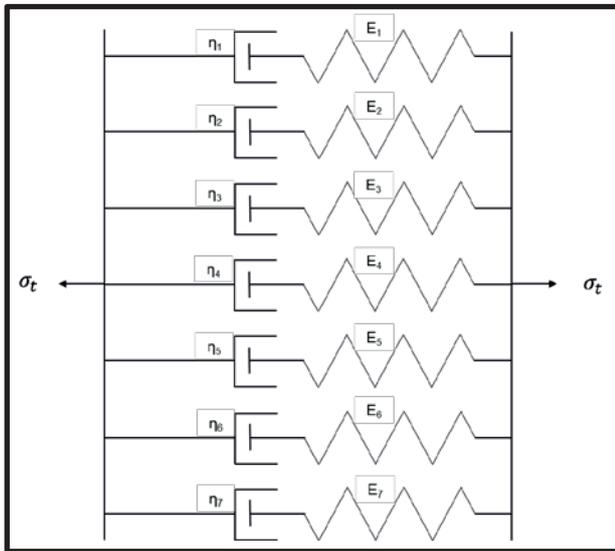
Prüfparameter zur Bestimmung der Relaxationseigenschaften (DSR)	
Messsystem	Platte/Platte
Prüfart	kraftgesteuert / statisch
Vorgegebene Dehnung	10 %
Relaxationszeit	40 min
Prüftemperatur	$-10\text{ °C}$
Probendurchmesser	8 mm
Spaltbreite	5 mm

Das Relaxationsverhalten des Bindemittels lässt sich nach [Radenberg, Steeb, et. al., 2012] und [Gehrke, 2017] mithilfe von Maxwell-Modellen beschreiben. Beim Maxwell-Modell sind ein Newtonscher Dämpfer und eine Feder in Reihe geschaltet. Bei Übertragung des Modells auf das Belastungsmodell kann festgestellt werden, dass das Prüfmedium nach dem Erzeugen einer gleichbleibenden Deformation durch die Rückstellungskraft einer Feder eine innere Spannung erfährt. Die Feder sorgt durch ihre Rückstellungskraft für eine Rückverformung und einen einhergehenden Spannungsabbau. Dem entgegen wirkt ein Dämpferwiderstand, welcher eine Reduktion der Relaxationsgeschwindigkeit infolge der abnehmenden Federspannung bewirkt.

In [Gehrke, 2017] wurde zur Auswertung des Relaxationsverhaltens von bitumenhaltigem Bindemittel eine Parallelschaltung dreier Maxwell-Modelle gewählt und in einem großen Untersuchungsumfang validiert. Dabei wurden primär Bindemittel untersucht, welche nicht durch einen viskositätsverändernden Zusatz oder sogar mit zwei Zusätzen modifiziert wurden.

In [Radenberg, Steeb, et. al., 2012] wurde analysiert, dass sieben Maxwell-Ketten sinnvoll sind, um das viskoelastische Verhalten von bitumenhaltigen Bindemitteln noch genauer beschreiben zu können.

Bild 15 stellt das dreidimensionale Rechen-Modell dar.



**Bild 15:** Dreidimensionales Maxwell-Modell zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens von bitumenhaltigen Bindemitteln [Radenberg, Steeb, et. al., 2012]

Zur Beschreibung des Relaxationsverhaltens von wachsmodifizierten Bindemitteln wurden sieben parallel geschaltete Feder-Dämpfer-Systeme verwendet. Die Parallelschaltung ermöglicht es das komplexe Materialverhalten sinngemäß mathematisch zu beschreiben.

$$\sigma_t = G_1 * \gamma * e^{\frac{t}{\tau_1}} + G_2 * \gamma * e^{\frac{t}{\tau_2}} + [...] + G_7 * \gamma * e^{\frac{t}{\tau_7}}$$

Mit:

- $\sigma_t$ : Zugspannung
- $G$ : Federkonstante
- $t$ : Versuchszeit
- $\gamma$ : Deformation
- $\eta$ : Dämpferkonstante

Für die Bewertung der Bitumenrelaxation wurde in Anlehnung an [Gehrke, 2017] die Restspannung in der Bindemittelprobe nach 60 Minuten Relaxationszeit gewählt.

**5.2.2 Gesteinskörnungseigenschaften**

Für die Charakterisierung der Gesteinskörnungskomponenten wurde die Bestimmung der Korngrößenverteilung gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 2] sowie die Bestimmung der Gesteinskörnungsrohichte gemäß [DIN EN 1097-6, Anhang A] mittels Pyknometerverfahren durchgeführt.

Ergänzend wurde am Füller (Gesteinskörnung < 0,063 mm) die versteifende Eigenschaft, beurteilt anhand der Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel ( $\Delta RuK$ ) in Anlehnung an [DIN EN 13179-1] sowie der Hohlraumgehalt der

Füller nach Ridgen gemäß [DIN EN 1097-4] ermittelt.

Zudem wurde der Fließkoeffizient der feinen Gesteinskörnung gemäß [DIN EN 933-6] ermittelt.

**5.2.3 Mischgut- und Probenherstellung**

Mit dem Forschungsprojekt FE 84.0100/2009 [Radenberg, Gehrke, 2015] wurde u.a. die Vergleichbarkeit der labortechnischen Mischgutherstellung mit einer in der Praxis aus einem Gussasphaltkocher entnommenen Mischgutprobe nachgewiesen. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Mischgutherstellung in einem mit Stickstoff beaufschlagten Labormischer in der in Bild 16 dargestellten Mischreihenfolge. Hiermit wurden in dem vorgenannten Forschungsprojekt sehr gute Vergleichbarkeiten des Verarbeitungsverhaltens mit Mischgutproben aus einem Gussasphaltkocher nach ca. 1 Stunde Rührdauer bei gleicher Zusammensetzung erzielt.

Vortemperierung: Bitumen 160 °C Gesteinskörnungen 200 °C		
Drehzahl: 15 U/min	grobe + feine Gesteinskörnungen + Bitumen	160 °C
	2 min mischen	
	50 % des Füllers zugeben	
	10 min mischen	
	25 % des Füllers zugeben	
	12 min mischen	190 °C
	25% des Füllers zugeben	
	12 min mischen	
	12 min mischen	

**Bild 16:** Schematische Darstellung des optimierten Herstellungsprozesses von Gussasphalt [Radenberg, Gehrke, 2015]

**5.2.4 Verformungswiderstand der Gussasphaltvarianten**

In diesem Forschungsprojekt wurden Untersuchungen des Verformungswiderstandes durch die Prüfung der statischen Stempeleindringtiefe gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 20] sowie der dynamischen Stempeleindringtiefe gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1], durchgeführt (siehe Bild 13).

In einem ersten Untersuchungsschritt wurden dafür zehn Gussasphalte unter Variation des eingesetzten Bindemittels geprüft.

Basierend auf den in dieser Untersuchungsreihe ermittelten Kenngrößen und unter Berücksichtigung der Kälteuntersuchungen gemäß Kapitel 5.2.5 wurden drei Bindemittel für weitere Untersuchungen unter Variation des Größtkorns mit 5 mm und 11 mm ausgewählt. Ergänzend fand eine Variation der Gesteinsart der groben Gesteinskörnung, dem

Verhältnis von Brechsand und Natursand sowie von drei Füllern mit verschiedenen versteifenden Eigenschaften bei Gussasphaltvarianten mit 8 mm Größtkorn statt.

### 5.2.5 Tieftemperaturverhalten der Gussasphaltvarianten

Für die Untersuchung des Tieftemperaturverhaltens der Gussasphaltvarianten kamen verschiedene Verfahren zur Anwendung. Es wurden sowohl Untersuchungen der Biegezugfestigkeit von Gussasphalt mittels Dreipunkt-Biegezugversuch sowie die wissenschaftlich komplexen Prüfungen des Abkühl- und des einaxialen Zugversuchs, welche in Kapitel 3.3.2 beschrieben sind, durchgeführt.

Gemäß Arbeitsprogramm (Bild 13) wurden in einem ersten Schritt die Dreipunkt-Biegezugversuche an insgesamt 28 Varianten unter gezielter Betrachtung des Einflusses der Mischgutzusammensetzung durchgeführt.

Die Probenvorbereitung, -prüfung und Auswertung erfolgte dabei in Anlehnung an das [Vorläufige Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, August 1959].

Die Untersuchungen erfolgten an Prismen der Abmessungen 40x40x160 mm als Dreifachbestimmung bei den Prüftemperaturen 22 °C, 0 °C und -15 °C. Abweichend vom Merkblatt wurden Asphaltprobepplatten hergestellt und aus diesen allseitig geschnittene Prismen gewonnen. Dies ermöglichte gleichmäßige Probekörper ohne einen Binde-mittelfilm an einer der Prüfflächen.

Der Probeneinbau erfolgte nach zweistündiger Konditionierung der Probekörper auf die Prüftemperatur ( $\pm 1$  °C) in einem Klimaschrank. Dies stellt ebenfalls eine Abweichung vom Merkblatt dar, welches eine Konditionierung im Wasserbad vorsieht.

Als Auflager dienten zwei Stahlrollen, die mit einem Durchmesser von  $10,0 \pm 0,5$  mm im Abstand von  $100,0 \pm 0,5$  mm zueinander positioniert waren. Die Belastung der Probe erfolgte dabei exakt mittig zwischen den Auflagern über eine dritte Stahlrolle desselben Durchmessers. Die Prüfung wurde dabei weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/min bis zu einer maximalen Kraft von 20 kN durchgeführt.

Die Ergebnisse aus der Bestimmung der Biegezugfestigkeit wurden im Arbeitsschritt 4 durch Prüfung der Tieftemperatur-Versuche gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 46 A] validiert.

Hierfür wurden anhand der Biegezugfestigkeit und des Verformungswiderstandes acht repräsentative

Gussasphaltvarianten ausgewählt, welche ein möglichst breites Spektrum der Gebrauchseigenschaften abdecken.

## 5.3 Validierung der Forschungsergebnisse anhand von Untersuchung an Praxisproben

Für die Untersuchungen des Verformungswiderstands an Proben aus Gussasphalt-Baumaßnahmen wurden sowohl schadhafte Bestandsstrecken, wie auch Proben aus neuen und schadlosen vorhandenen Gussasphaltbaumaßnahmen geprüft.

Die Auswahl der Praxisproben erfolgte in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss.

### 5.3.1 Verformungswiderstand der Praxisproben

Analog zu den Untersuchungen an laborgemischten Gussasphaltproben wurde die Untersuchung des Verformungswiderstandes durch die Prüfung der statischen Stempel Eindringtiefe gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 20] sowie der dynamischen Stempel-eindringtiefe gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1], durchgeführt.

### 5.3.2 Tieftemperaturverhalten der Praxisproben

Die Prüfung der Kälteflexibilität wurde durch die Untersuchung der Biegezugfestigkeit im Dreipunkt-Biegezugversuch durchgeführt. Die Probekörper wurden analog zu den laborgemischten Proben hergestellt und geprüft.

## 6 Ergebnisse und Auswertung

### 6.1 Gemischkomponenten

#### 6.1.1 Füller

Die mittels Pyknometer-Verfahren ermittelten Rohdichten gemäß [DIN EN 1097-7] der Füller sind in Tab. 6 tabellarisch aufgeführt.

Tab. 6: Rohdichten der Füller

Füllersorte	Rohdichte
[-]	[g/cm³]
KSFF	2,722
KSFR	2,746
DH	2,821
QH	2,649

Die Korngrößenverteilung der Füller wurde durch Luftstrahlsiebung gemäß [TP Gestein-StB 08, Teil 4.1.4] in Verbindung mit [DIN EN 933-10] und durch eine Sedimentationsanalyse gemäß [DIN 18123] durchgeführt.

In Tab. 7 sind die Ergebnisse der Luftstrahlsiebung für alle Füllervarianten aufgeführt.

In Bild 17 sind die in der Luftstrahlsiebung ermittelten Siebrückstände graphisch dargestellt.

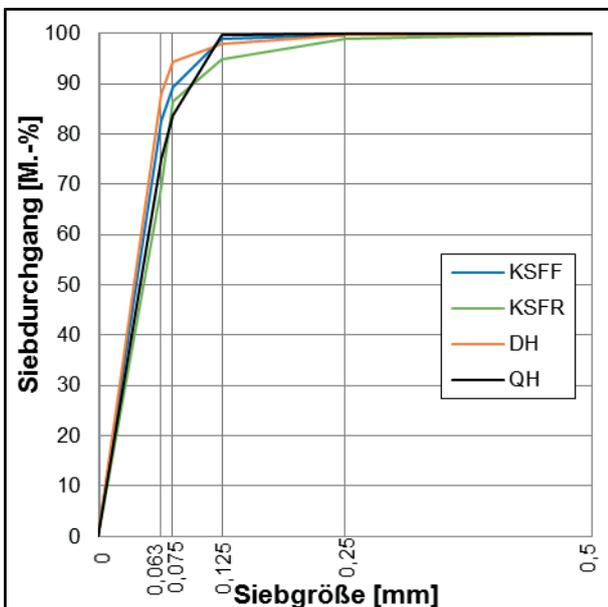


Bild 17: Siebrückstände der Luftstrahlsiebung

Tab. 7: Ergebnis der Luftstrahlsiebung der untersuchten Füller

Siebdurchgang [M.-%]
----------------------

Füllersorte	Siebgröße [mm]				
	0,5	0,25	0,125	0,075	0,063
KSFF	100,0	99,7	99,0	89,2	82,7
KSFR	100,0	99,0	94,9	86,4	69,5
DH	100,0	99,6	97,8	94,2	88,0
QH	100,0	99,8	99,6	83,6	75,1

Die Hohlraumgehalte der Füller nach Ridgen gemäß [DIN EN 1097-4] zeigt Tab. 8.

Tab. 8: Hohlraumgehalte nach Ridgen der Füller

Füllersorten	Hohlraumgehalt nach Ridgen
[-]	[Vol.-%]
KSFF	35,7
KSFR	39,7
DH	40,5
QH	33,6

Die versteifenden Eigenschaften der Füller wurde anhand der Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel ( $\Delta EP RuK$ ) in Anlehnung an die [DIN EN 13179-1] bestimmt.

Dazu wurden die vier Füller unter der Verwendung von Bindemitteln 20/30 und 30/45 untersucht.

Die für die vier Füller festgestellten Anstiege des EP RuK sind in Bild 18 für die Bindemittel 30/45 und 20/30, dargestellt. Zusätzlich sind die EP RuK der verwendeten Frischbindemittel aufgeführt.

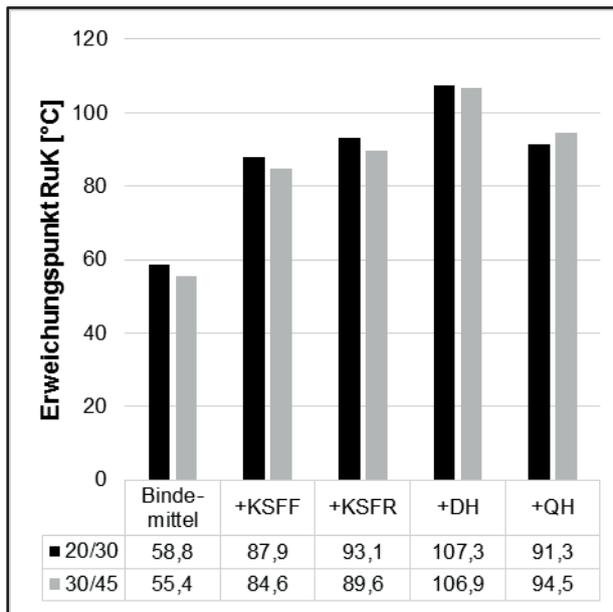


Bild 18: Versteifende Eigenschaften der verwendeten Füller

### 6.1.2 Feine Gesteinskörnung

Die Rohdichten der feinen Gesteinskörnung wurden gemäß [DIN EN 1097-7] bestimmt (siehe Tab. 9).

Tab. 9: Rohdichten der feinen Gesteinskörnungen

Feine Gesteinskörnung	Rohdichte
[-]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Diabas	2,844
Basanit	3,064
Andesit	2,792
Natursand	2,635

Die an der feinen Gesteinskörnung ermittelten Korngrößenverteilungen gemäß [DIN EN 933-1] sind in Bild 19 und Tab. 10 dargestellt.

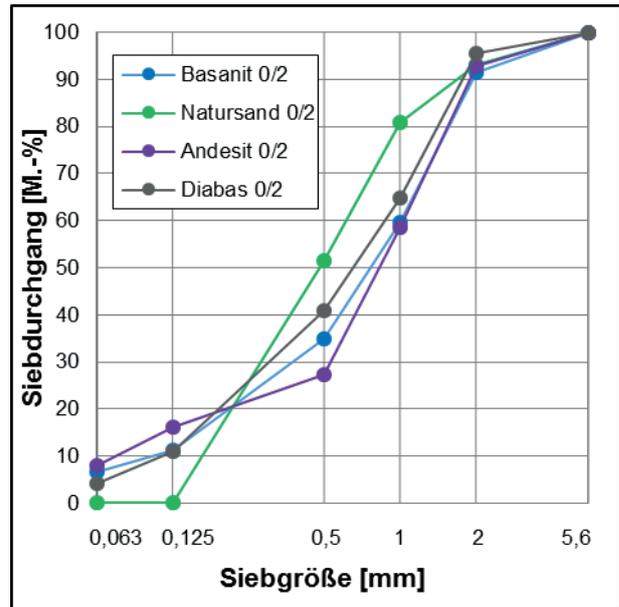


Bild 19: Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnungen

Tab. 10: Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnungen

		Basanit	Natur-sand	Andesit	Diabas
Siebdurchgang [M.-%]	5,6	100,0	100,0	100,0	100,0
	2	91,6	93,1	92,8	95,6
	1	59,6	80,8	58,7	64,9
	0,5	34,8	51,4	27,3	40,8
	0,125	11,3	0,2	16,2	10,9
	0,063	6,6	0,0	8,1	4,3

Die untersuchten Sande erfüllen die in den [TL Ge-stein-StB 04/07] vorgeschriebenen Anforderungs-werte bezüglich des Überkornanteils.

Die ermittelten Fließkoeffizienten gemäß [DIN EN 933-6] fasst Tab. 11 zusammen.

Tab. 11: Fließkoeffizient E<sub>C</sub> der feinen Gesteinskörnungen

Feine Gesteinskörnung	Fließkoeffizient
[-]	E <sub>C</sub> [s]
Diabas	36,0
Basanit	39,2
Andesit	38,1
Natursand	26,5

### 6.1.3 Grobe Gesteinskörnung

Als grobe Gesteinskörnung wurden ein Di-abas 2/5 mm, eine Grauwacke 2/5 mm, ein Basalt 2/5 mm und ein Andesit 2/5 mm ausgewählt. Der Rahmen der Untersuchungen sah eine Bestimmung

der Rohdichten gemäß [DIN EN 1097-7] vor. Die Ergebnisse sind in Tab. 12 dargestellt.

Tab. 12: Rohdichten der groben Gesteinskörnung

Grobe Gesteinskörnung	Rohdichte
[-]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Diabas 2/5	2,825
Basalt 2/5	2,967
Andesit 2/5	2,755
Grauwacke 2/5	2,706

Die ermittelten Korngrößenverteilungen gemäß [DIN EN 933-1] sind in den Bildern 20, 21 und 22 abgebildet. Die zugehörigen Messdaten sind getrennt nach der Lieferkörnung in 2/5 (Tab. 13), 5/8 (Tab. 14) und 8/11 (Tab. 15) unterteilt.

Tab. 13: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 2/5

		Basalt	Grauwacke	Andesit	Diabas	
Siebdurchgang [M.-%]	Siebgröße [mm]	8	100,0	100,0	100,0	100,0
		5,6	93,7	91,9	98,6	95,1
		2	7,6	1,8	7,5	6,7
		0,125	2,3	0,4	0,2	0,8
		0,063	1,3	0,1	0,1	0,1

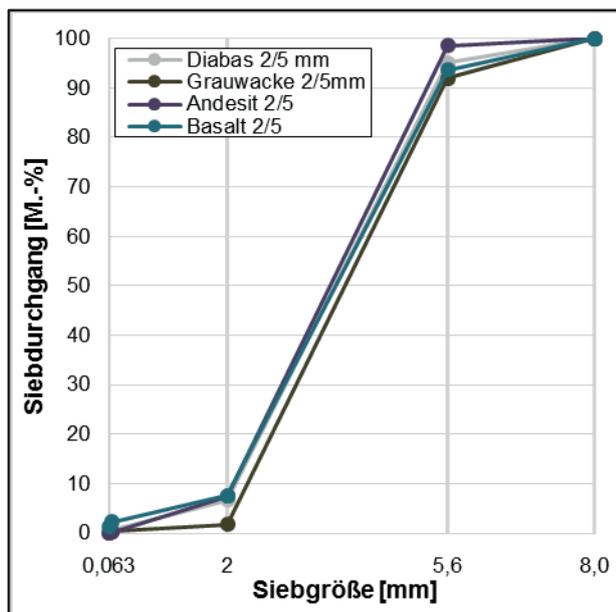


Bild 20: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 2/5

Tab. 14: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 5/8

		Basalt	Grauwacke	Andesit	Diabas	
Siebdurchgang [M.-%]	Siebgröße [mm]	11,2	100,0	100,0	100,0	100,0
		8	91,1	92,4	89,0	90,3
		5,6	11,4	8,7	20,7	13,2
		2	1,3	0,2	0,1	0,9
		0,063	0,5	0,1	0,0	0,5

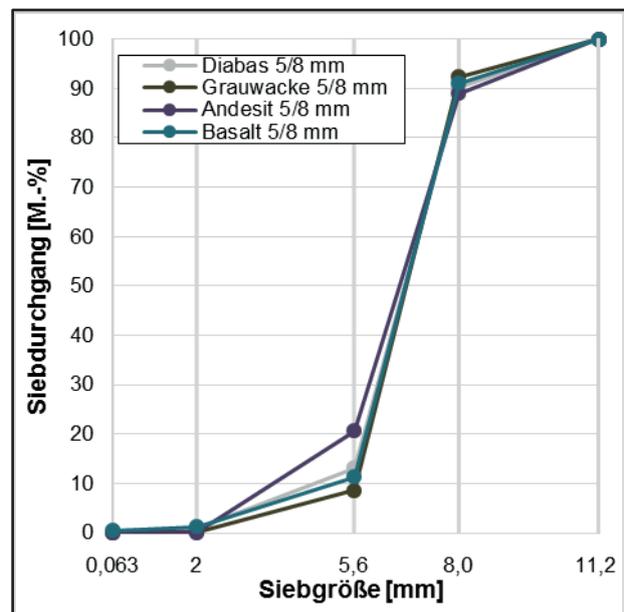


Bild 21: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 5/8

Tab. 15: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 8/11

		Diabas	
Siebdurchgang [M.-%]	Siebgröße [mm]	16	100,0
		11,2	85,9
		8	7,5
		5,6	0,4
		2	0,0

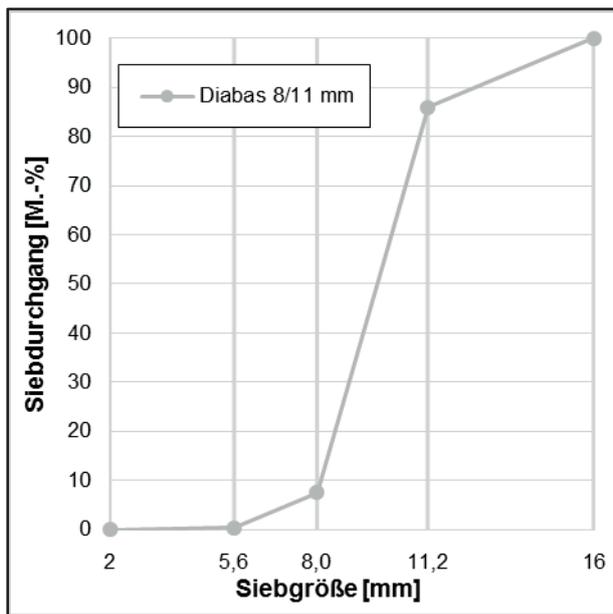


Bild 22: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 8/11

### 6.1.4 Bindemittel

#### Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel

Die Bindemittel wurden nach Kapitel 5.2.1 mit den klassischen Verfahren Erweichungspunkt Ring und Kugel (EP RuK) gemäß [DIN EN 1427] sowie der Nadelpenetration gemäß [DIN EN 1426] untersucht.

Der Untersuchungsumfang sieht dabei alle vierzig Bindemittel vor. Die Kenngrößen für die Verfahren sind, unter Angabe der zugehörigen Messergebnisse, in Bild 23 bis 27 in Abhängigkeit der Bindemittelgemischgruppen gemäß Kapitel 4 dargestellt.

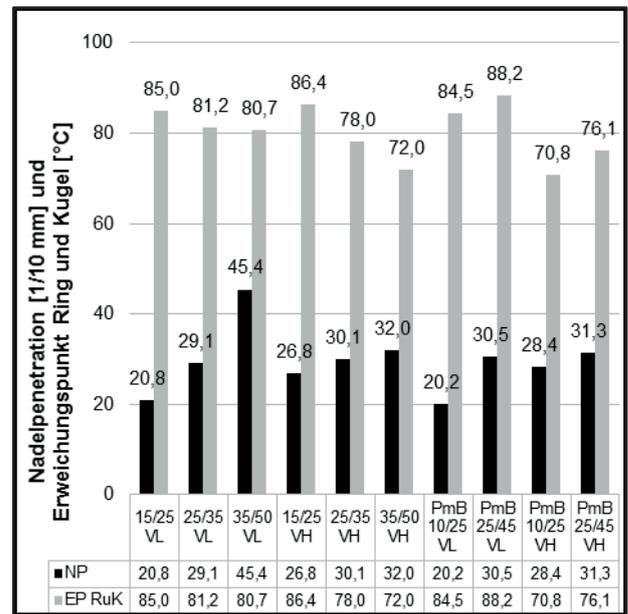


Bild 23: Nadelpenetration und EP RuK an 10 Fertigbindemitteln

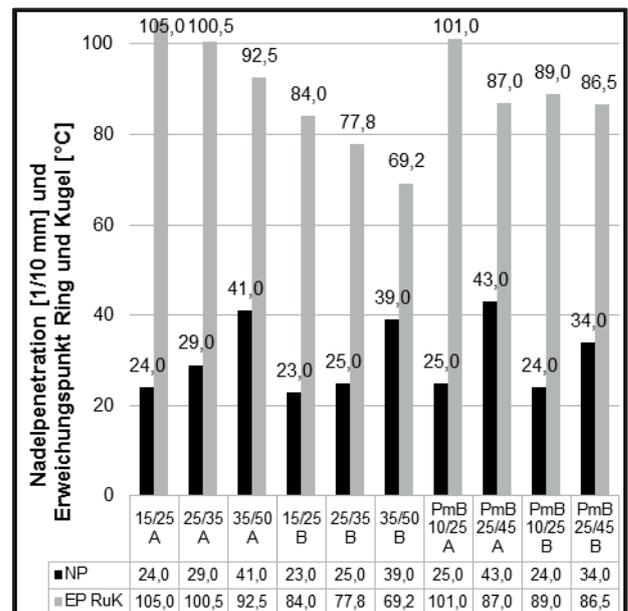


Bild 24: Nadelpenetration und EP RuK an mit Montanwachsmodifizierten Bindemitteln

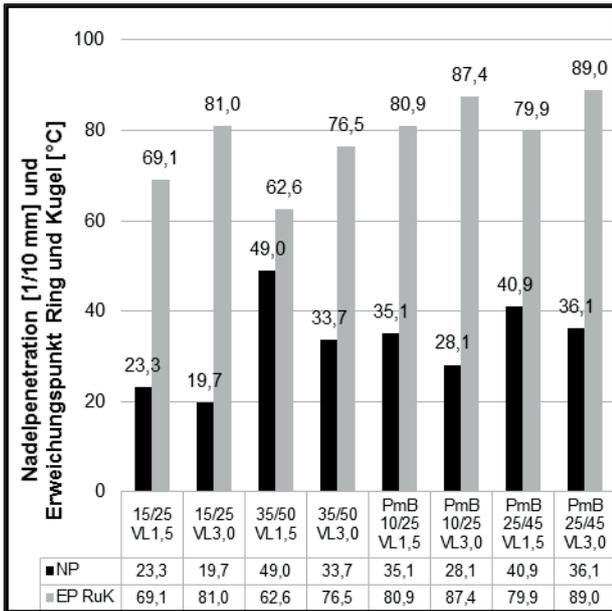


Bild 25: Nadelpenetration und EP RuK an mit FT-Wachs modifizierten Bindemitteln

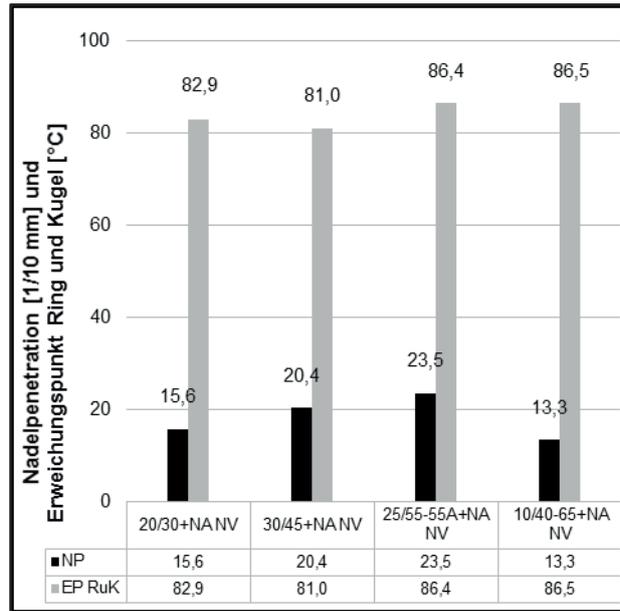


Bild 27: Nadelpenetration und EP RuK an mit Naturasphalt und FT-Wachs modifizierten Bindemitteln

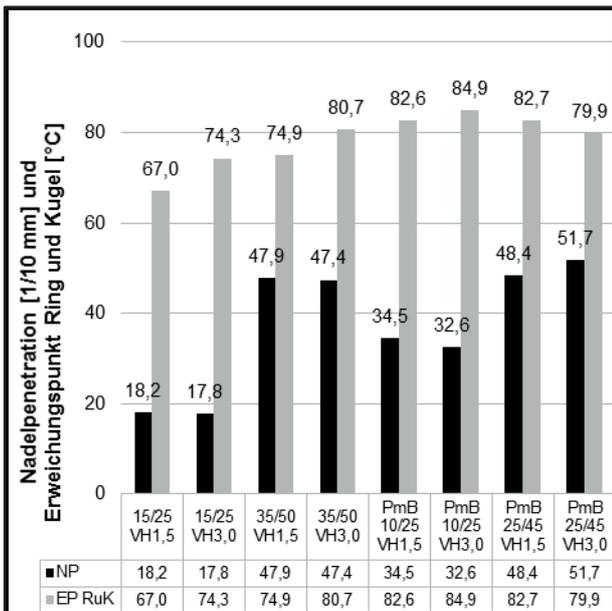


Bild 26: Nadelpenetration und EP RuK an mit Amid-Wachs modifizierten Bindemitteln

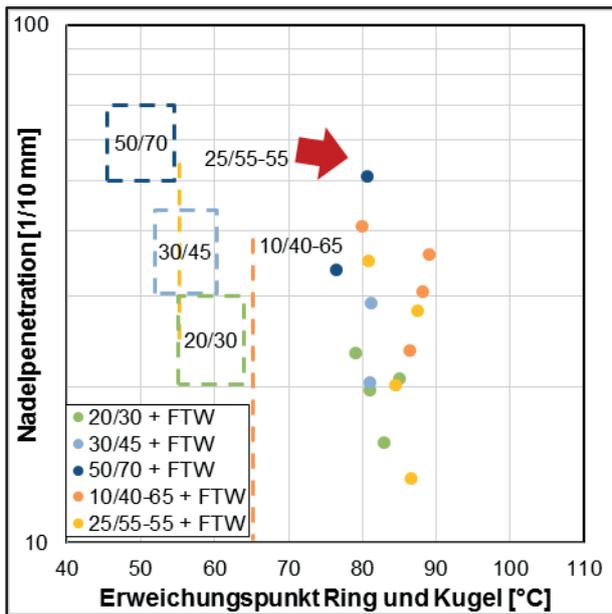
Mit der halblogarithmischen Darstellung der Nadelpenetration und des Erweichungspunktes Ring und Kugel kann die Wirksamkeit der Zusätze dargestellt werden.

