

Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 140

bast

Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

von

Martin Radenberg
Nina Flottmann
Bianca Drewes

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

Markus König
Thomas Hilfert, M.Sc.

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 140

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 Öffentlichkeitsarbeit.

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 Öffentlichkeitsarbeit.

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 29.0327/2013:
Datentechnische Erfassung und Auswertung von Prüfdaten und Erfahrungssammlung in Betonfahrbahndecken

Fachbetreuung

Referat „Asphaltbauweisen“

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-484-5

Bergisch Gladbach, November 2019

Kurzfassung – Abstract

Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

Mit der Umsetzung des Allgemeinen Rundschreibens Straßenbau ARS Nr. 11/12 und den ergänzenden Ausgaben der TL Asphalt-StB 07/13 und der ZTV Asphalt-SB 07/13 wurden erweiterte Prüfvorgaben an Bindemittelproduzenten und Asphaltmischguthersteller bezüglich der Produktüberwachung sowie an Straßenbaubehörden bezüglich der Kontrollprüfungen festgelegt.

Diese umfassen die Prüfung des Erweichungspunktes Ring und Kugel und der Nadelpenetration sowie Prüfungen mit dem Dynamischen Scherrheometer (inkl. MSCR-Prüfung) und mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) an vier verschiedenen Straßenbaubitumen und drei polymermodifizierten Bitumen. Teilweise werden diese Prüfungen zusätzlich an den kurzzeit- und langzeitgealterten Bindemitteln durchgeführt.

Die Prüfdaten wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes über die Jahre 2013 bis 2015 gesammelt. Dazu wurde eine Datenbank mit einem entsprechenden Webserver eingerichtet.

Neben den Bindemitteldaten wurden von den Mischguthestellern die gemäß den TL Asphalt-StB 07/13 als „ist anzugeben“ gekennzeichneten Asphaltkennwerte proportionale Spurrinnentiefe, Hohlraumausfüllungsgrad und dynamische Stempeleindringtiefe beschafft.

Anschließend wurden die Daten einer statistischen Analyse unterzogen, mit der eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse der Untersuchungsjahre 2014 und 2015 belegt werden konnte.

Für die verschiedenen Prüfergebnisse wurden unterschiedliche Bewertungsansätze verfolgt.

Es wurden systematische Änderungen der Bindemittleigenschaften durch die Kurzzeit- und die Langzeitalterung anhand der Änderung des Erweichungspunktes Ring und Kugel und der Nadelpenetration festgehalten.

Die BBR-Prüfdaten wurden anhand der Temperaturen T_{S300} und $T_{m0,3}$ bewertet.

Die DSR-Ergebnisse zeigen ein hohes Potenzial zur Differenzierung der Straßenbaubitumen auf. Hier konnten mithilfe der Äquisteifigkeitstemperatur und des entsprechenden Phasenwinkels Erfahrungswerte in Abhängigkeit von der Bitumensorte formuliert werden.

Für die Asphaltkennwerte proportionale Spurrinnentiefe, Hohlraumausfüllungsgrad und dynamische Stempeleindringtiefe wurden ebenfalls Erfahrungswerte formuliert.

Collection of experience bitumendata – fresh bitumen

Within the implementation of the General Circular on Road Construction No. 11/12 and the complementary editions of TL Asphalt-StB 07/13 and the ZTV Asphalt StB 07/13, extended inspection specifications were given to binder and asphalt mixture manufacturers regarding product monitoring as well as to road authorities regarding control tests.

These specifications include the testing of the Softening Point Ring and Ball and Needle Penetration as well as tests with the Dynamic Shear Rheometer (including MSCR-Tests) and Bending Beam Rheometer on four different paving bitumen and three polymer-modified bitumen. In some cases, these tests are additionally carried out on short-term-aged and long-term-aged binders.

In addition, the asphalt parameters rut depth, cavity filling ratio and dynamic stamp penetration were produced from the mixture manufacturers as indicated according to TL Asphalt-StB 07/13.

Within this research project the test data was collected and evaluated over a period of two years. For this purpose a database with a corresponding web server was set up.

The data was statistically analyzed and it has shown that the test results from the two considered years 2014 and 2015 have a high agreement.

Different valuation methods were used for the various test results.

The short-term-aging and the long-term-aging entailed systematic changes of the binder properties which are shown in the results of the Softening Point Ring and Ball and the Needle Penetration.

The BBR test data were evaluated on the basis of the temperatures T_{S300} and $T_{m0,3}$.

The DSR results showed a high potential to differentiate the sort of paving bitumen. Thus, with the help of the equivalent stiffness temperature and the phase angle, empirical values could be formulated in dependence of the binder type.

There also were formulated empirical values for the characteristic asphalt values proportional rut depth, cavity filling ratio and dynamic stamp penetration.

Summary

Collection of experience bitumendata – fresh bitumen

1 Introduction

In order to verify and ensure the quality of asphalt roads, tests on bituminous binders have been carried out for many years as part of the contractual specifications. Despite a predominantly compliance with these requirements, inadequate durability of asphalt layers has been observed in the past and its cause was also suspected in the quality of the binder. In this context, the working group “Asphalt constructions” of the Road and Transportation Research Association (FGSV) has, among other things, set up extended tests on bituminous binders, which were introduced initially with the General Circular Road Construction (ARS) No. 11/2012 [ARS 11/2012, 2012] and then with complementary editions of [TL Asphalt-StB 07/13, 2007] and [ZTV Asphalt-StB 07, 2007].

These specifications include the testing of the Softening Point Ring and Ball and Needle Penetration as well as tests with the Dynamic Shear Rheometer (including MSCR-Tests) and Bending Beam Rheometer (BBR) on four different paving bitumen and three polymer-modified bitumen. In some cases, these tests are additionally carried out on short-term-aged and long-term-aged binders.

During the running time of the project a database with a corresponding web server was set up and put into operation. In this database the basic data was statistically analyzed and evaluated. In addition to the plausibility check to avoid incorrect entries of the input data, an extended examination of the tests according to the current standards was carried out and alternative evaluation possibilities were investigated.

2 Purpose

The aim of the research project was to determine a meaningful and representative valuation background for the performance-oriented binder tests with

the Bending Beam Rheometer according to [DIN EN 14771, 2012] and the Dynamic Shear Rheometer according to [DIN EN 14770, 2012] including MSCR tests in accordance with [AL MSCR-Prüfung, 2012] and the tests for short-term and long-term aging according to [DIN EN 12607-1, 2007] and [DIN EN 14769, 2012] as well as the asphalt tests required (proportional rut depth, cavity filling ratio, dynamic penetration depth) according to the [TL Asphalt-StB, 2007].

3 Data input

Up to the last export of data sets within this project, 8,844 data records were received. Figure 1 shows the development of data volume over the project running time.

The main part of the data was supplied by mixture manufacturers. The data volume is divided according to the three sources: binder manufacturer (BH), mixture manufacturer (MGH) and purchaser (AG).

Data from 2014 and 2015 were used to evaluate the results.

4 Evaluation of binders

The binder was tested according to the respectively valid technical rules.

4.1 Standard characteristics

The delivered data sets of the standard characteristics (Softening Point Ring and Ball and Needle

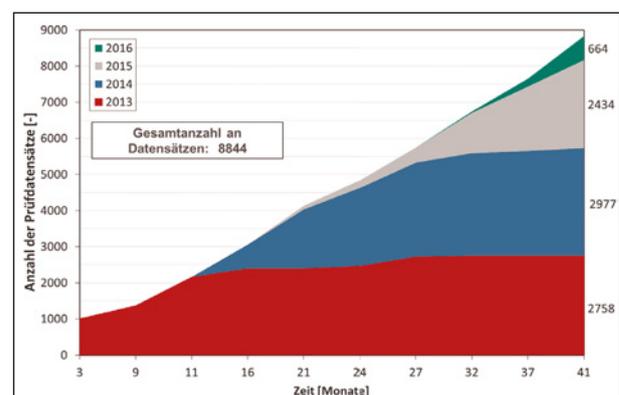


Fig. 1: Development of data volume

Penetration) was evaluated statistically and displayed using box whiskers plots and subsequently examined for compliance with the required limits according to the technical rules (example, see Figure 2).

It was noticeable that the paving grade bitumen 50/70, 70/100 and 160/220 tended to be harder than they should be according to the classification, which was reflected in a relatively frequent undercutting of the required value for needle penetration.

In principle, an appropriate identification is possible for the paving grade bitumen by combining the standard characteristics of needle penetration and the Softening Point Ring and Ball. However, the bitumen types 50/70 and 70/100 show larger overlapping areas.

Respective to the aging behavior, it should be noted that approximately the same average changes in the Softening Point Ring and Ball of the binders were observed as a result of the two aging stages. These were about +6 °C (RTFOT-aged) and +15 °C (RTFOT- and PAV-aged). In contrast, the average changes in the needle penetration showed a dependence on the bitumen hardness. The percentage decrease in needle penetration increased with decreasing bitumen hardness.

In the case of the polymer-modified binders, no clear identification of the binder type was possible by means of the analysis of the standard characteristic values. The decrease in needle penetration caused by laboratory aging and the increase of the Softening Point Ring and Ball varied according to the type of binder. Due to these variations, a significant spreading of the data values was determined when considering the data after RTFOT- and after RTFOT and PAV aging.

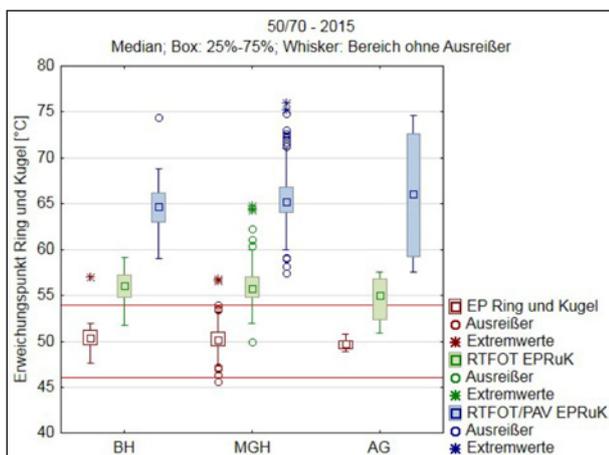


Fig. 2: Softening point ring and ball binder 50/70, year 2015

4.2 BBR results

A statistical analysis of the m-value and the flexural creep stiffness in dependence of the test temperature was also carried out for the BBR results. In the case of paving grade bitumen a good differentiation of the various types of binders could be made by contrasting the flexural creep stiffness and the m-value. However, with decreasing test temperature the values spread increasingly. Therefore, only test temperatures of -10 °C and -16 °C were taken into account to determine the temperatures T_{S300} and $T_{m0,3}$.

In the comparison of the temperatures T_{S300} and $T_{m0,3}$ of the paving grade bitumen, the various types of binders also had relatively high overlapping areas, whereby the temperatures of the 30/45 tended to be the highest, and the determined temperatures generally decreased with a decreasing binder hardness (Figure 3).

In contrast to the paving grade bitumen no grouping of was found for the polymer-modified bitumen. Although the slightly larger part of the data is located below the bisector, the values scatter very strongly both above and below the bisector (Figure 4).

4.3 DSR results

The DSR results were also statistically evaluated. For further assessment of the DSR results, the respective equi-stiffness temperature was used. This corresponds to the temperature at which the complex shear modulus reaches a value of 15.0 kPa [Projekt 16639 N/1, 2014]. In addition, the phase angle at the equi-stiffness temperature was determined (see as example Figure 5).

In the further consideration of the phase angles at a complex shear modulus of 1.0 kPa, a safe classi-

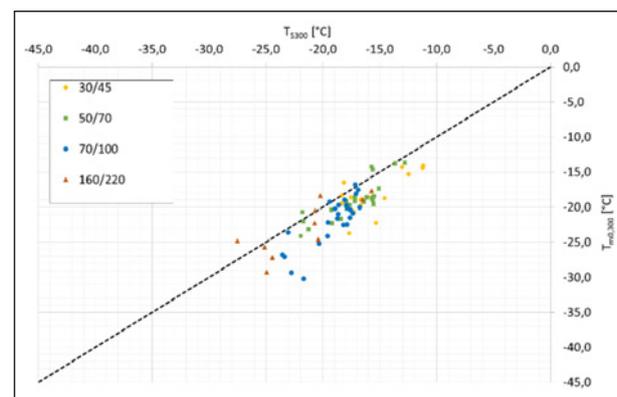


Fig. 3: BBR results of paving grade bitumen, year 2015

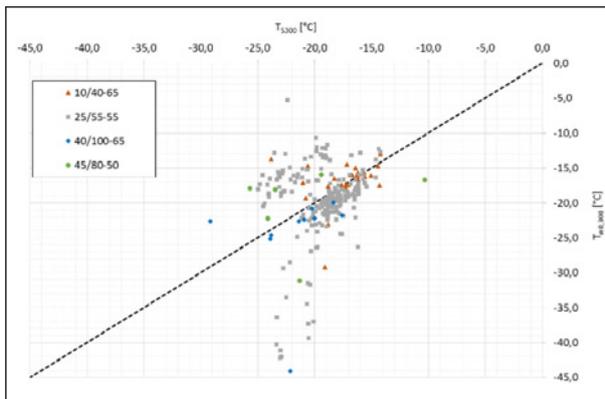


Fig. 4: BBR results of modified bitumen, year 2015

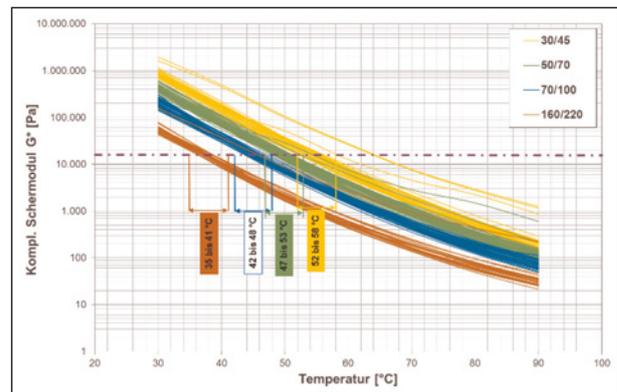


Fig. 5: Equi-stiffness temperature of paving grade bitumen, year 2015

Binder type	T at G* = 15,0 kPa		Phase angle at G* = 15,0 kPa		Phase angle at G* = 1,0 kPa	
	min T [°C]	max T [°C]	min δ [°]	max δ [°]	min δ [°]	max δ [°]
30/45	52	58	76	86	85	89
50/70	47	53	76	86	85	89
70/100	42	48	77	86	85	89
160/220	35	41	77	86	85	89

Table 1: Summary of the rheological characteristics of paving grade bitumen

Binder type	T at G* = 15,0 kPa		Phase angle at G* = 15,0 kPa		Phase angle at G* = 1,0 kPa	
	min T [°C]	max T [°C]	min δ [°]	max δ [°]	min δ [°]	max δ [°]
25/55-55 A	48	62	62	78	71	86
10/40-65 A	56	68	62	78	73	81
40/100-65 A	48	58	60	72	67	80

Table 2: Summary of the rheological characteristics of polymer-modified bitumen

fication of all paving grade bitumen with a range of 85° to 89° could be recognized. In contrast, the phase angles of the polymer-modified binders showed a range of 67° to 86° and thus were sufficiently well separated from paving grade bitumen.

The summary of these characteristic values is given in Table 1 and Table 2.

4.4 MSCR results

The MSCR results of the paving grade bitumen could not be evaluated by the percentage deformation through the non-recoverable portion as partially negative values were detected for percentage recovery. This effect intensified with decreasing binder hardness. According to current information the test method does not seem suitable for paving grade bitumen.

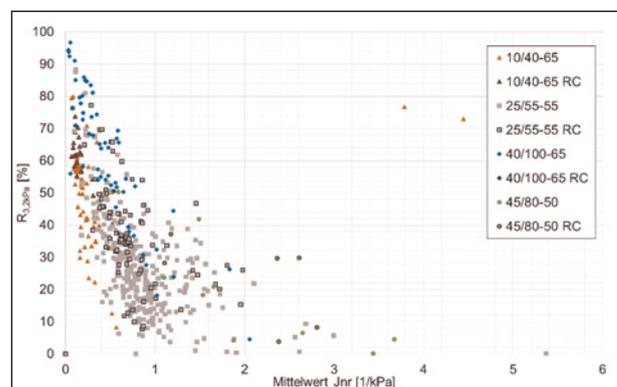


Fig. 6: Results of the MSCR evaluation for polymer-modified bitumen, year 2014

In principle, the evaluation of the MSCR data showed that the greatest differentiation of the values was given at a creep stress value of 3.2 kPa. If, in the case of polymer-modified binders, the percentage recovery is plotted against the non-recoverable

portion, a certain grouping is shown depending on the type of binder (Figure 6).