Bild 28 bis Bild 30 zeigen die so ausgewerteten Ergebnisse. Des Weiteren sind die Kenngrößenbereiche der nicht modifizierten Bindemittel mit ihrer Spannweite über die Messgrößen Erweichungspunkt Ring und Kugel und Nadelpenetration als strichlinierte Rahmen dargestellt. Somit ist eine Beurteilung der Wirkungsweise des jeweiligen Waxes möglich. Die Zuordnung der Messpunkte zu dem jeweiligen Frischbindemittel ist durch die Farbgebung der Symbole vorgenommen worden.

Die Messgrößen aus der Bestimmung der Nadelpenetration sind auf der Y-Achse logarithmisch aufgetragen. Die Werte des Erweichungspunktes Ring und Kugel sind zugehörig zu den Bindemitteln auf der X-Achse linear dargestellt.

Die Differenzierung erfolgt in Abhängigkeit von der verwendeten Wachst.

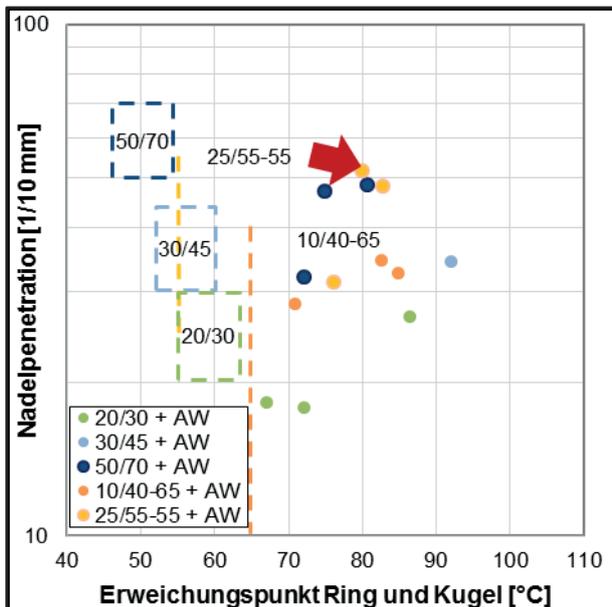
In Bild 28 sind die Ergebnisse unter Verwendung von Fischer-Tropsch-Wachsen dargestellt.



**Bild 28:** Vergleich der konventionellen Bindemittelkenngrößen vor und nach der Modifikation mit FT-Wachs

Die Modifikation mit Fischer-Tropsch-Wachs führt zu einer Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel [°C] bei einer vergleichbaren Härte des Bindemittels beurteilt anhand der Nadelpenetration [1/10 mm].

Bild 29 stellt die Entwicklung der Messergebnisse unter Verwendung von Amid-Wachs dar.

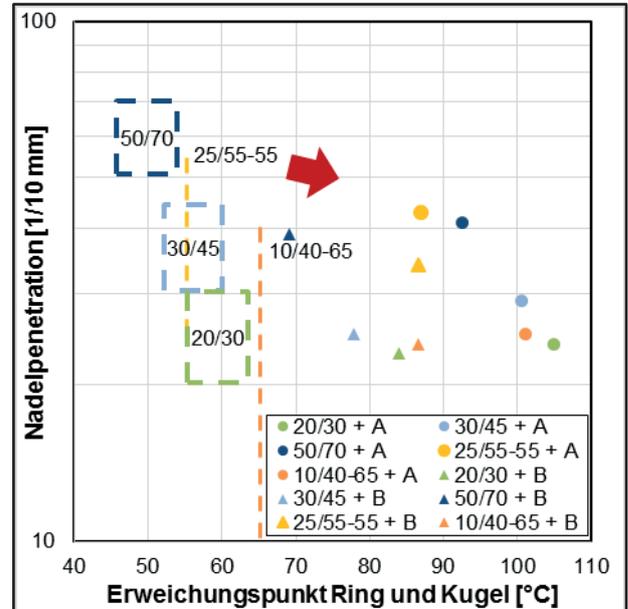


**Bild 29:** Vergleich der konventionellen Bindemittelkenngrößen vor und nach der Modifikation mit Amid-Wachs

Mit Fettsäure-Amiden modifizierte Bindemittel weisen vergleichbare Ergebnisse zu der Modifikation mit Fischer-Tropsch-Wachs auf. Es findet eine Verschiebung des Erweichungspunktes Ring und Kugel

bei vergleichbar bleibender Nadelpenetration des Bindemittels statt.

In Bild 30 sind die Kenngrößen unter Verwendung von Montanwachs A und B dargestellt. Die Differenzierung erfolgt dabei durch die runden und dreieckigen Formen der Messpunkte.



**Bild 30:** Vergleich der konventionellen Bindemittelkenngrößen vor und nach der Modifikation mit Montanwachs

Die Modifikation mit Montanwachs B weist ähnliche Verläufe wie die zuvor dargestellten Wachssorten auf. Montanwachs A erzeugt eine deutlich höhere Verschiebung des EP Ring und Kugel. Dementsprechend sind mit Montanwachs A modifizierte Bindemittel als höher verhärtend zu charakterisieren.

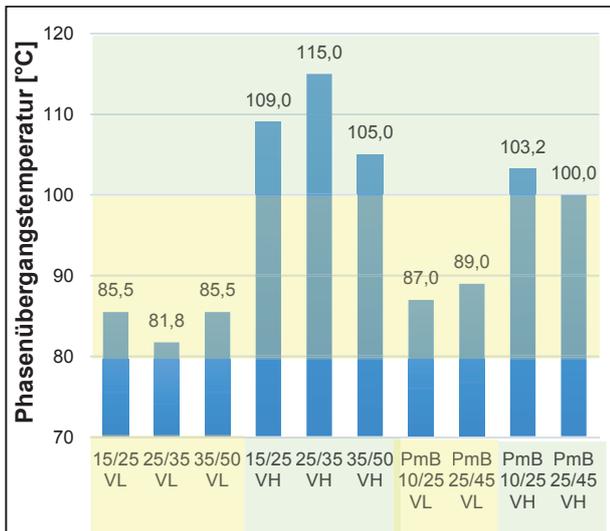
Phasenübergangstemperatur

Die Modifikation der Bindemittel mit Fischer-Tropsch-Wachs, Fettsäureamid, Montanwachs und Naturasphalt erzeugt differente Ergebnisse hinsichtlich der Phasenübergangstemperatur der Bindemittel. Die Versuchsdurchführung erfolgte gemäß der [AL DSR-Prüfung (konstante Scherrate)]. Die Ergebnisse sind, wie in der Auswertung von EP RuK und Nadelpenetration, differenziert nach den in Kapitel 4 aufgelisteten Bindemittelgemischgruppen in Bild 31 bis Bild 35 dargestellt.

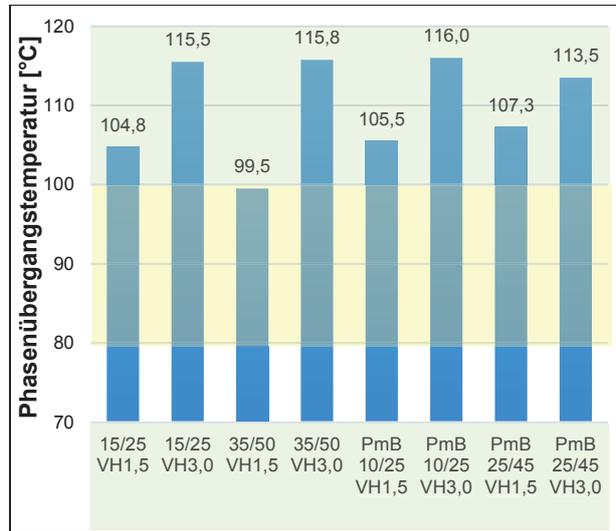
In Bild 33 und 34 ist zu erkennen, dass mit erhöhter Wachsdosierung auch die Phasenübergangstemperatur steigt.



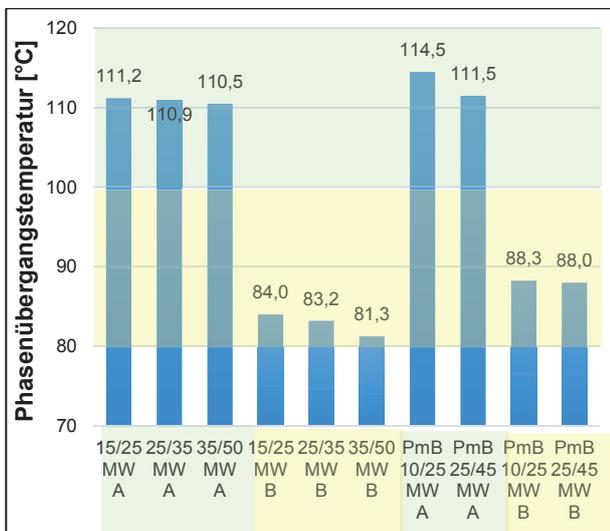
**Bild 33:** Phasenübergangstemperatur der Bindemittel mit FT-Wachs



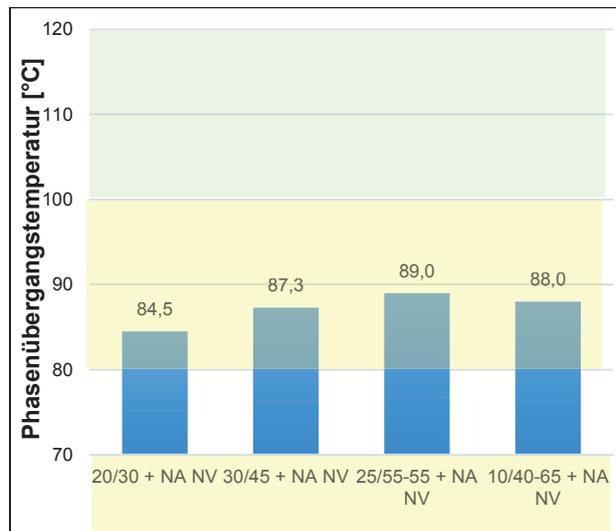
**Bild 31:** Phasenübergangstemperatur der Fertigbindemittel



**Bild 34:** Phasenübergangstemperatur der Bindemittel mit Amidwachs



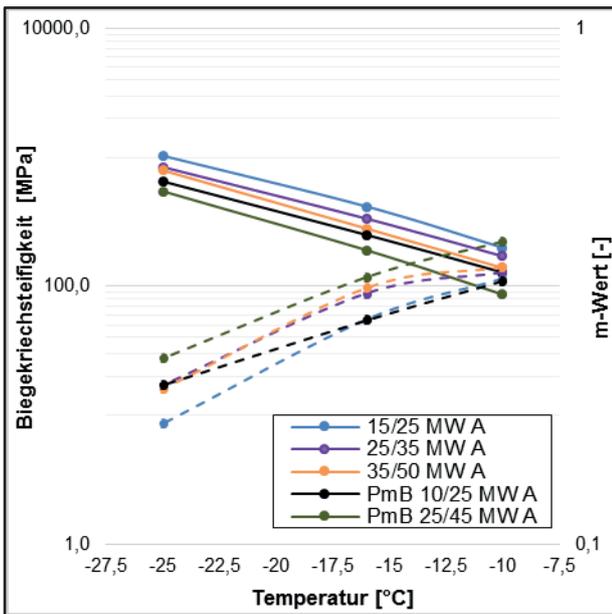
**Bild 32:** Phasenübergangstemperatur der Bindemittel mit Montanwachs



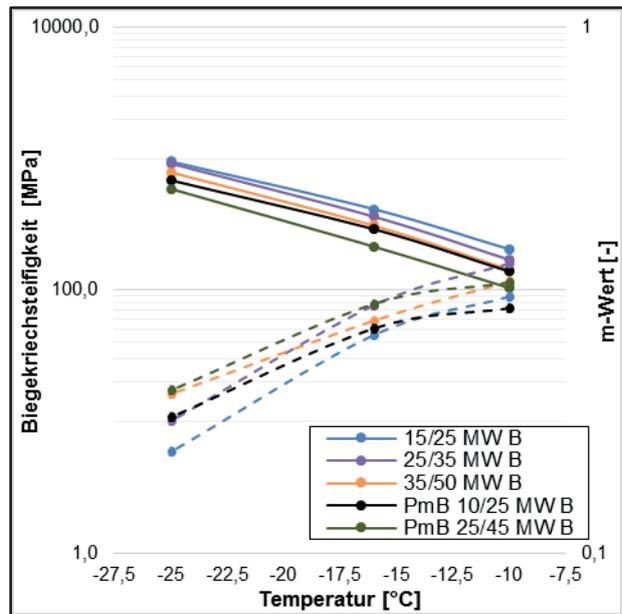
**Bild 35:** Phasenübergangstemperatur an den mit Naturasphalt und FT-Wachs modifizierten Bindemitteln

BBR-Untersuchungen





**Bild 38:** Biegekriechsteifigkeiten der mit Montanwachs A modifizierten Bindemittel



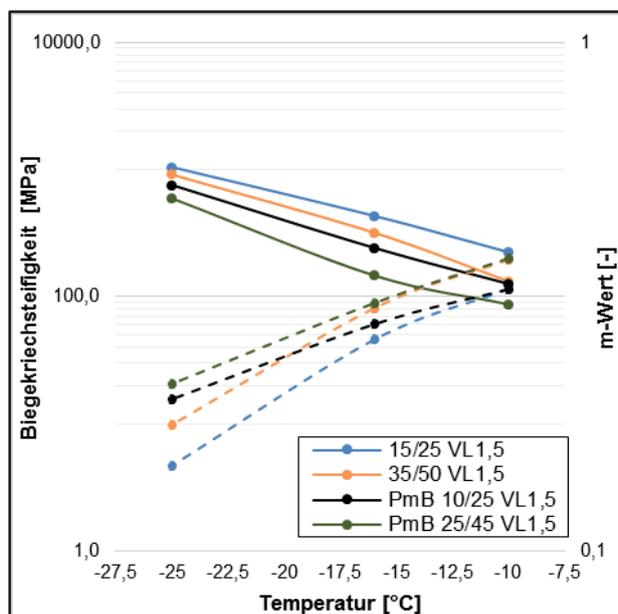
**Bild 39:** Biegekriechsteifigkeiten der mit Montanwachs B modifizierten Bindemittel

**Tab. 18:** Kenngrößen BBR - Montanwachs A mod. Bindemitteln

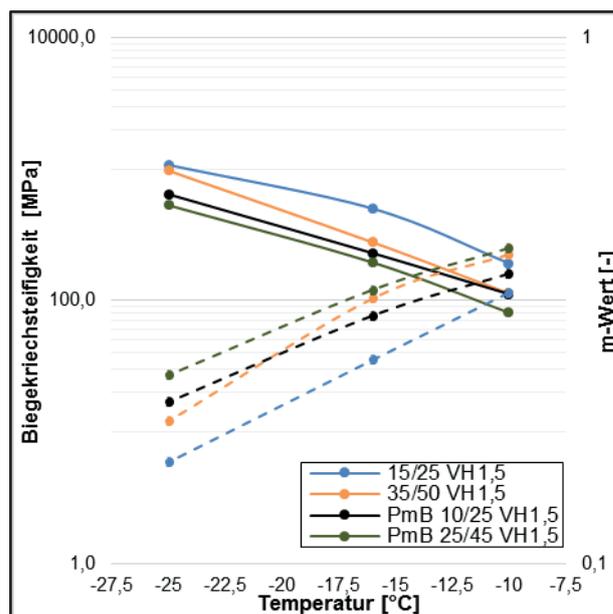
Bindemittel	Temperatur bei 300 MPa	Temperatur bei m-Wert von 0,3
[n]	[°C]	[°C]
15/25 MW A	-13,3	-13,5
25/35 MW A	-15,1	-16,8
35/50 MW A	-16,5	-17,6
PmB 10/25 MW A	-19,5	-12,7
PmB 25/45 MW A	-17,5	-18,9

**Tab. 19:** Kenngrößen BBR - Montanwachs B mod. Bindemitteln

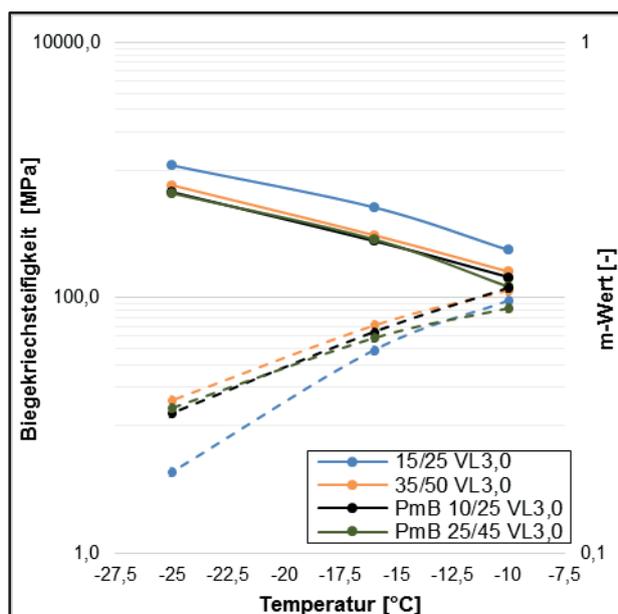
Bindemittel	Temperatur bei 300 MPa	Temperatur bei m-Wert von 0,3
[n]	[°C]	[°C]
15/25 MW B	-13,2	-11,0
25/35 MW B	-14,5	-15,6
35/50 MW B	-15,7	-13,3
PmB 10/25 MW B	-16,3	-9,6
PmB 25/45 MW B	-18,7	-15,7



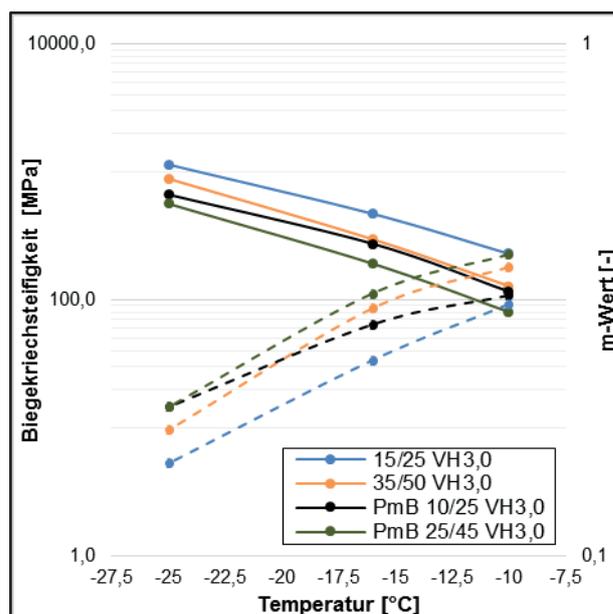
**Bild 40:** Biegebruchsteifigkeiten der mit 1,5 M.-% FT-Wachs modifizierten Bindemittel



**Bild 42:** Biegebruchsteifigkeiten der mit 1,5 M.-% Amid-Wachs modifizierten Bindemittel



**Bild 41:** Biegebruchsteifigkeiten der mit 3,0 M.-% FT-Wachs modifizierten Bindemittel



**Bild 43:** Biegebruchsteifigkeiten der mit 3,0 M.-% Amid-Wachs modifizierten Bindemittel

**Tab. 20:** Kenngrößen BBR – FT-Wachs mod. Bindemittel

Bindemittel	Temperatur bei 300 MPa	Temperatur bei m-Wert von 0,3
[n]	[°C]	[°C]
15/25 VL1,5	-12,7	-12,5
35/50 VL1,5	-15,5	-16,0
PmB 10/25 VL1,5	-17,5	-13,5
PmB 25/45 VL1,5	-20,1	-16,6
15/25 VH3,0	-11,5	-11,3
35/50 VH3,0	-15,7	-14,0
PmB 10/25 VH3,0	-16,6	-13,0
PmB 25/45 VH3,0	-18,0	-15,2

**Tab. 21:** Kenngrößen BBR – Amid-Wachs mod. Bindemittel

Bindemittel	Temperatur bei 300 MPa	Temperatur bei m-Wert von 0,3
[n]	[°C]	[°C]
15/25 VH1,5	-12,2	-11,8
35/50 VH1,5	-16,5	-17,5
PmB 10/25 VH1,5	-18,1	-15,6
PmB 25/45 VH1,5	-19,4	-18,8
15/25 VH3,0	-12,2	-10,8
35/50 VH3,0	-16,1	-16,4
PmB 10/25 VH3,0	-16,8	-13,7
PmB 25/45 VH3,0	-19,3	-18,0

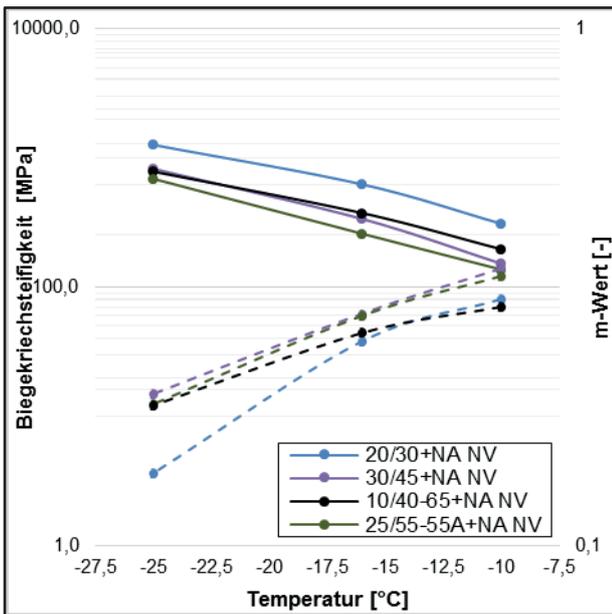


Bild 44: Biegebruchsteifigkeiten der mit Naturasphalt und FT-Wachs modifizierten Bindemittel

Tab. 22: Kenngrößen BBR - Naturasphalt und FT-Wachs modifizierten Bindemitteln

Bindemittel	Temperatur bei Biegebruchsteifigkeit von 300 MPa	Temperatur bei m-Wert von 0,3
[n]	[°C]	[°C]
20/30 NA NV	-9,8	-9,8
30/45 NA NV	-15,1	-13,7
10/40-65 NA NV	-10,8	-7,0
25/55-55 NA NV	-17,3	-13,6

Grundsätzlich können bitumenhaltige Bindemittel mit dieser Auswertung der BBR-Ergebnisse in m-Wert- und s-Wert-dominiert differenziert werden. Das Bild 45 stellt die zugehörigen Temperaturen bei einer Steifigkeit von 300 MPa der Temperatur bei einem m-Wert von 0,3 für die Bindemittelgemischgruppen (Kapitel 4) gegenüber.

Es ist zu erkennen, dass ein überwiegender Teil der Bindemittel als m-Wert-dominiert charakterisiert werden kann.

Es kann qualitativ festgestellt werden, dass mit Amid-Wachs modifizierte Bindemittel die vergleichsweise geringste Kälteempfindlichkeit aufweisen.

Mehrfachmodifikationen in Form einer Kombination aus Fischer-Tropsch-Wachs mit Bindemittel aus Naturasphalt NA NV stellen sich in diesem Zusammenhang als kälteempfindlichste Varianten dar.

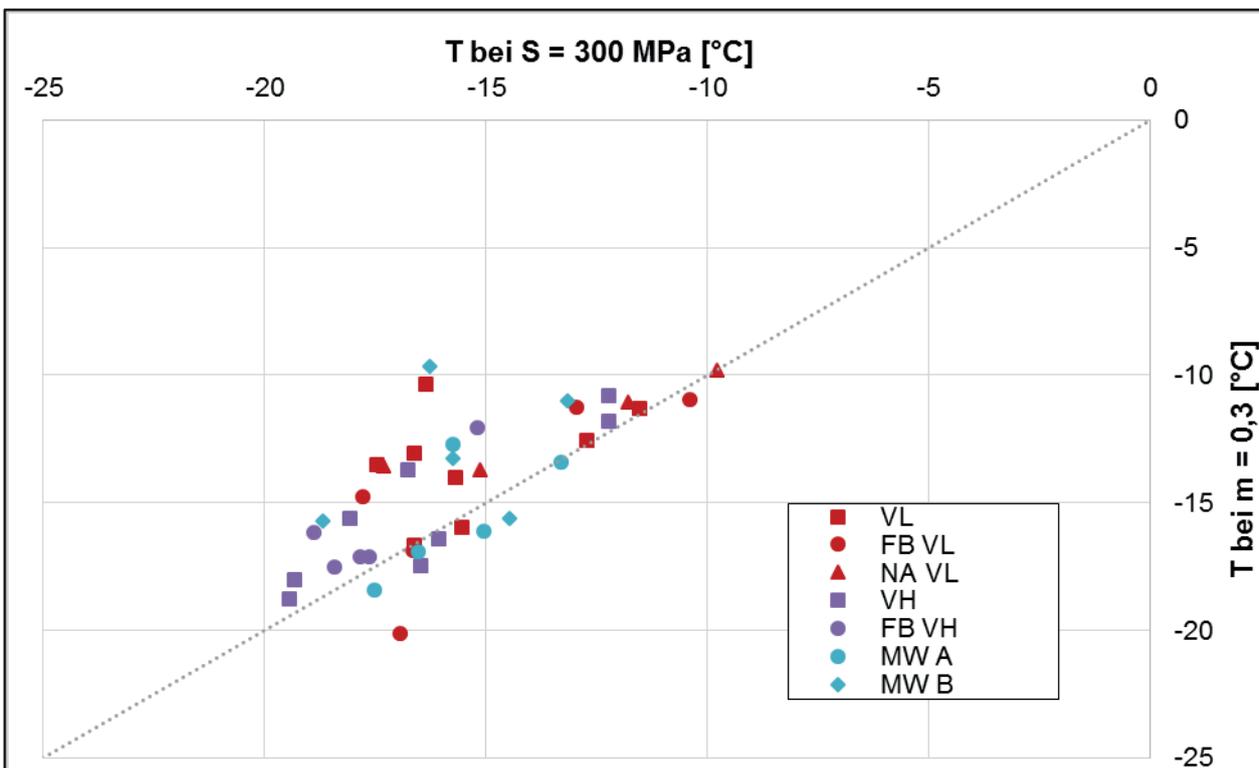
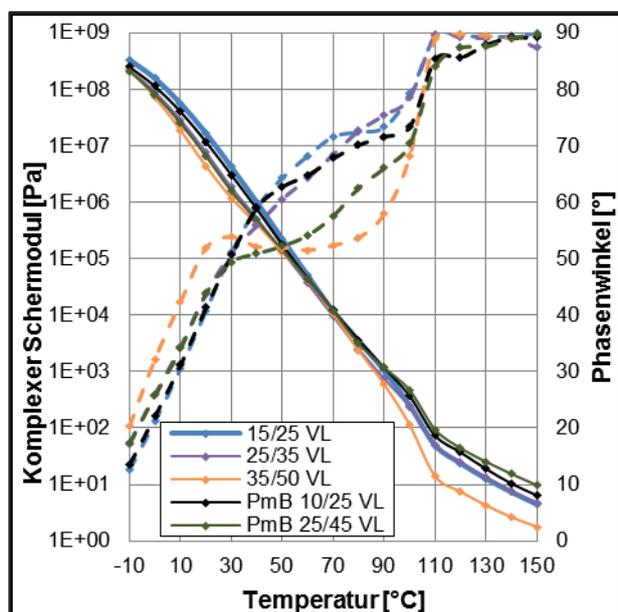


Bild 45: Temperatur bei einer Steifigkeit von 300 MPa und bei einem m-Wert von 0,3 bei Prüfung mittels Bending Beam Rheometer

## DSR-Untersuchungen

Die Untersuchungen mittels Dynamischem Scherreometer erfolgten gemäß [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)], jedoch mit einem erweiterten Temperaturspektrum. Nachfolgend sind die Ergebnisse grafisch dargestellt.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt analog zu der BBR-Untersuchung. Der Schubmodul des jeweiligen Bindemittel ist der y1-Achse zugeordnet als durchgehende Linie dargestellt. Die zu dem Bindemittel zugehörigen Verläufe des Phasenwinkels sind auf der y2-Achse in derselben Farbe als gestrichelte Linie abgebildet.

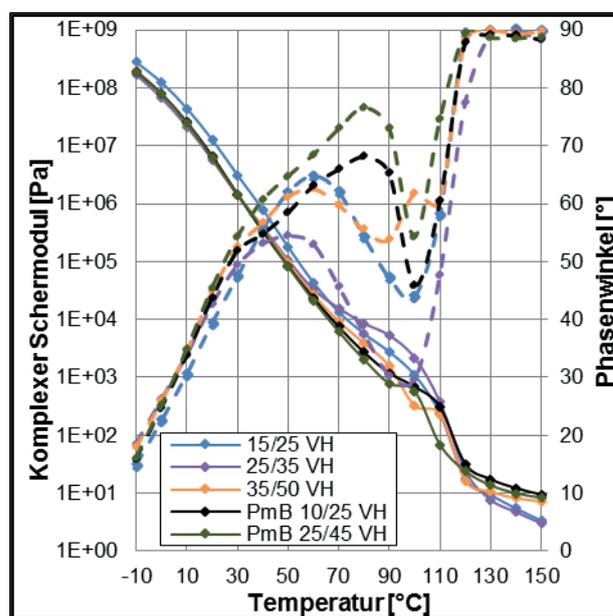


**Bild 46:** Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Fertigbindemitteln der Kategorie VL

**Tab. 23:** Kenngrößen DSR – Fertigbindemittel Kategorie VL

Bindemittel	Äquisteifigkeitstemp	Zugehöriger Phasenwinkel
[n]	[°C]	[°]
15/25 VL	69,1	71,4
25/35 VL	68,0	67,7
35/50 VL	68,6	52,2
PmB 10/25 VL	69,1	67,6
PmB 25/45 VL	69,0	57,3

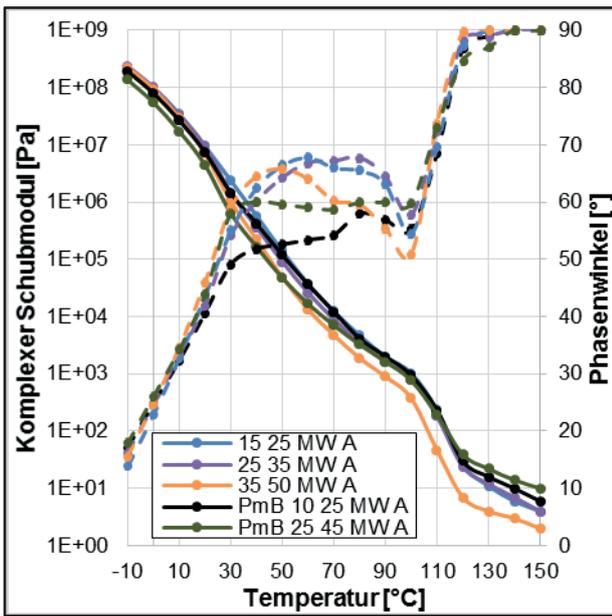
Die Bilder Bild 46 bis Bild 54 zeigen die Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an den Bindemittelgemischgruppen. Zugehörig sind in den Tabellen Tab. 23 bis Tab. 29 die Kenngrößen zusammengefasst.



**Bild 47:** Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Fertigbindemitteln der Kategorie VH

**Tab. 24:** Kenngrößen DSR – Fertigbindemittel Kategorie VH

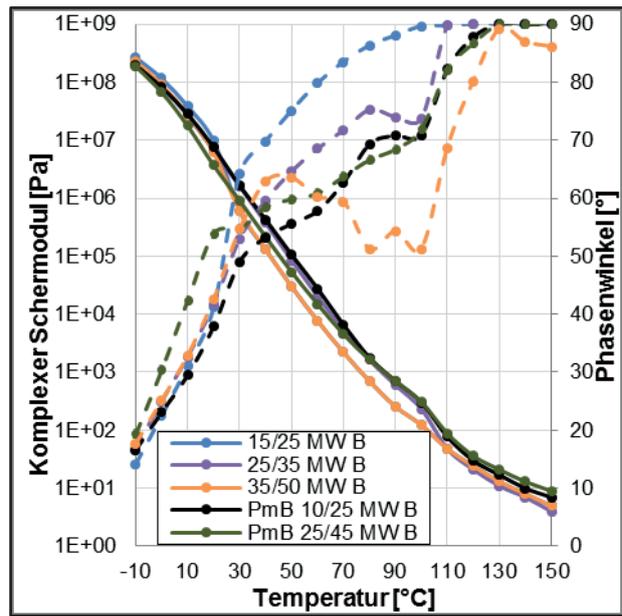
Bindemittel	Äquisteifigkeitstemp	Zugehöriger Phasenwinkel
[n]	[°C]	[°]
15/25 VH	69,5	62,1
25/35 VH	71,0	44,9
35/50 VH	66,7	60,8
PmB 10/25 VH	65,3	64,6
PmB 25/45 VH	64,1	70,3



**Bild 48:** Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit Montanwachs A

**Tab. 25:** Kenngrößen DSR – Bindemittel mit Montanwachs A

Bindemittel	Äquisteifigkeitstemperatur	Zugehöriger Phasenwinkel
[n]	[°C]	[°]
15/25 MW A	69,0	66,2
25/35 MW A	66,5	67,0
35/50 MW A	60,2	59,1
PmB 10/25 MW A	68,8	54,2
PmB 25/45 MW A	66,0	60,8



**Bild 49:** Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit Montanwachs B

**Tab. 26:** Kenngrößen DSR – Bindemittel mit Montanwachs B

Bindemittel	Äquisteifigkeitstemperatur	Zugehöriger Phasenwinkel
[n]	[°C]	[°]
15/25 MW B	56,8	78,3
25/35 MW B	63,7	69,7
35/50 MW B	56,8	78,3
PmB 10/25 MW B	61,8	59,0
PmB 25/45 MW B	60,0	60,8

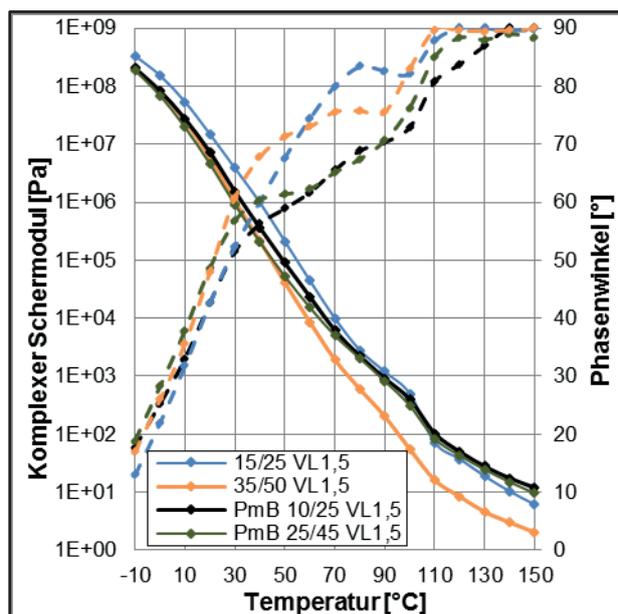


Bild 50: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit 1,5 M.-% Zugabe von Fischer-Tropsch-Wachs

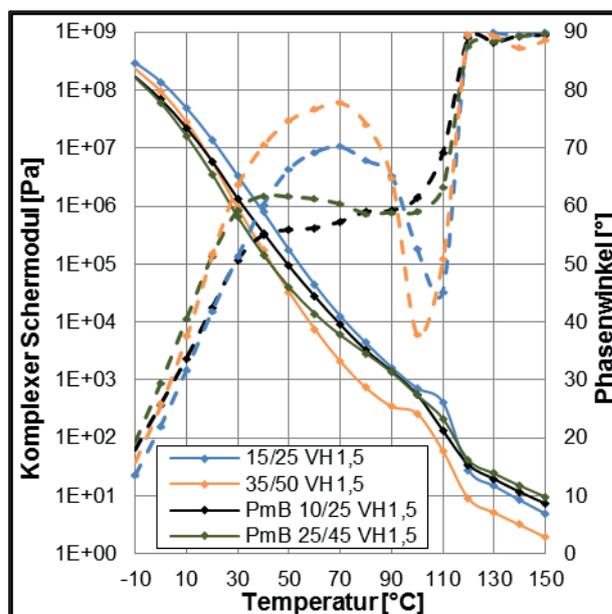


Bild 52: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit 1,5 M.-% Zugabe von Amid-Wachs

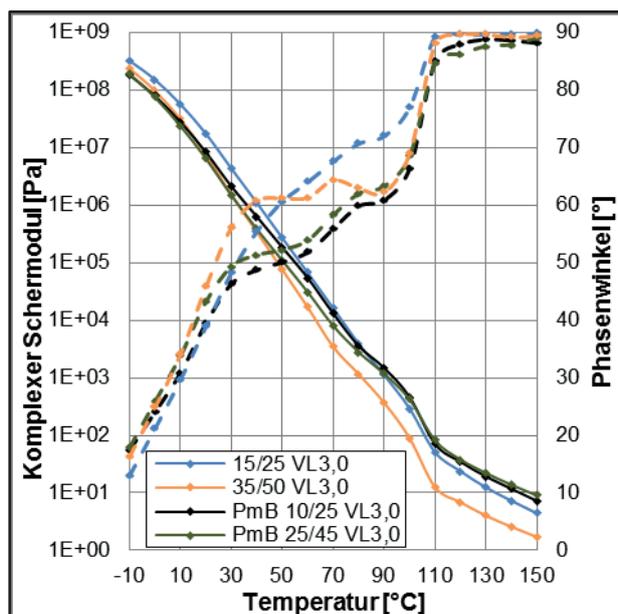


Bild 51: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit 3,0 M.-% Zugabe von Fischer-Tropsch-Wachs

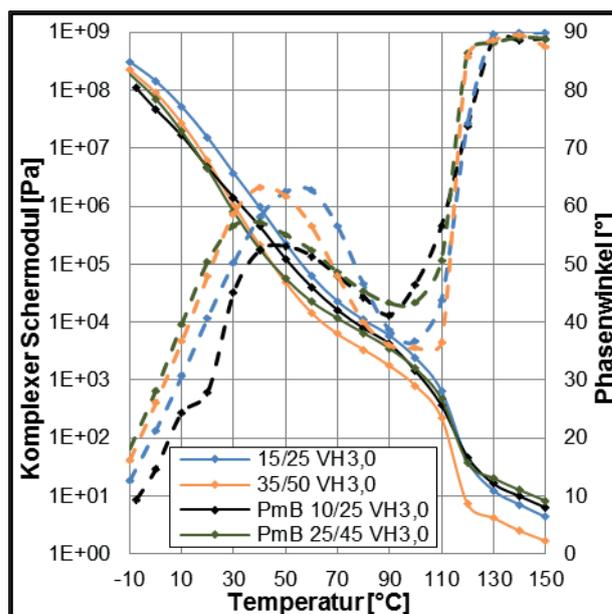


Bild 53: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit 3,0 M.-% Zugabe von Amid-Wachs

Tab. 27: Kenngrößen DSR – Bindemittel mit FT-Wachs

Bindemittel	Äquisteifkeits-temperatur	Zugehöriger Phasenwinkel
[n]	[°C]	[°]
15/25 VL1,5	67,4	77,1
35/50 VL1,5	58,0	72,6
PmB 10/25 VL1,5	64,9	63,5
PmB 25/45 VL1,5	60,3	62,3
15/25 VL3,0	71,0	68,0
35/50 VL3,0	61,4	61,8
PmB 10/25 VL3,0	69,5	55,7
PmB 25/45 VL3,0	66,9	56,9

Tab. 28: Kenngrößen DSR – Bindemittel mit Amid-Wachs

Bindemittel	Äquisteifkeits-temperatur	Zugehöriger Phasenwinkel
[n]	[°C]	[°]
15/25 VH1,5	69,2	70,1
35/50 VH1,5	57,1	76,1
PmB 10/25 VH1,5	66,8	56,9
PmB 25/45 VH1,5	59,6	61,2
15/25 VH3,0	76,6	50,0
35/50 VH3,0	59,8	56,6
PmB 10/25 VH3,0	71,4	47,4
PmB 25/45 VH3,0	66,9	49,8

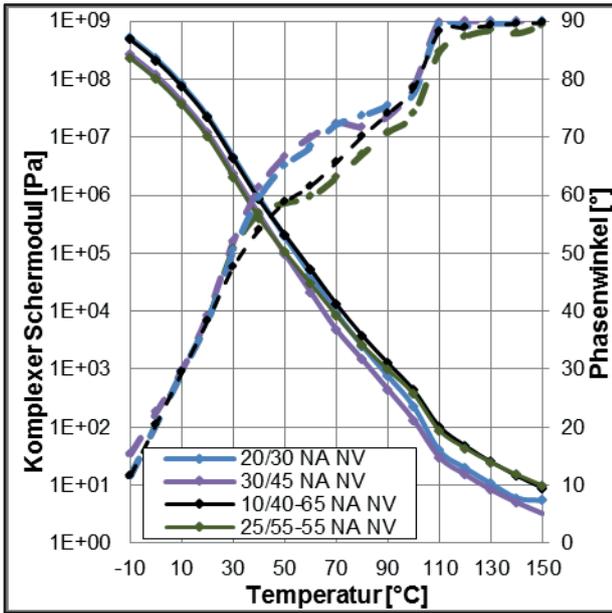


Bild 54: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit Naturasphalt und Fischer-Tropsch-Wachs

Tab. 29: Kenngrößen DSR – mit Naturasphalt und Fischer-Tropsch-Wachs

Bindemittel	Äquisteifigkeits-temperatur	Zugehöriger Phasenwinkel
[n]	[°C]	[°]
20/30 NA NV	68,3	71,6
30/45 NA NV	63,9	64,1
25/55-55 NA NV	67,0	62,1
10/40-65 NA NV	69,6	65,5

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Dynamischen Scherrheometer sind in Bild 55 zusammengefasst. Zusätzlich zu den gemessenen Ergebnissen dieses Forschungsprojekts sind Ergebnisse an nicht modifizierten Bindemitteln aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt der Ruhr-Universität Bochum dargestellt [Radenberg, et al, 2014]. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden für die Darstellung der geprüften Bindemittel die Grundbindemittel und die Wachsart als Variantenbezeichnung gewählt.

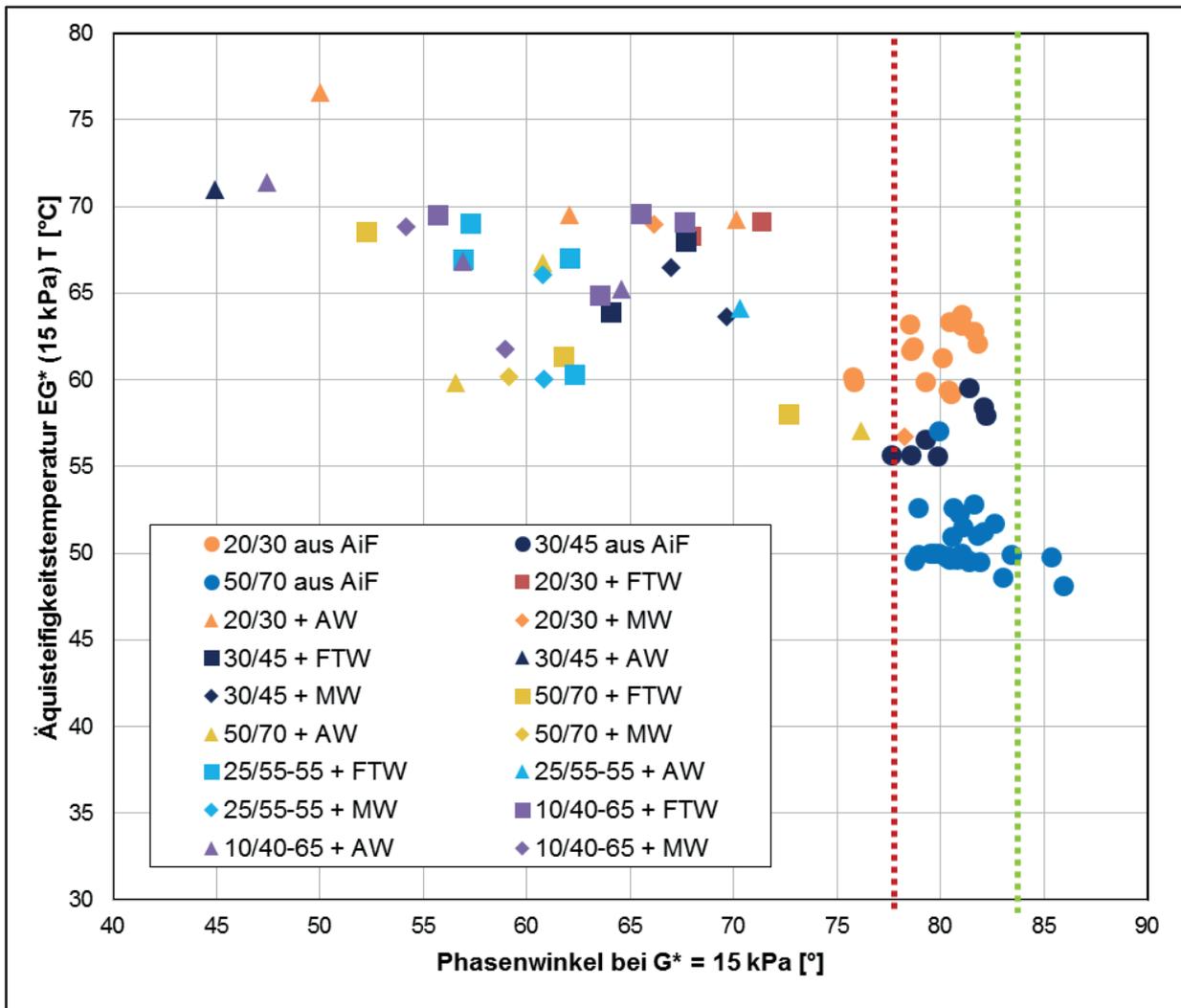


Bild 55: Darstellung der Ergebnisse aus der DSR-Untersuchung

## Relaxationsverhalten

Das Relaxationsverhalten der Bindemittel wurde gemäß des in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Prüfverfahrens ermittelt und mathematisch ausgewertet.

Die Betrachtung der Ergebnisse erfolgt analog zu den zuvor beschriebenen Bindemitteluntersuchungen getrennt nach den verwendeten viskositätsverändernden Zusätzen.

In Bild 56 bis Bild 64 sind die Verläufe der Zugspannungen der Bindemittel getrennt nach den Bindemittelgemischgruppen dargestellt.

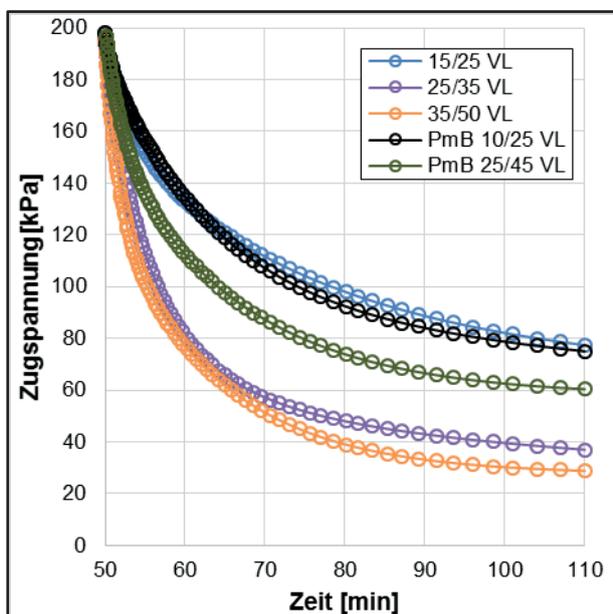


Bild 56: Relaxationsverlauf an Fertigbindemitteln - Kategorie VL

Tab. 30: Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Fertigbindemitteln der Kategorie VL

Bindemittel [n]	$\sigma_{60}$ [kPa]
15/25 VL	77,37
25/35 VL	36,99
35/50 VL	28,79
PmB 10/25 VL	75,01
PmB 25/45 VL	60,35

Die zugehörigen Absolutwerte der Normalspannung nach 60 Minuten sind zugehörig in den Tabellen Tab. 30 bis Tab. 36 zusammengefasst.

Die Bilder stellen den Verlauf der Zugspannungen nach dem in Bild 15 dargestellten rheologischen Modell dar. Ein Vergleich der gemessenen mit den so errechneten Werten ist dem Anhang A1 zu entnehmen.

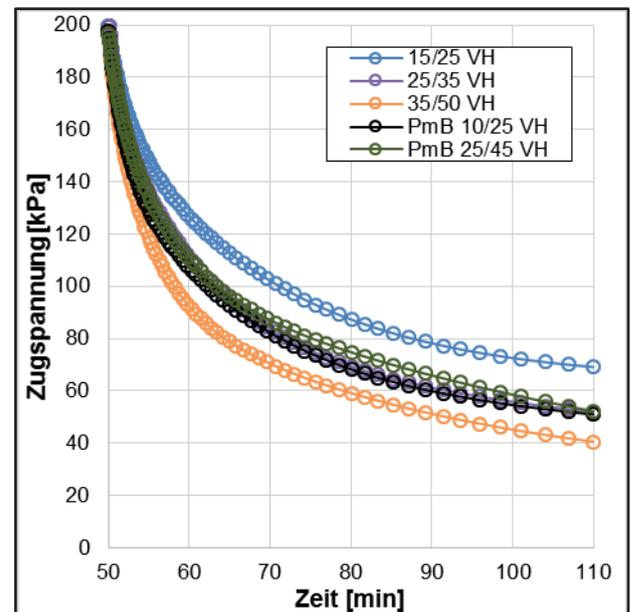
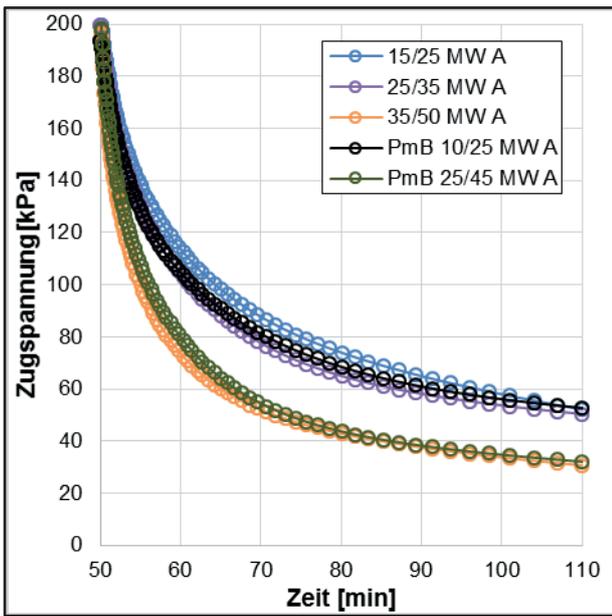


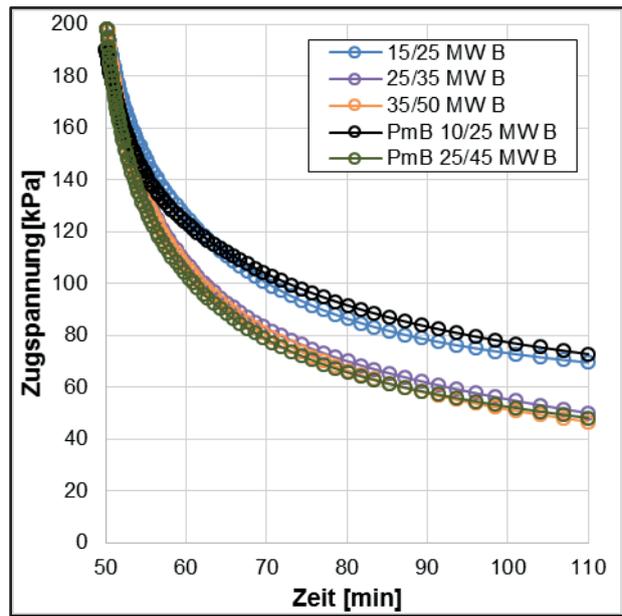
Bild 57: Relaxationsverlauf an Fertigbindemitteln – Kategorie VH

Tab. 31: Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Fertigbindemitteln der Kategorie VH

Bindemittel [n]	$\sigma_{60}$ [kPa]
15/25 VH	69,13
25/35 VH	52,19
35/50 VH	40,57
PmB 10/25 VH	50,99
PmB 25/45 VH	52,17



**Bild 58:** Relaxationsverlauf an Bindemitteln mit Montanwachs A



**Bild 59:** Relaxationsverlauf an Bindemitteln mit Montanwachs B

**Tab. 32:** Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit Montanwachs A

Bindemittel	$\sigma_{60}$
[n]	[kPa]
15/25 MW A	52,10
25/35 MW A	50,41
35/50 MW A	30,69
PmB 10/25 MW A	52,73
PmB 25/45 MW A	32,13

**Tab. 33:** Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit Montanwachs B

Bindemittel	$\sigma_{60}$
[n]	[kPa]
15/25 MW B	69,46
25/35 MW B	49,97
35/50 MW B	46,69
PmB 10/25 MW B	72,73
PmB 25/45 MW B	48,11

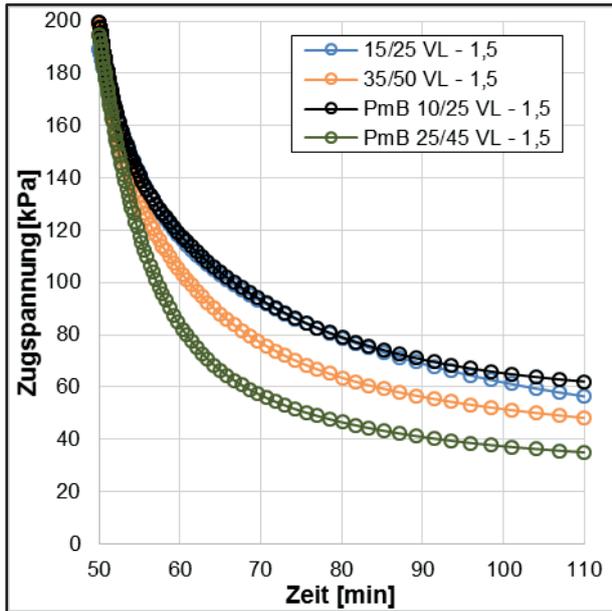


Bild 60: Relaxationsverlauf Bindemittel mit 1,5 M.-% FT-Wachs

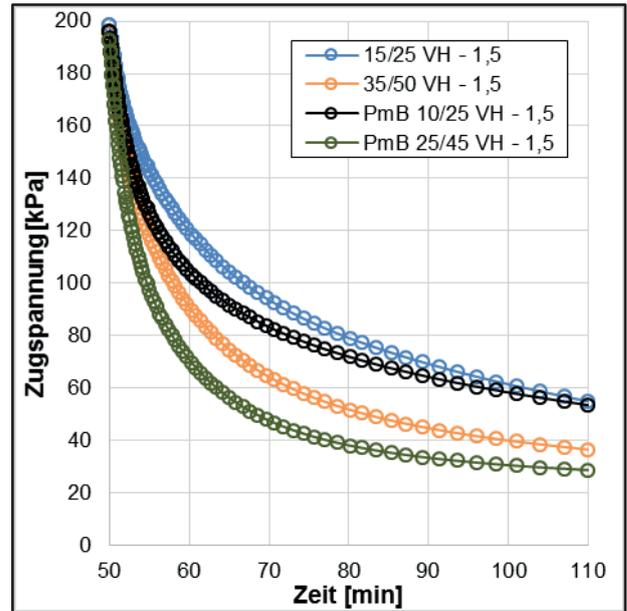


Bild 62: Relaxationsverlauf Bindemittel mit 1,5 M.-% Amid-Wachs

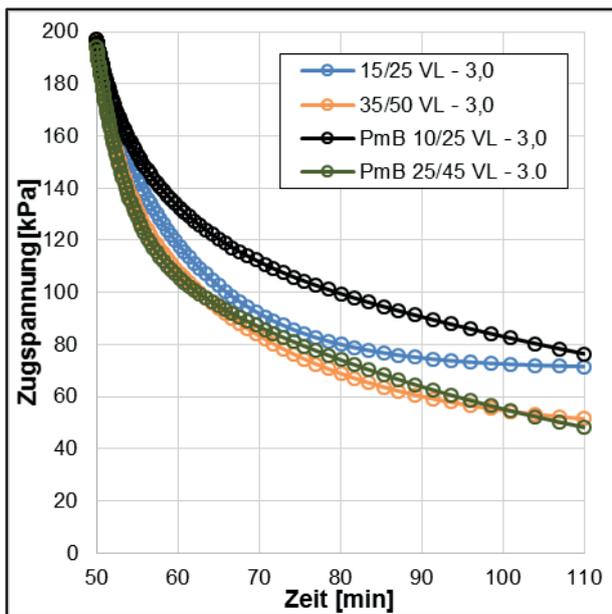


Bild 61: Relaxationsverlauf Bindemittel mit 3,0 M.-% FT-Wachs

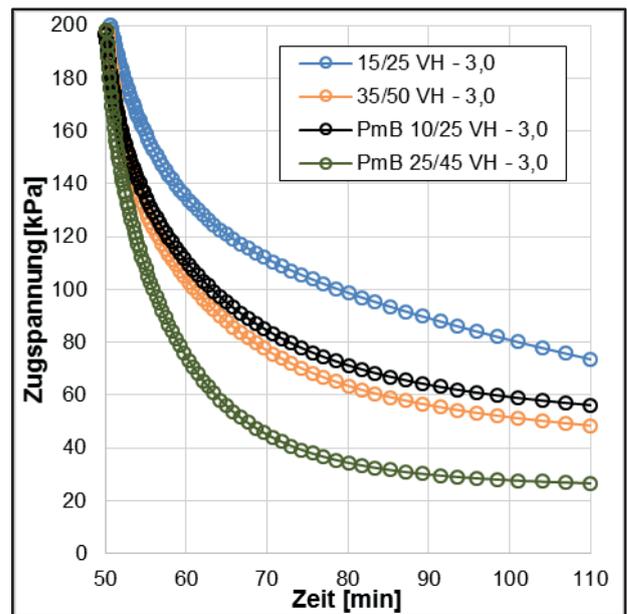


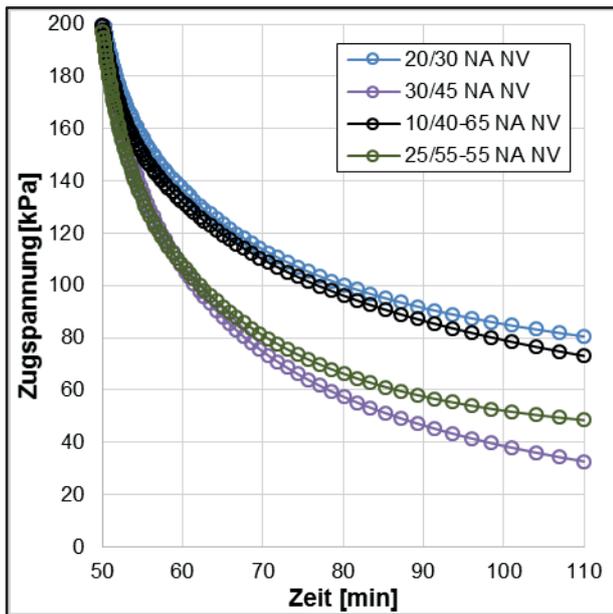
Bild 63: Relaxationsverlauf Bindemitteln mit 3,0 M.-% Amid-Wachs

Tab. 34: Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit 1,5 M.-% FT-Wachs

Bindemittel	$\sigma_{60}$
[n]	[kPa]
15/25 VL – 1,5	56,48
35/50 VL – 1,5	48,24
PmB 10/25 VL – 1,5	62,14
PmB 25/45 VL – 1,5	35,07
15/25 VL – 3,0	71,59
35/50 VL – 3,0	50,19
PmB 10/25 VL – 3,0	78,76
PmB 25/45 VL – 3,0	47,36

Tab. 35: Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit Amid-Wachs

Bindemittel	$\sigma_{60}$
[n]	[kPa]
15/25 VH – 1,5	55,07
35/50 VH – 1,5	36,72
PmB 10/25 VH – 1,5	53,64
PmB 25/45 VH – 1,5	28,89
15/25 VH – 3,0	73,56
35/50 VH – 3,0	48,47
PmB 10/25 VH – 3,0	56,19
PmB 25/45 VH – 3,0	26,56



**Bild 64:** Relaxationsverlauf an Bindemitteln unter Doppelmodifikation mit Naturasphalt und Fischer-Tropsch-Wachs

**Tab. 36:** Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit Naturasphalt und Fischer-Tropsch-Wachs

Bindemittel [n]	$\sigma_{60}$ [kPa]
20/30 NA NV	80,52
30/45 NA NV	32,70
10/40-65 NA NV	73,05
25/55-55 NA NV	48,49

### Bindemittelauswahl

Basierend auf den Ergebnissen der untersuchten 40 Bindemittel wurden zehn Bindemittel ausgewählt, welche den Ergebnisbereich hinsichtlich der Kälteuntersuchungen repräsentativ widerspiegeln.

Die Bestimmung der Nadelpenetration, des Erweichungspunkts Ring und Kugel und der Phasenübergangstemperatur diente lediglich zur Überprüfung und zur Erfahrungssammlung und wurde als nicht maßgebend für die Bewertung des Kälteverhaltens nicht weiter berücksichtigt.

Als Bewertungskriterien für die Auswahl der zehn Bindemittel wurden Kenngrößen der BBR-, der DSR- und der Relaxationsmessungen herangezogen.

Die Kälteflexibilität im BBR wurde anhand der Kenngrößen  $T(m=0,3)$  und  $T(s=300\text{MPa})$  bewertet. Dabei wurde je Bindemittel die höhere Temperatur als die maßgebende für die Bewertung herangezogen.

Die DSR-Messung lieferte den Phasenwinkel bei  $-10\text{ }^\circ\text{C}$ , welcher als weiteres Kriterium zur Beurteilung der Kälteempfindlichkeit herangezogen wurde. Es wurde der Phasenwinkel bei  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  ausgewählt, um eine Vergleichbarkeit zu der Messung der Bitumenrelaxation nutzen zu können.

Als Bewertungskriterium der Relaxation wurde die Restspannung im Bitumenprobekörper nach 60 Minuten Relaxationszeit ausgewählt.

Die Bewertung erfolgte durch eine Reihung der Messergebnisse vom Wert 1 (kälteanfällige Variante) bis 40 (am wenigsten kälteanfällig). Die Summe über die drei bewerteten Kenngrößen ermöglicht eine absolute Betrachtung über die Bindemittel.

In Tab. 37 sind die Ergebnisse der Untersuchungen aufgelistet. Die Auswahl der zehn Bindemittel ist farblich hervorgehoben. Die rot hinterlegten Bindemittel stellen die nicht polymermodifizierten Bindemittel mit geringer Kälteflexibilität für alle drei betrachteten Wachsarten dar. Zusätzlich ist in rosa eine Variante mit Doppelmodifikation hinterlegt.

In orange sind die beiden ausgewählten polymermodifizierten Bindemittel markiert. In blau dargestellt sind Varianten, welche in der Bewertung durchschnittlich abschließen, während die grün markierten Varianten als nicht kälteanfällig den Ergebnisbereich vollständig abdecken.