5 Evaluation of asphalt characteristics

5.1 Proportional rut depth

The proportional rut depth showed a gradation depending on the grain size. Generally it decreased with the increase of the grain size, but the different asphalt mixture showed overlapping areas.

There have been deduced experience values of the proportional rut depth depending on the asphalt mixture concept (Table 3).

5.2 Cavity filling ratio

Also the cavity filling ratio showed dependence on the maximum grain size that was used. The cavity filling ratio decreased with an increasing grain size. Also there has been determined a dependence on the kind of burden for which the asphalt type has been designed. Asphalt concepts for a low burden had a lower cavity filling ratio then concepts for a normal burden. The concepts for a high burden showed the lowest cavity filling ratio. There can be made

The cover layers and binder layers can be clearly separated from one another on the basis of the degree of cavity filling (Figure 7).

Experience values as a function of the asphalt type were also formulated on the basis of the results. These have a span of 5 % for the cover layers and a span of 5 % to 10 % for the binder layers because of the determined greater scatter.

5.3 Dynamic stamp penetration

There can be made a good gradation of the mastic asphalt types on basis of the dynamic stamp penetration as a function of the grain size. The proportion of the spurring depth decreased with increasing grain size. The results of the experience values of dynamic stamp penetration depending on the type of the mastic asphalts is shown in Table 4.

6 Conclusion and outlook

Within the framework of this project, experience values could be formulated for the various result parameters, which should be taken into account in future discussions on the adaptation of the standards.

Asphalttype	Proportional rut depth	
	Minimum [%]	Maximum [%]
SMA 8 S	2	10
SMA 11 S	2	10
AC 8 D S	5	12
AC 11 D S	3	11
AC 16 B S	2	6
AC 22 B S	1	5

Table 3: Experience values of the rut depth

Asphaltsorte	Minimalwert der Stempeleindringtiefe [mm]	Maximalwert der Stempeleindringtiefe [mm]
MA 5 S	1,0	3,5
MA 8 S	0,8	3,0
MA 11 S	0,5	2,5

Table 4: Experience values of the dynamic stamp penetration of mastic asphalts (n=2.500)

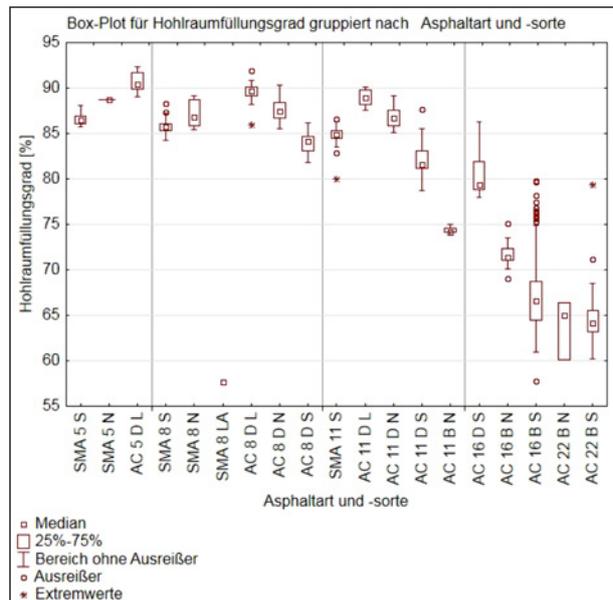


Fig. 7: Cavity filling ratio in dependence on the asphalt type

The ageing behaviour should be included in the assessment of the cold behaviour of binders. In further investigations potential correlations concerning the ageing behaviour of the binders and the BBR results and, if applicable, also the DSR results should be checked. This should serve to describe the ageing behaviour as comprehensively as possible in order to be able to evaluate the relationship between the ageing of the binder and the durability of the asphalt in further research work.

The DSR test has proven to be suitable for differentiating the type of binder used in paving bitumen. With the determination of the phase angle at a complex shear modulus of 1.0 kPa, a supplementary evaluation parameter could be introduced.

In order to evaluate the MSCR results, an extended evaluation background is required, which would have to be created by supplementary research.

The evaluation of the BBR results was based on the critical temperatures. The test temperatures $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ proved to be sufficiently suitable for determining these.

The values of the asphalt characteristics formulated in this project should in future be taken into account as orientation values and be confirmed or, if necessary, adapted by further experience. The extent to which parts of these values can be sensibly integrated into future standards should be discussed critically.

Literature

AL MSCR-Prüfung. 2012. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test). Köln: FGSV Verlag, 2012.

ARS 11/2012. 2012. Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 11/2012 (ARS 11/2012)- Änderungen und Ergänzungen des Technischen Regelwerkes Asphaltstraßen. s. I.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2012.

DIN EN 12607-1. 2007. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren. Fassung 2014. Berlin: Beuth Verlag, 2007.

DIN EN 14769. 2012. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV). Berlin: Beuth Verlag, 2012.

DIN EN 14770. 2012. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR). Berlin: Beuth Verlag, 2012.

DIN EN 14771. 2012. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR). Berlin: Beuth Verlag, 2012.

Projekt 16639 N/1. 2014. Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen – Schlussbericht. Vorhaben 16639 N/1. Bochum: Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr Universität Bochum, 2014.

TL Asphalt-StB 07/13. 2007. Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. Köln: FGSV Verlag, 2007. Fassung 2013.

ZTV Asphalt-StB 07. 2007. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Köln: FGSV Verlag, 2007. Fassung 2013.

Inhalt

1. Einleitung, Problemstellung, Zielsetzung	13	7.1.4 Bitumensorte 70/100	29
1.1 Einleitung und Problemstellung	13	7.1.5 Bitumensorte 160/220	30
1.2 Zielsetzung	13	7.1.6 Bindemittel 10/40–65	31
2. Methodik des Vorgehens	13	7.1.7 Bindemittel 25/55–55	33
2.1 Beschaffung der Daten	13	7.1.8 Bindemittel 40/100–65	34
2.2 Auswertung der Daten	15	7.1.9 Bindemittel 45/80–50	35
2.3 Datenbank	15	7.1.10 Zusammenfassung	36
3. Prüfverfahren	15	7.2 Bewertung der Standard-Kenndaten	37
3.1 Allgemeines	15	7.2.1 Straßenbaubitumen	37
3.2 Prüfverfahren Bindemittel	16	7.2.2 Vergleich der polymodifizierten Bindemittel	40
3.3 Prüfverfahren Asphalt	17	7.2.3 Zusammenfassung	43
4. Statistische Auswertung	18	7.3 BBR-Ergebnisse	43
4.1 Plausibilitätskontrolle	18	7.3.1 Statistische Bewertung	43
4.2 Box-Whisker-Plots	19	7.3.2 Weitere Bewertungsansätze	50
4.3 Deskriptive Statistik	19	7.3.3 Straßenbaubitumen	50
5. Datenverteilung	19	7.3.4 Polymermodifizierte Bindemittel	51
6. Informationstechnische Umsetzung	20	7.3.5 Zusammenfassung	53
6.1 Überblick	20	7.4 DSR-Ergebnisse	53
6.1.1 Datenhaltung	20	7.4.1 Statistische Bewertung	53
6.1.2 Fachkonzept	20	7.4.2 Straßenbaubitumen	60
6.1.3 Präsentationsschicht	22	7.4.3 Polymermodifizierte Bitumen	64
6.2 Implementierung und Bedienung	23	7.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse	69
6.2.1 Benutzerverwaltung	24	7.4.5 Einfluss des Geräteherstellers	70
6.2.2 Firmenverwaltung	25	7.5 MSCR-Ergebnisse	70
6.2.3 Schlüsselverwaltung	25	7.5.1 Straßenbaubitumen	71
6.2.4 Verschlüsseln von Datensätzen	25	7.5.2 Polymermodifizierte Bindemittel	72
7. Datenauswertung	25	7.6 Anzugebende Werte	73
7.1 Standard-Kenndaten	25	7.6.1 Proportionale Spurrinntiefe	73
7.1.1 Bitumensorte 20/30	25	7.6.2 Hohlraumausfüllungsgrad	73
7.1.2 Bitumensorte 30/45	26	7.6.3 Dynamische Stempelindringtiefe	74
7.1.3 Bitumensorte 50/70	27	8. Zusammenfassung	75
		9. Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise	78

Literatur 79
Bilder 81
Tabellen 87

Die Anhänge A und B sind im elektronischen
BAST-Archiv ELBA unter:
<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung, Problemstellung, Zielsetzung

1.1 Einleitung und Problemstellung

Zur Überprüfung und Gewährleistung der Qualität von Asphaltstraßen werden seit vielen Jahren auch Prüfungen an bitumenhaltigen Bindemitteln im Rahmen der bauvertraglichen Vorgaben durchgeführt. Trotz überwiegender Einhaltung dieser Vorgaben wurden in der Vergangenheit unzureichende Dauerhaftigkeiten von Asphaltschichten beobachtet, deren Ursache auch in der Bindemittelqualität vermutet wurde. Vor diesem Hintergrund hat die Arbeitsgruppe „Asphaltbauweisen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) u.a. erweiterte Prüfungen an bitumenhaltigen Bindemitteln festgelegt. Diese wurden zunächst mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 11/2012 [ARS 11/2012, 2012] des BMVI bekannt gemacht und dann in die Fassung 2013 der [TL Bitumen-StB 07/13, 2007], [TL Asphalt-StB 07/13, 2007] und der [ZTV Asphalt-StB 07, 2007] eingeführt.

Damit bestehen bis auf weiteres erweiterte Prüfvorgaben an Bindemittelproduzenten und Asphaltmischguthersteller bezüglich der Produktüberwachung sowie an Straßenbaubehörden bezüglich der Kontrollprüfungen. Diese zusätzlichen Prüfungen stellen keine Anforderungen im vertraglichen Sinne dar, sondern sollen zur Erfahrungssammlung dienen und Verbesserungspotentiale aufzeigen, um somit die Dauerhaftigkeit der Asphalte positiv zu beeinflussen. Die Analyse von performance-orientierten Bindemitteluntersuchungen als auch die von Untersuchungen an konditionierten Bindemittelproben wird damit intensiviert. Mit dem FE-Projekt 29.0327/2013/BASSt sollen die Prüfdaten zentral gesammelt, in eine geeignete Datenbank mit entsprechendem Webserver eingebunden und statistisch ausgewertet werden.

Während der Laufzeit des Projektes wird eine Datenbank mit entsprechendem Webserver aufgebaut und betrieben. Nach Abschluss des Projektes werden die Datenbank und der Webserver der Bundesanstalt für Straßenwesen zur Verfügung gestellt. In dieser Datenbank werden die Basisdaten statistisch analysiert und ausgewertet. Neben der Plausibilitätskontrolle zur Vermeidung von Fehleingaben der eingespeisten Werte ist eine erweiterte Betrachtung

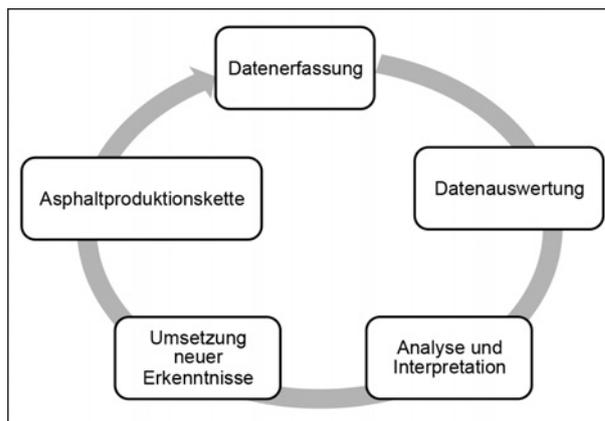


Bild 1: Gesamtziel des Forschungsprojektes

der Prüfungen gemäß den aktuellen Regelwerken möglich.

1.2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsprojektes ist es, einen aussagekräftigen und repräsentativen Bewertungshintergrund für die performance-orientierten Bindemittelprüfungen gemäß [DIN EN 14771, 2012] (BBR) und [DIN EN 14770, 2012] (DSR), nach der [AL MSCRT-Prüfung, 2012] (MSCRT) und den Prüfungen zur Kurzzeit- ([DIN EN 12607-1, 2007]) und Langzeitalterung ([DIN EN 14769, 2012]) sowie die gemäß den „Technischen Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen“ [TL Asphalt-StB, 2007] als „ist anzugeben“ gekennzeichneten Asphaltprüfungen (proportionale Spurrinnentiefe, Hohlraumausfüllungsgrad, dynamische Stempelpendringtiefe) zu ermitteln. Dadurch soll es ermöglicht werden, zweckmäßige Prüfkriterien zu erkennen und ggf. sinnvolle Grenzwerte für diese festzulegen.

Die Auswertung der Daten soll einerseits einen Aufschluss über die aktuelle Entwicklung der Bitumenqualität geben, andererseits sollen mögliche Schwachstellen im Prüfungssystem der Bindemittel- und Asphaltanalyse aufgedeckt werden, um diese bei Bedarf durch sinnvollere Prüfungen zu ersetzen. Das Gesamtziel des Projektes ist in Bild 1 schematisch dargestellt.

2 Methodik des Vorgehens

2.1 Beschaffung der Daten

Die Eingabe der zusätzlichen Kennwerte bei der Bindemittelherstellung erfolgt durch die Bindemittel-

lieferanten. Diese wurden vom Forschungsnehmer direkt sowie über die ARBIT (Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e. V.) zur Eingabe der Kennwerte aufgefordert. Bitumenlieferanten, die nicht der ARBIT angehören, wurden separat informiert.

Die bei der werkseigenen Produktionskontrolle anzugebenden zusätzlichen Bindemittelkenndaten werden durch die Mischguthersteller in die Datenbank eingefügt. Diese wurden vom Forschungsnehmer direkt und über den DAV (Deutscher Asphaltverband e. V.) und die FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.) zur Eingabe der Kennwerte aufgefordert.

Die ergänzenden Bindemittelkenndaten im Rahmen einer erweiterten Kontrollprüfung werden von den jeweiligen Auftraggebern in die Datenbank eingefügt. Sie wurden ebenfalls vom Forschungsnehmer

direkt und vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) zur Eingabe der Kennwerte aufgefordert.

Ebenso wurden auch die seit Inkrafttreten des ARS 11/2012 [ARS 11/2012, 2012] über die Internetseite der Bundesanstalt für Straßenwesen erfassten Bindemitteldaten in die Datenbank übertragen. Einen Überblick über die erforderlichen zusätzlichen Kennwerte bietet Tabelle 1.

Über die Mischguthersteller werden zusätzlich die gemäß [TL Asphalt-StB 07/13, 2007] bislang als „ist anzugeben“ gekennzeichneten Asphaltkennwerte beschafft. Die bereits vorliegenden Daten konnten wahlweise direkt in die Datenbank eingegeben werden oder dem Forschungsnehmer (beispielsweise in Form der Erstprüfung) zur Eingabe überlassen werden. Die Mischguthersteller wurden direkt und

	Straßenbaubitumen 30/45, 50/70, 70/100, 160/220	Polymermodifizierte Bitumen 25/55-55, 10/40-65, 40/100-65
Bindemittelherstellung Einmal je Quartal	<ul style="list-style-type: none"> - Erweichungspunkt Ring und Kugel bei frischem, RTFOT-gealterten und RTFOT- & PAV-gealterten Bindemittel - Nadelpenetration bei frischem, RTFOT-gealterten und RTFOT- und PAV-gealterten Bindemittel - DSR*²⁾- & MSCR-Prüfung*¹⁾ bei frischem Bindemittel ab [TL Asphalt-StB 07/13, 2007] - BBR-Analytik*³⁾ bei frischem Bindemittel 	
werkseigenen Produktionskontrolle a) alle 300 t b) alle 900 t bzw. mind. einmal jährlich ab einer Verbrauchsmenge von 50 t c) alle 1.500 t bzw. mind. einmal jährlich ab einer Verbrauchsmenge von 50 t	<ul style="list-style-type: none"> - Erweichungspunkt Ring und Kugel bei frischem Bindemittel (a) - Nadelpenetration bei frischem Bindemittel (a) - Erweichungspunkt Ring und Kugel bei RTFOT-gealterten und RTFOT- und PAV-gealterten Bindemittel (b) - Nadelpenetration bei RTFOT-gealterten und RTFOT- + PAV-gealterten Bindemittel (b) 	
		<ul style="list-style-type: none"> - DSR*²⁾- & MSCR-Prüfung*¹⁾ bei frischem Bindemittel *³⁾ - BBR-Analytik*³⁾ bei frischem Bindemittel (c)
Kontrollprüfung d) Empfehlung an AG bei Kontrollprüfung	<ul style="list-style-type: none"> - Erweichungspunkt Ring und Kugel bei frischem, RTFOT-gealterten und RTFOT- und PAV-gealterten Bindemittel (d) - Nadelpenetration bei frischem, RTFOT-gealterten und RTFOT- und PAV-gealterten Bindemittel (d) - DSR*²⁾- & MSCR-Prüfung*¹⁾ bei frischem Bindemittel (d) ab [TL Asphalt-StB 07/13, 2007] - BBR-Analytik*³⁾ bei frischem Bindemittel (d) 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Erweichungspunkt Ring und Kugel bei extrahiertem Bindemittel - Nadelpenetration bei extrahiertem Bindemittel - DSR*²⁾- & MSCRT-Prüfung*¹⁾ bei extrahiertem Bindemittel ab [TL Asphalt-StB 07/13, 2007] - BBR-Analytik*³⁾ bei extrahiertem Bindemittel 	
<p>*¹⁾ Angabe der Ergebnisse entsprechend [AL MSCR-Prüfung, 2012] *²⁾ Komplexer Schermodul und Phasenwinkel zwischen 30 und 90 °C (in Schritten von je 10 °C) *³⁾ Temperatur, bei der die Biegekriechsteifigkeit 300 MPa beträgt und der m-Wert bei dieser Temperatur</p>		

Tab. 1: Ergänzende Bindemittelprüfungen gemäß [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] bzw. [ARS 11/2012, 2012]

über den DAV und die FGSV zur Dateneingabe aufgefordert.