Tab. 37: Auswahl der Bindemittel für weitere Asphaltuntersuchungen anhand von drei Bewertungskriterien

Bindemittel	Auswahl und fortwährende Bezeichnung	Bindemittelkennwerte bei -10 °C						Wertung
		BBR		DSR – T-Sweep		DSR - Relaxation		
		T <sub>maßgebend</sub>	Rei- hung	Phasen- winkel	Rei- hung	Restspan- nung	Rei- hung	
[n]	[n]	[°C]	[-]	[°]	[-]	[kPa]	[-]	Gesamt- summe
15/25 VL	B1	-10,4	4	12,5	3	77,4	3	10
25/35 VL		-16,7	35	17,1	26	37,0	32	93
35/50 VL	B2	-16,9	36	20,2	40	28,8	39	115
15/25 VH		-12,1	10	14,8	11	69,1	10	31
25/35 VH	B3	-16,1	31	18,6	36	52,2	18	85
35/50 VH		-17,5	37	18,1	34	40,6	31	102
PmB 10/25 VL	B4	-11,3	7	13,6	8	75,0	4	19
PmB 25/45 VL		-14,8	23	17,4	28	60,4	12	63
PmB 10/25 VH		-13,7	20	15,9	14	51,0	21	55
PmB 25/45 VH		-15,6	28	16,1	16	52,2	19	63
15/25 A		-13,3	15	13,9	9	52,1	20	44
25/35 A		-15,1	24	16,3	18	50,4	22	64
35/50 A		-16,5	33	15,6	13	30,7	37	83
15/25 B	B5	-11,0	6	14,2	10	69,5	9	25
25/35 B		-14,5	22	16,8	22	50,0	24	68
35/50 B		-13,3	14	16,1	15	46,7	30	59
PmB 10/25 A		-12,7	12	17,1	27	52,7	17	56
PmB 25/45 A		-17,5	38	16,6	21	32,1	36	95
PmB 10/25 B		-9,6	2	17,9	32	72,7	7	41
PmB 25/45 B		-15,7	29	19,3	39	48,1	28	96
15/25 VL <sub>1,5</sub>		-12,5	11	13,0	5	56,5	13	29
15/25 VL <sub>3,0</sub>		-11,3	8	13,1	6	71,6	8	22
35/50 VL <sub>1,5</sub>		-15,5	26	17,0	25	48,2	27	78
35/50 VL <sub>3,0</sub>	B6	-14,0	21	16,4	19	50,2	23	63
PmB 10/25 VL <sub>1,5</sub>		-13,5	16	17,7	30	62,1	11	57
PmB 10/25 VL <sub>3,0</sub>		-13,0	13	17,4	29	78,8	2	44
PmB 25/45 VL <sub>1,5</sub>		-16,6	34	18,9	37	35,1	34	105
PmB 25/45 VL <sub>3,0</sub>		-15,2	25	18,0	33	47,4	29	87
15/25 VH <sub>1,5</sub>		-11,8	9	13,4	7	55,1	15	31
15/25 VH <sub>3,0</sub>	B7	-10,8	5	12,7	4	73,6	5	14
35/50 VH <sub>1,5</sub>		-16,5	32	16,8	23	36,7	33	88
35/50 VH <sub>3,0</sub>		-16,1	30	16,2	17	48,5	26	73
PmB 10/25 VH <sub>1,5</sub>		-15,6	27	17,9	31	53,6	16	74
PmB 10/25 VH <sub>3,0</sub>	B8	-13,7	19	16,9	24	56,2	14	57
PmB 25/45 VH <sub>1,5</sub>		-18,8	40	19,3	38	28,9	38	116
PmB 25/45 VH <sub>3,0</sub>	B9	-18,0	39	18,2	35	26,6	40	114
20/30+NA NV	B10	-9,8	3	11,7	1	80,5	1	5
30/45+NA NV		-13,7	18	15,4	12	32,7	35	65
25/55-55A+NA NV		-13,6	17	11,7	20	48,5	25	62
10/40-65+NA NV		-9,0	1	11,7	2	73,1	6	9

## 6.2 Verformungswiderstand und Kälteflexibilität der Laborproben

### 6.2.1 Mischgutzusammensetzung der Prüfvarianten

In Abhängigkeit von den Ergebnissen der in Kapitel 6.1.4 dargestellten Bindemitteluntersuchungen wurden die zehn in Tab. 37 markierten Bindemittel für die weiteren Untersuchungen verwendet. Die Bindemittelauswahl berücksichtigte dabei sowohl alle Arten von Zusätzen wie auch ein breites Spektrum der Kälteeigenschaften der Bindemittel.

Mit diesen Bindemitteln wurde jeweils eine Basiserprüfung für einen Gussasphalt mit 8 mm Größtkorn erstellt.

Die hierzu gewählte Korngrößenverteilung für einen MA 8 S mit der Gesteinskörnung Diabas (grobe und feine Gesteinskörnung) und mit dem Kalksteinfüller (KSFF) ist in Bild 65 und Tab. 38 dargestellt

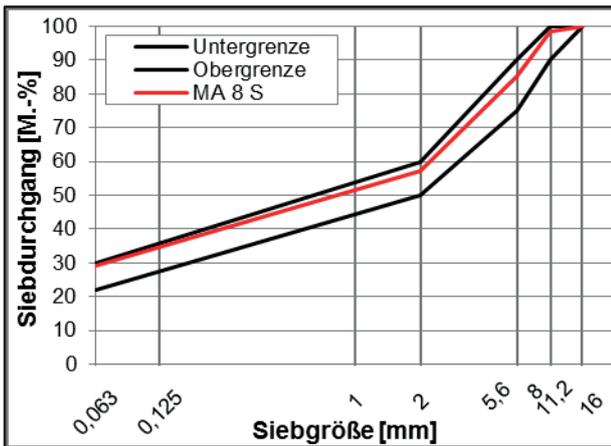


Bild 65: Sieblinie MA 8 S

Tab. 38: Korngrößenverteilung MA 8 S

Siebgröße	Durchgang	Sollwerte gem. TL Asphalt-StB 07/13
[mm]	[M.-%]	[M.-%]
11,2	100,0	100
8,0	98,5	90 bis 100
5,6	85,1	75 bis 90
2,0	57,3	50 bis 60
0,125	32,0	-
0,063	29,2	22 bis 30

Für die Variation des verwendeten Größtkorns wurden die Gesteinsarten konstant gehalten. Die Sieblinie für den MA 5 S ist in Bild 66 und Tab. 39, die Sieblinie für den MA 11 ist in Bild 67 und Tab. 40 zusammengefasst.

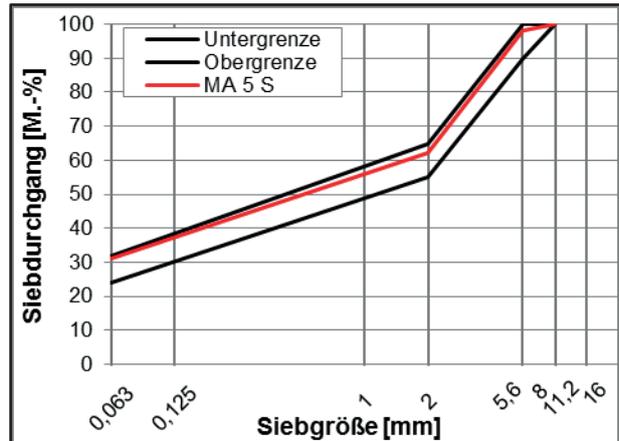


Bild 66: Sieblinie MA 5 S

Tab. 39: Korngrößenverteilung MA 5 S

Siebgröße	Durchgang	Sollwerte gem. TL Asphalt-StB 07/13
[mm]	[M.-%]	[M.-%]
8,0	100	100
5,6	98,2	90 bis 100
2,0	62,3	55 bis 65
0,125	34,3	-
0,063	31,2	24 bis 32

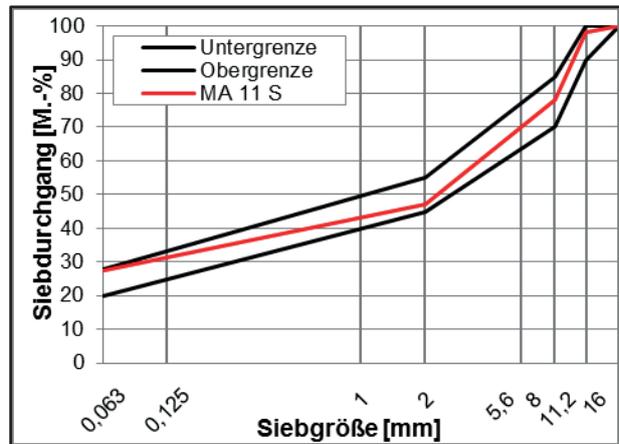


Bild 67: Sieblinie MA 11 S

Tab. 40: Korngrößenverteilung MA 11 S

Siebgröße	Durchgang	Sollwerte gem. TL Asphalt-StB 07/13
[mm]	[M.-%]	[M.-%]
16,0	100,0	100
11,2	98,3	90 bis 100
8,0	78,0	70 bis 85
5,6	66,4	-
2,0	47,0	45 bis 55
0,125	29,9	-
0,063	27,3	20 bis 28

Die im Zuge der Asphaltuntersuchungen verwendeten Varianten wurden alle nach folgendem Schema bezeichnet:

MA X – Bn oder MA X - GVn

Mit:

MA: Gussasphalt  
 X: Größtkorn  
 Bn: Bindemittel 1 bis 9 gemäß Tab. 37  
 GVn: Gesteinsvariante gemäß Tab. 41

Für die Untersuchung des Einflusses der Gesteinskomponenten auf einen MA 8 S wurden vierzehn Varianten ausgewählt, welche sich hinsichtlich der Gesteinsart der feinen und groben Gesteinskörnung, der verwendeten Füller - unter Berücksichtigung verschiedener versteifender Eigenschaften - und der Variation des Natursand/Brechsand-Verhältnisses unterschieden.

Die Zusammensetzung der vierzehn Gesteinsvarianten (GV) ist in Tab. 41 dokumentiert. Als Sieblinie wurde die des MA 8 verwendet.

Die Untersuchungen wurden systematisch durch Variation einzelner Komponenten durchgeführt, um die Überlagerungen mehrerer Einflussfaktoren möglichst zu vermeiden. In einem ersten Schritt wurde das Brechsand/Natursand-Verhältnis variiert (Variante 1 bis 5). Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde ein BS/NS-Verhältnis ausgewählt und in einem weiteren Schritt die Gesteinsart der feinen und groben Gesteinskörnung sowie des Füllers variiert und analysiert (Variante 6 bis 14). Mit diesen Erkenntnissen wurden im letzten Schritt vermeintlich kälteempfindliche Gesteinskörnungen ausgewählt.

**Tab. 41:** Variation der Gesteinskomponenten bei einem Gussasphalt MA 8

Variante	Verwendeter Füller	BS / NS Verh.	Verwendete fGk und gGk
[n]	[-]	[M.-%]	[-]
MA 8 – GV1	KSFF	100/0	Diabas
MA 8 – GV2	KSFF	80/20	Diabas
MA 8 – GV3	KSFF	65/35	Diabas
MA 8 – GV4	KSFF	50/50	Diabas
MA 8 – GV5	KSFF	35/65	Diabas
MA 8 – GV6	KSFR	65/35	Diabas
MA 8 – GV7	DH	65/35	Diabas
MA 8 – GV8	QH	65/35	Diabas
MA 8 – GV9	KSFF	65/35	Grauwacke
MA 8 – GV10	KSFF	65/35	Andesit
MA 8 – GV11	KSFF	65/35	Basalt
MA 8 – GV12	KSFR	65/35	Basalt
MA 8 – GV13	DH	65/35	Basalt
MA 8 – GV14	QH	65/35	Basalt

## 6.2.2 Statischer Stempelindringversuch

Eine Kenngröße, welche im Zuge der Untersuchung des Verformungswiderstandes ermittelt wurde, stellt die statische Stempelindringtiefe dar.

Die Variation der Bindemittel bezieht sich auf die in Tab. 37 getroffene Auswahl und lieferte die in Tab. 42 dargestellten Eindringtiefen nach 30 und 60 Minuten sowie die daraus resultierende Zunahme der Eindringtiefe in den letzten 30 Minuten. Als Sieblinie lag die des MA 8 – GV3 zugrunde.

**Tab. 42:** Statische Stempelindringtiefen unter Variation des Bindemittels bei einem Gussasphalt MA 8

Variante	Eindringtiefe nach 30 Min.	Eindringtiefe nach 60 Min.	Zunahme
[n]	[mm]	[mm]	[mm]
MA 8 – B1	2,02	2,24	0,22
MA 8 – B2	2,21	2,44	0,23
MA 8 – B3	1,80	2,02	0,22
MA 8 – B4	1,79	1,96	0,17
MA 8 – B5	2,05	2,34	0,29
MA 8 – B6	2,38	2,63	0,26
MA 8 – B7	1,96	2,23	0,27
MA 8 – B8	1,49	1,66	0,17
MA 8 – B9	2,86	3,19	0,33
MA 8 – B10	0,89	1,07	0,18

Es wurden drei Bindemittel für die Variation der Gesteinskomponenten ausgewählt, mit welchen eine Variation des verwendeten Größtkorns durchgeführt wurde. Die Ergebnisse des Verformungswiderstandes am Gussasphalt MA 5 und am MA 11 sind in Tab. 43 zusammengefasst.

**Tab. 43:** Statische Stempelindringtiefen unter Variation des Bindemittels bei einem Gussasphalt MA 5

Variante	Eindringtiefe nach 30 Min.	Eindringtiefe nach 60 Min.	Zunahme
[n]	[mm]	[mm]	[mm]
MA 5 – B1	1,52	1,67	0,15
MA 5 – B4	1,73	1,94	0,21
MA 5 – B7	1,89	2,15	0,26
MA 11 – B1	1,73	1,93	0,20
MA 11 – B4	1,48	1,67	0,19
MA 11 – B7	1,77	1,99	0,22

Die Ergebnisse der statischen Stempelindringtiefe der in Tab. 41 dargestellten Gussasphaltkonzepte unter Variation der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung sind in Tab. 44 aufgeführt.

**Tab. 44:** Statische Stempelindringtiefe unter Variation der Gesteinskomponenten bei einem Gussasphalt MA 8

Variante	Eindringtiefe nach 30 Min.	Eindringtiefe nach 60 Min.	Zunahme
[n]	[mm]	[mm]	[mm]
MA 8 – GV1	2,53	2,79	0,26
MA 8 – GV2	3,62	4,14	0,52
MA 8 – GV3	1,96	2,23	0,27
MA 8 – GV4	3,55	4,09	0,54
MA 8 – GV5	3,80	4,39	0,60
MA 8 – GV6	1,61	1,79	0,18
MA 8 – GV7	1,86	2,09	0,23
MA 8 – GV8	2,72	3,05	0,33
MA 8 – GV9	2,21	2,56	0,35
MA 8 – GV10	2,70	3,11	0,41
MA 8 – GV11	2,32	2,64	0,32
MA 8 – GV12	1,28	1,46	0,18
MA 8 – GV13	1,59	1,81	0,22
MA 8 – GV14	0,90	1,04	0,14

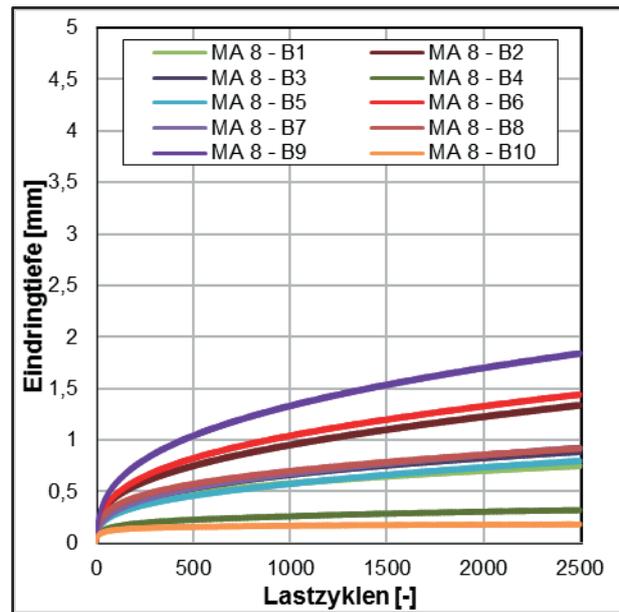
### 6.2.3 Dynamischer Stempelindringversuch

Zur weitergehenden Überprüfung des Verformungswiderstandes wurde der Dynamische Stempelindringversuch gemäß [TP Asphalt, Teil 25 A 1] durchgeführt.

Der Untersuchungsumfang entspricht dabei den in Kapitel 6.2 aufgelisteten Varianten.

Die Darstellung der ermittelten Kenngrößen erfolgt in der gleichen Reihenfolge wie beim statischen Stempelindringversuch.

In Tab. 45 und Bild 68 sind die Ergebnisse des dynamischen Stempelindringversuchs mit ihren Eindringtiefen nach 2500 Lastzyklen für den MA 8 unter Variation des Bindemittels dargestellt.

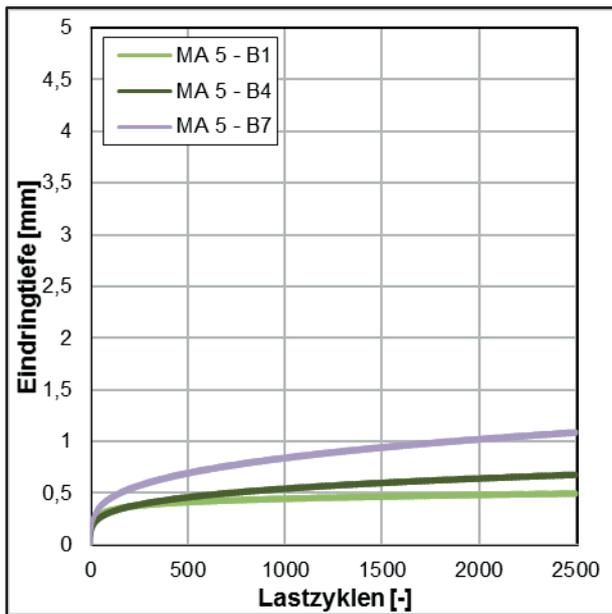


**Bild 68:** Verlauf der dynamischen Stempelindringtiefe an MA 8 unter Variation des Bindemittels

**Tab. 45:** Dynamische Stempelindringtiefe an MA 8 unter Variation des Bindemittels

Variante	Dynamische Stempelindringtiefe nach 2500 Lastzyklen
[n]	[mm]
MA 8 – B1	0,74
MA 8 – B2	1,33
MA 8 – B3	0,88
MA 8 – B4	0,31
MA 8 – B5	0,79
MA 8 – B6	1,44
MA 8 – B7	0,92
MA 8 – B8	0,91
MA 8 – B9	1,83
MA 8 – B10	0,18

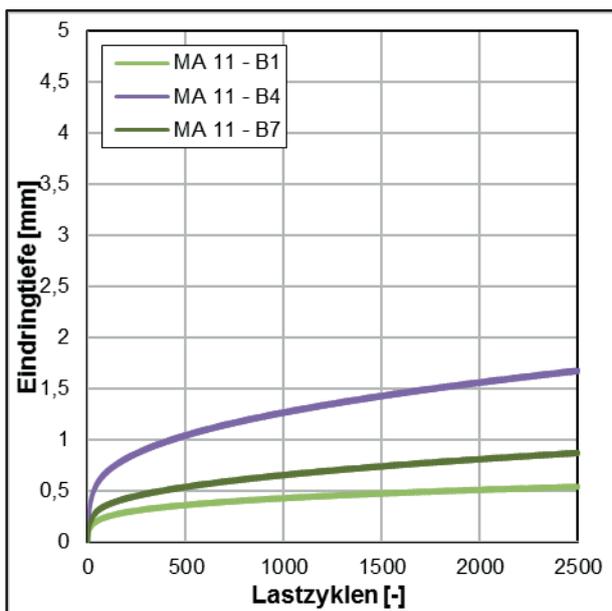
Die Variation des verwendeten Größtkorns bei drei ausgewählten Bindemitteln lieferte die in Tab. 46 und den Bildern Bild 69 und Bild 70 dargestellten Ergebnisse.



**Bild 69:** Verlauf der dynamischen Stempelseindringtiefe an MA 5 unter Variation des Bindemittels

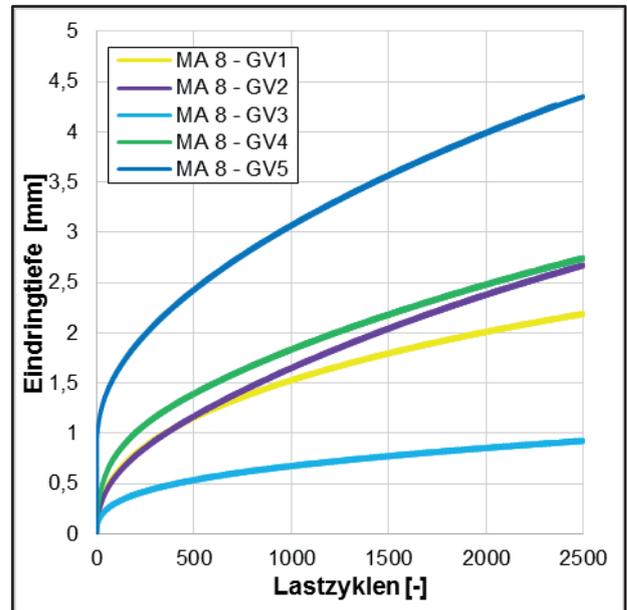
**Tab. 46:** Dynamische Stempelseindringtiefe an MA 5 und MA 11 unter Variation des Bindemittels

Variante	Dynamische Stempelseindringtiefe nach 2500 Lastzyklen
[n]	[mm]
MA 5 – B1	0,50
MA 5 – B4	0,65
MA 5 – B7	1,10
MA 11 – B1	0,83
MA 11 – B4	0,58
MA 11 – B7	1,70



**Bild 70:** Verlauf der dynamischen Stempelseindringtiefe an MA 11 unter Variation des Bindemittels

Die Variation des BS/NS-Verhältnisses erfolgte unter Berücksichtigung der Grenzen der [TL Asphalt-StB-07/13]. Die untersuchten Verhältnisse werden durch die Varianten 1 bis 5 abgebildet und sind in Tab. 47 und Bild 71 dargestellt.



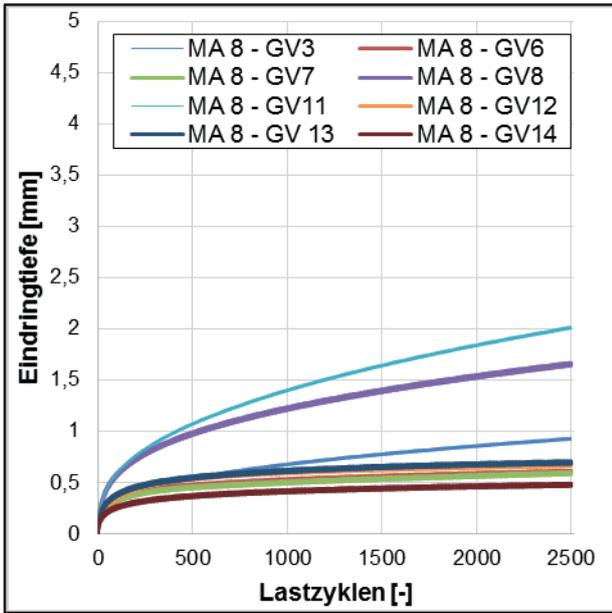
**Bild 71:** Verlauf der dynamischen Stempelseindringtiefe an MA 8 unter Variation des BS/NS-Verhältnisses

**Tab. 47:** Dynamische Stempelseindringtiefe an MA 8 unter Variation des BS/NS-Verhältnisses

Variante	Dynamische Stempelseindringtiefe nach 2500 Lastzyklen
[n]	[mm]
MA 8 – GV1	2,12
MA 8 – GV2	2,61
MA 8 – GV3	0,97
MA 8 – GV4	2,63
MA 8 – GV5	4,40

Für die weiteren Untersuchungen wurde ein BS/NS-Verhältnis von 65/35 ausgewählt. Bei diesem Verhältnis hat sich ein optimaler Verformungswiderstand ausgebildet. Variante 3 dient somit als Bezugsvariante.

In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde der Einfluss des verwendeten Füllers auf den Verformungswiderstand betrachtet. Dafür wurden die vier Füller aus Tab. 2 unter Verwendung von zwei Gesteinskörnungsarten bei ansonsten konstanter Zusammensetzung untersucht (Bild 72 und Tab 48).

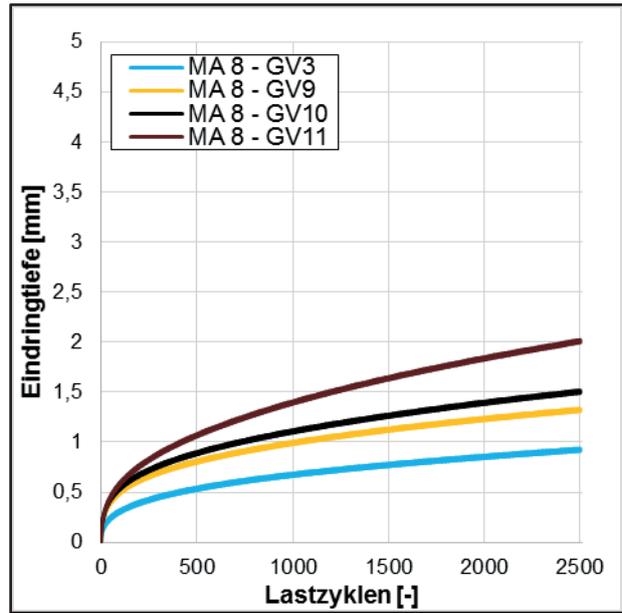


**Bild 72:** Dynamische Stempelseindringtiefe an Gussasphalten MA 8 unter Variation der eingesetzten Füller

**Tab. 48:** Dynamische Stempelseindringtiefe an Gussasphalten MA 8 unter Variation der eingesetzten Füller

Variante	Dynamische Stempelseindringtiefe nach 2500 Lastzyklen
[n]	[mm]
MA 8 – GV3	0,97
MA 8 – GV6	0,59
MA 8 – GV7	0,58
MA 8 – GV8	1,65
MA 8 – GV11	2,00
MA 8 – GV12	0,66
MA 8 – GV13	0,69
MA 8 – GV14	0,47

Ergänzend wurde der Einfluss der Art der verwendeten feinen und groben Gesteinskörnung untersucht. Kenngröße und Verlauf sind in Tab. 49 und Bild 73 dargestellt.



**Bild 73:** Dynamische Stempelseindringtiefe an Gussasphalten MA 8 unter Variation der eingesetzten Gesteinskörnung

**Tab. 49:** Dynamische Stempelseindringtiefe an Gussasphalten MA 8 unter Variation der eingesetzten Gesteinskörnung

Variante	Dynamische Stempelseindringtiefe nach 2500 Lastzyklen
[n]	[mm]
MA 8 – GV3	0,97
MA 8 – GV9	1,32
MA 8 – GV10	1,50
MA 8 – GV11	2,00

### 6.2.4 Ergebnisse und Präzision des Dreipunkt-Biegezugversuchs

Die Rissempfindlichkeit von Gussasphalt unterschiedlichster Zusammensetzungen wurde durch Untersuchungen mit dem Dreipunkt-Biegezugversuch geprüft und analysiert.

Die im Dreipunkt-Biegezugversuch untersuchten Varianten entsprechen denen der Untersuchung des Verformungswiderstandes.

Die erste Versuchsreihe wurde an zehn Gussasphaltvarianten mit einem Größtkorn von 8 mm unter Variation des Bindemittels durchgeführt (Bild 76).

Die Untersuchungen wurden in Dreifachbestimmung bei den Prüftemperaturen 22 °C, 0 °C und -15 °C durchgeführt. Eine Präzision für dieses Verfahrens ist bisher noch nicht bekannt.

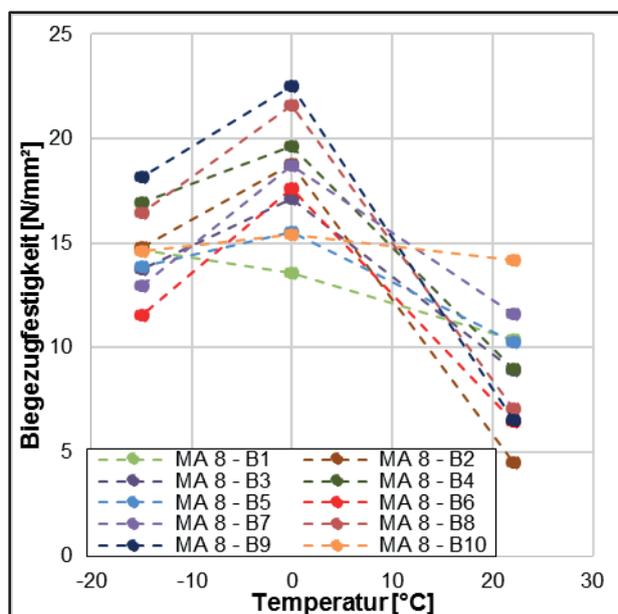


Bild 74: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Variation des eingesetzten Bindemittels

Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche wurden die Kenngrößen QII als Quotient aus Biegezugfestigkeit bei 22 °C und der bei 0 °C und die Durchbiegung bei 0 °C betrachtet. Die in Bild 74 dargestellten Ergebnisse sind in der Tab. 50 unter Angabe der Messwerte aufgeführt. Die Ergebnisse der weitergehenden Auswertung ist Tab. 51 zu entnehmen. Die Varianten mit einem Quotienten  $Q_{II} > 0,6$  wurden farblich hinterlegt. Diese sind nach den bisherigen Erkenntnissen mit diesem Prüfverfahren als kälteanfällig zu interpretieren. Eine Durchbiegung bei 0 °C  $< 0,3$  mm wurde nicht festgestellt.

Tab. 50: Biegezugfestigkeiten für Gussasphalte MA 8 unter Variation des eingesetzten Bindemittels

Variante [n]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		
	22 °C	0 °C	-15 °C
MA 8 - B1	10,40	13,59	14,68
MA 8 - B2	4,46	18,76	14,79
MA 8 - B3	8,90	17,13	13,73
MA 8 - B4	8,95	19,62	16,95
MA 8 - B5	10,28	15,52	13,89
MA 8 - B6	6,44	17,62	11,55
MA 8 - B7	11,61	18,70	12,95
MA 8 - B8	7,06	21,62	16,45
MA 8 - B9	6,52	22,51	18,18
MA 8 - B10	14,19	15,40	14,58

Tab. 51: Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch zur für MA 8 unter Variation des eingesetzten Bindemittels

Variante [n]	Q II	Q III	Durchbiegung bei 0 °C
	[-]	[-]	[mm]
MA 8 - B1	0,77	0,71	0,84
MA 8 - B2	0,24	0,30	0,97
MA 8 - B3	0,52	0,65	0,76
MA 8 - B4	0,46	0,53	0,91
MA 8 - B5	0,66	0,74	0,74
MA 8 - B6	0,37	0,56	0,84
MA 8 - B7	0,62	0,90	0,75
MA 8 - B8	0,33	0,43	1,09
MA 8 - B9	0,29	0,36	1,35
MA 8 - B10	0,92	0,97	0,42

Die Untersuchungsergebnisse unter Verwendung von drei ausgewählten Bindemitteln und verändertem Größtkorn sind für einen MA 5 (Bild 75) und einen MA 11 (Bild 76) dargestellt. Die Tab. 52 fasst die gemessenen Kenngrößen für die sechs Varianten zusammen. Die Auswertung ist in Tab. 53 aufgeführt.

Tab. 52: Biegezugfestigkeiten für Gussasphalte MA 5 und MA 11 unter Variation des eingesetzten Bindemittels

Variante [n]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		
	22 °C	0 °C	-15 °C
MA 5 - B1	11,04	14,46	14,64
MA 5 - B4	8,72	18,58	15,51
MA 5 - B7	10,46	18,38	14,53
MA 11 - B1	10,22	11,56	11,52
MA 11 - B4	7,53	13,84	13,60
MA 11 - B7	7,72	11,97	11,66

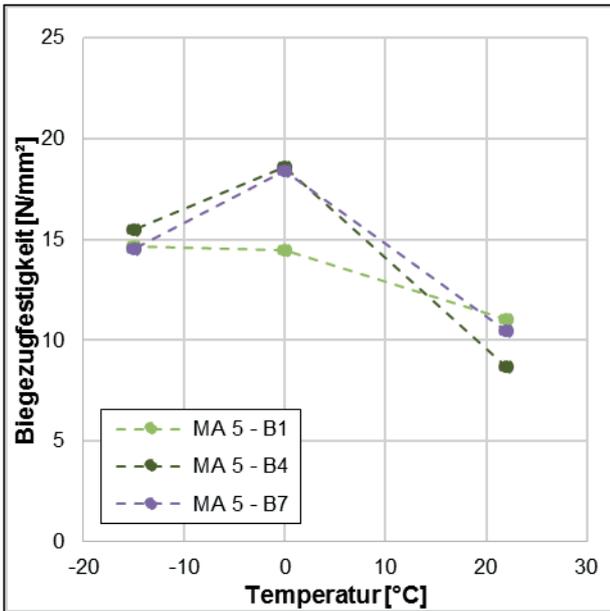


Bild 75: Biegezugfestigkeiten für MA 5 unter Variation des eingesetzten Bindemittels

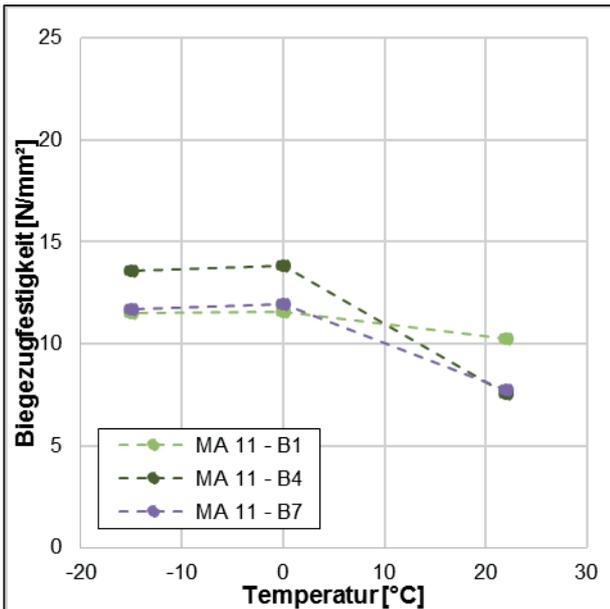


Bild 76: Biegezugfestigkeiten für MA 11 unter Variation des eingesetzten Bindemittels

Tab. 53: Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch für MA 5 und MA 11 unter Variation des Bindemittels

Variante	Q II	Q III	Durchbiegung bei 0 °C
[n]	[-]	[-]	[mm]
MA 5 – B1	0,76	0,75	0,78
MA 5 – B4	0,47	0,56	0,80
MA 5 – B7	0,57	0,72	0,91
MA 11 – B1	0,88	0,89	0,65
MA 11 – B4	0,54	0,55	0,67
MA 11 – B7	0,64	0,66	1,04

Der Einfluss variierender Gesteinskomponenten auf die Ergebnisse im Dreipunkt-Biegezugversuch wurde mit den 14 in Tab. 41 dargestellten Varianten geprüft.