Dies betraf die folgenden Asphaltkenndaten:

- Hohlraumausfüllungsgrad für alle Walzasphalthe in Deck- und Binderschichten,
- dynamische Eindringtiefe für Gussasphalthe und
- proportionale Spurrinnentiefe für Walzasphalthe in S-Binder- und S-Deckschichten.

2.2 Auswertung der Daten

Aus den eingegebenen Daten wurde für jede Bindemittel- und Asphaltart für jeden Kennwert stets der Mittelwert, die Standardabweichung, die Varianz, die Kurtosis (Maß für die Wölbung der Häufigkeitsverteilung), die Schiefe (Maß für die Symmetrie der Häufigkeitsverteilung) und die Konfidenz (für ein festgelegtes Konfidenzniveau) berechnet.

Die statistischen Größen wurden für jeden Kennwert jeder Bindemittel- bzw. Asphaltart angegeben, um so diese zu charakterisieren und Aussagen über die Konstanz der Eigenschaften zu treffen. Auf Basis dieser statistischen Kennwerte wurden – beginnend nach der Eingabe der bereits vorhandenen Daten durch den Forschungsnehmer – über die Mittelwerte und die Konfidenzintervalle die erwarteten Spannen für die rheologischen Bitumenkennwerte (MSCR-Test, DSR- und BBR-Analytik) bzw. für die Asphaltkennwerte (Hohlraumausfüllungsgrad, proportionale Spurrinnentiefe bzw. dynamische Stempelindringtiefe) bestimmt. Diese dienten einer Plausibilitätskontrolle.

Bereits bekannte statistische Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen physikalischen Kennwerten oder statistische Bindemittelerhebungen wurden aufgegriffen, wie [Radenberg, et al., 2012], [Hagner, 2013], [Hirsch, 2007]. Vor allem Untersuchungen, die bei gleichen Prüftemperaturen durchgeführt werden, können Rückschlüsse über die verschiedenen Aussagen unterschiedlicher Prüfanalytik liefern bzw. über deren Gleichheit.

Die statistische Auswertung der einzelnen Kennwerte und die statistische Untersuchung der Zusammenhänge der unterschiedlichen Kenngrößen wurden genutzt, um darauf aufbauend aussagekräftige

Parameter zur Charakterisierung der Bitumen bzw. der Asphalthe vorzuschlagen.

Für die performance-bezogenen Asphaltkennwerte wurden auf Basis der erhobenen Daten überprüft, ob Vorschläge für Grenzwerte abgeleitet werden können.

2.3 Datenbank

Zum Speichern der Daten wurde eine relationale Datenbank eingesetzt. Der Vorteil von relationalen Datenbanken stellt sich in der Möglichkeit dar, Verweise zwischen einzelnen Spalten der Tabellen erzeugen zu können.

Durch diese Assoziation konnte einerseits eine doppelte Datenhaltung vermieden werden, andererseits konnten Konsistenzprüfungen auf Basis von Einschränkungen definiert werden. Dies gewährleistete bei einer hierarchischen Datenstruktur zu verhindern, dass referenzierte Zeilen entfernt werden, während die übergeordneten Elemente noch vorhanden sind.

Darüber hinaus unterstützte die hier eingesetzte Open-Source Software MariaDB (eine Weiterentwicklung der bekannten MySQL Datenbank) ein Transaktionsmanagement, was die Integrität der Datenbank zu jedem Zeitpunkt sicherstellte. Teilweise oder fehlerhaft übermittelte Datensätze wurden nicht geschrieben oder repariert.

3 Prüfverfahren

3.1 Allgemeines

Mit der Einführung neuer und komplexerer Anforderungen an die rheologischen Bindemittelleigenschaften (MSCR-Prüfung, DSR- und BBR-Analytik) wird eine umfassendere Charakterisierung der Gebrauchseigenschaften der Bindemittel erwartet.

Grundsätzlich haben die Gebrauchseigenschaften der Bindemittel einen unmittelbaren Einfluss auf die Gebrauchseigenschaften des Asphalthe. Somit könnten die Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen wichtige Erkenntnisse zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen liefern. Die Grundvoraussetzung hierfür ist eine hinreichend präzise Beschreibung der rheologischen Eigenschaften der Bindemittel.

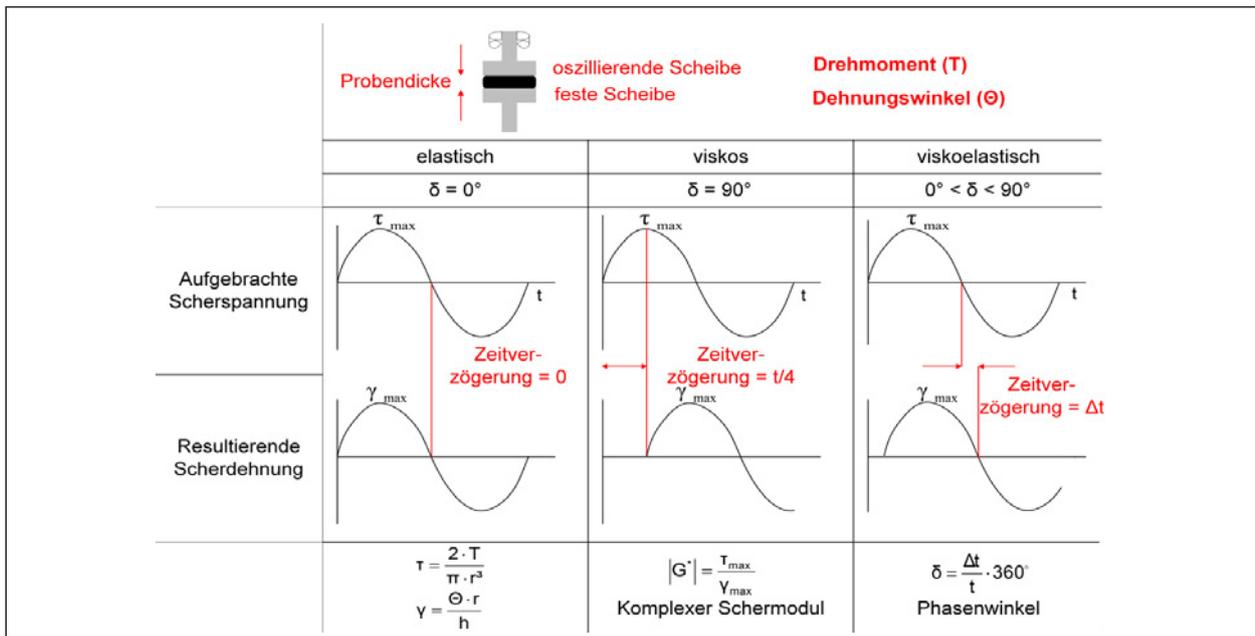


Bild 2: Beispielhafte Bestimmung des Phasenwinkels

Aus wissenschaftlicher Sicht ist die Schaffung eines repräsentativen Bewertungshintergrundes für die verschiedenen Bindemittelstationen (Produktion, Transport/Lagerung, Mischgutherstellung, Einbau) möglich. Anhand der Auswertung der einzelnen Parameter könnten darüber hinaus Defizite der einzelnen Prüfmethode identifiziert und ggf. Verbesserungsansätze aufgezeigt werden. Gleiches gilt für die Zusammenstellung der Prüfergebnisse des Asphaltbereichs.

3.2 Prüfverfahren Bindemittel

Neben den einfachen physikalischen Untersuchungsmethoden wie der Nadelpenetration nach [DIN EN 1426, 2007] und dem Erweichungspunkt Ring und Kugel nach [DIN EN 1427, 2007] (Standard-Kennwerten) haben in den vergangenen Jahren rheologische Untersuchungsverfahren zur Charakterisierung der Bindemittelleigenschaften an Bedeutung gewonnen. Speziell zur Beurteilung von modifizierten Bitumen – aber auch bei Straßenbaubitumen unterschiedlicher Provenienz, Herstellung oder Mischung – liefern diese Untersuchungsmethoden weitestgehende Ergebnisse über die Eigenschaften der Bindemittel.

Die Bestimmung der viskoelastischen Eigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln erfolgt primär mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR). Nach [DIN EN 14770, 2012] wird durch Aufbringung einer scheren Belastung mit einer harmonischen

sinusförmigen Schwingung zum einen die Phasenverschiebung zwischen Belastung und (zeitlich verzögerter) Dehnung (Phasenwinkel) definiert. Zum anderen kann durch die Betrachtung von Scherspannung und Verzerrung die Steifigkeit (komplexer Schermodul) ermittelt werden. Bild 2 zeigt die Bestimmung des Phasenwinkels.

Der Phasenwinkel ist ein Maß zur Quantifizierung der viskosen und elastischen Anteile des Bindemittels. Ein Phasenwinkel von 0° beschreibt ein ideal-elastisches Verformungsverhalten (vollständig reversible Verformungseigenschaften). Beträgt der Phasenwinkel 90° , liegt ein ideal-viskoses Verformungsverhalten vor. Der komplexe Schermodul stellt ein quantitatives Maß für den Widerstand gegen eine erzwungene Verformung dar. Beide, Komplexer Schermodul und Phasenwinkel bitumenhaltiger Bindemittel, sind in hohem Maße frequenz- und temperaturabhängig und werden gemäß TL Bitumen-StB 07 bei einer Frequenz von 1,59 Hz und Temperaturen zwischen 30 und 90°C (jeweils in Schritten von 10°C) ermittelt. Dabei wird eine Platte-Platte-Messgeometrie verwendet.

Zur Bestimmung der Kriechkomplianz (Nachgiebigkeit oder auch Kehrwert der Steifigkeit) und der prozentualen Erholung bitumenhaltiger Bindemittel wird mit dem DSR der Multiple Stress Creep and Recovery-Test (MSCRT) nach der „Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im DSR

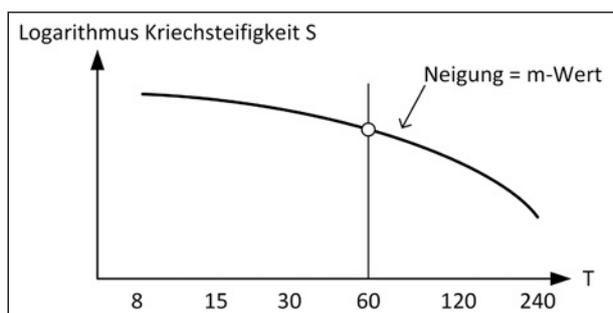


Bild 3: Beispielhafte Auswertung des BBR-Versuchs (Durchbiegung und m-Wert)

– Durchführung der MSCR-Prüfung“ [AL MSCR-Prüfung, 2012] durchgeführt. Durch die zyklische Be- und Entlastung der Bindemittelprobe und der Steigerung der Belastung in drei Stufen wird eine sukzessive Erhöhung der Verformung eingeleitet. Somit soll vergleichbar mit dem klassischen DSR-Versuch zum einen der Frage eines unterschiedlichen rheologischen Stoffverhaltens verschiedener Bindemittel gleicher Sorte nachgegangen werden, zum anderen soll der MSCRT Erkenntnisse zum Verformungsverhalten des Bitumens bei Wärme aufzeigen.

Im Rahmen amerikanischer Forschungsaktivitäten [Gierhart, 2011] wurden deutliche Korrelationen zwischen Spurbildung und verbleibender Bindemittelverformung im MSCRT festgestellt. Auf europäischer Ebene wurde im Jahr 2012 ein pränormativer Ringversuch mit 31 teilnehmenden Laboratorien durchgeführt. Im Nachgang zu diesem Ringversuch werden - abweichend von der [AL MSCR-Prüfung, 2012] - lediglich die Durchschnittswerte der Kriechkomplianz bei 0,1 kPa und 3,2 kPa sowie der prozentualen Erholung als Prüfergebnisse empfohlen. [European Round Robin MSCRT, 2013]

Zur Beurteilung des mechanischen Tieftemperaturverhaltens von bitumenhaltigen Bindemitteln wird die Prüfung mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) nach [DIN EN 14771, 2012] aufgeführt. Durch einen Dreipunkt-Biegeversuch wird bei diesem Messverfahren eine balkenförmige Bindemittelprobe bei einer konstanten Temperatur durch eine konstante Einzellast beansprucht. Aus der Durchbiegung des Balkens wird die Biegekriechsteifigkeit S und aus dem zeitlichen Fortschreiten der Durchbiegung der m -Wert als Maß für das Relaxationsverhalten berechnet. In Bild 3 ist die Auswertung des BBR-Versuchs beispielhaft dargestellt.

Gemäß den [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] ist die Temperatur anzugeben, bei der die Biegekriech-

steifigkeit nach einer Prüfzeit von 60 Sekunden 300 MPa beträgt. Zusätzlich ist der unter diesen Bedingungen (Temperatur und Zeit) festgestellte m -Wert anzugeben.

Während des Transportes, der Lagerung, der Mischgutproduktion, der Silierung oder dem Einbau ist das Bitumen Umwelteinwirkungen ausgesetzt, die zu strukturchemischen Veränderungen führen. Bereits diese als Kurzzeitalterung zusammengefassten Einwirkungen beeinflussen die chemische und physikalische Zusammensetzung des Bindemittels. Mittels Rolling-Thin-Film-Oven-Test (RTOT) nach [DIN EN 12607-1, 2007] werden diese Einflüsse auf das Bindemittel simuliert. Neben einer Dokumentation der Massenänderung werden an den so konditionierten Bindemitteln gemäß [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] die Änderung der physikalischen Parameter Nadelpenetration sowie Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt.

Während der Liegezeit unterliegt eine Asphalt-schicht den Einflüssen von Wetter und Verkehr. Aufgrund dessen schreitet der Alterungsprozess eines Bitumens im Asphalt stetig fort. Jedoch unterscheiden sich die Strukturveränderungen im Bitumen durch die geringeren Temperatureinwirkungen im Vergleich zur Mischgutproduktion oder zum Einbau. Diese sogenannte Langzeitalterung wird im Labor zeitraffend in einem Druckalterungsbehälter (Pressure Aging Vessel- PAV) nach [DIN EN 14769, 2012] simuliert. Die Veränderung des Bindemittels wird gemäß den [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] hier über die physikalischen Parameter Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel erfasst.

Zusätzlich wird aus den bestimmten Penetrationswerten und dem Erweichungspunkt der Penetrationsindex gemäß [DIN EN 12591, 2009] ermittelt. Die Berechnung des Penetrationsindexes beruht auf einer Hypothese von [Pfeiffer, et al., 1936] nach der die Penetration eines Bitumens bei der Temperatur des Erweichungspunktes ($800 \cdot 0,1$) mm beträgt und der Logarithmus der Penetration über der Temperatur eine Gerade darstellt. Der Penetrationsindex berechnet sich entsprechend dieser Annahmen aus dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Penetration bei 25°C .

3.3 Prüfverfahren Asphalt

Mit dem Spurbildungsversuch nach [DIN EN 12697-22, 2007] und [TP Asphalt-StB, Teil 22, 2007] wird der

Widerstand des Asphalttes gegen bleibende Verformung bestimmt. Durch die wiederholte Überrollung eines Asphaltprobekörpers mit einem vollgummibereiften Prüfrad in einem auf 60 °C temperierten Luftbad wird in der Rollspur eine Deformation erzeugt. Im Gegensatz zu der zuvor in Deutschland verwendeten Prüfeinrichtung mit Stahlrad im Wasserbad – für die bereits ein Bewertungshintergrund bestand – ist die Prüfeinrichtung nach [TP Asphalt-StB, Teil 22, 2007] praxisgerechter (z.B. kein Stripping-Effekt). Neben der absoluten Spurrinnentiefe (rut depth) wird die proportionale Spurrinnentiefe bezogen auf die Plattendicke (proportional rut depth) sowie ggf. die Spurbildungsrate (wheel tracking slope) als auf 10³ Lastzyklen bezogene Veränderung der Spurrinnentiefe als Ergebnis angegeben.

In den [TL Asphalt-StB 07/13, 2007] ist neben der proportionalen Spurrinnentiefe auch die Angabe des Hohlraumausfüllungsgrades nach [DIN EN 12697-8, 2003] als „ist anzugeben“ deklariert. Der Hohlraumausfüllungsgrad definiert sich durch das Bindemittelvolumen bezogen auf den fiktiven Hohlraumgehalt des Gesteinskörnungsgemisches. Die Betrachtung des Hohlraumausfüllungsgrades ermöglicht eine vertiefte Betrachtung der volumetrischen Asphalzzusammensetzung. [Arand, 2005] zeigt dazu beispielsweise, dass eine nachweisliche Korrelation zwischen Hohlraumausfüllungsgrad und Dauerhaftigkeit besteht. Dabei hatten sowohl kompositionelle Veränderungen des Mischgutes, als auch eine Änderung der Verdichtungsarbeit (beides führt zu einer Variation des Hohlraumausfüllungsgrades) Korrelationen zur Dauerhaftigkeit. Ergänzend wurde die Untersuchung von dynamischen Stempeleindringversuchen an Asphaltbetonzusammensetzungen analysiert. Dabei konnte ebenfalls ein quantitativer, positiver Einfluss des Hohlraumausfüllungsgrades auf den Verformungswiderstand bei Wärme aufgezeigt werden. [Schellenberger, 2002] weist ferner auf den Einfluss des Hohlraumausfüllungsgrades auf die Griffbarkeit hin.

Die quantitative Beurteilung des Verformungsverhaltens von Gussasphalt erfolgt in Deutschland anhand des statischen Stempeleindringversuchs nach [TP Asphalt-StB, Teil 20, 2007]. Aufgrund der geringen Differenzierbarkeit ist dieses Verfahren gemäß [Steinauer, et al., 2007] erst bei größeren Eindringtiefen als sinnvoll zur Beurteilung der Gussasphalte anzusehen. Zur Beurteilung besonders verformungsresistenter Gussasphalte wird daher die dynamische Stempeleindringtiefe nach [TP Asphalt-StB, Teil

Kategorie	Beanspruchung durch		ET _{dyn}
	Verkehr	Klima/Lage	[mm]
1	Langsam rollender bis stehender Schwerverkehr (Stauraum, Steigung / Gefälle)	Extrem warme Sommer, lange direkte Sonneneinstrahlung, milde Winter	≤ 1,5
2	Rollender Verkehr auch mit hohem Anteil an Schwerverkehr	warme Sommer mit direkter Sonneneinstrahlung, milde Winter	≤ 2,5
3	Rollender Verkehr mit geringem Anteil an Schwerverkehr	mäßige Temperaturen, kurze Sonneneinstrahlung, kalte Winter, Höhenlage	≤ 5,0

Tab. 2: Richtwerte für die dynamischen Eindringtiefen

25A1, 2009] empfohlen. Zur Überprüfung der Aussagekraft der dynamischen Stempeleindringtiefe hat [Schellenberg, 2009] die Spurrinnentiefe auf Brückenbelägen mit unterschiedlich zusammengesetzten Gussasphalten erfasst und mit den an identischen Gussasphaltproben bestimmten dynamischen Eindringtiefen verglichen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,893 ist ein statistischer Zusammenhang erkennbar. Bis zur normativen Bewertung der dynamischen Eindringtiefe geben die Richtwerte nach [Schellenberg, et al., 2000] Anhaltswerte zur Beurteilung des Gussasphalts (siehe Tabelle 2).

4. Statistische Auswertung

4.1 Plausibilitätskontrolle

Vor der eigentlichen Auswertung der Daten fand eine detaillierte Plausibilitätskontrolle der Datensätze statt. Dabei wurden alle Daten auf logische Fehler sowie Eingabefehler untersucht.

Logische Fehler sind dabei zum Beispiel das Ansteigen der Nadelpenetration nach Alterung. Eingabefehler sind zum Beispiel Zahlendreher beim Abtippen der Daten in die Formblätter.

Konnten die Fehler eindeutig identifiziert werden, so wurden sie nach Möglichkeit behoben. Dies erfolgte durch Korrektur der Zahlendreher oder Neuuzuordnung zur richtigen Bindemittelsorte, falls diese eindeutig falsch im Formblatt angegeben war.

War ein Datensatz nicht plausibel und konnte der Fehler nicht behoben werden, weil er nicht mit aus-

reichender Sicherheit identifiziert wurde, wurde dieser Datensatz bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt.

4.2 Box-Whisker-Plots

Die statistische Bewertung der Bitumendaten wurde mithilfe der Software Statistica durchgeführt. Dazu wurden sogenannte Box-Whisker-Plots erstellt.

Im Box-Whisker-Plot wird der Median als kleines Quadrat dargestellt (Bild 4). Der Bereich, in dem sich 25 % bis 75 % der Daten befinden, der sogenannte Quartilsbereich, wird als Box dargestellt. Die Länge dieser Box ist der Interquartilsabstand (IQR). An den Quartilsbereich schließen sich die Whisker an, die als T dargestellt werden und die übrigen Daten umfassen, die nicht als Ausreißer deklariert wurden.

Statistische Ausreißer werden standardmäßig durch den Koeffizienten 1,5 definiert. Dies bedeutet, dass alle Datensätze, die um mehr als das 1,5-fache von IQR von der Box entfernt liegen als Ausreißer definiert werden. Diese werden mit einem kleinen Kreis markiert. Extremwerte hingegen liegen mehr als das 3-fache des IQR von dem Quartilsbereich entfernt und werden mit einem * markiert.

4.3 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik wurde in tabellarischer Form zusammengefasst. Diese beinhaltet die Angaben zum Mittelwert, der Standardabweichung, der Varianz, der Schiefe und der Kurtosis sowie dem Konfidenz des Mittelwertes bei einem 95 %-Niveau.

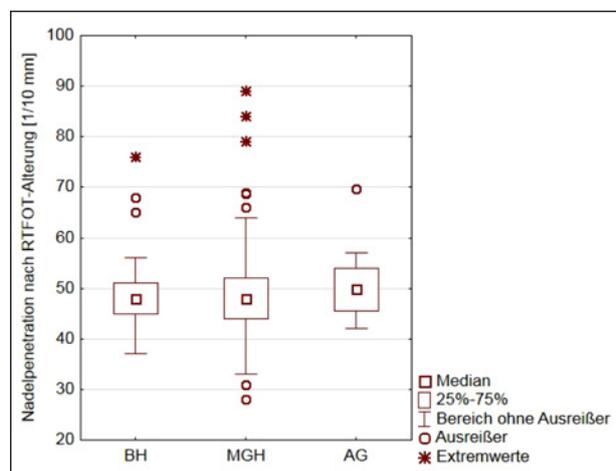


Bild 4: Beispiel für ein Box-Whisker-Plot

5. Datenverteilung

Das abgefragte Datenkollektiv teilte sich in Straßenbaubitumen der Sorten 30/45, 50/70, 70/100 und 160/200 sowie der polymodifizierten Bitumensorten 10/40-65, 25/55-55 und 40/100-65 auf.

Neben diesen in den [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] aufgeführten zu prüfenden Bindemitteln wurden auf freiwilliger Basis Datensätze zu dem Straßenbaubitumen 20/30 und dem polymermodifizierten Bindemittel 45/8050 geliefert. Die gelieferte Datenmenge bei diesen Bindemitteln ist jedoch im Vergleich zu der Datenmenge für die nach [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] zu prüfenden Bindemitteln sehr gering gewesen.

Teilweise waren die Datensätze mit dem Hinweis auf eine Modifizierung versehen. Nicht in allen Fällen war jedoch erkennbar, welche Modifizierung vorlag. Unabhängig von der Art der Modifizierung wurden diese Bindemittel bei der Auswertung als „modifiziert“ geführt und separat von den übrigen Datensätzen betrachtet.

Bis zum letzten Export des Datensätze im Rahmen dieses Projektes sind 8.844 Datensätze eingegan-

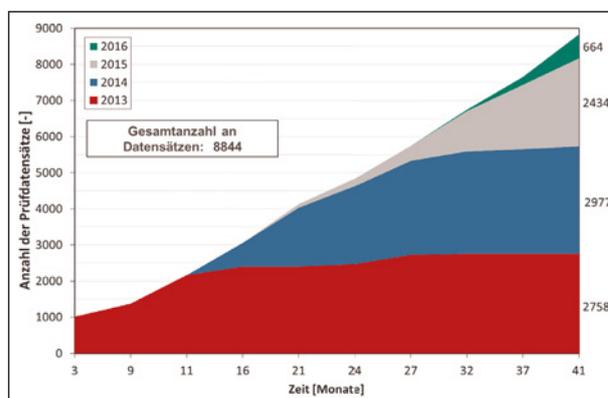


Bild 5: Datenvolumenentwicklung

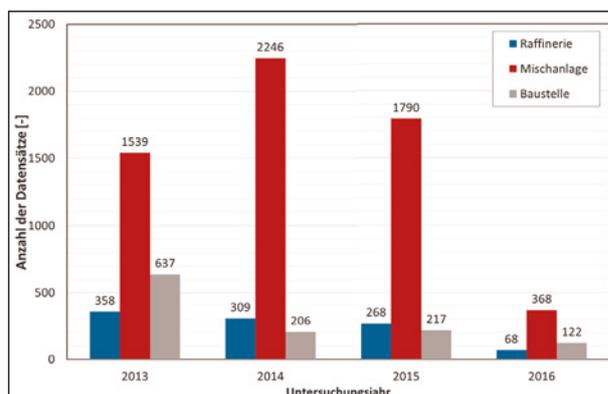


Bild 6: Aufteilung der Datensätze in Quellen

gen. In Bild 5 ist die Datenvolumenentwicklung über die Projektlaufzeit dargestellt.

Der Hauptteil der Daten wurde von Mischgutherstellern geliefert. Die genaue Aufteilung des Datenvolumens unterteilt nach den drei Quellen Bindemittelhersteller (Raffinerie“BH“), Mischguthersteller (Mischanlage, „MGH“) und Auftraggeber (Baustelle, „AG“) ist in Bild 6 dargestellt.

6 Informationstechnische Umsetzung

6.1 Überblick

Die Umsetzung der Webanwendung zur Erfassung von Datensätzen erfolgte mittels einer Drei-Schichten-Architektur (Bild 7). Sie gliederte sich dabei in Datenhaltung, Fachkonzept und Präsentationsschicht. Durch dieses Abstraktionsniveau wurde ein modularer Aufbau der Applikation gewährleistet. Die Entwicklung der Datenbank und zugehörigen Anwendungskomponenten basierte auf dem Wasserfallmodell der Softwaretechnik. Hierzu gehörten im Rahmen dieses Projektes die Phasen Anforderungsspezifikation, Systemdesign, Programmierung, Modultests, Integrationstests und Systemtest.

6.1.1 Datenhaltung

Die Datenhaltungsschicht wurde unter Verwendung des Datenverwaltungssystem MariaDB umgesetzt. MariaDB basiert auf dem Datenbankverwaltungssystem MySQL der Firma Oracle Corporation und kann wahlweise unter MS Windows und diversen Linux-Systemen betrieben werden.

Zum Entwurf der Datenbank wurde zunächst ein geeignetes Entity-Relationship-Modell erstellt, welches als Basis für die Umsetzung diente. Das Schema (Struktur der Datenbank) basierte auf einem relationalen Datenmodell, welches Beziehungen zwischen Einträgen darstellte. So ließ sich z.B. eine

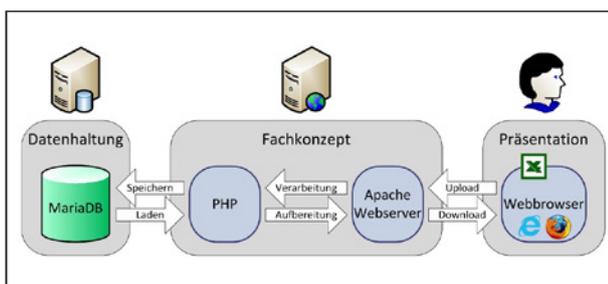


Bild 7: Drei-Schichten-Architektur

einfache Assoziation zwischen einem übertragenen Datensatz und dem übermittelnden Benutzer herstellen und die Konsistenz der Datenbank wurde durch erweiterte Regeln gesichert. Ein Eintrag ohne zugewiesenen Benutzer war nicht möglich, genauso wenig, wie spezielle Testeinträge zu entfernen, solange der übergeordnete Probeneintrag diese noch referenziert.

Um den Zugriff auf die Datenbank weitgehend einzuschränken, besaß nur die Fachkonzeptschicht die erforderlichen Zugriffsrechte, um Änderungen vorzunehmen. Ein direkter Zugriff auf die Datenbank von außen, der über das MySQL-Protokoll möglich gewesen wäre, war ausgeschlossen, da der Server nur Verbindungen vom selben Rechner annahm. Für eine eventuelle spätere Auslagerung der Datenbank auf einen physikalisch separaten Rechner ist die Einschränkung mittels IP-basierter Whitelist möglich.

6.1.2 Fachkonzept

Die Fachkonzeptschicht kümmert sich um die logische Verarbeitung von Anfragen des Nutzers und kommunizierte mit der Datenhaltungsschicht. In ihr wurden die Validierung der Datensätze, das Session- und Transaktionsmanagement, administrative Aufgaben, die statistische Auswertung, die Rechteverwaltung und die Generierung von Inhalten für den Nutzer verarbeitet.

Als zentraler Grundbaustein diente der Apache HTTP-Server, welcher der meistgenutzte Webserver im Internet war. Er diente als zentrale Kommunikationsplattform gegenüber den Nutzern, die das System bedienen. In der vorgenommenen Konfiguration nahm Apache nur verschlüsselte Verbindungen über das SSL/TLS (Secure Sockets Layer / Transport Layer Security) Protokoll HTTPS an. Um die Anwendungslogik zu realisieren, bediente sich die Applikation des Präprozessors PHP. PHP-Skripte werden vor der Auslieferung an den Benutzer verarbeitet und bieten ein breites Spektrum an Möglichkeiten, wie z.B. die objektorientierte Programmierung, die auch als Grundlage für dieses Projekt diente.

Um das Kernkonzept Wiederverwendbarkeit der Softwareentwicklung zu berücksichtigen, bestand die Anwendung im Kern aus dem PHP Framework Symfony2, welches dem Model-View-Controller (MVC)-Schema folgt. Bei dem Design nach

MVC-Prinzip wurde das Datenmodell (Model), die Präsentation der Daten (View) und die Steuerung (Controller) der Applikation voneinander getrennt. Dies ermöglichte das Datenmodell unabhängig von View oder Controller in anderen Anwendungen zu verwenden und mit wenigen Anpassungen zu erweitern. Gegenseitige Abhängigkeiten wurden auf ein Minimum reduziert.

Symfony2 brachte eine Reihe von integrierten Bibliotheken und Features mit, die Entwicklern und Nutzern des Systems die Benutzung erleichtern:

- dynamische Anwendungskonfiguration, je nach Einsatzzweck (Entwicklungsumgebung/Produktiveinsatz),
- objektrelationale Abbildungsschicht, die auf Basis des Modells die Datenbankstruktur verwaltet,
- Dynamisches Routing von Anfragen/Clean Uniform Resource Locators (URLs),
- Template Engine auf Basis von Twig (View),
- Hilfsskripte für Formulare und Anfragen,
- Schadcodefilterung für Eingabebelemente,
- Sitzungsverwaltung (Session-Management) und Benutzerverwaltung,
- Caching der zu übermittelnden Daten für schnellere Webseitenabfrage,
- Konsolenanwendung zur Wartung und Installation und
- dynamische Erweiterbarkeit der Installation mit Plugins (Bundles).

Symfony2 stand unter der MIT-Lizenz und war für jeden Einsatzfall (kommerziell/akademisch/privat) kostenfrei und Open-Source.