Die Darstellung der Verläufe der Biegezugfestigkeit erfolgte getrennt nach der Variation des Brechsand/ Natursand-Verhältnisses (Bild 77), des Füllers (Bild 78), der verwendeten groben Gesteinskörnung (Bild 79) und der Überlagerung der Einflüsse aus Füller und Gesteinskörnung (Bild 80).

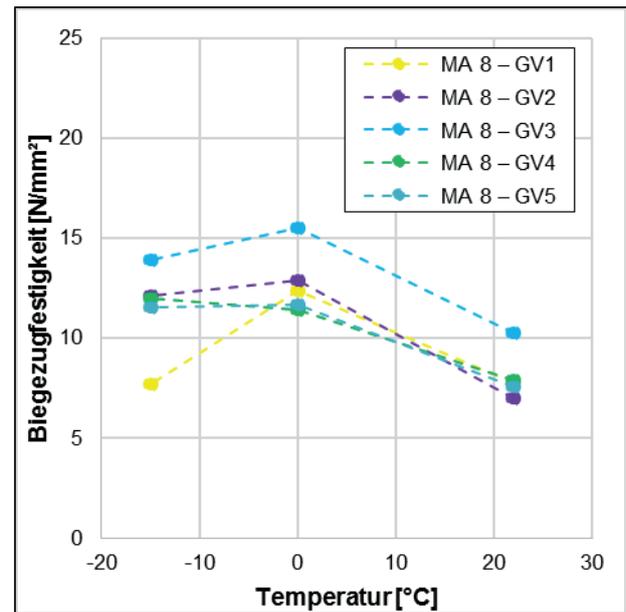


Bild 77: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Variation des BS/NS-Verhältnis

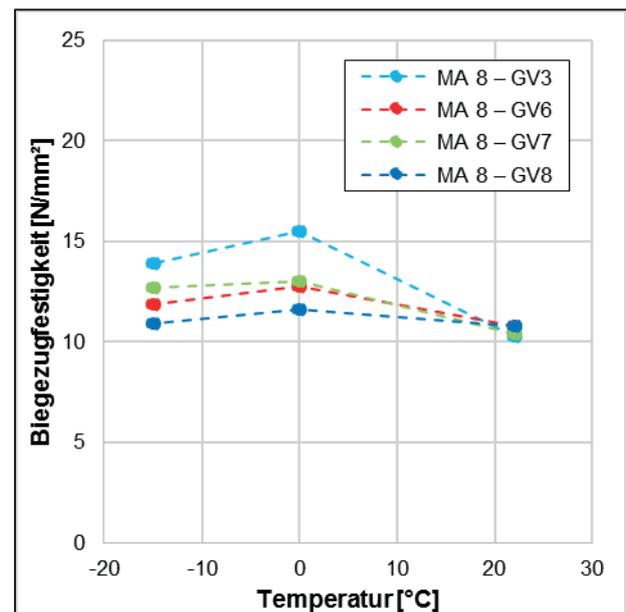


Bild 78: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Variation des eingesetzten Füller

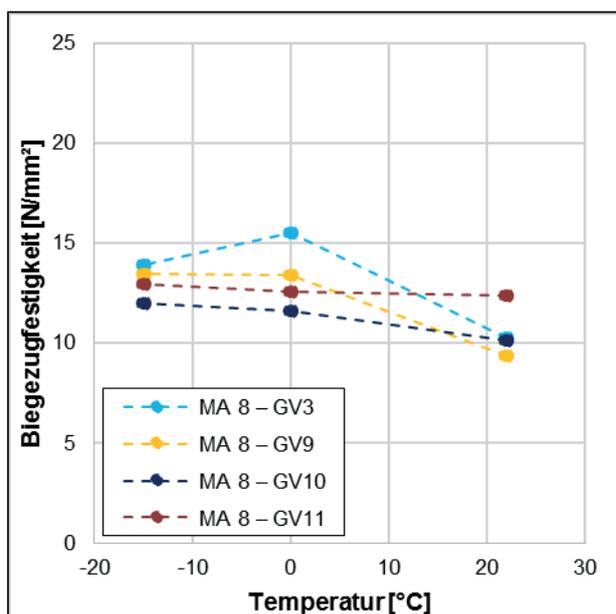


Bild 79: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Variation der großen Gesteinskörnungen

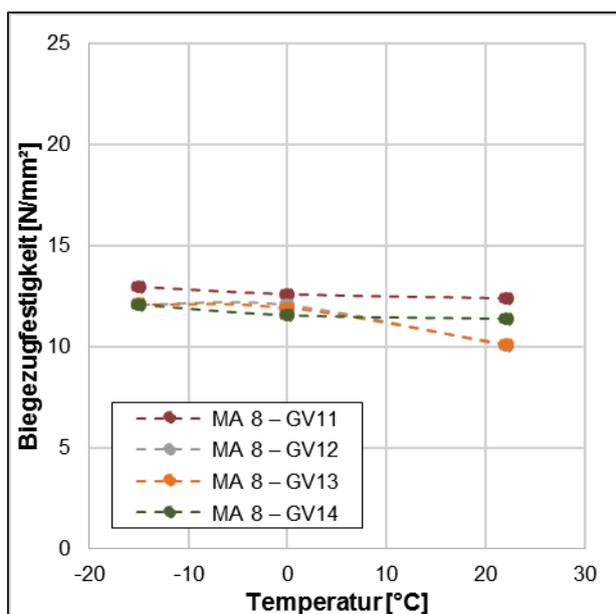


Bild 80: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Überlagerung der Einflüsse aus Füller und Gesteinskörnung

Die Ergebnisse der Biegezugprüfungen sind in Abhängigkeit von der Prüftemperatur in Tab. 54 und die Auswertung ist in Tab. 55 zusammengefasst.

Variante [n]	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		
	22 °C	0 °C	-15 °C
MA 8 – GV1	7,75	12,39	7,68
MA 8 – GV2	7,03	12,90	12,11
MA 8 – GV3	10,28	15,52	13,89
MA 8 – GV4	7,92	11,44	11,97
MA 8 – GV5	7,61	11,70	11,52
MA 8 – GV6	10,82	12,74	11,86
MA 8 – GV7	10,40	13,03	12,70
MA 8 – GV8	10,82	11,60	10,89
MA 8 – GV9	9,36	13,43	13,50
MA 8 – GV10	10,12	11,62	11,98
MA 8 – GV11	12,37	12,58	12,95
MA 8 – GV12	10,04	12,06	12,09
MA 8 – GV13	10,13	11,91	12,10
MA 8 – GV14	11,40	11,58	12,09

Tab. 55: Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch für MA 8 unter Variation der Gesteinskomponenten

Variante. [n]	Q II	Q III	Durchbiegung bei 0 °C
	[-]	[-]	[mm]
MA 8 – GV1	0,63	1,01	0,49
MA 8 – GV2	0,55	0,58	0,72
MA 8 – GV3	0,66	0,74	0,51
MA 8 – GV4	0,69	0,66	0,50
MA 8 – GV5	0,65	0,66	0,52
MA 8 – GV6	0,85	0,91	0,65
MA 8 – GV7	0,80	0,82	0,61
MA 8 – GV8	0,93	0,99	0,63
MA 8 – GV9	0,70	0,69	0,67
MA 8 – GV10	0,87	0,84	0,65
MA 8 – GV11	0,98	0,96	0,65
MA 8 – GV12	0,83	0,83	0,56
MA 8 – GV13	0,85	0,84	0,63
MA 8 – GV14	0,98	0,94	0,63

Tab. 54: Biegezugfestigkeiten unter Variation der Gesteinskomponenten mit einem Bindemittel B7

Basierend auf den insgesamt 47 mittels Dreipunkt-Biegezugversuch geprüften Asphaltvarianten ist es möglich eine erste Betrachtung der Präzision durchzuführen. Die Versuche wurden am selben Prüfgerät durch denselben Prüfer nach dem beschriebenen Messverfahren durchgeführt. Die ausführlichen Ergebnisse sind im Anhang A3 unter Angabe der Messwerte der Dreifachbestimmungen aufgeführt.

Es wurde darüber hinaus als sinnvoll erachtet eine Ermittlung der Präzision für jede Prüftemperatur vorzunehmen. Die Tab. 56 fasst die statistischen Kenngrößen für die drei Prüftemperaturen zusammen.

**Tab. 56:** Statistische Kenngrößen der Präzision des Dreipunkt-Biegezugversuchs anhand von 47 Messreihen

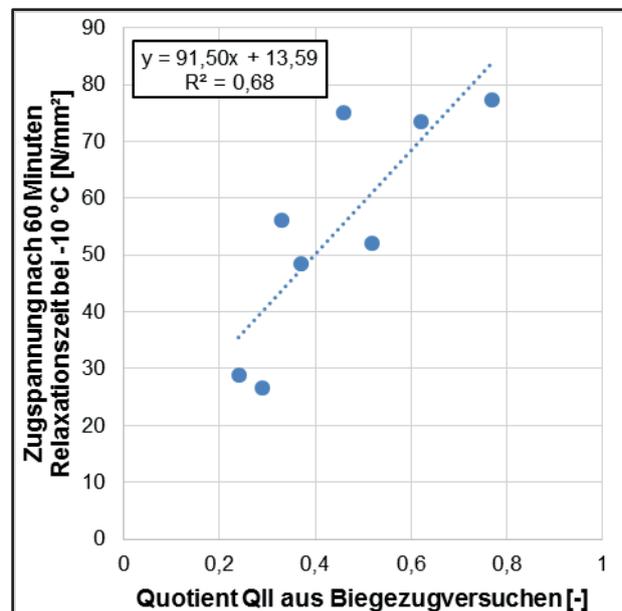
Kenngröße	Einheit	22 °C	0 °C	-15 °C
Mittelwert Biegezugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	8,71	14,04	12,61
Mittlere Standardabweichung	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,24	0,32	0,29
Mittlere Standardabweichung	[%]	2,77	2,35	2,34
Maximale Standardabweichung	[N/mm <sup>2</sup> ]	0,51	0,69	0,90
Maximale Standardabweichung	[%]	6,36	5,44	7,82
Maximale Absolute Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert	[%]	8,90	7,70	9,67

Die kritische Spannweite der Dreifachbestimmung wird definiert aus der entsprechenden Standardabweichung und dem Faktor  $WP(n) = 3,31$  mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %.

## 6.2.5 Korrelationen zwischen Bindemittel- und Asphaltkennwerten für Tieftemperaturbereich

Basierend auf den Ergebnissen der Bindemittel- und Asphaltuntersuchungen des Tieftemperaturbereichs wurde eine Analyse von Korrelationen durchgeführt.

Es konnte eine brauchbare Korrelation zwischen dem Quotienten QII aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch und der Zugspannung  $\sigma_{60}$  nach 60 Minuten Relaxationszeit im DSR nachgewiesen werden. Diese ist in Bild 81 für die acht mit Fischer-Tropsch- oder Amid-Wachs modifizierten Bindemitteln, der Tab. 37 und Tab. 51, dargestellt.



**Bild 81:** Mathematischer Zusammenhang der Kälteflexibilität von Bindemittel- zu Asphaltuntersuchungen an MA

Unter Verwendung des analysierten mathematischen Zusammenhangs ist eine theoretische Prognose der Rissempfindlichkeit des hier verwendeten MA 8 anhand des Relaxationsverhaltens des jeweiligen Bindemittels möglich. Diese theoretisch-mathematische Betrachtung ist dem Anhang A2 zu entnehmen. Aufgrund des noch nicht zufriedenstellenden Bestimmtheitsmaßes dieser Betrachtung sind hier noch weitere Untersuchungen notwendig.

### 6.2.6 Auswahl von MA-Varianten für die Validierung der Biegezugprüfung

Für die validierenden Untersuchungen der Kälteprüfung mittels Dreipunkt-Biegezugversuch wurden an neun ausgewählten Mischgutzusammensetzungen zusätzlich die komplexen Tieftemperaturprüfverfahren (TTV) Abkühl- und einaxialer Zugversuch durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit dem begleitenden Fachgremium wurden vier Gussasphalte MA 8 mit variierendem Bindemittel ausgewählt. Eine fünfte Variante wurde im Zuge von weiterem Forschungsbedarf untersucht und in die Auswertung mit einbezogen. Die Tab. 57 fasst die Ergebnisse des Verformungswiderstandes und der Kälteempfindlichkeit zusammen.

**Tab. 57:** Auswahl von fünf Varianten MA 8 mit variierendem Bindemittel

Variante	St. SET nach 30 Min.	Dyn. SEV nach 2500 Lastzyklen	Q II
[n]	[mm]	[mm]	[-]
MA 8 – B1	2,02	0,74	0,77
MA 8 – B2	2,21	1,33	0,24
MA 8 – B4	1,79	0,31	0,46
MA 8 – B7	1,96	0,92	0,62
MA 8 – B10	0,89	0,18	0,92

Aus der Variation des Größtkorns wurden zwei weitere Varianten ausgewählt (Tab. 58). Für die Untersuchungen wurden ein MA 5 und ein MA 11 mit jeweils drei Bindemitteln geprüft. Aus diesen sechs Varianten wurden zwei für weitergehende Untersuchungen des TTV ausgewählt.

**Tab. 58:** Auswahl von zwei Varianten mit variierendem Größtkorn

Variante	St. SET nach 30 Min.	Dyn. SEV nach 2500 Lastzyklen	Q II
[n]	[mm]	[mm]	[-]
MA 5 – B1	1,52	0,50	0,76
MA 11 – B7	1,77	1,70	0,64

Die Variante B1 bezeichnet einen MA 5 mit einem Bindemittel 15/25 VL. Diese wurde ausgewählt, weil sie über alle modifizierten Bindemittel unter Verwendung des Referenzgesteinskörnungsgemisches die höchste Rissempfindlichkeit, beurteilt anhand QII, erwarten lässt.

Die Variante B2 stellt einen MA 11 mit einem Bindemittel 15/25 VH<sub>3,0</sub> dar. Sie stellt sich als ungewöhnliche Variante dar, da trotz eines geringen Verformungswiderstands eine hohe Rissempfindlichkeit im Dreipunkt-Biegezugversuch festgestellt wurde.

Die Variation der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnungen ergab die letzten beiden Mischgutzusammensetzungen. Aus den 14 Varianten wurden Variante 11 und 14 ausgewählt. Die Ergebnisse sind in Tab. 59 zusammengefasst.

**Tab. 59:** Auswahl von zwei Varianten mit variierenden granulometrischen Eigenschaften

Variante	St. SET nach 30 Min.	Dyn. SEV nach 2500 Lastzyklen	Q II
[n]	[mm]	[mm]	[-]
MA 8 – GV 11	2,32	2,00	0,98
MA 8 – GV 14	0,90	0,47	0,98

## 7 Validierung der Biegezugprüfungsergebnisse mittels Prüfung des Tieftemperaturverhaltens durch Abkühl- und einaxiale Zugversuche

Die Untersuchungen der Kälteeigenschaften gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 46A] wurden in Fremdleistung durchgeführt.

Die Ergebnisse der einaxialen Zugversuche sind in Tab. 60 und Tab. 61 getrennt nach der ermittelten Bruchspannung und der zugehörigen Bruchdehnung für alle vier Prüftemperaturen dargestellt. Der Verlauf der Zugfestigkeit wurde über eine Spline-Funktion berechnet und in Bild 82, bis zur Bruchtemperatur aus dem Abkühlversuch, dargestellt.

Tab. 60: Bruchspannungen im einaxialen Zugversuch

Variante [n]	Bruchspannung [MPa] bei T =			
	20 °C	5 °C	-10 °C	-25 °C
MA 8 – B1	2,556	7,818	5,606	4,371
MA 8 – B2	2,705	6,428	5,666	4,506
MA 8 – B4	2,432	7,442	5,024	4,432
MA 8 – B7	2,834	6,575	5,494	4,677
MA 8 – B10	3,852	7,326	4,603	4,386
MA 5 - B1	3,658	6,483	5,157	4,441
MA 11 – B7	2,522	6,865	5,108	3,998
MA 8 – GV 11	2,947	6,519	5,453	4,283
MA 8 – GV 14	3,539	5,787	4,656	4,463

Tab. 61: Bruchdehnungen im einaxialen Zugversuch

Variante [n]	Bruchdehnung [‰] bei T =			
	20 °C	5 °C	-10 °C	-25 °C
MA 8 – B1	4,593	3,586	2,28	1,916
MA 8 – B2	4,040	3,378	2,156	1,846
MA 8 – B4	5,493	3,856	1,918	1,677
MA 8 – B7	4,690	2,951	1,948	1,833
MA 8 – B10	3,657	2,930	1,624	1,573
MA 5 - B1	4,571	2,557	1,879	1,718
MA 11 – B7	4,467	3,702	1,860	1,606
MA 8 – GV 11	5,857	2,637	2,010	1,653
MA 8 – GV 14	3,770	2,455	1,719	1,854

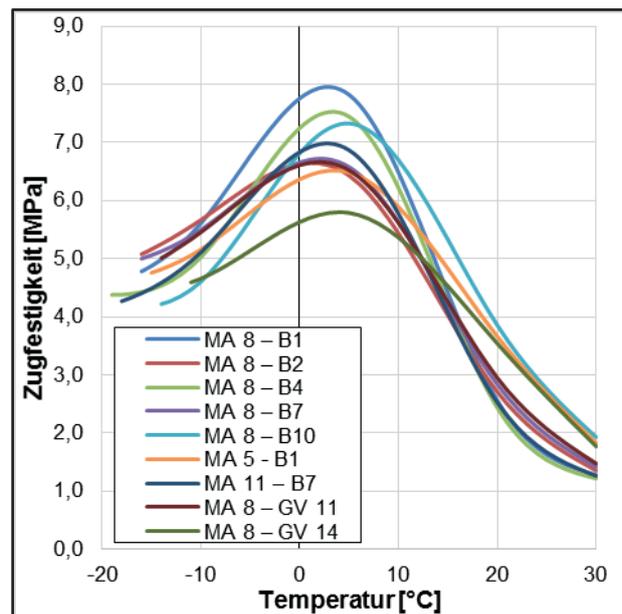


Bild 82: Verlauf der Zugfestigkeiten für die neun Mischgutzkonzepte zur Validierung der Prüfergebnisse

Eine Bewertungshilfe für die einaxialen Zugversuche ist durch die Orientierungswerte im [AP TTV, Teil 1, 2012] gegeben. Diese wird für Gussasphalte auf die in Tab. 62 aufgeführten Werte festgelegt.

Tab. 62: Orientierungswerte zur Bewertung von einaxialen Zugversuchen an Gussasphalt [AP TTV, Teil 1, 2012]

Asphaltart	Zugfestigkeit bei T = -10 °C	Bruchdehnung bei T = -10 °C
Gussasphalt (MA)	≥ 6,0 MPa	≥ 0,4 ‰

Es kann festgestellt werden, dass von den untersuchten neun Gussasphalten keiner den Orientierungswert für die Mindest-Zugfestigkeit bei -10 °C erreicht. Insofern sind der Anforderungswert und/oder die Prüfergebnisse kritisch zu hinterfragen. Die Anforderung an die Mindest-Bruchdehnung hingegen wird von allen Varianten eingehalten.

Die Orientierungswerte für Gussasphalt des [AP TTV, Teil 1, 2012] beziehen sich auf Forschungstätigkeiten von [Arand, Hase, 1990] sowie [Renken et. al., 2002] und lassen sich dementsprechend nur bedingt auf Gussasphalte, welche gemäß den [ZTV Asphalt-StB 07/13] hergestellt wurden, übertragen.

In Tab. 63 sind die Ergebnisse der Abkühlversuche dargestellt.

**Tab. 63:** Bruchtemperaturen im Abkühlversuch

Variante	Bruchtemperatur	Max. thermisch induzierte Zugspannung
[n]	[°C]	[MPa]
MA 8 – B1	-16,1	4,793
MA 8 – B2	-15,7	4,277
MA 8 – B4	-18,6	5,089
MA 8 – B7	-16,3	4,823
MA 8 – B10	-14,2	4,891
MA 5 - B1	-15,1	4,913
MA 11 – B7	-18,4	4,756
MA 8 – GV 11	-13,9	4,442
MA 8 – GV 14	-11,2	4,215

Gemäß den [TP Asphalt-StB, Teil 46A] ist bei der kombinierten Untersuchung aus einaxialen Zugversuchen und Abkühlversuchen zusätzlich die Zugfestigkeitsreserve zu bestimmen. Dafür werden die Verläufe der Zugfestigkeiten als Spline-Funktion sowie die Kurvenverläufe der Abkühlversuche überlagert und daraus die aufnehmbare Zugfestigkeitsreserve ermittelt. Die Tab. 64 beinhaltet den Maximalwert der Zugfestigkeitsreserve und die zugehörige Temperatur, bei welcher dieses Maximum erreicht wird.

**Tab. 64:** Ergebnisse der Zugfestigkeitsreserve aus einaxialen Zug- und Abkühlversuchen

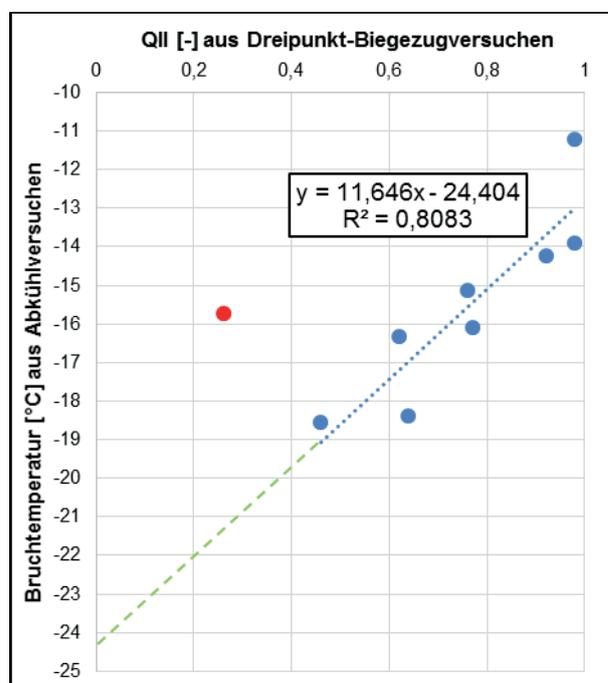
Variante	Temperatur beim Maximum der Zugfestigkeitsreserve	Maximalwert der Zugfestigkeitsreserve
[n]	[°C]	[MPa]
MA 8 – B1	5,7	6,865
MA 8 – B2	4,6	5,530
MA 8 – B4	5,9	6,625
MA 8 – B7	5,5	5,976
MA 8 – B10	8,6	6,285
MA 5 - B1	8,1	5,366
MA 11 – B7	5,2	6,422
MA 8 – GV 11	6,5	5,446
MA 8 – GV 14	9,9	4,675

Die Temperaturen beim Maximum der Zugfestigkeitsreserve liegen dabei alle in einem positiven Temperaturbereich. Dies deutet auf eine geringe Kälteflexibilität hin.

Sowohl bei der Auswertung der Abkühlversuche, wie auch bei der Zugfestigkeitsreserve fällt die Variante MA 8 - B2 auf. Dieses Gussasphaltgemisch beinhaltet ein wachsmodifiziertes Bindemittel 50/70 und weist untypisch hohe Bruchtemperaturen auf. Dieses Ergebnis ist kritisch zu hinterfragen und wurde als Ausreißer identifiziert und in der nachfolgenden Auswertung als roter Punkt kenntlich gemacht.

Die Ergebnisse der Abkühlversuche bestätigen dabei die mittels Dreipunkt-Biegezugversuch analysierte geringe Kälteflexibilität der ausgewählten Prüfvarianten.

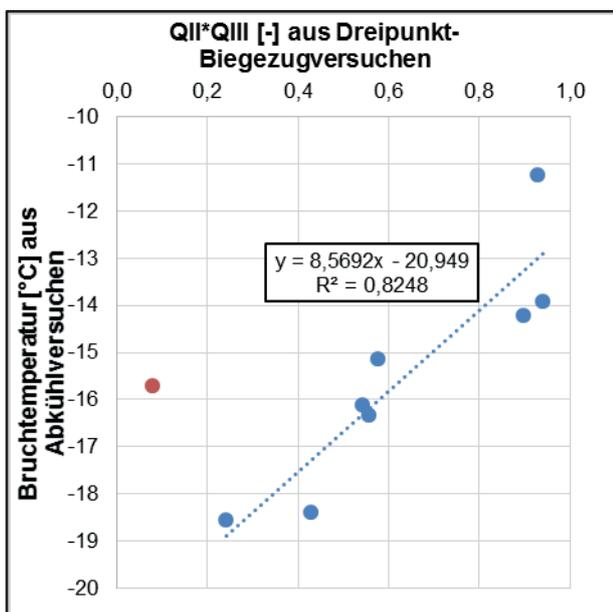
Für eine abschließende Betrachtung wurden Korrelationen zwischen den Kälteprüfungen verschiedener Belastungszustände untersucht. Ein Vergleich zwischen dem Verhältnis-Wert QII aus der Prüfung der Biegezugfestigkeit im Vergleich zur Bruchtemperatur des Abkühlversuchs lieferte den in Bild 83 dargestellten Zusammenhang.



**Bild 83:** Zusammenhang von Prüfergebnissen aus Dreipunkt-Biegezugversuchen und Abkühlversuchen

Bei Betrachtung der acht verbleibenden Varianten konnte eine brauchbare Korrelation festgestellt werden. Diese muss im Zuge weiterer Forschung noch durch ergänzende Untersuchungen gestützt werden. Falls sich der festgestellte Zusammenhang bestätigt, könnte in einem nächsten Schritt der Orientierungswert für QII zur Beurteilung der Kälteflexibilität auf die verschiedenen Mischgutzusammensetzungen angepasst werden.

Die Bewertung der Dreipunkt-Biegezugversuche erfolgt auf Grundlage des Verhältnisses QII. Hierzu werden die Prüfergebnisse bei 22 °C und bei 0 °C betrachtet, die Biegezugfestigkeit bei -15 °C jedoch nicht. Mit dem Quotienten QIII kann ein weiterer Bewertungsfaktor aus den Biegezugfestigkeiten bei 22 °C und -15 °C errechnet werden, sodass mit beiden Quotienten der gesamte Prüftemperaturbereich abgedeckt wäre. Das Bild 84 zeigt eine Kombination beider Quotienten (Multiplikation), wodurch eine Aufweitung der Bewertungsskala der Biegezugfestigkeiten und ein etwas höheres Bestimmtheitsmaß erreicht werden.



**Bild 84:** Zusammenhang Dreipunkt-Biegezug- zu Abkühlversuch

Weitere Korrelationen zwischen den Ergebnissen aus einaxialen Zugversuchen, Abkühlversuchen sowie der Zugfestigkeitsreserve zu denen des Dreipunkt-Biegezugversuchs ergaben keine Abhängigkeiten mit höherer Bestimmtheit.

## 8 Validierung der Forschungsergebnisse anhand der Untersuchung von Praxisproben

### 8.1 Mischgutzusammensetzung und -kenngroßen

#### 8.1.1 Risshafte Praxisproben

In Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss, mit Straßenbaubehörden, Prüfinstituten und entsprechenden Gremien der FGSV wurden fünf Gussasphaltflächen lokalisiert in denen Risse vorlagen. Umfassende gutachterliche Untersuchungen zur Ursache der Risse lagen allerdings nicht vor.

In einem ersten Schritt wurde die Mischgutzusammensetzung durch Extraktion bestimmt. Die Mischgutproben werden im Folgenden gemäß Tab. 65 bezeichnet. Diese gibt darüber hinaus Auskunft, ob die Proben auf Bauwerken oder auf freier Strecke entnommen wurden.

Tab. 65: Herkunft der risshaften Praxisproben

Variante	Entnahmestelle
[n]	[-]
R1	Brücke
R2	Brücke
R3	Brücke
R4	Freie Strecke
R5	Brücke

Die Sieblinien der fünf Varianten sind in Bild 85: dargestellt.

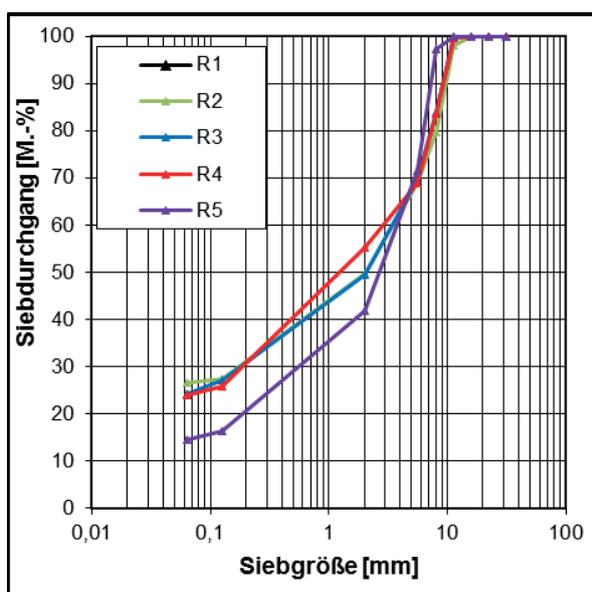


Bild 85: Sieblinien der risshaften Praxisproben nach Extraktion

Die Variante 5 ist ein MA 8 S. Alle weiteren Varianten sind Gussasphalte mit 11 mm Größtkorn.

Am rückgewonnenen Bindemittel wurden rheologische Untersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungen mittels Dynamischem Scherrheometer erfolgten gemäß [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)], jedoch mit einem erweiterten Temperaturspektrum.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind unter Angabe des Verlaufs (Bild 86) und der ermittelten Kenngrößen (Tab. 66) dokumentiert.