Die Assoziation zwischen den Klassen des Modells und der Datenhaltung erfolgte durch den Einsatz der objektrelationalen Abbildungsschicht (Doctrine Projekt). Dabei wurde aus zusätzlichen Informationen (Annotations) in der Quelltextdatei des Modells Kenntnis über die zu kontaktierende Datenbank gewonnen. Auf Basis dieser Strukturinformationen konnte die Datenbank auch von Symfony2 selbst erstellt und inkrementell aktualisiert werden. Dabei wurden der Ist- und Soll-Zustand des Schemas abgeglichen und die notwendigen Änderungen mit SQL-Abfragen im System durchgeführt. Während der Entwicklungsphase wurde dieses Werkzeug ohne Probleme eingesetzt. In der Datenbank bereits befindliche Daten wurden nach Möglichkeit beibehalten. Bei großen Strukturänderungen war ein Verlust von Datensätzen aber nicht ausgeschlossen. Ein großer Vorteil beim Einsatz dieses Systems war, dass Doctrine eine Konsistenz zwischen Modell und Datenhaltung herstellt und bei der Wartung ein Schritt für den Administrator entfällt, falls die Struktur modifiziert werden muss.

Das dritte Element zur Komplettierung des MVC-Schemas war die Template-Engine Twig. Ein Template ist eine vordefinierte Schablone, die mit Inhalt gefüllt werden kann, wie hier mit Daten aus dem Modell. Twig ermöglichte den Einsatz von verschiedenen Programmierschlüsselwörtern zur Verschachtelung, Schleifenverarbeitung und Verzweigung innerhalb eines Templates. So war es möglich über mehrere Datensätze mit einer Schleife zu iterieren und Programmcode einzusparen. Die Vererbung und Erweiterung von Templates ermöglichte die zentrale Definition gemeinsamer Strukturele-

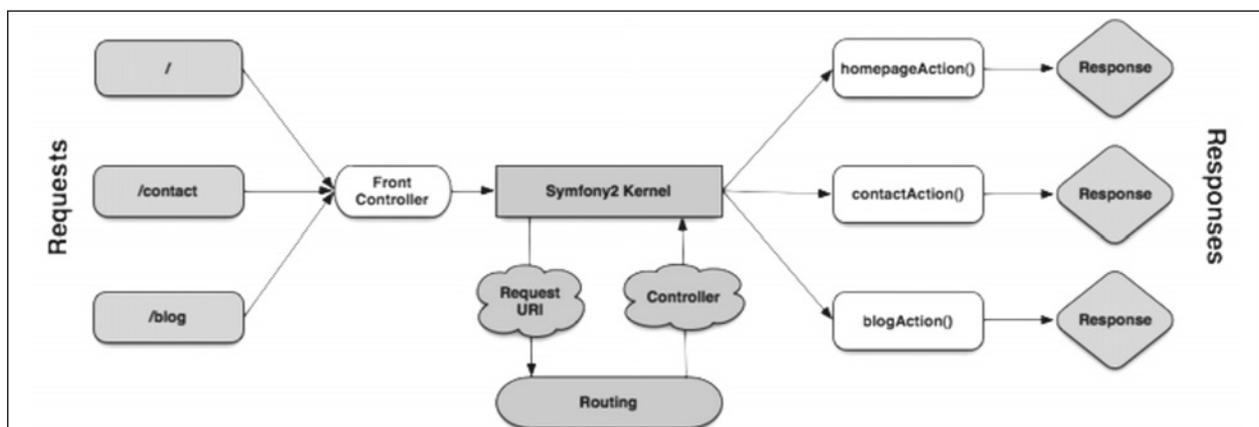


Bild 8: Verlauf einer Abfrage (Request) bis zur Antwort (Response) [Quelle: symfony.com]

mente im Document Object Model (DOM) der Ausgabedatei.

Der Lebenszyklus einer Anfrage im Symfony Framework ist in Bild 8 dargestellt.

Der Symfony Kernel kümmerte sich um die korrekte Zuordnung von Anfragen zu definierten Routen. Eine Route ist in Symfony einem Controller zugeordnet, der die zentrale Komponente bei der Logikverarbeitung darstellt. Innerhalb dieses Controllers konnten verschiedene URLs abgearbeitet werden. Auf eine Anfrage (Request) vom Benutzer erfolgte immer eine Antwort (Response), die mit Inhalt gefüllt werden oder nur einen Statuscode zurückgeben konnte. In den meisten Fällen bestanden Antworten aus HTML-Dokumenten, welche durch Twig aufbereitet wurden. Es konnten aber für dynamische Anfragen innerhalb einer Seite, die mit JavaScript durchgeführt wurden, auch Dokumente in der JavaScript Object Notation (JSON) oder der eXtensible Markup Language (XML) ausgeliefert werden.

6.1.3 Präsentationsschicht

Im Gegensatz zu einer Desktop-Anwendung, die direkt auf dem lokalen Betriebssystem des Benutzers läuft, liegt bei einer Web-Anwendung die Präsentationsschicht im Webbrowser. Während eine betriebssystemunabhängige Anzeige möglich ist, muss jedoch berücksichtigt werden, dass Webbrowser unterschiedlicher Hersteller Webseiten ggf. anders darstellen. Auch in Bezug auf die Ausführung von JavaScript-Quelltext gibt es einige Unterschiede. Durch die inzwischen weite Verbreitung von aktiven Webseiteninhalten interpretieren jedoch die neueren Versionen weitestgehend standardkonform den

ausgelieferten Code. Ältere Browserversionen haben unter Umständen Probleme, sollten jedoch im Produktiveinsatz durch das Vorhandensein von Sicherheitslücken nicht mehr eingesetzt werden.

Die Symfony2 Webanwendung benutzte JavaScript-Funktionen, die ab Internet Explorer 10 (April 2011), Firefox 4.0 (2011), Chrome 7 (Oktober 2010), Safari 5 (Juni 2010) und Opera 12 (Juni 2012) zur Verfügung standen.

Zentrale Elemente der Präsentationsschicht wurden über Cascading-Stylesheets (CSS) mit visuellen Eigenschaften versehen (Farbe, Position, Textformat, etc.).

Dass im HTTP-Protokoll jede Abfrage ein Neuladen der Seite bewirkte, musste bei der Erstellung von Webanwendungen besonders berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Desktop-Anwendungen war eine durchgehende Bedienung ohne Laden einer Webseite nur mit JavaScript Funktionen möglich. Hierfür setzt die Webapplikation auf sogenannte XMLHttpRequests (XHR). XHRs stellten asynchrone Verbindungen im Hintergrund dar, die zur Abfrage von weiteren Informationen oder zum persistieren von Benutzeränderungen dienen konnten. Mit der XHR2 Spezifikation des World Wide Web Consortium (W3C) wurden auch asynchrone Dateiübertragungen ermöglicht.

Bild 9 zeigt eine Beispielanfrage auf die relative URL „/index“. Zunächst kümmerte sich der Webserver um die Aufbereitung von Inhalten (inkl. eventuell auszuführender PHP-Skripte) und übermittelte die Antwort dem Browser des Benutzers. An dieser Stelle war das herkömmliche Laden von Webseiten abgeschlossen. Klickte der Benutzer nun auf ein Element, das einen JavaScript Code hinterlegt hat, konnte eine asynchrone XHR Anfrage gestellt werden. Der Webserver verarbeitete diese Anfrage wie das Laden einer normalen Webseite. Für den Benutzer wurde dies aber nicht ersichtlich, da die Anzeige der Seite, auf der er sich befand, nicht aktualisiert wurde. Im Hintergrund konnte mit der Antwort des Requests nun das DOM der Webseite dynamisch modifiziert werden.

Um die JavaScript-Programmierung und die Kompatibilität zwischen verschiedenen Browserversionen zu verbessern, wurde bei diesem Projekt die Open-Source JavaScript-Bibliothek jQuery eingesetzt, welche auch XHR unterstützt.

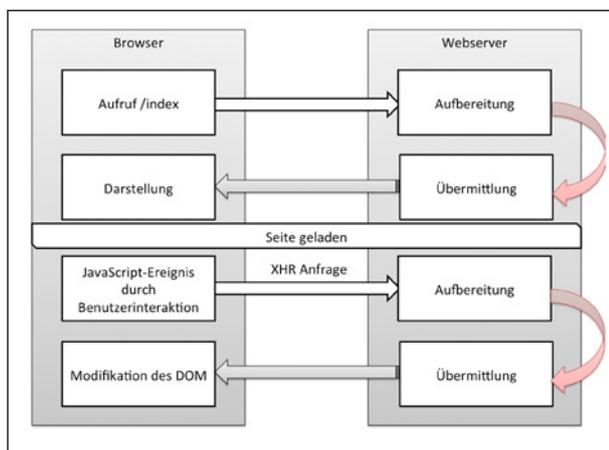


Bild 9: Aufruf einer Webseite und XHR

6.2 Implementierung und Bedienung

Das auf den Excel-Formblättern basierende Datenbankschema ist die Grundlage der Webapplikation. In der Anforderungsanalyse wurden drei verschiedene Datengrundlagen für Bindemittel und eine für die Asphaltkosten festgelegt.

Die allen Bindemittel-Formblättern gemeinsamen Daten wurden in die SQL-Tabelle „Bindemittel“ ausgelagert. Für frisches, kurzzeit- und langzeit-gelagertes und rückgewonnenes Bindemittel wurde jeweils eine eigene Tabelle angelegt, die mittels Relationen auf ihr Eltern-Element aus der Bindemittel-Tabelle verweist. Für DSR-Ergebnisse und MSCR-Ergebnisse wurden ebenfalls getrennte Tabellen verwendet, wobei jeweils ein DSR- bzw. MSCR-Metaelement unbegrenzt viele konkrete Messwerte vorhalten konnte, falls eine spätere Erweiterung der Testanforderung notwendig würde. Da die Einträge mit einem spezifisch kodierten Schlüssel versehen wurden, wurde eine Schlüsselassoziiertabelle angelegt, die einer spezifischen Arbeitseinheit (hier Firma genannt) einen oder mehrere Schlüssel zuweisen konnte. Benutzer haben eine Assoziation zu einer Firma und sehen die Einträge der anderen Mitarbeiter.

Für die Asphaltkosten reichte eine Tabelle, welche die Werte direkt vorhielt. Sollte eine Erweiterung notwendig sein, so könnte eine Änderung leicht über die in Symphony2 enthaltenen Bordmittel durchgeführt werden.

Die Benutzer-Tabelle diente auch zum Assoziieren mit dem Sitzungs-Management von Symphony2 und enthielt die Rollenzuweisung. Wären weitere Rollen notwendig, so könnte die Symphony Konfiguration erweitert und der Zugriffsschutz angepasst werden.

Für noch nicht registrierte Benutzer war eine einmalige Registrierung am System notwendig. Der Benutzer erhielt daraufhin eine Rolle vom Typ „ROLE_USER“, die ihm keine Berechtigungen einräumten, außer sich einzuloggen. Ein Mitglied der Gruppe „ROLE_BUND“ oder „ROLE_ADMIN“ musste daraufhin die Zuweisung in die entsprechende Gruppe vornehmen. Symphony überprüfte die Berechtigungen beim Zugriff auf verschiedene Pfade des Systems. Über eine Security-Konfiguration konnten bestimmte Bereiche nur einer oder mehreren Benutzergruppen zugewiesen werden, z. B. für das Benutzermanagement. Alle Anmeldedaten wurden verschlüsselt über das HTTPS Protokoll übertragen.

Für das vom Benutzer festgelegte Passwort wurde ein sogenannter „Salt“ erstellt und an das eigentliche Passwort angehängt. Dies ermöglichte die Abwehr eines Angriffvektors, der mit vorberechneten Passwort-Hashes arbeitete. Das eigentliche Hash-Verfahren (Einweg-Verschlüsselung) wurde mit dem bcrypt-Algorithmus durchgeführt. Dieser ermöglichte eine dynamische Aufwandseinstellung. Während viele Hashing-Algorithmen für den Einsatz in mobilen Geräten hinsichtlich Energieeffizienz und Geschwindigkeit optimiert sind (z. B. für die Verwendung von Drahtlosnetzwerken), ist bcrypt absichtlich langsamer. Dies verhindert, dass Angreifer alle möglichen Passwörter mit vertretbaren Kosten durchprobieren können.

Nach der Registrierung und Freischaltung des Benutzers konnten Excel-Formblätter über das Online-System hochgeladen werden. Auf den ersten Aufruf der Seite folgend konnte ein ausgefülltes Excel-Formblatt übertragen werden. Dies erfolgte mittels der erwähnten XHR-Methodik, um dem Nutzer direkte Rückmeldungen auf seine Aktionen und die Validierung der Formblätter geben zu können. Außerdem wurde durch den Verzicht auf herkömmliche HTML-Formulare das Risiko minimiert, dass der Benutzer über den „Zurück“-Knopf des Browsers oder die „Seite aktualisieren“-Funktion eine erneute Übermittlung von Datensätzen anstößt.

Nach der Auswahl und Übermittlung des Formblattes, wurde dieses, sofern die Daten korrekt waren, in die Datenbank geschrieben und diesem Benutzer zugewiesen. Konnten noch weitere Daten wie DSR/MSCR-Ergebnisse, Erstprüfungen (als PDF)



Bild 10: Verarbeitung von Datensätzen

Bindemittel	Hochgeladen am	Probenbezeichnung	Schlüssel	Bitumensorte	Probenahme
	23.06.2014 16:11:27		DE44_AA_12_139	30/45	2013
	23.06.2014 16:11:27		DE44_AA_12_138	25/55	2013
	23.06.2014 16:11:27		DE44_AA_12_136	25/55	2013
	23.06.2014 16:11:27		DE44_AA_12_135	30/45	2013
	23.06.2014 16:11:27		DE44_AA_12_134	50/70	2013
	23.06.2014 16:11:27		DE44_AA_12_133	30/45	2013

Bild 11: Liste aller Uploads (Details verfremdet)

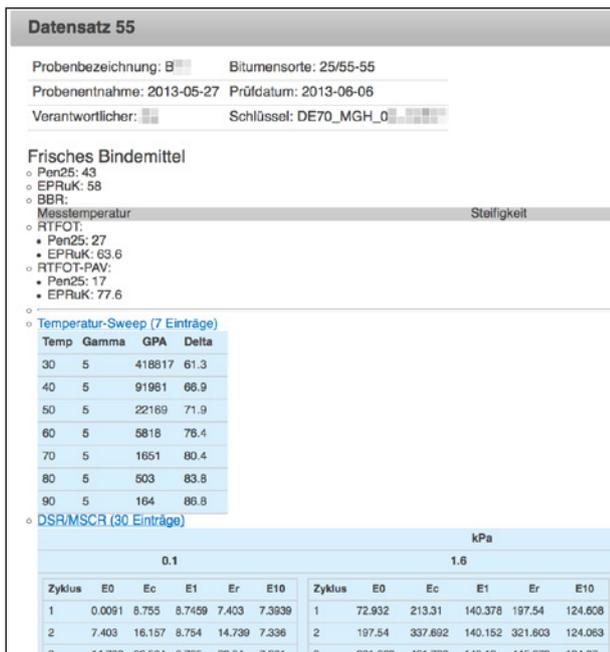


Bild 12: Detailseite eines Eintrags



Bild 13: Eintrag ohne DSR/MSCR-Daten



Bild 14: „Passwort ändern“-Funktion

oder Kontrollprüfungen (als PDF) übermittelt werden, so wurde dies direkt neben jedem verarbeiteten Datensatz angezeigt (Bild 10).

Falls ein oder mehrere Zeilen Fehler enthielten, so wurde dies deutlich signalisiert. Nach Abschluss der Zuweisung der zusätzlichen Dateien konnte das

Formblatt noch einmal hochgeladen werden. Bereits existierende Einträge, die die gleiche Probenbezeichnung und den gleichen Schlüssel und das gleiche Prüfdatum enthielten, wurden abgewiesen. So wurde nur die Differenz der Menge des letzten Uploads und des derzeitigen in die Datenbank geschrieben. Ohne die Verwendung von XHR wäre diese Methode stark fehleranfällig und für den Benutzer nicht bedienerfreundlich.

Nach dem erfolgreichen Upload konnten Einträge wieder abgerufen werden (Bild 11).

Auf der Detailseite jedes Eintrages konnten jeweils gespeicherten Informationen leicht eingesehen werden (Bild 12). Die zugehörigen DSR/MSCR-Werte wurden hier ebenfalls aufgelistet, falls für diesen Eintrag verfügbar.

Wurde für einen Bindemittel-Datensatz noch kein DSR/MSCR-Eintrag hochgeladen, so war es dem Benutzer, der diesen Eintrag erstellt hatte, oder einem Administrator, möglich dies nachträglich noch über die Detailseite durchzuführen (Bild 13).