Tab. 66: Kenngrößen DSR – rückgewonnenes Bindemittel risshafter Praxisproben

Variante	Äquisteifigkeits-temperatur	Zugehöriger Phasenwinkel
[n]	[°C]	[°]
R1	83,7	68,8
R2	73,3	58,9
R3	87,2	60,2
R4	106,0	60,0
R5	70,0	54,4

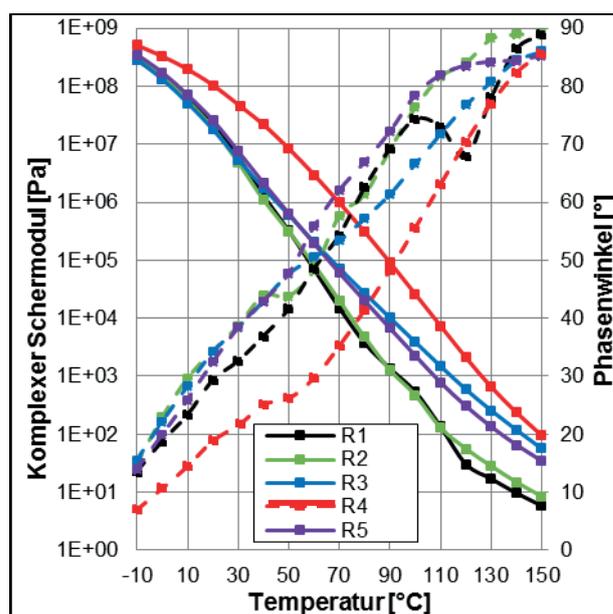
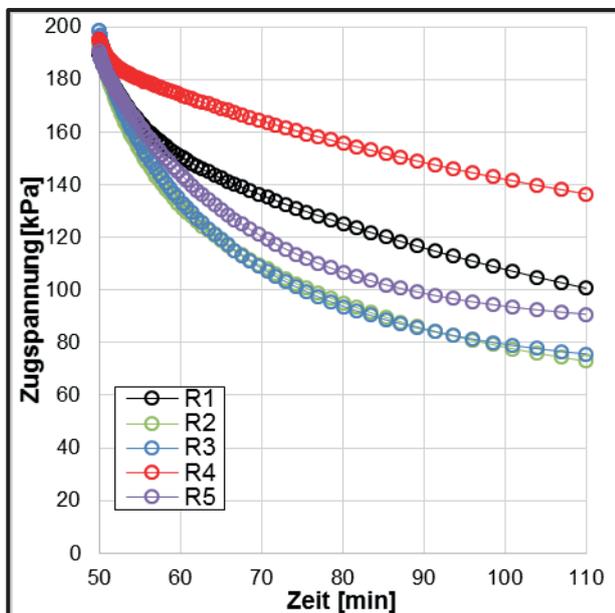


Bild 86: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an rückgewonnenem Bindemittel aus risshaften Praxisproben

Zusätzlich wurde die Relaxationsfähigkeit gemäß dem in Kapitel 5.2.1 dargestellten Verfahren geprüft (Tab. 67 und Bild 87).

**Tab. 67:** Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei rückgewonnenen Bindemitteln aus risshaften Praxisproben

Variante	$\sigma_{60}$
[n]	[kPa]
R1	100,67
R2	72,98
R3	75,69
R4	136,46
R5	90,81



**Bild 87:** Relaxationsverlauf an rückgewonnenen Bindemitteln der risshaften Praxisproben

Für die Auswertung der Ergebnisse der BBR-Versuche sind in Tab. 68 die Temperaturen bei einer Biegekreuchsteifigkeit von 300 MPa und einem m-Wert von 0,3 aufgeführt.

**Tab. 68:** Temperatur bei einer Biegekreuchsteifigkeit von 300 MPa bei Fertigbindemitteln der Kategorie VL

Variante	Temperatur bei Biegekreuchsteifigkeit von 300 MPa	Temperatur bei m-Wert von 0,3
[n]	[°C]	[°C]
R1	-11,6	-12,1
R2	-14,5	-11,3
R3	-12,0	-11,3
R4	+28,8*	+22,7*
R5	-15,6	-9,7

Die Messergebnisse der Probe R4 mussten aus den drei Prüfergebnissen extrapoliert werden. Diese Extrapolation der Kenngrößen aus drei Messwerten ist dabei kritisch zu betrachten.

### 8.1.2 Schadhafte Praxisproben

Ergänzend zu den schadhafte Praxisproben wurden zwölf schadhafte Varianten untersucht. Die Tab. 69 fasst die Mischgutzusammensetzungen gemäß den Angaben der Erstprüfungen zusammen. Darüber hinaus enthält sie die Information, ob es sich um eine Rückstellprobe (RP), frische Probe (F) oder Bohrproben (BK) handelt.

Die Variante P12 kann in diesem Zusammenhang als besondere Ausbauprobe benannt werden, da diese unter hoher Frequentierung seit mehr als 40 Jahren Liegezeit keine gravierenden Schäden aufweist.

**Tab. 69:** Zusammensetzung der schadhafte Praxisproben

Var.	Größtkorn	Füller	Gestein	BM	Art
[n]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]
P1	11 S	KSFF	Basalt / NS	20/30 FTW	RP
P2	8 S	KSFF	Diabas / NS	30/45 FTW	F
P3	8 S	KSFF	Diabas / NS	30/45 FTW	F
P4	8 S	KSFF	Basalt / NS	20/30 FTW	RP
P5	11 S	KSFF	Basalt / NS	20/30 FTW	RP
P6	8 S	KSFF	Andesit / NS	20/30 FTW	RP
P7	11 S	KSFF	Basalt / NS	20/30 FTW NA NV	RP
P8	8 S	KSFF	Andesit / NS	20/30 FTW	RP
P9	11 S	KSFF	Grauwacke / NS	20/30 FTW NA NV	F
P10	11 S	KSFF	Grauwacke / NS	20/30 FTW	F
P11	11 S	KSFF	Diabas / NS	20/30 FTW	RP
P12	8 S	KSFF	Diabas / NS	k. A.	BK

## 8.2 Verformungswiderstand der Gussasphalt-Praxisproben

### 8.2.1 Verformungswiderstand der risshaften Praxisproben

In einem ersten Schritt wurden die fünf risshaften Gussasphaltflächen durch Prüfung der statischen Stempeleindringtiefe untersucht (Tab. 70).

Tab. 70: Statische Eindringtiefe an schadhafte Praxisproben

Var.	Eindringtiefe nach 30 Min.	Eindringtiefe nach 60 Min.	Zunahme
[n]	[mm]	[mm]	[mm]
R1	0,72	0,75	0,03
R2	1,50	1,74	0,24
R3	1,86	1,94	0,08
R4	0,77	0,84	0,07
R5	1,65	1,83	0,18

Ergänzend zu den Ergebnissen unter statischer Last wurden Untersuchungen der dynamischen Stempeleindringtiefe durchgeführt. Die Ergebnisse sind unter Angabe des Verlaufs (in Bild 88) und der Eindringtiefe nach 2500 Lastzyklen (in Tab. 71) aufgeführt.

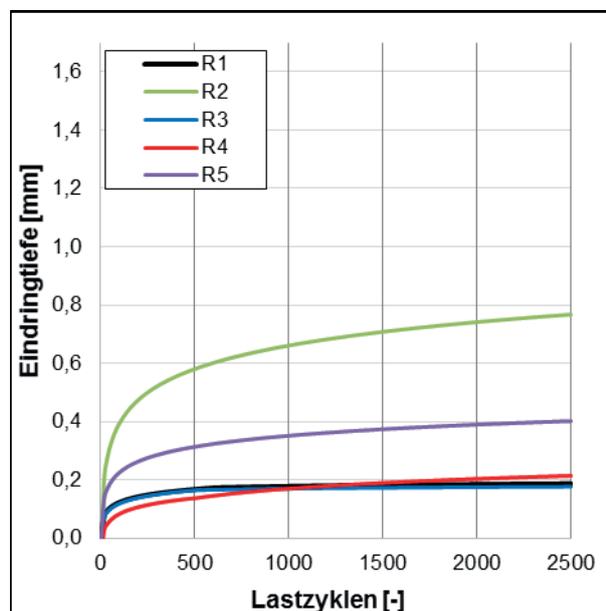


Bild 88: Verlauf der dyn. SET an den risshaften Praxisproben

Tab. 71: Dyn. Stempeleindringtiefe der risshaften Praxisproben

Variante	Dynamische Stempeleindringtiefe nach 2500 Lastzyklen
[n]	[mm]
R1	0,19
R2	0,77
R3	0,18
R4	0,21
R5	0,40

### 8.2.2 Verformungswiderstand schadloser Praxisproben

Analog zu den fünf Proben aus schadhafte Flächen wurden an zwölf weiteren Proben (überwiegend aus Kontrollmischgut) Untersuchungen der stat. Stempeleindringtiefe (Tab. 72) und der dyn. Stempeleindringtiefe (Tab. 73) durchgeführt.

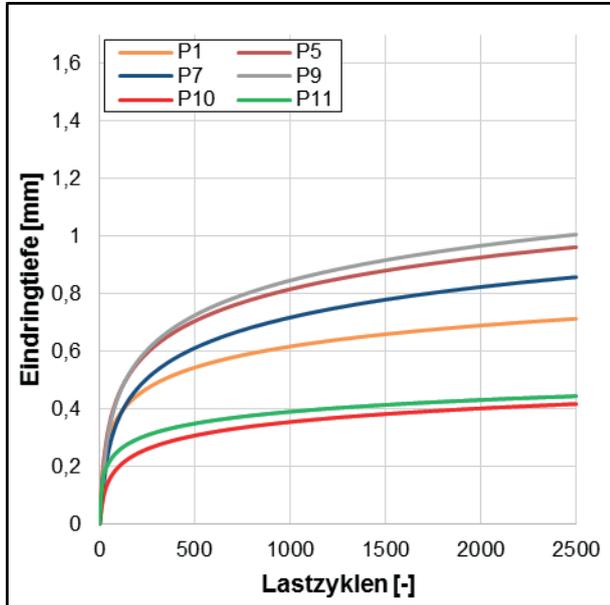
Tab. 72: Statische Eindringtiefe an schadlosen Praxisproben

Var.	Eindringtiefe nach 30 Min.	Eindringtiefe nach 60 Min.	Zunahme
[n]	[mm]	[mm]	[mm]
P1	1,46	1,64	0,18
P2	2,08	2,36	0,28
P3	2,27	2,63	0,36
P4	1,97	2,26	0,29
P5	3,10	3,37	0,27
P6	2,06	2,44	0,38
P7	2,68	2,96	0,28
P8	3,39	3,97	0,58
P9	1,83	2,08	0,25
P10	1,49	1,72	0,23
P11	1,89	2,11	0,22
P12	2,69	3,24	0,55

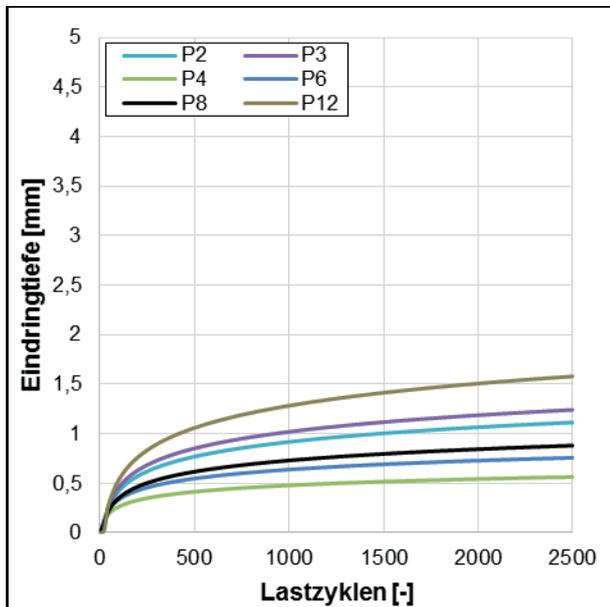
Tab. 73: Dyn. Stempeleindringtiefe der schadlosen Varianten

Variante	Dynamische Stempeleindringtiefe nach 2500 Lastzyklen
[n]	[mm]
P1	0,71
P2	1,11
P3	1,24
P4	0,56
P5	0,96
P6	0,76
P7	0,86
P8	0,88
P9	1,01
P10	0,42
P11	0,44
P12	1,58

Die Darstellung der Verläufe der dynamischen Stempel Eindringtiefe sind in Bild 89 für Praxisproben mit 11 mm Größtkorn und in Bild 90 für solche mit 8 mm Größtkorn dargestellt.



**Bild 89:** Verlauf der dynamischen Stempel Eindringtiefe an schadlosen Praxisproben mit einem Größtkorn von 11 mm



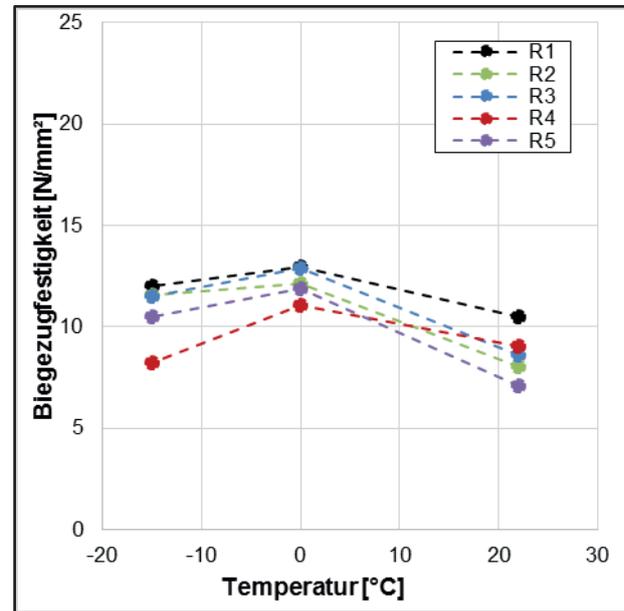
**Bild 90:** Verlauf der dynamischen Stempel Eindringtiefe an schadlosen Praxisproben mit einem Größtkorn von 8 mm

### 8.3 Tieftemperaturverhalten der Gussasphalt-Praxisproben

#### 8.3.1 Tieftemperaturverhalten schadhafter Praxisproben

Die fünf Ausbauproben aus schadhafte Gussasphaltflächen wurden bezüglich ihrer Rissempfindlichkeit untersucht.

Die Ergebnisse der Biegezugprüfungen (Bild 91) sind in Abhängigkeit von der Prüftemperatur in Tab. 74 und die Auswertung ist in Tab. 75 zusammengefasst.



**Bild 91:** Biegezugfestigkeiten der schadhafte Praxisproben

**Tab. 74:** Biegezugfestigkeiten der schadhafte Praxisproben

Variante	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]		
	22 °C	0 °C	-15 °C
R1	10,51	12,96	12,00
R2	8,05	12,12	11,59
R3	8,59	12,91	11,48
R4	9,03	11,03	8,23
R5	7,08	11,89	10,47

**Tab. 75:** Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch der schadhafte Praxisproben

Variante	QII	QIII	Durchbiegung bei 0 °C
	[-]	[-]	[mm]
R1	0,81	0,88	0,64
R2	0,66	0,69	0,63
R3	0,67	0,75	0,59
R4	0,82	1,10	0,62
R5	0,60	0,68	0,71

### 8.3.2 Tieftemperaturverhalten schadloser Praxisproben

Die zwölf in Tab. 69 aufgelisteten Praxisproben wurden ebenfalls mittels Dreipunkt-Biegezugversuch hinsichtlich der Rissempfindlichkeit untersucht. Der Verlauf der Biegezugspannungen ist analog zur Darstellung des Verformungswiderstandes für eine bessere Differenzierbarkeit getrennt nach dem festgestellten Größtkorn in Bild 92 und Bild 93 visualisiert. Tab. 76 und Tab. 77 enthalten die Messergebnisse und Kenngrößen der Untersuchungen.

Tab. 76: Biegezugfestigkeiten der schadlosen Praxisproben

Variante	Biegezugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]			
	[n]	22 °C	0 °C	-15 °C
P1		8,62	13,13	12,77
P2		4,78	12,04	11,20
P3		3,87	11,00	11,18
P4		7,90	12,41	12,87
P5		7,73	11,66	11,39
P6		8,46	12,86	12,24
P7		7,53	14,49	12,36
P8		7,56	13,79	11,98
P9		6,78	12,56	10,13
P10		8,24	12,58	11,81
P11		8,60	12,73	12,36
P12		5,45	16,01	12,22

Tab. 77: Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch - schadlose Praxisproben

Variante	QII	QIII	Durchbiegung bei 0 °C	
	[n]	[-]	[-]	[mm]
P1		0,66	0,68	0,55
P2		0,40	0,43	0,68
P3		0,35	0,35	0,56
P4		0,64	0,61	0,49
P5		0,66	0,68	0,54
P6		0,66	0,69	0,54
P7		0,52	0,61	0,60
P8		0,55	0,63	0,68
P9		0,54	0,67	0,67
P10		0,65	0,70	0,63
P11		0,68	0,70	0,55
P12		0,34	0,45	0,74

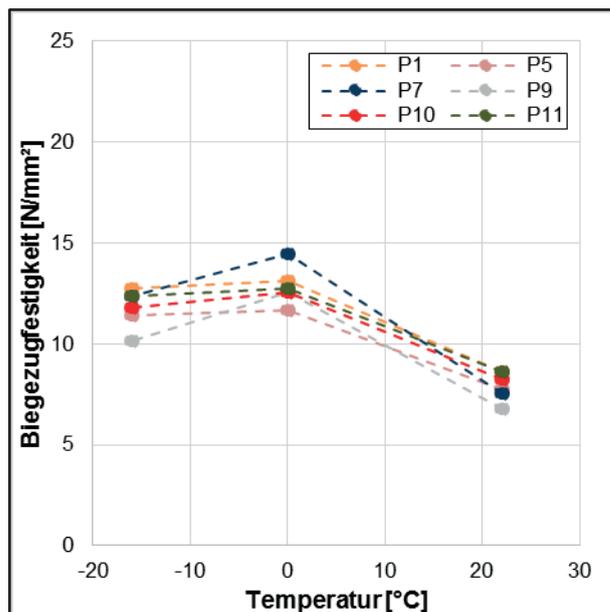


Bild 92: Biegezugfestigkeiten für schadlose Praxisproben mit einem Größtkorn von 11 mm

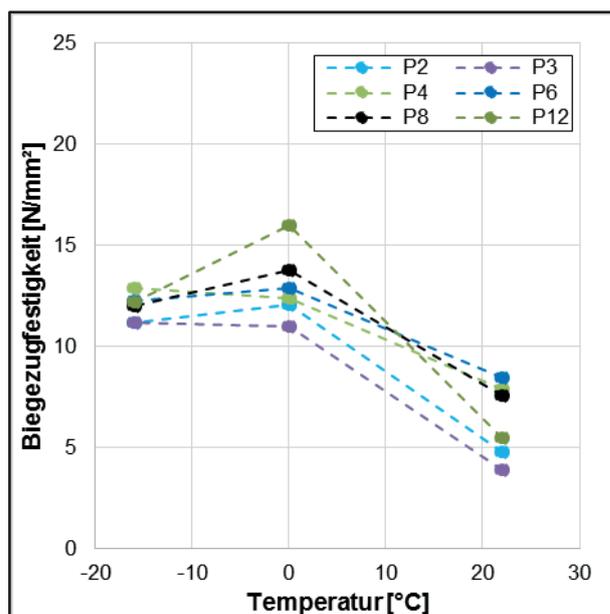


Bild 93: Biegezugfestigkeiten für schadlose Praxisproben mit einem Größtkorn von 8 mm

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Durch gezielte Untersuchung der Mischgutkomponenten und deren Interaktion im Asphaltmischgut konnte eine umfangreiche Kenntnis über die Performance-Eigenschaften von Gussasphalten gewonnen werden.

Dafür wurden 40 verschiedene Bindemittel hinsichtlich ihrer physikalischen und rheologischen Eigenschaften analysiert. Durch drei ausgewählte Prüfverfahren wurden die Bindemittel insbesondere auf ihre Kälteflexibilität hin untersucht und es konnte eine eindeutige Abhängigkeit zwischen der Kälteflexibilität und der Bindemittelhärte festgestellt werden.

Auf Grundlage der umfangreichen Untersuchungsergebnisse wurden anschließend zehn Bindemittel für Asphaltuntersuchungen ausgewählt, die ein möglichst breites Spektrum des Verhaltens bei Kälte abdecken.

Der Einfluss der Variation der Mischgutzusammensetzung auf das Verformungs- und Kälteverhalten (Performance-Eigenschaften) erfolgte in mehreren Teilschritten. Die Bindemittelabhängigkeit wurde zunächst in einem MA 8 analysiert. Zusätzlich fand eine Variation des Größtkorns (MA 5 und MA 11) mit drei dieser Bindemittel statt. In einem letzten Teilschritt wurde eine Variation der granulometrischen Eigenschaften der Gesteinskörnung durchgeführt.

Für die Analyse des Verformungswiderstandes fanden statische und dynamische Stempel Eindringversuche statt.

Die Kälteflexibilität wurde an allen Varianten durch Prüfung mit dem Dreipunkt-Biegezugversuch untersucht. Es sollte untersucht werden, ob dieses vergleichsweise einfache Prüfverfahren eine ausreichende Vergleichbarkeit mit der komplexen Ermittlung des Tieftemperaturverhaltens (TTV) mittels Kombination aus einaxialen Zug- und Abkühlversuchen darstellt. Für diesen Vergleich wurden aufbauend auf den Ergebnissen der Biegezugfestigkeit neun Mischgutzusammensetzungen ausgewählt und in Fremdleistung hinsichtlich ihres Tieftemperaturverhaltens geprüft.

Für die Durchführung der Versuche und Bewertung der Ergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs wurde auf das [Vorläufiges Merkblatt Biegezugfestigkeit, August 1959] und auf Erfahrungswerte aus dem Raum Berlin Bezug genommen. Die Probekörperherstellung und -konditionierung wurde auf den

aktuellen Stand der Technik angepasst. Aus Asphaltprobepplatten wurden Prismen mit den Maßen 40x40x160 mm allseitig geschnitten hergestellt. In Anlehnung an die [TP Asphalt, Teil 46 A] wurden die Asphalt-Probekörper aus der Mitte der Asphaltprobepplatte, quer zur Walzrichtung und mit einem Abstand von 20 mm zum Plattenrand ausgesägt. Die Konditionierung auf die jeweilige Prüftemperatur ( $\pm 1$  °C) erfolgte für einen Zeitraum von mindestens zwei Stunden in einem Klimaschrank.

Die Analyse der Messpräzision des Dreipunkt-Biegezugversuchs ergab eine hohe Präzision für die Dreifachbestimmung bei den drei Prüftemperaturen. Wie in Kapitel 6.2.4 dargestellt, ergab sich eine mittlere Standardabweichung  $< 3\%$  für alle Temperaturen bei einer maximalen absoluten Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert  $< 10\%$ .

Es konnte festgestellt werden, dass Bindemittel, welche zuvor als kälteempfindlich eingestuft wurden, im Asphalt aufgrund des Quotienten QII als rissempfindlich einzustufen sind. Die Ergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs bestätigten, dass das Bindemittel als primär kausal für die Rissbildung im Asphalt erwartet werden kann.

Es wurde eine brauchbare Korrelation ( $R^2 = 0,68$ ) zwischen dem Quotienten Q II aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch und der Zugspannung  $\sigma_{60}$  nach 60 Minuten Relaxationszeit im DSR nachgewiesen. Eine mögliche Präzisierung des mathematischen Zusammenhangs sollte durch weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

Die externe Prüfung von einaxialen Zugversuchen und Abkühlversuchen ergab, dass die ausgewählten Asphalte als kälteempfindlich definiert wurden. Diese Beurteilung beruht auf den Orientierungswerten zur Beurteilung der Bruchspannung von Gussasphalt bei  $-10$  °C und der Bruchtemperatur im Abkühlversuch, welche im [AP TTV, Teil 1, 2012] definiert sind.

Die vergleichende Betrachtung der kälteorientierten Asphaltuntersuchungen zeigte einen mathematischen Zusammenhang zwischen dem Verhältniswert QII aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch zu der gemessenen Bruchtemperatur im Abkühlversuch mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,81. Dieser Zusammenhang basiert auf acht Messwerten. In weiteren Forschungstätigkeiten sollte diese Korrelation weiterführend auf eine breitere Basis gestellt

werden. Zusätzlich wurde bei der Analyse der Quotient  $Q_{III}$  und somit ein breiteres Temperaturband betrachtet. Die Multiplikation der Verhältniswerte  $Q_{II}$  und  $Q_{III}$  lieferte ein etwas höheres Bestimmtheitsmaß für die Korrelation zur Bruchtemperatur aus dem Abkühlversuch. Mit weitergehender und ergänzender Forschung könnte dieser oder weitere Ansätze zu einer möglichen Bewertungsgröße validiert werden.

Der Dreipunkt-Biegezugversuch stellt mit seiner hohen Präzision und seinen Korrelationen zu Bindemittel- und Asphaltuntersuchungen nachweislich eine einfache und schnell zu realisierende Alternative zur Beurteilung der Rissempfindlichkeit von Gussasphalt dar.

Bei der Analyse von fünf risshaften Praxisstrecken wurde festgestellt, dass diese bei der Untersuchung des rückgewonnenen Bindemittels sowie auch am Asphalt als kälteanfällig eingestuft werden konnten. Für die Bewertung wurden alle drei Bindemitteluntersuchungen sowie der Dreipunkt-Biegezugversuch herangezogen.

Aufbauend auf den gewonnenen Prüfergebnissen ist zu prüfen, ob eine Anpassung der [ZTV Asphalt-StB, 07/13] hinsichtlich der im Gussasphalt zu verwendenden Bindemittel vorgenommen werden sollte. Es konnte eine eindeutige Abhängigkeit zwischen der Rissbildung und der Bindemittelhärte festgestellt werden.

## 10 Literatur

- AL DSR-Prüfung (konstante Scherrate):** Arbeitsanleitung zur Bestimmung der Phasenübergangstemperatur viskositätsveränderter Bindemittel mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR) – Teil 3: Durchführung mit konstanter Scherrate, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) und Arbeitsgruppe „Asphaltbauweisen“, Köln, Ausgabe 2016
- AL DSR-Prüfung (T-Sweep):** Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischem Scherrheometer (DSR) – Durchführung im Temperatursweep, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) und Arbeitsgruppe „Asphaltbauweisen“, Köln, Ausgabe 2014
- AP TTV, Teil 1, 2012:** Arbeitspapier Tieftemperaturverhalten von Asphalt, Teil 1: Zug- und Abkühlversuche; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2012
- Arand, 1996:** Arand, W.: Funktionelle Anforderungen an Bitumen und Asphalt – Prüftechnische Ansprache des Verformungswiderstandes, der Reißresistenz und der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten, Bitumen, Heft 3, 1996
- Arand, Hase, 1990:** Arand, W.; Hase, M.: Verhalten von Gußasphalten bei tiefen Temperaturen, Teil A: Bewertungshintergrund zur Beurteilung von Gußasphalten, Teil B; Einfluß kompositioneller Merkmale, AiF-Forschungsvorhaben Nr. 7191, Braunschweig, 1990
- BAST, 2016:** 4 <http://www.bast.de/DE/Presse/2012/presse-18-2012.html>, Stand 16.12.2016
- Blumer, 1975:** Blumer, M.: Zum Verformungsverhalten bituminöser Beläge und Tragschichten, Bitumen 37 - 3, S. 73 - 87, 1975
- Büchler, 2010:** Büchler, S.: Rheologisches Modell zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Asphalten, Braunschweig, 2010
- Büteröwe, 2017:** Büteröwe, L.: Einfluss der Bindemittelmodifikation auf den Verformungswiderstand und die Kälteflexibilität von Gussasphalt, Masterarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr Universität Bochum, 2017, unveröffentlicht
- Carkci, 2012:** Carkci, N.: Einfluss von Bindemittelart und –zustand auf das Rissausbreitungsverhalten von Asphalt bei tiefen Temperaturen, Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr Universität Bochum, 2012, unveröffentlicht
- DIN 18123:** Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korngrößenverteilung; Fassung 2011, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 933-1:** Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren; Fassung 2012, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 933-6:** Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Beurteilung der Oberflächeneigenschaften - Fließkoeffizienten von Gesteinskörnungen; Fassung 2014, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 933-10:** Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen - Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung); Fassung 2009, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1097-4:** Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 4: Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichtetem Füller; Fassung 2008, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1097-6, Anhang A:** Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Fassung 2013, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1097-7:** Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füller - Pyknometer-Verfahren; Fassung 2008, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 13108, Teil 6:** Asphaltmischgut – Mischgut-anforderungen – Teil 6: Gussasphalt; Fassung 2013, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 13179-1:** Prüfverfahren für mineralische Füller in bitumenhaltigen Mischungen - Teil 1: Delta-Ring- und Kugel-Verfahren; Fassung 2013, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- DIN EN 1426:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration, Fassung 2015, Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 1427:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes –

- Ring- und Kugel-Verfahren, Fassung 2015, Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 14770:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), Fassung 2012, Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 14771:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekrechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR), Fassung 2011, Beuth Verlag, Berlin, zurückgezogen
- E KvB, 2016:** Empfehlungen zur Klassifikation von viskositätsveränderten Bindemitteln; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2016
- Expositionsbeschreibung, 2008:** „Maschinelles Verarbeiten von Gussasphalt“, 2008
- Francken et al., 2006:** Arbeitspapier Nr. 65: Mechanische Eigenschaften von Asphalt in Befestigungen für Verkehrsflächen- Eingangsgrößen in die Bemessung (Materialkennwert); Arbeitspapier; FGSV, 2006
- Gehrke, 2017:** Komplexe Charakterisierung bitumenhaltiger Bindemittel anhand temperatur-, Frequenz- und belastungsabhängiger Kennwerte; Dissertation an der Ruhr Universität Bochum, Heft 27, 2017
- Großhans, 1985:** Erfahrungen bei der Modifizierung von Gussasphalt mit Rohmontanwachs (Romonta); Die Straße 25 - 9, S 275 - 277, 1985
- Großhans, 2014:** Praxiserfahrungen und Hinweise – Wachsmodifizierung von Guss- und Walzasphalt, Asphalt, Monat August, S. 19 - 23, 2014
- Hofko et al, 2015:** Rundkorn statt Kantkorn; Asphalt 6/2015, Giesel Verlag GmbH; Hannover; 2015
- Hofko et al., 2016:** Bernhard Hofko, Mariyan Dimitrov, Oliver Schwab, Fabian Weiss, Anne Kaspar-Giebl, Helmut Rechberger und Hinrich Grothe: Einfluss von Kornform und Wachsmodifikation auf technische, ökonomische und ökologische Eigenschaften von Gussasphalt – Teil 1 und Teil 2; Straße und Autobahn, Heft 4 und 5, S. 264 - 270 und S. 374 - 380, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2016
- Kaluza:** Kaluza, M. S.: Neue Möglichkeiten zur Ansprache des rheologischen Kälteverhaltens von Bitumen, Diplomarbeit an der Ruhr Universität Bochum, 2011, unveröffentlicht
- M TA:** Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV), Köln, Ausgabe 2011
- Papadopoulos, 2017:** Papadopoulos, A.: Tieftemperaturverhalten komplex modifizierter Bitumen für Gussasphalt sowie experimentelle Ansprache des Rissverhaltens von Gussasphalt; Masterarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr Universität Bochum, 2017, unveröffentlicht
- RaB-A06:** Richtlinie für die analytische Bemessung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke, Ausgabe 2005
- Radenberg, et al, 2012:** Radenberg, M., Rube, N., Gottaut, C.: Optimierung der lärmtechnischen und bautechnischen Wirksamkeit und Nutzungsdauer dichter Asphaltdeckschichten; Abschlussbericht zum BAST-Forschungsprojekt FE 07.0239/2010/AGB; Bochum, 2012
- Radenberg, Steeb, et. al., 2012:** Radenberg, M., Steeb, H., Schüler, T., Manke, R., Jänicke, R.; Multi-scale modelling of elastic/viscoelastic compounds, Wiley Online Library, Bochum, 2012
- Radenberg, et al, 2014:** Radenberg, M., Nytus, N., Gehrke, M.: Schlussbericht zum Vorhaben 16639 N /1 der AiF-Forschungsvereinigung (Deutsches Asphaltinstitut e. V.): Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen, Bochum, 2014
- Radenberg, Gehrke, 2015:** Radenberg, M.; Gehrke, M.: Schlussbericht zum FE 84.0100/2009: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei max. 230 Grad Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze, Bochum, 2015, unveröffentlicht
- Radenberg, Holzwarth, 2016:** Forschungsprojekt FE 07.0280/2014/EGB: „Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)“, 2018; unveröffentlicht

- Renken et. al., 2002:** Renken, P.; Lobach, T.; Büchler, S.; Hagner, T.: Einfluss der Modifizierung durch Polymere und/oder Naturasphalt auf Standfestigkeit, Kälteverhalten und Verarbeitbarkeit von Gussasphalt, BMBW-Forschungsvorhaben FE 07/185/1998/DGB, Braunschweig, 2002
- Renken et al., 2003:** Renken, Peter; Lobach, Thomas; Büchler, Stephan; Hagner, Thomas: Einfluß der Modifizierung von Bindemitteln durch Polymere und/oder Naturasphalt auf Standfestigkeit, Kälteverhalten und Verarbeitbarkeit von Gussasphalt. Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Heft 862, Bonn, 2003
- Renken, 2013:** Renken, P.: Produkteigenschaften und Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften von Asphalt – Wachsadditivierung zur Viskositätsveränderung von Bitumen. Asphalt, Heft 1, Giesel Verlag GmbH, Hannover, 2013
- RStO, 2012:** Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2012
- Schellenberg, Schellenberg, 2001:** Schellenberg, P., Schellenberg, K.: Optimierung der Zusammensetzung und der Eigenschaften von Gussasphalt an einem Beispiel. Bitumen Jahrgang 63, Heft 2, Seite 56 - 60, 2001
- Schellenberg, Schellenberg, 2003:** Schellenberg, P., Schellenberg, K.: Die Wirkung von Kalksteinmehl in Asphalt, Straße und Autobahn, Heft 5, S. 267 - 270, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2003
- Schellenberg, Schellenberg, 2015:** Schellenberg, P., Schellenberg, K.: Die Festigkeit von Asphalt; online-Dokument auf der Seite des Bundesverbandes unabhängiger Institute für bautechnische Prüfungen e.V., abgerufen am 07.06.2017  
<https://bup.de/artikel/die-festigkeit-von-asphalt/>
- Späth, 1978:** Späth, M.: Über den Einfluß von polymerzusätzen im Asphalt. Straße und Autobahn, Heft 6, S. 230 - 234, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1978
- TL Asphalt-StB 07/13:** Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB), Ausgabe 2007/Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2013
- TL Gestein-StB 04/07:** Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB ), Ausgabe 2007/Fassung 2016, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2016
- TP Asphalt-StB 07/16:** Technische Prüfvorschriften für Asphalt, Ausgabe 2007/Fassung 2016, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2016
- TP Asphalt-StB, Teil 2:** Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 2: Korngrößenverteilung; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- TP Asphalt-StB, Teil 20:** Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 20: Eindringtiefe an Gussasphaltwürfeln, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- TP Asphalt-StB, Teil 22:** Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 20: Spurbildungsversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- TP Asphalt-StB, Teil 25 A1:** Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 A1: Dynamischer Stempeleindringversuch an Gussasphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- TP Asphalt-StB, Teil 46 A:** Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 46 A: Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007
- TP Gestein-StB 08, Teil 4.1.4:** Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau – Teil 4.1.4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (Luftstrahlsiebung); Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2008
- Tunnel-online 1/2011:** Hansel, D., Guirguis, P.: Stahlfaserbeton-Tübbing: Stand der Technik und realisierte Projekte; online-Zeitschrift; Tunnel 1/2011  
[http://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel\\_2011-01\\_Stahlfaserbeton-\\_Tuebbing\\_Stand\\_der\\_Technik\\_und\\_realisierte\\_Projekte\\_1076893.html](http://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_2011-01_Stahlfaserbeton-_Tuebbing_Stand_der_Technik_und_realisierte_Projekte_1076893.html) (abgerufen 22.Juni 2017)

---

**Vorläufiges Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit, August 1959:** Vorläufiges Merkblatt für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit bituminöser Massen, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Fassung vom August 1959

**Wörner et al., 2008:** Wörner, T., Stütz, M., Westeiner, E.: Ersatz des Brechsand/Natursand-Verhältnisses durch den Fließkoeffizienten, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V., Bonn, 2008

**ZTV Asphalt-StB 07/13:** Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007, Fassung 2013

## Bilder

- Bild 1: Gussasphalt-Probekörper im Querschnitt
- Bild 2: Zusammenhang Bindemittelüberschuss zum Bindemittelgehalt in Abhängigkeit von der Temperatur [Schellenberg, Schellenberg, 2001]
- Bild 3: Darstellung eines Belastungszyklus im dynamischen Stempel Eindringversuch [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1]
- Bild 4: Kryogene Zugspannung in Abhängigkeit von der Temperatur (Zeit) im Asphalt [Arand, 1996]
- Bild 5: Kryogene Zugspannung und -festigkeit von Asphalt in Abhängigkeit von der Temperatur im Asphalt [Arand, 1996]
- Bild 6: Kartierung der Frosteinwirkungszonen [BAST, 2016]
- Bild 7: Versuche zur Ansprache des thermorheologischen Verhaltens von Asphalten [Arand, 1996]
- Bild 8: Prüfeinrichtung zur Durchführung Einaxialer Zug- und Abkühlversuche [TP Asphalt-StB, Teil 46 A]
- Bild 9: Relaxationsspannungen am AC 11 DN unter Variation der Startspannung [Büchler, 2010]
- Bild 10: Retardationsverlauf – Dehnungsverläufe für verschiedene Zuspinnungen am Beispiel eines AC 11 DN [Büchler, 2010]
- Bild 11: Prinzipskizze Versuchsaufbau des Dreipunkt-Biegezugversuch [nach tunnel-online 1/2011]
- Bild 12: Kraft-Weg-Verlauf bei der Biegezugprüfung
- Bild 13: Flussdiagramm des Untersuchungsprogramms
- Bild 14: Schematischer Versuchsaufbau „Relaxationsverhalten“
- Bild 15: Dreidimensionales Maxwell-Modell zur Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens von bitumenhaltigen Bindemitteln [Radenberg, Steeb, et. al., 2012]
- Bild 16: Schematische Darstellung des optimierten Herstellungsprozesses von Gussasphalt [Radenberg, Gehrke, 2015]
- Bild 18: Versteifende Eigenschaften der verwendeten Füller
- Bild 19: Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnungen
- Bild 20: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 2/5
- Bild 21: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 5/8
- Bild 22: Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 8/11
- Bild 23: Nadelpenetration und EP RuK an 10 Fertigbindemitteln
- Bild 24: Nadelpenetration und EP RuK an mit Montanwachs-modifizierten Bindemitteln
- Bild 25: Nadelpenetration und EP RuK an mit FT-Wachs modifizierten Bindemitteln
- Bild 26: Nadelpenetration und EP RuK an mit Amid-Wachs modifizierten Bindemitteln
- Bild 27: Nadelpenetration und EP RuK an mit Naturasphalt und FT-Wachs modifizierten Bindemitteln
- Bild 28: Vergleich der konventionellen Bindemittelkenngrößen vor und nach der Modifikation mit FT-Wachs
- Bild 29: Vergleich der konventionellen Bindemittelkenngrößen vor und nach der Modifikation mit Amid-Wachs
- Bild 30: Vergleich der konventionellen Bindemittelkenngrößen vor und nach der Modifikation mit Montanwachs
- Bild 31: Phasenübergangstemperatur der Fertigbindemittel
- Bild 32: Phasenübergangstemperatur der Bindemittel mit Montanwachs
- Bild 33: Phasenübergangstemperatur der Bindemittel mit FT-Wachs
- Bild 34: Phasenübergangstemperatur der Bindemittel mit Amid-wachs
- Bild 35: Phasenübergangstemperatur an den mit Naturasphalt und FT-Wachs modifizierten Bindemitteln
- Bild 36: Biegekriechsteifigkeit Fertigbindemittel - Kategorie VL
- Bild 37: Biegekriechsteifigkeit Fertigbindemittel – Kategorie VH
- Bild 38: Biegekriechsteifigkeiten der mit Montanwachs A modifizierten Bindemittel
- Bild 39: Biegekriechsteifigkeiten der mit Montanwachs B modifizierten Bindemittel
- Bild 40: Biegekriechsteifigkeiten der mit 1,5 M.-% FT-Wachs modifizierten Bindemittel
- Bild 41: Biegekriechsteifigkeiten der mit 3,0 M.-% FT-Wachs modifizierten Bindemittel
- Bild 42: Biegekriechsteifigkeiten der mit 1,5 M.-% Amid-Wachs modifizierten Bindemittel
- Bild 43: Biegekriechsteifigkeiten der mit 3,0 M.-%

- Bild 44: Amid-Wachs modifizierten Bindemittel Biegekriechsteifigkeiten der mit Naturasphalt und FT-Wachs modifizierten Bindemittel
- Bild 45: Temperatur bei einer Steifigkeit von 300 MPa und bei einem m-Wert von 0,3 bei Prüfung mittels Bending Beam Rheometer
- Bild 46: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Fertigbindemitteln der Kategorie VL
- Bild 47: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Fertigbindemitteln der Kategorie VH
- Bild 48: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit Montanwachs A
- Bild 49: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit Montanwachs B
- Bild 50: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit 1,5 M.-% Zugabe von Fischer-Tropsch-Wachs
- Bild 51: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit 3,0 M.-% Zugabe von Fischer-Tropsch-Wachs
- Bild 52: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit 1,5 M.-% Zugabe von Amid-Wachs
- Bild 53: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit 3,0 M.-% Zugabe von Amid-Wachs
- Bild 54: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an Bindemitteln mit Naturasphalt und Fischer-Tropsch-Wachs
- Bild 55: Darstellung der Ergebnisse aus der DSR-Untersuchung
- Bild 56: Relaxationsverlauf an Fertigbindemitteln - Kategorie VL
- Bild 57: Relaxationsverlauf an Fertigbindemitteln – Kategorie VH
- Bild 58: Relaxationsverlauf an Bindemitteln mit Montanwachs A
- Bild 59: Relaxationsverlauf an Bindemitteln mit Montanwachs B
- Bild 60: Relaxationsverlauf Bindemittel mit 1,5 M.-% FT-Wachs
- Bild 61: Relaxationsverlauf Bindemittel mit 3,0 M.-% FT-Wachs
- Bild 62: Relaxationsverlauf Bindemittel mit 1,5 M.-% Amid-Wachs
- Bild 63: Relaxationsverlauf Bindemitteln mit 3,0 M.-% Amid-Wachs
- Bild 64: Relaxationsverlauf an Bindemitteln unter Doppelmodifikation mit Naturasphalt und Fischer-Tropsch-Wachs
- Bild 65: Sieblinie MA 8 S
- Bild 66: Sieblinie MA 5 S
- Bild 67: Sieblinie MA 11 S
- Bild 68: Verlauf der dynamischen Stempeleindringtiefe an MA 8 unter Variation des Bindemittels
- Bild 69: Verlauf der dynamischen Stempeleindringtiefe an MA 5 unter Variation des Bindemittels
- Bild 70: Verlauf der dynamischen Stempeleindringtiefe an MA 11 unter Variation des Bindemittels
- Bild 71: Verlauf der dynamischen Stempeleindringtiefe an MA 8 unter Variation des BS/NS-Verhältnisses
- Bild 72: Dynamische Stempeleindringtiefe an Gussasphalten MA 8 unter Variation der eingesetzten Füller
- Bild 73: Dynamische Stempeleindringtiefe an Gussasphalten MA 8 unter Variation der eingesetzten Gesteinskörnung
- Bild 74: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Variation des ein-gesetzten Bindemittels
- Bild 75: Biegezugfestigkeiten für MA 5 unter Variation des ein-gesetzten Bindemittels
- Bild 76: Biegezugfestigkeiten für MA 11 unter Variation des ein-gesetzten Bindemittels
- Bild 77: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Variation des BS/NS-Verhältnis
- Bild 78: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Variation des ein-gesetzten Füller
- Bild 79: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Variation der groben Gesteinskörnungen
- Bild 80: Biegezugfestigkeiten für MA 8 unter Überlagerung der Einflüsse aus Füller und Gesteinskörnung
- Bild 81: Mathematischer Zusammenhang der Kälteflexibilität von Bindemittel- zu Asphaltuntersuchungen an MA
- Bild 82: Verlauf der Zugfestigkeiten für die neun Mischgutkonzepte zur Validierung der Prüfergebnisse
- Bild 83: Zusammenhang von Prüfergebnissen aus Dreipunkt-Biegezugversuchen und Abkühlversuchen
- Bild 84: Zusammenhang Dreipunkt-Biegezug- zu Abkühlversuch

Bild 85:	Sieblinien der risshaften Praxisproben nach Extraktion	Tab. 15:	Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 8/11
Bild 86:	Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an rückgewonnenem Bindemittel aus risshaften Praxisproben	Tab. 16:	Kenngößen BBR – Fertigbindemittel Kategorie VL
Bild 87:	Relaxationsverlauf an rückgewonnenen Bindemitteln der risshaften Praxisproben	Tab. 17:	Kenngößen BBR – Fertigbindemittel Kategorie VH
Bild 88:	Verlauf der dyn. SET an den risshaften Praxisproben	Tab. 18:	Kenngößen BBR - Montanwachs A mod. Bindemitteln
Bild 89:	Verlauf der dynamischen Stempeleindringtiefe an schadlosen Praxisproben mit einem Größtkorn von 11 mm	Tab. 19:	Kenngößen BBR - Montanwachs B mod. Bindemitteln
Bild 90:	Verlauf der dynamischen Stempeleindringtiefe an schadlosen Praxisproben mit einem Größtkorn von 8 mm	Tab. 20:	Kenngößen BBR – FT-Wachs mod. Bindemittel
Bild 91:	Biegezugfestigkeiten der schadhaften Praxisproben	Tab. 21:	Kenngößen BBR – Amid-Wachs mod. Bindemittel
Bild 92:	Biegezugfestigkeiten für schadlose Praxisproben mit einem Größtkorn von 11 mm	Tab. 22:	Kenngößen BBR - Naturasphalt und FT-Wachs modifizierten Bindemitteln
Bild 93:	Biegezugfestigkeiten für schadlose Praxisproben mit einem Größtkorn von 8 mm	Tab. 23:	Kenngößen DSR – Fertigbindemittel Kategorie VL

## Tabellen

Tab. 1:	Sortenbezeichnungen für viskositätsveränderte Binde-mittel	Tab. 24:	Kenngößen DSR – Fertigbindemittel Kategorie VH
Tab. 2:	Auswahl projektbezogener Füller	Tab. 25:	Kenngößen DSR – Bindemittel mit Montanwachs A
Tab. 3:	Auswahl projektbezogener grober Gesteinskörnung	Tab. 26:	Kenngößen DSR – Bindemittel mit Montanwachs B
Tab. 4:	Auswahl projektbezogener feiner Gesteinskörnung	Tab. 27:	Kenngößen DSR – Bindemittel mit FT-Wachs
Tab. 5:	Prüfparameter zur Bestimmung der Relaxationseigenschaften mit dem DSR	Tab. 28:	Kenngößen DSR – Bindemittel mit Amid-Wachs
Tab. 6:	Rohdichten der Füller	Tab. 29:	Kenngößen DSR – mit Naturasphalt und Fischer-Tropsch-Wachs
Tab. 7:	Ergebnis der Luftstrahlsiebung der untersuchten Füller	Tab. 30:	Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Fertigbindemitteln der Kategorie VL
Tab. 8:	Hohlraumgehalte nach Rigden der Füller	Tab. 31:	Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Fertigbindemitteln der Kategorie VH
Tab. 9:	Rohdichten der feinen Gesteinskörnungen	Tab. 32:	Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit Montanwachs A
Tab. 10:	Korngrößenverteilung der feinen Gesteinskörnungen	Tab. 33:	Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit Montanwachs B
Tab. 11:	Fließkoeffizient EC der feinen Gesteinskörnungen	Tab. 34:	Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit 1,5 M.-% FT-Wachs
Tab. 12:	Rohdichten der groben Gesteinskörnung	Tab. 35:	Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit Amid-Wachs
Tab. 13:	Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 2/5		
Tab. 14:	Korngrößenverteilung der groben Gesteinskörnung 5/8		

- Tab. 36: Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei Bindemitteln mit Naturasphalt und Fischer-Tropsch-Wachs
- Tab. 37: Auswahl der Bindemittel für weitere Asphaltuntersuchungen anhand von drei Bewertungskriterien
- Tab. 38: Korngrößenverteilung MA 8 S
- Tab. 39: Korngrößenverteilung MA 5 S
- Tab. 40: Korngrößenverteilung MA 11 S
- Tab. 41: Variation der Gesteinskomponenten bei einem Guss-asphalt MA 8
- Tab. 42: Statische Stempeleindringtiefen unter Variation des Bindemittels bei einem Gussasphalt MA 8
- Tab. 43: Statische Stempeleindringtiefen unter Variation des Bindemittels bei einem Gussasphalt MA 5
- Tab. 44: Statische Stempeleindringtiefe unter Variation der Gesteinskomponenten bei einem Gussasphalt MA 8
- Tab. 45: Dynamische Stempeleindringtiefe an MA 8 unter Variation des Bindemittels
- Tab. 46: Dynamische Stempeleindringtiefe an MA 5 und MA 11 unter Variation des Bindemittels
- Tab. 47: Dynamische Stempeleindringtiefe an MA 8 unter Variation des BS/NS-Verhältnisses
- Tab. 48: Dynamische Stempeleindringtiefe an Gussasphalten MA 8 unter Variation der eingesetzten Füller
- Tab. 49: Dynamische Stempeleindringtiefe an Gussasphalten MA 8 unter Variation der eingesetzten Gesteinskörnung
- Tab. 50: Biegezugfestigkeiten für Gussasphalte MA 8 unter Variation des eingesetzten Bindemittels
- Tab. 51: Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch zur für MA 8 unter Variation des eingesetzten Bindemittels
- Tab. 52: Biegezugfestigkeiten für Gussasphalte MA 5 und MA 11 unter Variation des eingesetzten Bindemittels
- Tab. 53: Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch für MA 5 und MA 11 unter Variation des Bindemittels
- Tab. 54: Biegezugfestigkeiten unter Variation der Gesteinskomponenten mit einem Bindemittel B7
- Tab. 55: Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch für MA 8 unter Variation der Gesteinskomponenten
- Tab. 56: Statistische Kenngrößen der Präzision des Dreipunkt-Biegezugversuchs anhand von 47 Messreihen
- Tab. 57: Auswahl von fünf Varianten MA 8 mit variierendem Bindemittel
- Tab. 58: Auswahl von zwei Varianten mit variierendem Größtkorn
- Tab. 59: Auswahl von zwei Varianten mit variierenden granulometrischen Eigenschaften
- Tab. 60: Bruchspannungen im einaxialen Zugversuch
- Tab. 61: Bruchdehnungen im einaxialen Zugversuch
- Tab. 62: Orientierungswerte zur Bewertung von einaxialen Zugversuchen an Gussasphalt [AP TTV, Teil 1, 2012]
- Tab. 63: Bruchtemperaturen im Abkühlversuch
- Tab. 64: Ergebnisse der Zugfestigkeitsreserve aus einaxialen Zug- und Abkühlversuchen
- Tab. 65: Herkunft der risshaften Praxisproben
- Tab. 66: Kenngrößen DSR – rückgewonnenes Bindemittel risshafter Praxisproben
- Tab. 67: Restspannung nach 60 Minuten Relaxationszeit bei rückgewonnenen Bindemitteln aus risshaften Praxisproben
- Tab. 68: Temperatur bei einer Biegekiechsteifigkeit von 300 MPa bei Fertigbindemitteln der Kategorie VL
- Tab. 69: Zusammensetzung der schadlosen Praxisproben
- Tab. 70: Statische Eindringtiefe an schadhaften Praxisproben
- Tab. 71: Dyn. Stempeleindringtiefe der risshaften Praxisproben
- Tab. 72: Statische Eindringtiefe an schadlosen Praxisproben
- Tab. 73: Dyn. Stempeleindringtiefen der schadlosen Varianten
- Tab. 74: Biegezugfestigkeiten der schadhaften Praxisproben
- Tab. 75: Kenngrößen aus dem Dreipunkt-Biegezugversuch der schadhaften Praxisproben

Anhang A

Anhang A1: Messdaten und berechnete Daten aus rheologischem Maxwell-Modell

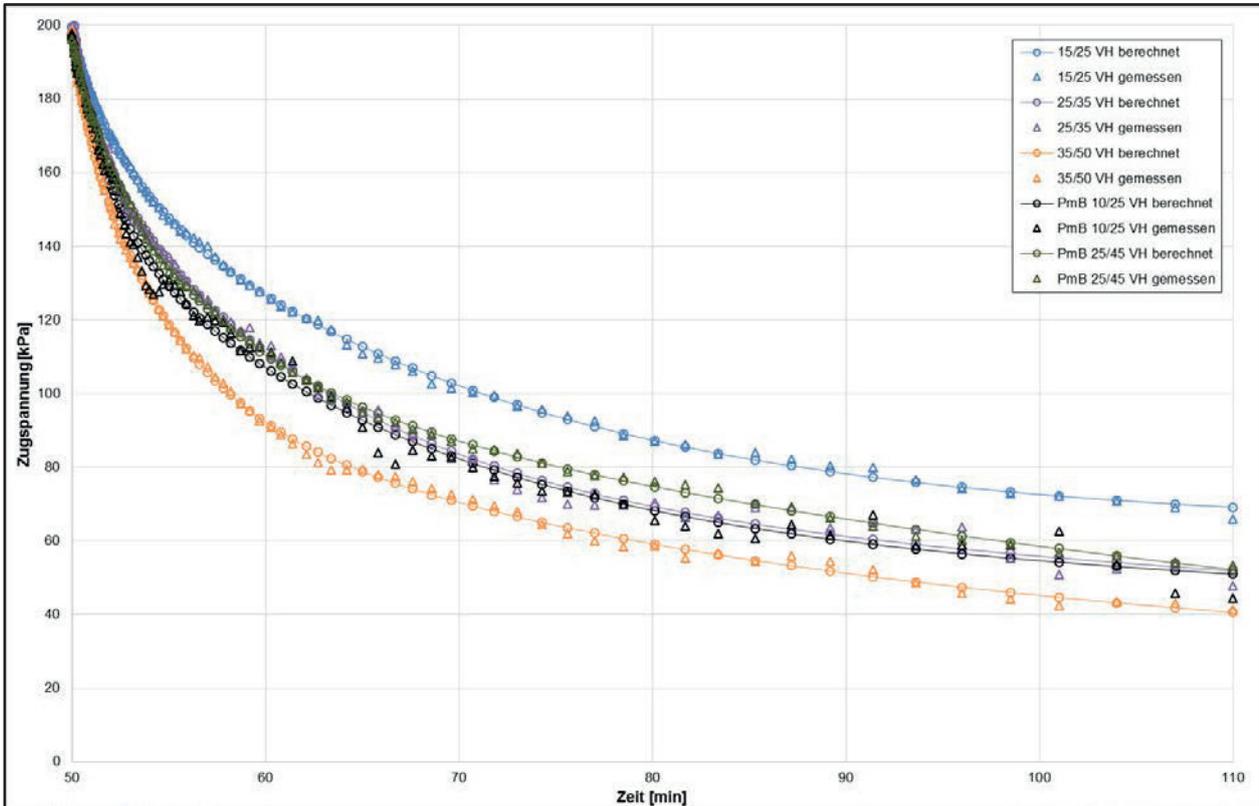


Bild 94: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Fertigbindemittel Kategorie VH

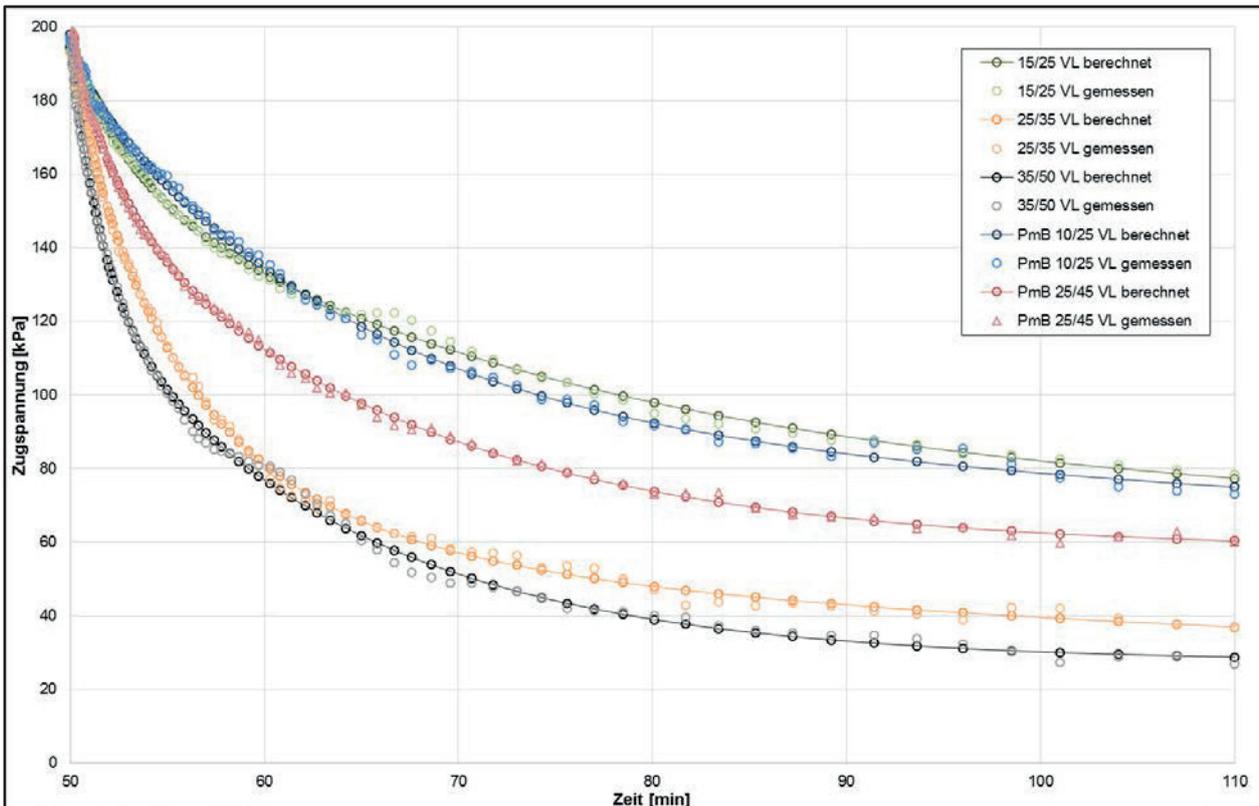


Bild 95: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Fertigbindemittel Kategorie VL

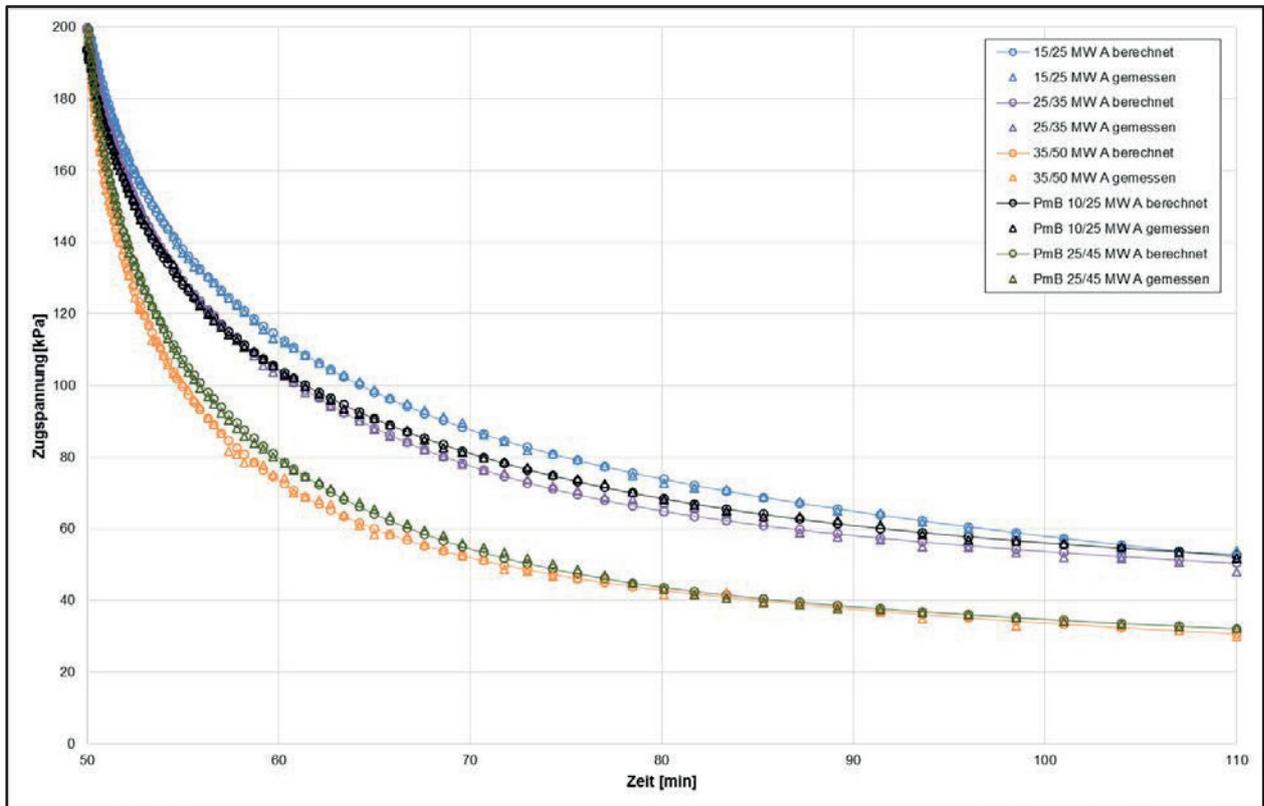


Bild 96: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Bindemittel mit Montanwachs A

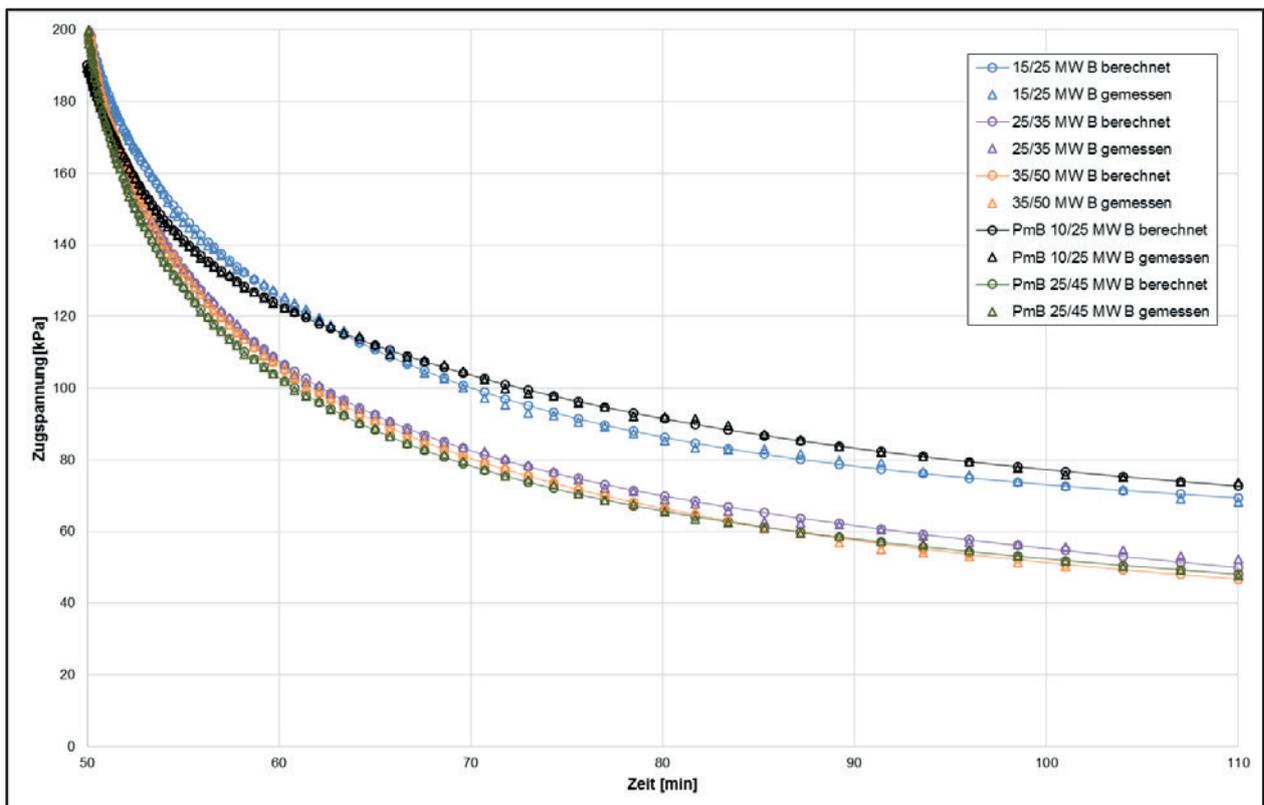


Bild 97: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Bindemittel mit Montanwachs B