Auch eine Basisfunktionalität für den einfachen Abruf von Excel-Dokumenten der hinterlegten Datensätze war möglich. Dies gestattete Administratoren einen schnellen Überblick über die Gesamtmenge aller Uploads zu erhalten. DSR- und MSCR-Daten wurden innerhalb der Datenblätter verknüpft und sind anklickbar.

Auf der Profilsseite war für jeden Benutzer einsehbar, welcher Gruppe er zugeordnet ist. Außerdem ermöglichte diese eine Änderung des derzeitigen Passworts unter derzeit angebrachten Passwortrichtlinien (Bild 14).

Den Administratoren standen verschiedene Funktionen zur Verfügung, um Aktualisierungen im System durchzuführen.

6.2.1 Benutzerverwaltung

Mittels der Benutzerverwaltung (Bild 15) konnten registrierte Benutzer einer oder mehreren Gruppen zugewiesen werden. Je nach vergebener Berechtigung waren unterschiedliche Bereiche des Systems gesperrt oder Funktionalitäten eingeschränkt. Eine Zuweisung des Benutzers zu eingetragenen Firmen war ebenfalls möglich, sowie die Sperrung oder Bearbeitung von Details.

ID	E-Mail	Name	Firma	Aktionen
5	test.user@rub.de	Test User	BASt	Bearbeiten Sperrt

Bild 15: Benutzerverwaltung

ID	Name	Anschrift	Land
1	Ruhr-Uni Bochum	Universitätsstr. 150	Deutschland
4	Testfirma	Testanschrift 123	Testland

Bild 16: Firmenverwaltung

6.2.2 Firmenverwaltung

Da Einträge innerhalb einer Firma für alle anderen Benutzer dieser Firma sichtbar waren, wurde auch eine Firmenverwaltung (Bild 16) integriert, um eine leichte Erstellung von entsprechenden Einträgen zu ermöglichen. Nach Anlegen einer Firma konnte diese einem oder mehreren Benutzern zugewiesen werden.

6.2.3 Schlüsselverwaltung

Für die Verschlüsselung von Datensätzen wurde ein Pool aus Herstellerschlüsseln generiert, der entsprechenden Firmen zugewiesen wurde. Über die Schlüsselverwaltung hatte ein Administrator die Möglichkeit diese Schlüssel einer Firma zuzuweisen. Im späteren Live-Betrieb wurde geprüft, ob es einem registrierten und freigeschalteten Benutzer erlaubt war, einen Eintrag mit diesem Schlüssel hochzuladen. Dadurch sollte verhindert werden, dass Benutzer die Schlüssel von anderen Benutzern mit ihren Einträgen belegen konnten.

6.2.4 Verschlüsseln von Datensätzen

Um die gewünschte Anonymisierung von Datensätzen in der Datenbank zu gewährleisten, wurde ein System zur Verschlüsselung einzelner Einträge entwickelt, welches aus zwei Komponenten besteht:

Einerseits hatte die Ruhr-Universität Bochum einen Pool von 20.000 numerischen Herstellerschlüsseln generiert, aus dem das System einen oder mehrere Einträge zufällig auswählte. Somit war es möglich aus den Einträgen zu schließen, dass eine Probe von einem bestimmten Hersteller stammt, ohne jedoch auf die konkrete Firma schließen zu können.

Andererseits wurde ein Gesamtschlüsselformat definiert, das zur Kategorisierung von Einträgen

PLZ	Typ	Lieferant	Hersteller
DE44	MGH	20	12345

Tab. 3: Schlüsselformat

diente. Das Format gliederte sich dabei in vier Teile (Tabelle 3), welche jeweils durch einen Unterstrich separiert sind.

Der zu dieser Tabelle zugehörige Schlüssel wäre:

DE44_MGH_20_12345

Die Postleitzahl gliederte sich in den zweistelligen internationalen Ländercode, gefolgt von den ersten zwei Stellen der Postleitzahl, um eine grobe geographische Zuordnung treffen zu können.

Als Typ kamen einerseits „MGH“ für Mischguthersteller, „BH“ für Bindemittelhersteller sowie „AG“ für Auftraggeber in Frage. Beim Auftraggeber benötigten die Daten aus rückgewonnenem Bindemittel keinen Schlüssel.

Die detaillierte Anleitung zur Erstellung der Schlüssel ist im Anhang A (Tabelle A 40) zu finden.

7 Datenauswertung

7.1 Standard-Kenndaten

Die Straßenbaubitumen und die polymermodifizierten Bitumen wurden zunächst gemäß Kapitel 4 anhand der Ergebnisse der konventionellen Bindemitteluntersuchungen statistisch bewertet und auf die Einhaltung der Anforderungsgrenzen überprüft. Die Ergebnisse für die verschiedenen Bitumensorten werden nachfolgend dargestellt und sind zusätzlich in tabellarischer Form dem Anhang A zu entnehmen (Tabelle A 1 bis Tabelle A 34).

Die polymermodifizierten Bitumen werden im Folgenden ohne Polymerbezeichnung (hier: A für elastomermodifiziert) dargestellt, da keine Ergebnisse für plastomermodifizierte Bitumen eingegangen sind.

7.1.1 Bitumensorte 20/30

Da die Eingabe von Datensätzen in die Datensammlung für das Straßenbaubitumen 20/30 auf freiwilligen Angaben basierte, stand zur Bewertung der Bitumensorte ein sehr geringer Datensatz zur Ver-

fügung. Für das Untersuchungsjahr 2014 wurden lediglich sechs gültige Datensätze erfasst, davon wurde einer von einem Bindemittelhersteller und die übrigen fünf von Mischgutherstellern geliefert. Für das Jahr 2015 wurden keine gültigen Datensätze geliefert. Die tabellarische statistische Bewertung ist im Anhang in Tabelle A 1 und Tabelle A 2 dargestellt.

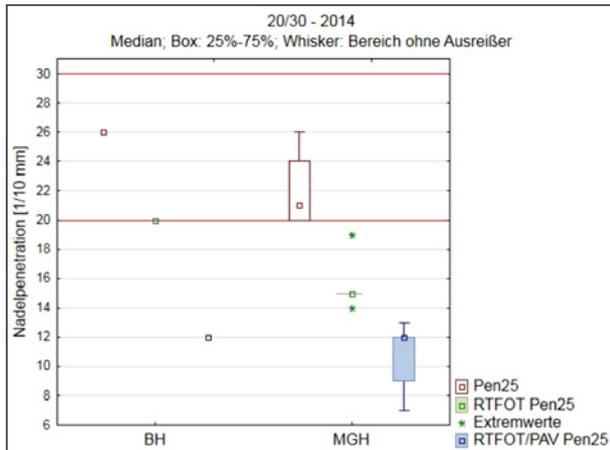


Bild 17: Nadelpenetration Bitumen 20/30, Untersuchungsjahr 2014

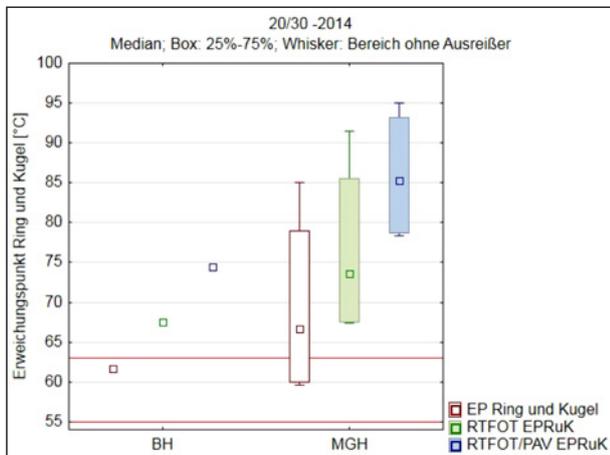


Bild 18: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 20/30, Untersuchungsjahr 2014

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	3
Anzahl unterschritten	0	Anzahl unterschritten	0
Anzahl gesamt	6	Anzahl gesamt	6
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	50,00 %
Anteil unterschritten	0,00 %	Anteil unterschritten	0,00 %

Tab. 4: Bitumen 20/30 – 2014

Die Anforderungswerte für die Nadelpenetration von 20 bis 30 $\frac{1}{10}$ mm wurden bei den Datensätzen des Untersuchungsjahres 2014 eingehalten (Tabelle 4). Die Nadelpenetration lag zwischen 20 und 26 $\frac{1}{10}$ mm (Bild 17).

Die Anforderungswerte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel von 55 bis 63 °C wurden in drei Fällen überschritten (Tabelle 4). Der höchste Wert lag 85 °C und war damit 22 °C höher als der Anforderungswert (Bild 18).

Aufgrund der geringen Grundgesamtheit der Datensätze waren diese nicht als repräsentativ zu sehen.

7.1.2 Bitumensorte 30/45

Zur Bewertung der Bitumensorte 30/45 lagen für das Untersuchungsjahr 2014 79 und für das Untersuchungsjahr 2015 lagen 82 gültige Datensätze vor, die sich wie folgt aufteilen:

Die tabellarische statistische Bewertung ist im Anhang in Tabelle A 3 bis Tabelle A 6 dargestellt.

Die Anforderungswerte an die Nadelpenetration von 30 $\frac{1}{10}$ mm bis 45 $\frac{1}{10}$ mm wurden im Untersuchungszeitraum 2014 in drei Fällen unterschritten (Bild 19). Die Unterschreitungswerte lagen dabei bei 28 bzw. 29 $\frac{1}{10}$ mm.

Quelle	Untersuchungsjahr 2014	Untersuchungsjahr 2015
BH	33	38
MGH	45	43
AG	1	1

Tab. 5: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 30/45

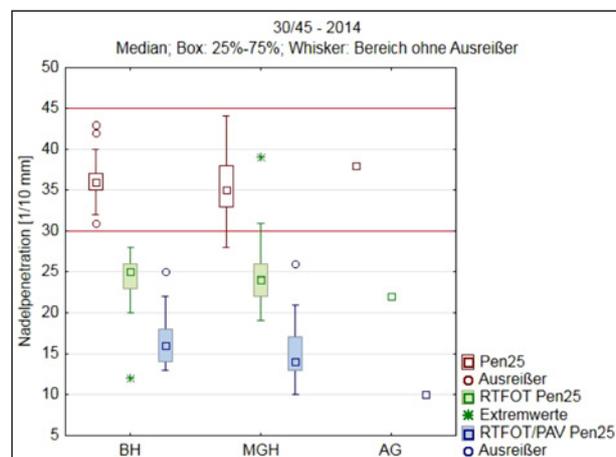


Bild 19: Nadelpenetration Bitumen 30/45, Untersuchungsjahr 2014

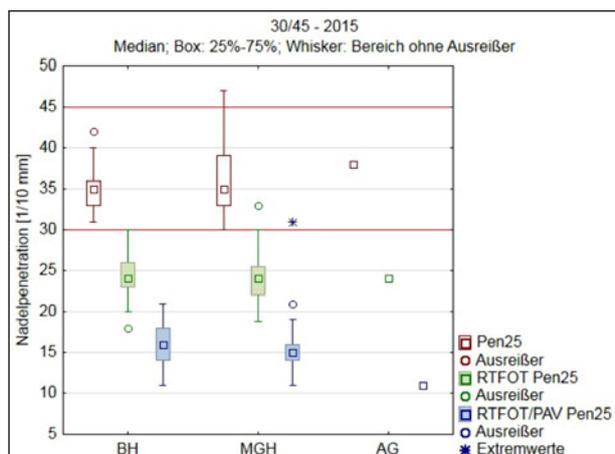


Bild 20: Nadelpenetration Bitumen 30/45, Untersuchungsjahr 2015

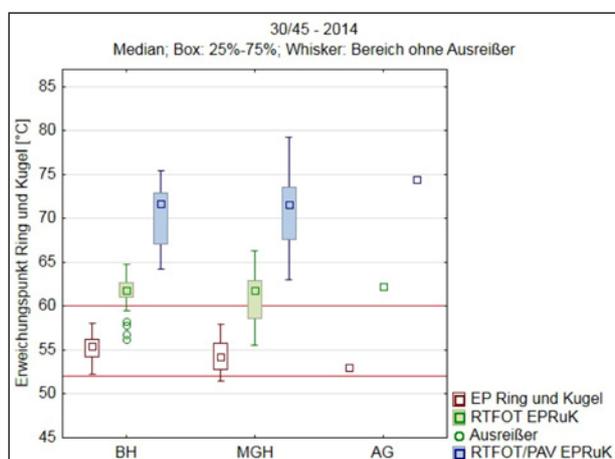


Bild 21: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 30/45, Untersuchungsjahr 2014

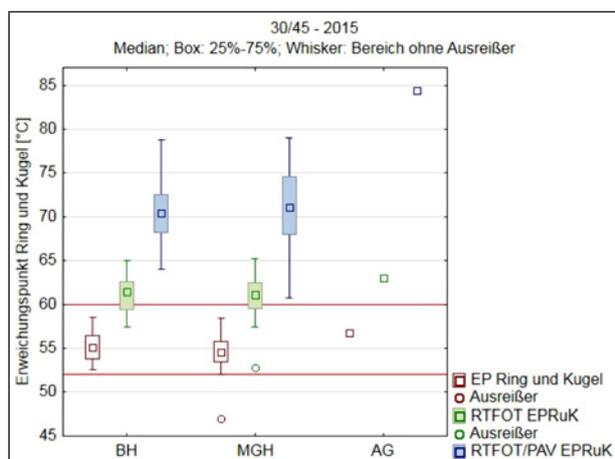


Bild 22: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 30/45, Untersuchungsjahr 2015

Im Untersuchungsjahr 2015 wurde der Anforderungswert an die Nadelpenetration hingegen in zwei Fällen überschritten (Bild 20). Die beiden Werte lagen bei $46 \frac{1}{10}$ mm bzw. $47 \frac{1}{10}$ mm.

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	0
Anzahl unterschritten	3	Anzahl unterschritten	3
Anzahl gesamt	80	Anzahl gesamt	80
Anteil überschritten	0,00%	Überschritten	0,00%
Anteil unterschritten	3,75%	Anteil unterschritten	3,75%

Tab. 6: Bitumen 30/45 – 2014

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	2	Anzahl überschritten	0
Anzahl unterschritten	0	Anzahl unterschritten	1
Anzahl gesamt	82	Anzahl gesamt	82
Anteil überschritten	2,44%	Anteil überschritten	0,00%
Anteil unterschritten	0,00%	Anteil unterschritten	1,22%

Tab. 7: Bitumen 30/45 – 2015

Die Anforderungswerte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel von 52 bis 60 °C wurden im Untersuchungsjahr 2014 in drei Fällen unterschritten (Tabelle 4). Die Unterschreitungswerte lagen hier bei 51,4 °C, 51,6 °C und 51,8 °C.

Im Untersuchungsjahr 2015 wurden die Anforderungswerte an den Erweichungspunkt Ring und Kugel in einem Fall unterschritten (Tabelle 7). Der Wert lag hier bei 47 °C.

Statistisch gesehen waren die Über- bzw. Unterschreitungen der Anforderungswerte der Nadelpenetration keine Ausreißer. Lediglich der Wert des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 47 °C im Untersuchungsjahr 2015 stellte sowohl eine Unterschreitung des Anforderungswertes als auch einen statistischen Ausreißer dar.

7.1.3 Bitumensorte 50/70

Zur Bewertung der Bitumensorte 50/70 lagen für das Untersuchungsjahr 2014 713 und für das Untersuchungsjahr 2015 lagen 528 gültige Datensätze vor (Tabelle 8).

Die tabellarische statistische Bewertung dieser Daten ist im Anhang A in Tabelle A 7 bis Tabelle A 10 dargestellt.