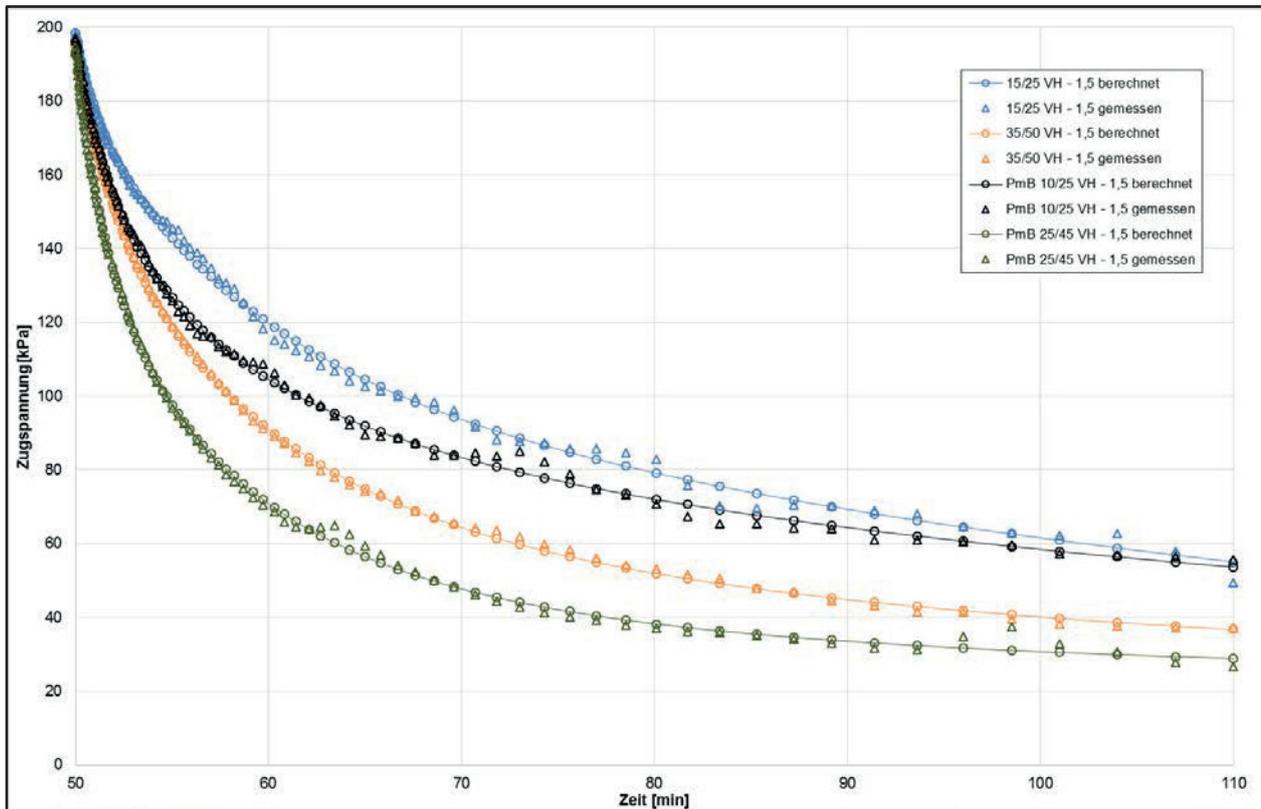


Bild 98: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Bindemittel mit 1,5 % FT-Wachs

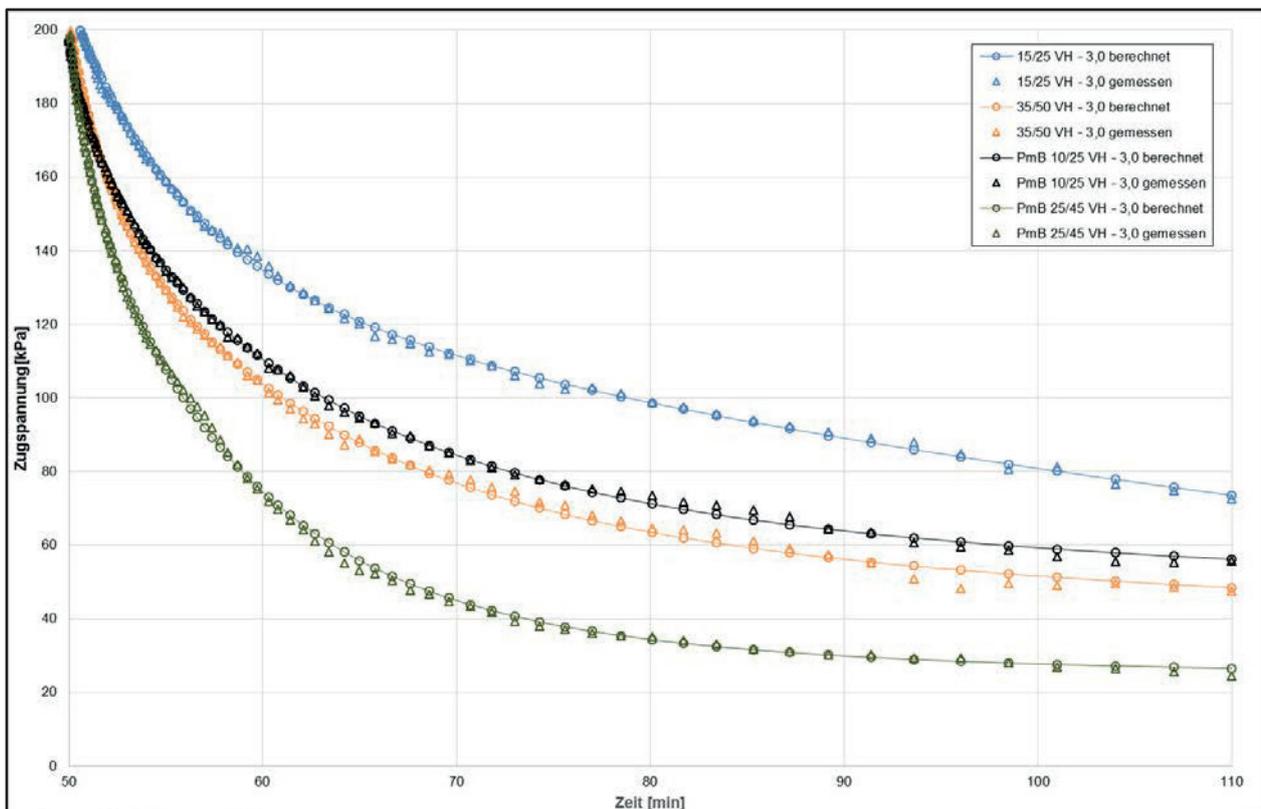


Bild 99: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Bindemittel mit 3,0 % FT-Wachs

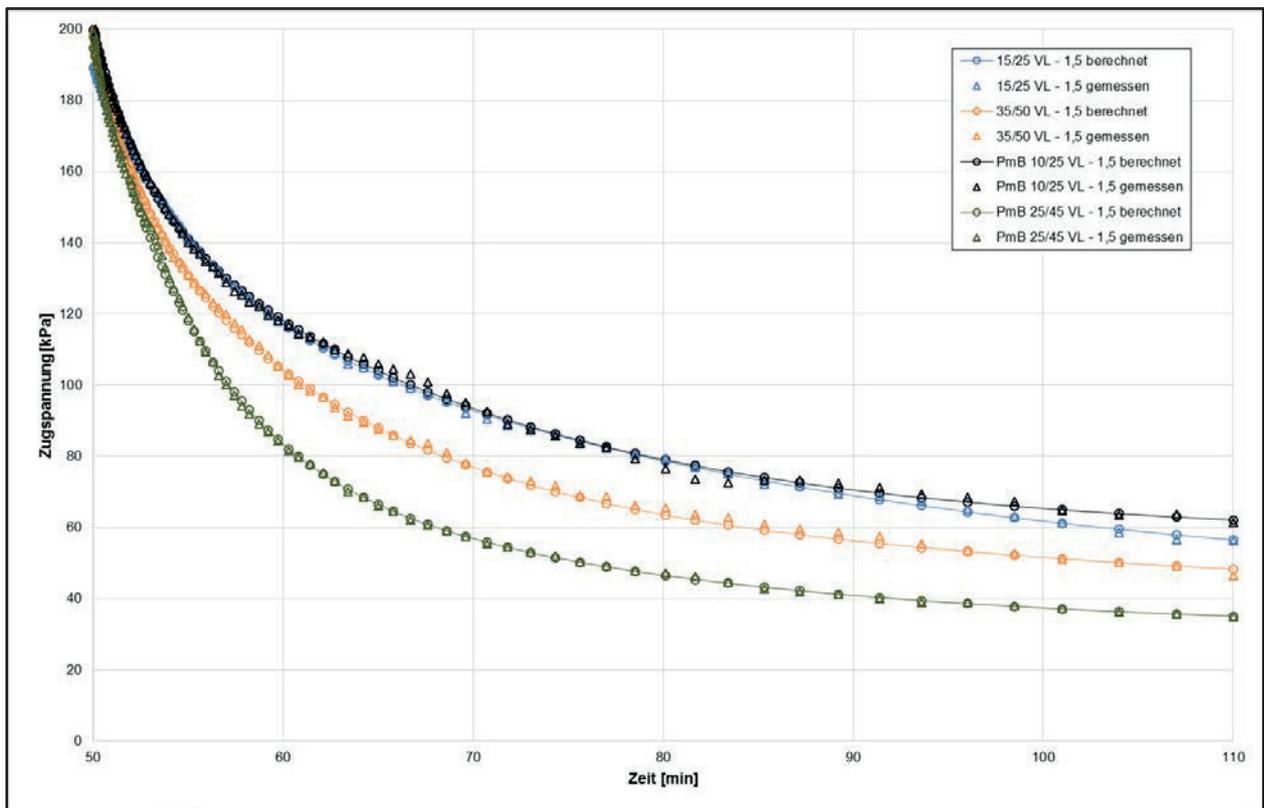


Bild 100: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Bindemittel mit 1,5 % Amidwachs

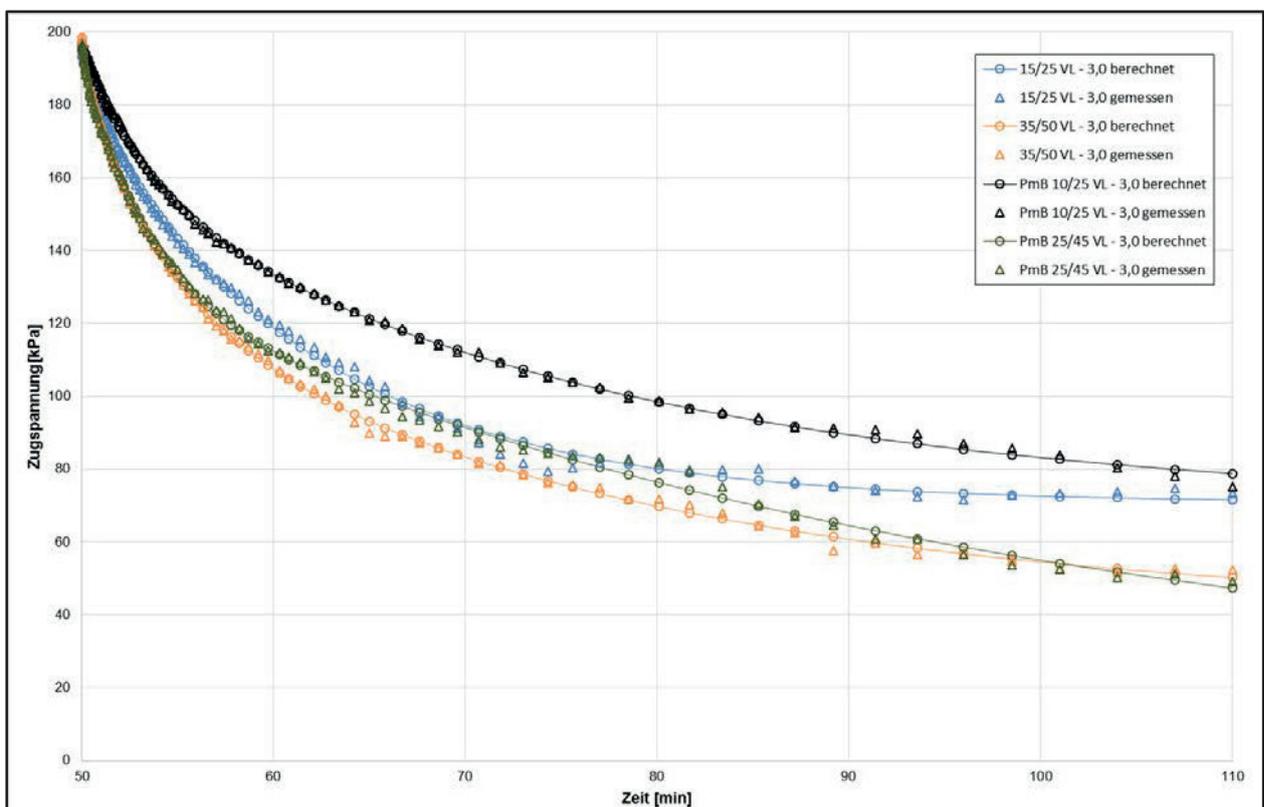


Bild 101: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Bindemittel mit 3,0 % Amidwachs

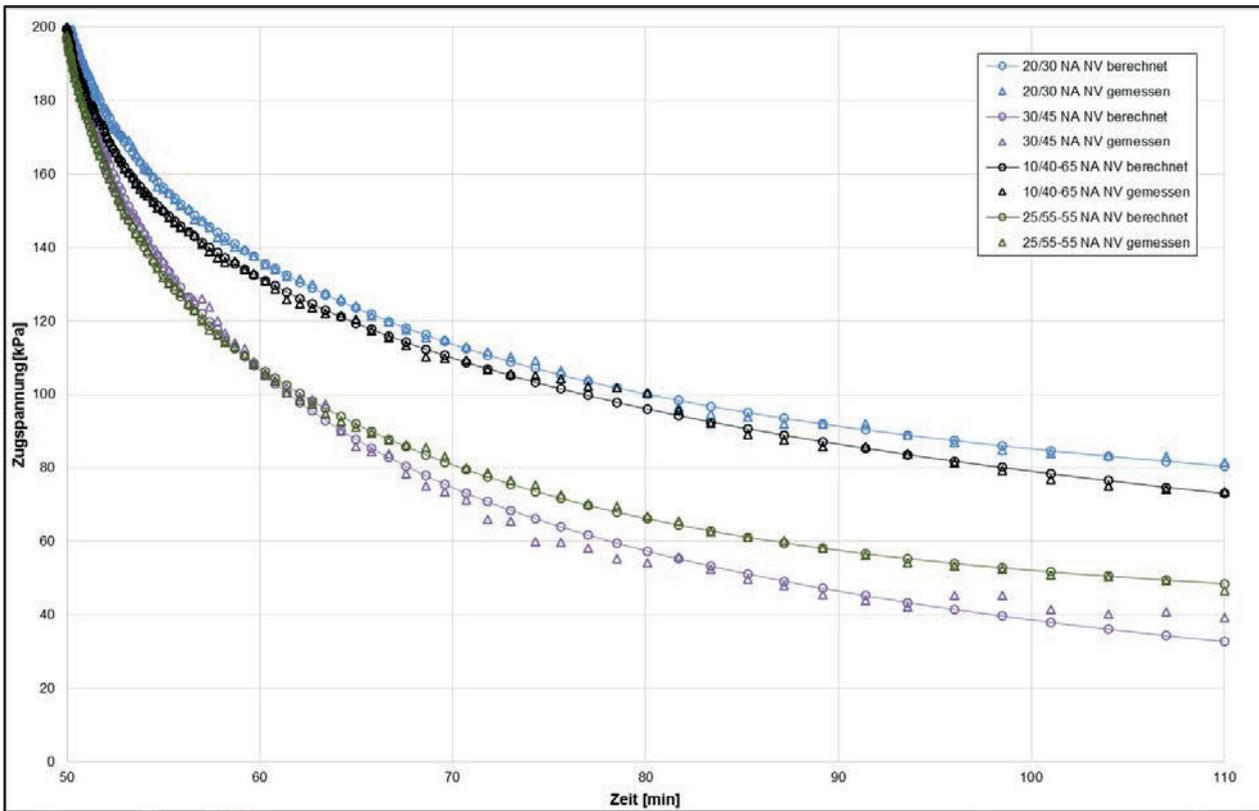


Bild 102 Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für Bindemittel mit NA und Wachs

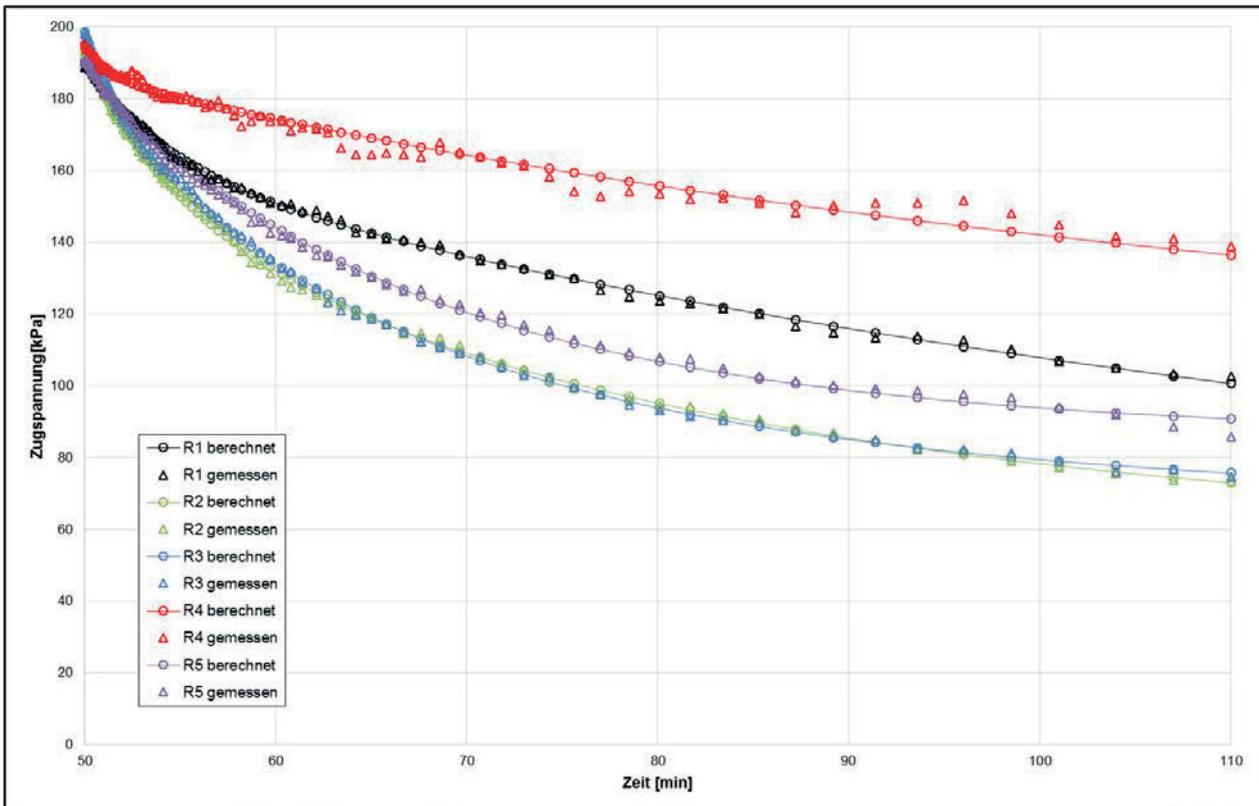


Bild 103: Vergleich Messdaten und mittels Maxwell-Modell berechneter Daten der Relaxation für extrahierte Bindemittel

## Anhang A 2

Tab. 78: Berechneter Quotient QII zur Beurteilung der Kälteflexibilität von MA 8 unter Verwendung der Bindemittelkennwerte zum Relaxationsverhalten

Bindemittel	Quotient QII
[n]	[-]
15/25 VL	0,81
25/35 VL	0,41
35/50 VL	0,33
15/25 VH	0,73
25/35 VH	0,56
35/50 VH	0,45
PmB 10/25 VL	0,79
PmB 25/45 VL	0,64
PmB 10/25 VH	0,55
PmB 25/45 VH	0,56
15/25 A	0,56
25/35 A	0,54
35/50 A	0,35
15/25 B	0,74
25/35 B	0,54
35/50 B	0,51
PmB 10/25 A	0,57
PmB 25/45 A	0,36
PmB 10/25 B	0,77
PmB 25/45 B	0,52
15/25 VL1,5	0,61
15/25 VL3,0	0,76
35/50 VL1,5	0,52
35/50 VL3,0	0,54
PmB 10/25 VL1,5	0,66
PmB 10/25 VL3,0	0,83
PmB 25/45 VL1,5	0,39
PmB 25/45 VL3,0	0,51
15/25 VH1,5	0,59
15/25 VH3,0	0,78
35/50 VH1,5	0,41
35/50 VH3,0	0,53
PmB 10/25 VH1,5	0,58
PmB 10/25 VH3,0	0,60
PmB 25/45 VH1,5	0,33
PmB 25/45 VH3,0	0,31
20/30+NA NV	0,85
30/45+NA NV	0,37
25/55-55+NA NV	0,77
10/40-65+NA NV	0,53

### Anhang A3: Ergebnisse der Dreifachbestimmung des Dreipunkt-Biegezugversuchs

Tab. 79: Messergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs an Gussasphalten MA 8 unter Variation des Bindemittels

Variante		Biegezugfestigkeit bei						Durchbiegung bei	
[n]		22 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert	-15 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert
MA 8 – B1	P1	10,69	10,40	13,80	13,59	14,51	14,68	0,77	0,84
	P2	10,55		13,95		15,18		0,93	
	P3	9,97		13,02		14,35		0,81	
MA 8 – B2	P1	4,39	4,46	18,23	18,76	14,87	14,79	1,08	0,97
	P2	4,52		19,02		14,64		0,80	
	P3	4,48		19,03		14,85		1,02	
MA 8 – B3	P1	9,08	8,90	17,52	17,13	13,61	13,73	0,72	0,76
	P2	8,72		17,39		13,49		0,72	
	P3	8,90		16,48		14,09		0,82	
MA 8 – B4	P1	9,29	8,95	20,22	19,62	16,82	16,94	1,03	0,91
	P2	8,80		19,27		17,22		0,76	
	P3	8,77		19,36		16,78		0,94	
MA 8 – B5	P1	10,09	10,28	15,36	15,52	13,82	13,89	0,82	0,74
	P2	10,87		15,55		13,70		0,77	
	P3	9,88		15,67		14,16		0,62	
MA 8 – B6	P1	6,45	6,44	17,82	17,62	11,15	11,55	0,79	0,84
	P2	6,70		17,54		11,94		0,64	
	P3	6,15		17,51		11,57		1,11	
MA 8 – B7	P1	11,54	11,61	18,16	18,70	12,94	12,95	0,76	0,75
	P2	11,82		18,49		13,21		0,89	
	P3	11,47		19,43		12,69		0,60	
MA 8 – B8	P1	7,04	7,06	21,15	21,62	15,95	16,45	0,89	1,09
	P2	7,48		22,45		16,56		1,27	
	P3	6,66		21,25		16,83		1,10	
MA 8 – B9	P1	6,69	6,52	22,12	22,51	18,07	18,18	1,57	1,35
	P2	6,34		22,87		18,31		1,15	
	P3	6,52		22,52		18,16		1,35	
MA 8 – B10	P1	14,12	14,19	16,25	15,40	14,60	14,58	0,35	0,42
	P2	14,13		14,61		14,07		0,46	
	P3	14,32		15,35		15,07		0,43	

**Tab. 80:** Messergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs an Gussasphalten MA 5 unter Variation des Bindemittels

Variante		Biegezugfestigkeit bei						Durchbiegung bei	
[n]		22 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert	-15 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert
MA 5 – B1	P1	10,79	11,04	14,28	15,46	15,33	14,64	0,73	0,78
	P2	11,68		14,62		14,54		1,04	
	P3	10,64		14,49		14,06		0,56	
MA 5 – B4	P1	8,78	8,71	18,86	18,58	15,60	15,51	0,85	0,80
	P2	9,00		18,15		15,31		0,74	
	P3	8,37		18,72		15,60		0,80	
MA 5 – B7	P1	10,77	10,46	18,38	18,38	14,28	14,53	0,75	0,91
	P2	10,22		18,75		14,87		0,91	
	P3	10,39		18,02		14,45		1,06	

**Tab. 81:** Messergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs an Gussasphalten MA 11 unter Variation des Bindemittels

Variante		Biegezugfestigkeit bei						Durchbiegung bei	
[n]		22 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert	-15 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert
MA 11 – B1	P1	10,46	10,22	11,83	11,56	11,43	11,52	0,61	0,65
	P2	10,39		11,12		11,12		0,77	
	P3	9,83		11,73		12,02		0,57	
MA 11 – B4	P1	7,89	7,53	13,92	13,84	13,40	13,60	0,70	0,67
	P2	7,55		14,06		13,71		0,70	
	P3	7,15		13,53		13,69		0,61	
MA 11 – B7	P1	8,11	7,72	11,97	11,97	11,11	11,66	0,86	1,04
	P2	7,36		11,67		12,32		1,17	
	P3	7,69		12,27		11,56		1,08	

Tab. 82 Messergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs an Gussasphalten MA 8 unter Variation des Gesteinskomponenten (1)

Variante		Biegezugfestigkeit bei						Durchbiegung bei	
[n]		22 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert	-15 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert
MA 8 – GV1	P1	7,75	7,75	12,51	12,39	7,75	7,68	0,48	0,49
	P2	7,92		11,99		7,66		0,50	
	P3	7,59		12,67		7,62		0,48	
MA 8 – GV2	P1	7,10	7,03	12,83	12,90	12,19	12,90	0,98	0,72
	P2	6,50		12,74		11,99		0,45	
	P3	7,49		13,12		12,15		0,73	
MA 8 – GV3	P1	10,09	10,28	15,36	15,52	13,82	13,89	0,51	0,51
	P2	10,87		15,55		13,70		0,64	
	P3	9,88		15,67		14,16		0,37	
MA 8 – GV4	P1	8,15	7,92	11,47	11,44	11,95	11,97	0,49	0,50
	P2	7,89		11,29		12,07		0,46	
	P3	7,72		11,55		11,88		0,55	
MA 8 – GV5	P1	7,67	7,61	11,65	11,70	11,44	11,52	0,49	0,52
	P2	7,76		11,74		11,53		0,55	
	P3	7,40		11,71		11,60		0,51	
MA 8 – GV6	P1	10,88	10,82	13,05	12,74	11,93	11,86	0,64	0,65
	P2	11,00		12,93		11,83		0,72	
	P3	10,58		12,24		11,83		0,60	
MA 8 – GV7	P1	10,44	10,40	12,91	13,03	12,67	12,70	0,56	0,61
	P2	10,46		13,07		12,49		0,59	
	P3	10,31		13,11		12,94		0,68	
MA 8 – GV8	P1	10,70	10,82	11,52	11,60	11,38	10,89	0,57	0,63
	P2	10,88		11,31		10,75		0,64	
	P3	10,87		11,96		10,54		0,67	
MA 8 – GV9	P1	9,45	9,36	13,42	13,43	13,59	13,50	0,58	0,67
	P2	9,57		13,36		13,62		0,82	
	P3	9,04		13,49		13,29		0,62	

**Tab. 83:** Messergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs an Gussasphalten MA 8 unter Variation des Gesteinskomponenten (2)

Variante		Biegezugfestigkeit bei						Durchbiegung bei	
[n]		22 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert	-15 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert
MA 8 – GV10	P1	10,28	10,12	11,54	11,62	12,60	11,98	0,63	0,65
	P2	9,89		11,31		11,17		0,66	
	P3	10,19		12,01		12,15		0,65	
MA 8 – GV11	P1	12,29	12,37	12,61	12,58	12,99	12,95	0,60	0,65
	P2	12,52		13,00		12,42		0,69	
	P3	12,30		12,13		13,42		0,65	
MA 8 – GV12	P1	10,41	10,04	12,04	12,06	11,78	12,09	0,53	0,56
	P2	9,63		12,29		12,19		0,61	
	P3	10,10		11,87		12,31		0,54	
MA 8 – GV13	P1	10,15	10,13	12,35	11,91	11,66	12,10	0,59	0,63
	P2	9,75		10,99		12,71		0,61	
	P3	10,49		12,38		11,92		0,69	
MA 8 – GV14	P1	11,65	11,40	11,61	11,58	11,65	12,09	0,57	0,63
	P2	11,80		11,43		11,98		0,77	
	P3	10,76		11,69		12,63		0,56	

**Tab. 84** Messergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs an schadhafte Praxisproben

Variante		Biegezugfestigkeit bei						Durchbiegung bei	
[n]		22 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert	-15 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert
R1	P1	9,82	10,51	13,31	12,96	11,97	12,00	0,71	0,64
	P2	11,03		13,20		12,01		0,63	
	P3	10,68		12,35		12,01		0,58	
R2	P1	7,80	8,05	12,05	12,12	11,46	11,59	0,64	0,63
	P2	8,14		11,82		11,65		0,62	
	P3	8,21		12,48		11,64		0,62	
R3	P1	9,02	8,59	13,51	12,91	11,50	11,48	0,55	0,59
	P2	8,40		12,25		12,57		0,65	
	P3	8,36		12,96		10,37		0,58	
R4	P1	8,68	9,03	11,09	11,03	8,33	8,23	0,69	0,62
	P2	9,05		11,51		8,43		0,62	
	P3	9,37		10,50		7,94		0,54	
R5	P1	7,30	7,08	11,30	11,89	10,66	10,47	0,76	0,71
	P2	6,63		12,46		10,73		0,74	
	P3	7,31		11,92		10,03		0,61	

Tab. 85: Messergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs an schadlosen Praxisproben (1)

Variante		Biegezugfestigkeit bei						Durchbiegung bei	
[n]		22 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert	-15 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert
P1	P1	8,63	8,62	13,25	13,13	12,01	12,77	0,51	0,55
	P2	8,69		13,34		13,11		0,62	
	P3	8,55		12,80		13,19		0,52	
P2	P1	4,54	4,78	12,54	12,04	11,11	11,20	0,70	0,68
	P2	4,96		11,99		11,38		0,67	
	P3	4,85		11,59		11,12		0,68	
P3	P1	3,83	3,87	11,40	11,00	10,40	11,18	0,64	0,56
	P2	3,92		10,81		11,63		0,45	
	P3	3,87		10,81		11,52		0,61	
P4	P1	8,05	7,90	12,41	12,41	13,04	12,87	0,48	0,49
	P2	7,56		12,04		13,00		0,49	
	P3	8,10		12,79		12,56		0,51	
P5	P1	7,58	7,73	12,36	11,66	11,85	11,39	0,52	0,54
	P2	7,70		11,28		11,02		0,51	
	P3	7,91		11,35		11,30		0,59	
P6	P1	8,01	8,46	13,75	12,86	12,56	12,24	0,55	0,54
	P2	8,51		12,75		12,05		0,56	
	P3	8,86		12,08		12,10		0,52	
P7	P1	7,63	7,53	14,65	14,49	12,88	12,36	0,62	0,60
	P2	7,46		14,80		11,58		0,54	
	P3	7,50		14,02		12,63		0,63	
P8	P1	7,38	7,56	13,13	13,79	12,03	11,98	0,65	0,68
	P2	7,72		13,74		12,51		0,70	
	P3	7,58		14,49		11,39		0,71	

Tab. 86: Messergebnisse des Dreipunkt-Biegezugversuchs an schadlosen Praxisproben (2)

Variante		Biegezugfestigkeit bei						Durchbiegung bei	
[n]		22 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert	-15 °C	Mittelwert	0 °C	Mittelwert
P9	P1	6,40	6,78	12,70	12,56	9,77	10,13	0,73	0,67
	P2	7,38		12,68		10,43		0,59	
	P3	6,55		12,30		10,19		0,69	
P10	P1	8,18	8,24	12,76	12,58	11,64	11,81	0,70	0,63
	P2	8,83		12,81		11,60		0,65	
	P3	7,71		12,19		12,19		0,56	
P11	P1	8,74	8,60	12,36	12,73	12,56	12,36	0,51	0,55
	P2	8,44		12,85		12,73		0,54	
	P3	8,62		12,99		11,80		0,60	
P12	P1	5,60	5,45	16,38	16,01	11,81	12,22	0,71	0,74
	P2	5,45		16,28		12,95		0,71	
	P3	5,28		15,36		11,89		0,80	

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

## 2019

### S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

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

### S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

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

### S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

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

### S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

### S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

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

### S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

### S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost € 15,50

### S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser € 16,50

### S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

### S 138: Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

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

### S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn

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

### S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

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

### S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

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

## 2020

### S 142: Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

### S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

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

### S 144: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

### S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

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

### S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

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

## 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, Pichottka, 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, Wistuba  
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, Gehlen, 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  
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**  
Demond, 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 Ausbauphase**  
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.

---

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](http://www.schuenemann-verlag.de)

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