Quelle	Untersuchungsjahr 2014	Untersuchungsjahr 2015
BH	50	44
MGH	628	472
AG	35	12

Tab. 8: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 50/70

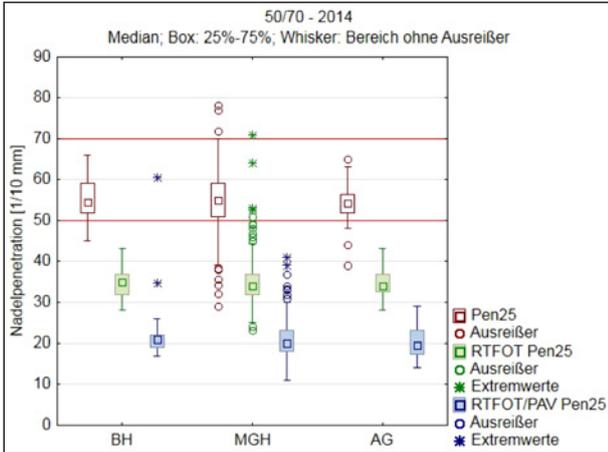


Bild 23: Nadelpenetration Bitumen 50/70, Untersuchungsjahr 2014

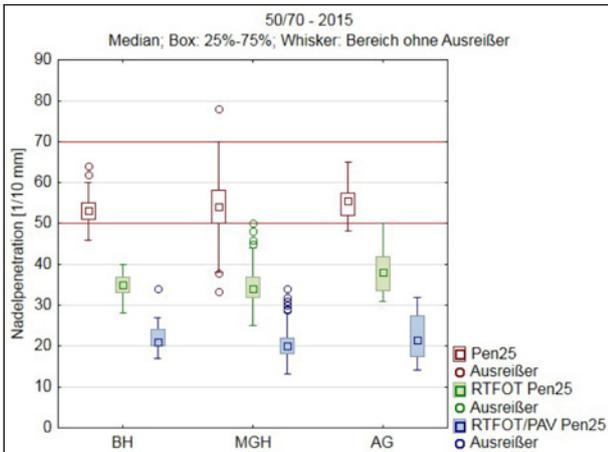


Bild 24: Nadelpenetration Bitumen 50/70, Untersuchungsjahr 2015

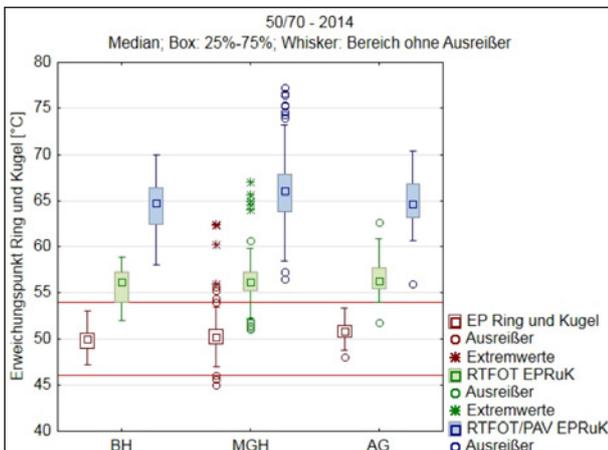


Bild 25: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 50/70, Untersuchungsjahr 2014

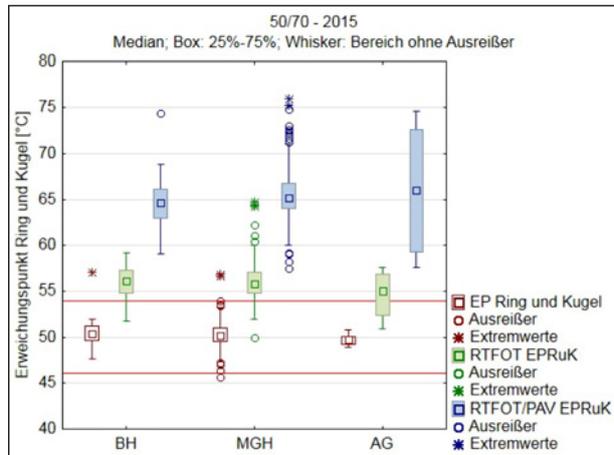


Bild 26: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 50/70, Untersuchungsjahr 2015

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	6	Anzahl überschritten	9
Anzahl unterschritten	84	Anzahl unterschritten	4
Anzahl gesamt	704	Anzahl gesamt	713
Anteil überschritten	0,85 %	überschritten	1,26 %
Anteil unterschritten	11,93 %	Anteil unterschritten	0,56 %

Tab. 9: Bitumen 50/70 – 2014

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	1	Anzahl überschritten	3
Anzahl unterschritten	90	Anzahl unterschritten	1
Anzahl gesamt	528	Anzahl gesamt	528
Anteil überschritten	0,19 %	überschritten	0,57 %
Anteil unterschritten	17,05 %	Anteil unterschritten	0,19 %

Tab. 10: Bitumen 50/70 – 2015

Der Anforderungsbereich für die Nadelpenetration lag zwischen $50 \frac{1}{10}$ mm und $70 \frac{1}{10}$ mm. Im Jahr 2014 lagen ca. 12 % der Daten unterhalb des Bereichs und weniger als 1 % darüber (Bild 23 und Tabelle 9). Im Jahr 2015 lagen sogar mehr als 17 % unterhalb des Anforderungsbereichs und weniger als 0,2 % darüber (Bild 24 und Tabelle 10). Statistisch gesehen handelte es sich bei den Über- und Unterschreitungen nur um einen geringen Anteil an Ausreißern.

Die meisten Abweichungen von den Anforderungswerten wiesen die Datensätze der Mischgutherstel-

ler auf. Hier lag jedoch auch der Hauptteil der Datensätze vor.

Die Anforderungswerte an den Erweichungspunkt Ring und Kugel liegen beim Bitumen 50/70 zwischen 46 °C und 54 °C. Diese Anforderungswerte wurden im Untersuchungszeitraum 2014 in knapp 1,3 % überschritten und in weniger als 0,6 % unterschritten (Bild 25 und Tabelle 9). Im Jahr 2015 wurden die Anforderungswerte in weniger als 0,6 % überschritten und in weniger als 0,2 % unterschritten (Bild 26 und Tabelle 10).

Die größten Spannweiten lagen bei den Daten der Mischguthersteller vor. Hier lag jedoch auch die zehnfache Datensatzanzahl gegenüber den Bindemittelherstellern vor, sodass eine größere Streuung zu erwarten war.

Eine genaue Betrachtung der Datensätze zeigte auf, dass mit Ausnahme von drei Einzelfällen die Nichteinhaltung der Anforderungswerte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel und für die Nadelpenetration gleichzeitig vorlagen.

7.1.4 Bitumensorte 70/100

Zur Bewertung der Bitumensorte 70/100 lagen für das Untersuchungszeitraum 2014 insgesamt 793 gültige Datensätze vor und für das Untersuchungszeitraum 2015 625 (Tabelle 11).

Quelle	Untersuchungsjahr 2014	Untersuchungsjahr 2015
BH	54	42
MGH	719	576
AG	7	7

Tab. 11: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 70/100

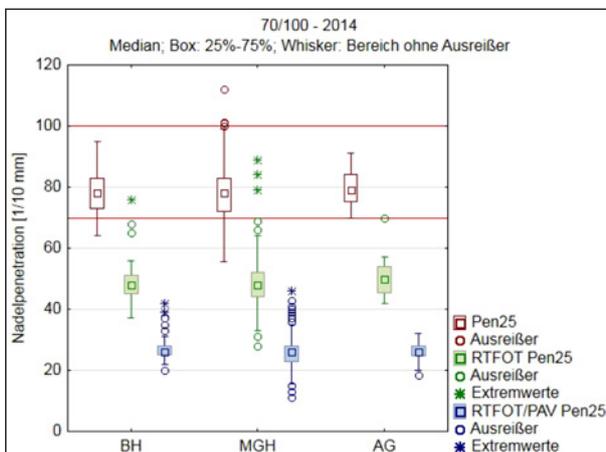


Bild 27: Nadelpenetration Bitumen 70/100, Untersuchungszeitraum 2014

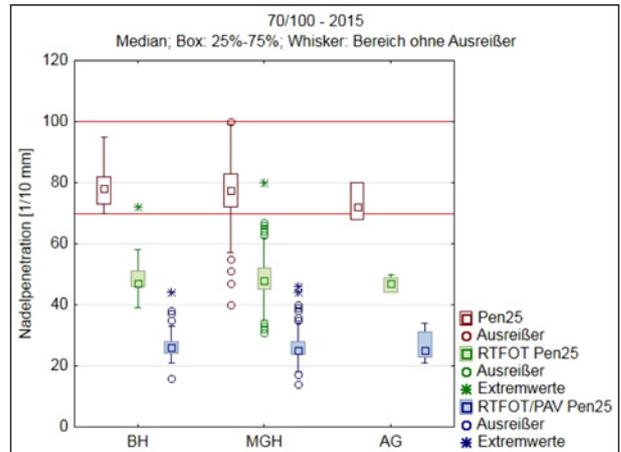


Bild 28: Nadelpenetration Bitumen 70/100, Untersuchungszeitraum 2015

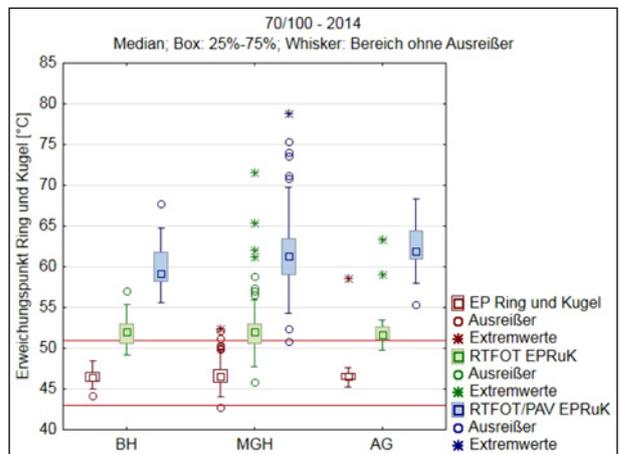


Bild 29: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 70/100, Untersuchungszeitraum 2014

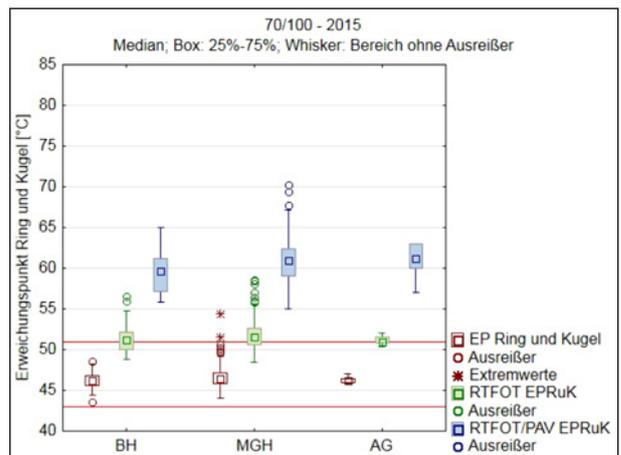


Bild 30: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 70/100, Untersuchungszeitraum 2015

Die tabellarische statistische Bewertung dieser Daten ist im Anhang A in Tabelle A 11 bis Tabelle A 14 dargestellt.

Die Anforderungswerte für die Nadelpenetration liegen zwischen $70 \frac{1}{10}$ mm und $100 \frac{1}{10}$ mm. Diese

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	3	Anzahl überschritten	8
Anzahl unterschritten	87	Anzahl unterschritten	1
Anzahl gesamt	793	Anzahl gesamt	795
Anteil überschritten	0,38 %	Anteil überschritten	1,01 %
Anteil unterschritten	10,97 %	Anteil unterschritten	0,13 %

Tab.:12: Bitumen 70/100 – 2014

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	2
Anzahl unterschritten	67	Anzahl unterschritten	0
Anzahl gesamt	625	Anzahl gesamt	625
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	0,32 %
Anteil unterschritten	10,72 %	Anteil unterschritten	0,00 %

Tab. 13: Bitumen 70/100 – 2015

Anforderungswerte wurden im Untersuchungsjahr 2014 in weniger als 0,4 % der Fälle überschritten und in ca. 11 % der Fälle unterschritten (Bild 27 und Tabelle 12). Im Untersuchungsjahr 2015 wurden die Anforderungswerte kein Mal überschritten aber ebenfalls in ca. 11 % der Fälle unterschritten (Bild 28 und Tabelle 13).

Die Anforderungswerte des Erweichungspunktes Ring und Kugel der Bitumensorte 70/100 liegen bei 43 °C bis 51 °C. Diese Werte wurden im Untersuchungsjahr 2014 in ca. 1 % der Fälle überschritten und in weniger als 0,2 % der Fälle unterschritten (Bild 29 und Tabelle 12). Im Untersuchungsjahr 2015 wurden die Anforderungswerte in ca. 0,3 % der Fälle überschritten und kein Mal unterschritten (Bild 30 und Tabelle 13).

Auffällig war, dass sowohl bei den Werten des Nadelpenetration als auch bei dem Erweichungspunkt Ring und Kugel die Datenwerte der Mischguthersteller deutlich stärker streuten als die der Bindemittelhersteller und der Auftraggeber. Jedoch lag hier auch der Großteil der Daten vor, sodass von einer relativ großen Spannweite auszugehen war.

Im Vergleich zur Bitumensorte 50/70 zeigte sich hier jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen

Quelle	Untersuchungsjahr 2014	Untersuchungsjahr 2015
BH	31	25
MGH	125	88
AG	1	1

Tab.:14: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 160/220

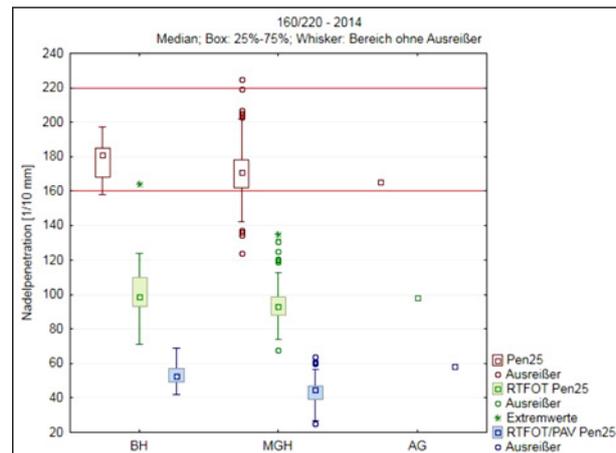


Bild 31: Nadelpenetration Bitumen 160/220, Untersuchungsjahr 2014

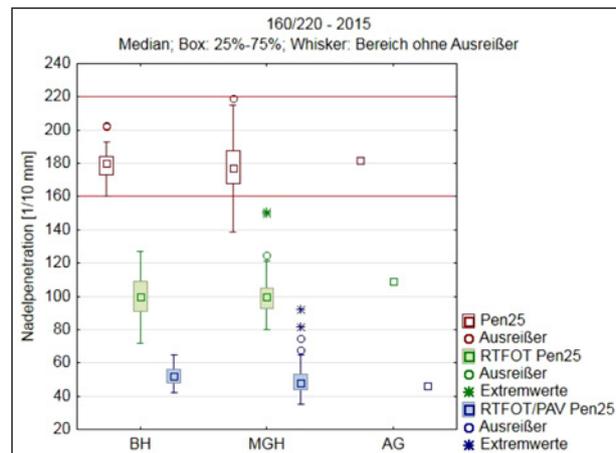


Bild 32: Nadelpenetration Bitumen 160/220, Untersuchungsjahr 2015

der Nichteinhaltung der beiden Anforderungswerte. Die Bitumen, bei denen der Anforderungswert des Erweichungspunktes Ring und Kugel nicht eingehalten wurde, hielten nur in der Hälfte der Fälle auch den Anforderungswert der Nadelpenetration nicht ein.

7.1.5 Bitumensorte 160/220

Zur Bewertung der Bitumensorte 160/220 standen für das Untersuchungsjahr 2014 insgesamt 157 gültige Datensätze zur Verfügung und für das Untersuchungsjahr 2015 114 (Tabelle 14).

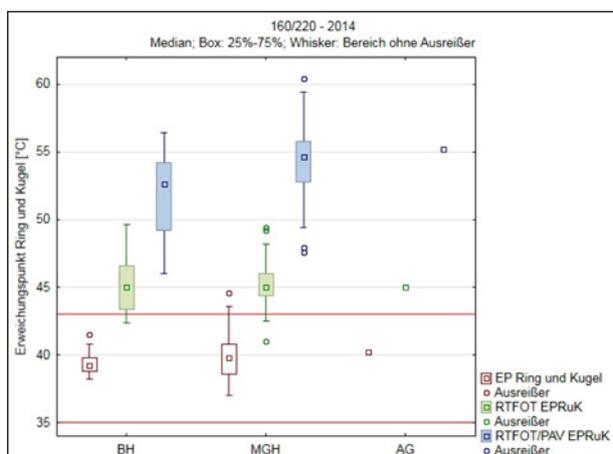


Bild 33: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 160/220, Untersuchungsjahr 2014

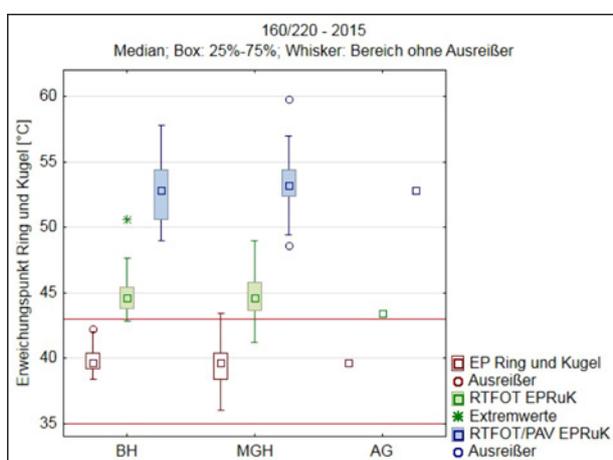


Bild 34: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 160/220, Untersuchungsjahr 2015

Die tabellarische statistische Bewertung dieser Daten ist im Anhang A in Tabelle A 15 bis Tabelle A 18 dargestellt.

Die Anforderungswerte der Nadelpenetration liegen bei dieser Bitumensorte zwischen $160 \frac{1}{10}$ mm und $220 \frac{1}{10}$ mm. Diese Anforderungswerte wurden im Untersuchungsjahr 2014 in weniger als 0,7 % der Fälle überschritten und in mehr als 10 % der Fälle unterschritten (Bild 31 und Tabelle 15). Im Untersuchungsjahr 2015 wurde der Anforderungsbereich kein Mal überschritten und ca. in 8 % der Fälle unterschritten (Bild 32 und Tabelle 16).

Der Anforderungsbereich für den Erweichungspunkt Ring und Kugel liegt bei der Bitumensorte 160/220 zwischen 35 °C und 43 °C. Dieser Bereich wurde im Untersuchungsjahr 2014 in ca. 0,3 % der Fälle überschritten und nicht einmal unterschritten. Im Untersuchungsjahr 2015 wurde dieser Bereich in weniger als 0,9 % der Fälle überschritten und ebenfalls kein Mal unterschritten.

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	1	Anzahl Überschritten	2
Anzahl Unterschritten	16	Anzahl Unterschritten	0
Anzahl gesamt	157	Anzahl gesamt	625
Anteil überschritten	0,64 %	Überschritten	0,32 %
Anteil unterschritten	10,19 %	Anteil Unterschritten	0,00 %

Tab. 15: Bitumen 160/220 – 2014

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	1
Anzahl unterschritten	9	Anzahl unterschritten	0
Anzahl gesamt	114	Anzahl gesamt	114
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	0,88 %
Anteil unterschritten	7,89 %	Anteil unterschritten	0,00 %

Tab. 16: Bitumen 160/220 – 2015

Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Datensätze zeigte keinen Zusammenhang zwischen den Bindemitteln, die den Anforderungswert an die Nadelpenetration nicht einhalten und denen, die den Anforderungswert an den Erweichungspunkt Ring und Kugel nicht einhalten.

7.1.6 Bindemittel 10/40–65

Zur Bewertung der PmB 10/40–65 standen insgesamt 67 gültige Datensätze für das Untersuchungsjahr 2014 zur Verfügung und 56 Datensätze für das Untersuchungsjahr 2015 (Tabelle 17).

Die tabellarische statistische Bewertung dieser Daten ist in Anhang A in Tabelle A 19 bis Tabelle A 22 dargestellt.

Der Anforderungsbereich an die Nadelpenetration liegt bei diesem Bindemittel zwischen $10 \frac{1}{10}$ mm und $40 \frac{1}{10}$ mm. Dieser Anforderungsbereich wurde in beiden Untersuchungsjahren eingehalten (Bild 35 und Tabelle 18). Im Untersuchungsjahr 2014 lag die Nadelpenetration zwischen 20 und $39 \frac{1}{10}$ mm. Im Untersuchungsjahr 2015 lag sie zwischen 19 und $36 \frac{1}{10}$ mm (Bild 36 und Tabelle 19).

Der Anforderungswert des Erweichungspunktes Ring und Kugel für ein Bitumen 10/40–65 liegt bei

Quelle	Untersuchungsjahr 2014	Untersuchungsjahr 2015
BH	23	31
MGH	39	25
AG	5	0

Tab. 17: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 10/40–65

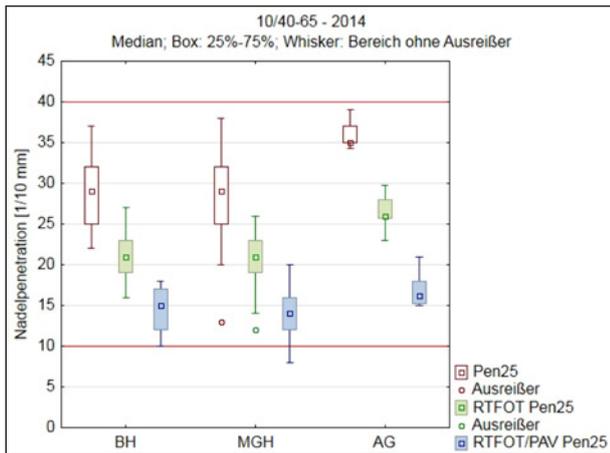


Bild 35: Nadelpenetration Bindemittel 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014

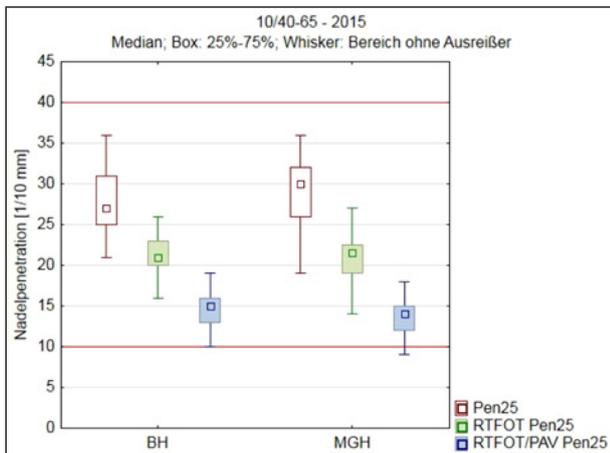


Bild 36: Nadelpenetration Bindemittel 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015

mindestens 65 °C. Dieser Wert wurde im Untersuchungsjahr 2014 in mehr als 13 % der Fälle unterschritten. Der niedrigste festgestellte Wert lag dabei bei 62,8 °C (Bild 37 und Tabelle 18). Im Untersuchungsjahr 2015 wurde der Anforderungswert an den Erweichungspunkt Ring und Kugel in ca. 3,6 % der Fälle unterschritten. Das Minimum lag dabei bei 64,4 °C. Die Unterschreitungen sind als eher geringfügig einzustufen.

Insgesamt zeigte sich eine starke Übereinstimmung der Daten der Bindemittelhersteller und Mischguthersteller. Bei den Daten der Auftraggeber

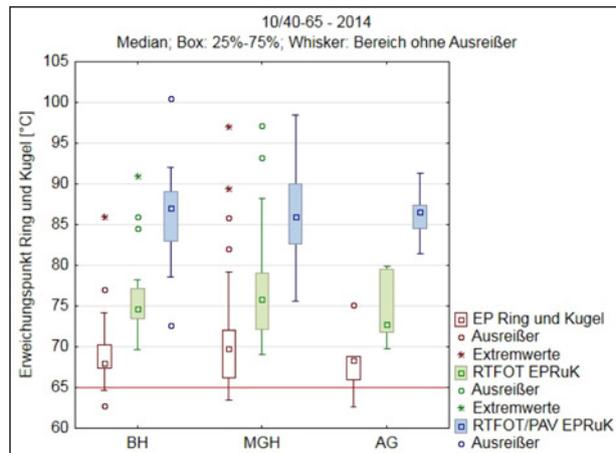


Bild 37: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014

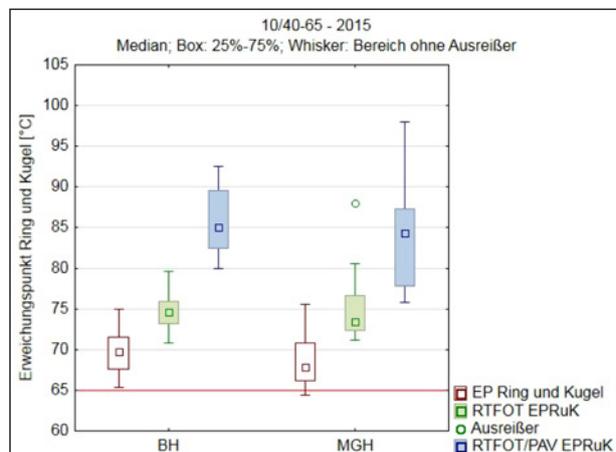


Bild 38: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	-
Anzahl unterschritten	0	Anzahl unterschritten	9
Anzahl gesamt	68	Anzahl gesamt	67
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	-
Anteil unterschritten	0,00 %	Anteil unterschritten	13,43 %

Tab. 18: Bitumen 10/40–65–2014

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	-
Anzahl unterschritten	0	Anzahl unterschritten	2
Anzahl gesamt	56	Anzahl gesamt	56
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	-
Anteil unterschritten	0,00 %	Anteil unterschritten	3,57 %

Tab. 19: Bindemittel 10/40–65–2015

ist auffällig, dass die Werte der Nadelpenetration im Mittel über den anderen Prüfergebnissen liegen.

7.1.7 Bindemittel 25/55–55

Zur Bewertung des PmB 25/55–55 lagen für das Untersuchungsjahr 2014 insgesamt 650 gültige Datensätze vor. Und im Untersuchungsjahr 2015 540 (Tabelle 20).

Die tabellarische statistische Auswertung dieser Datensätze ist in Anhang A Tabelle A 23 bis Tabelle A 26 zu finden.

Quelle	Untersuchungsjahr 2014	Untersuchungsjahr 2015
BH	54	59
MGH	499	430
AG	97	49

Tab. 20: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 25/55–55

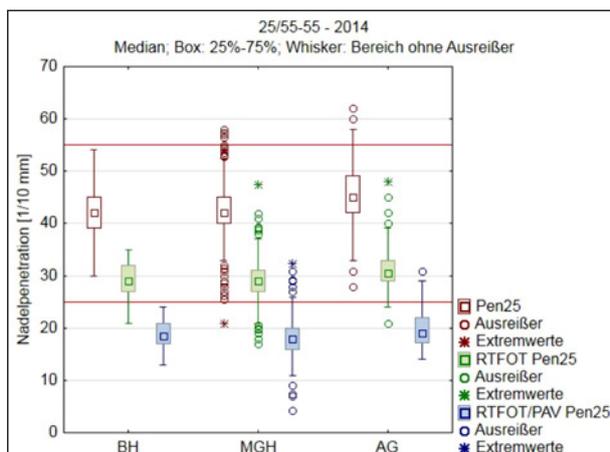


Bild 39: Nadelpenetration Bindemittel 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014

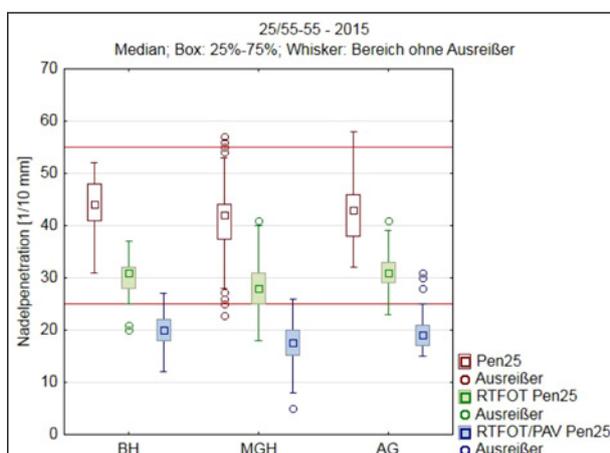


Bild 40: Nadelpenetration Bindemittel 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015

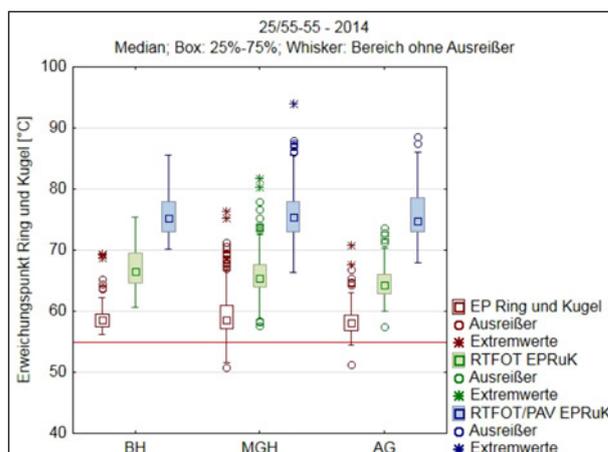


Bild 41: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014

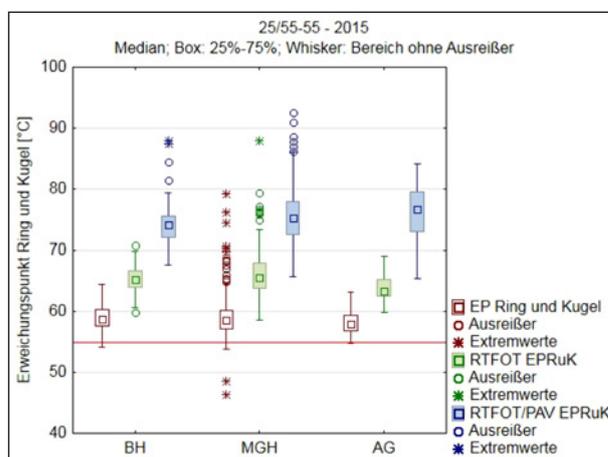


Bild 42: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 25/5555, Untersuchungsjahr 2015

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	10	Anzahl überschritten	-
Anzahl unterschritten	1	Anzahl unterschritten	14
Anzahl gesamt	650	Anzahl gesamt	652
Anteil überschritten	1,54%	Anteil überschritten	-
Anteil unterschritten	0,15%	Anteil unterschritten	2,15%

Tab. 21: Bindemittel 25/55-55–2014

Der Anforderungsbereich für die Nadelpenetration liegt bei diesem Bindemittel zwischen 25 und 55 $\frac{1}{10}$ mm. Dieser Anforderungsbereich wurde im Untersuchungsjahr 2014 in ca. 1,5 % der Fälle überschritten und in weniger als 0,2 % der Fälle unterschritten (Bild 39 und Tabelle 21). Dabei wurden Werte zwischen 31 und 62 $\frac{1}{10}$ mm festgestellt. Im Untersuchungsjahr 2015 wurde der Anforderungsbereich in weniger als 1 % der Fälle überschritten

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	5	Anzahl überschritten	-
Anzahl unterschritten	1	Anzahl unterschritten	11
Anzahl gesamt	540	Anzahl gesamt	540
Anteil überschritten	0,93 %	Überschritten	-
Anteil unterschritten	0,19 %	Anteil unterschritten	2,04 %

Tab. 22: Bindemittel 25/55-55 – 2015

und ebenfalls in weniger als 0,2 % der Fälle unterschritten (Bild 40 und Tabelle 22). Der gemessene Wertebereich liegt hier zwischen 22,7 und 58 $\frac{1}{10}$ mm.

Der Anforderungswert des Erweichungspunktes Ring und Kugel liegt bei mindestens 55 °C. Im Untersuchungsjahr 2014 wurde dieser Wert in weniger als 2,2 % der Fälle unterschritten (Bild 41 und Tabelle 21), im Untersuchungsjahr 2015 in weniger als 2,1 % der Fälle (Bild 42 und Tabelle 22). Der niedrigste festgestellte Wert betrug im Untersuchungsjahr 2014 50,8 °C und im Untersuchungsjahr 2015 46,2°C, wobei es sich bei diesem Wert ebenso wie bei dem zweit niedrigsten Wert von 48,5 °C statistisch gesehen um Ausreißer handelt.

Die Wertebereiche der Datensätze der Bindemittelhersteller und der Auftraggeber wiesen eine ähnliche Verteilung auf, wobei die Datensätze der Auftraggeber auf einem etwas höheren Niveau lagen. Die Datensätze der Mischguthersteller wiesen die größte Streuung auf und zeigen Konzentrationen von Prüfergebnissen, die aus statistischer Sicht vielfach als Extremwert einzustufen sind und sich gleichzeitig um die beiden Anforderungsgrenzen anordnen.

7.1.8 Bindemittel 40/100–65

Zur Bewertung der PmB 40/10065 standen für das Untersuchungsjahr 2014 insgesamt 68 gültige Datensätze zur Verfügung und für das Untersuchungsjahr 2015 25 (Tabelle 23).

Die tabellarische statistische Auswertung der Datensätze ist in Anhang A Tabelle A 28 bis Tabelle 30 zu finden.

Der Anforderungswert an die Nadelpenetration liegt bei diesem Bindemittel zwischen 40 und 100 $\frac{1}{10}$ mm.

Quelle	Untersuchungsjahr 2014	Untersuchungsjahr 2015
BH	33	15
MGH	29	9
AG	6	1

Tab. 23: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 40/100–65

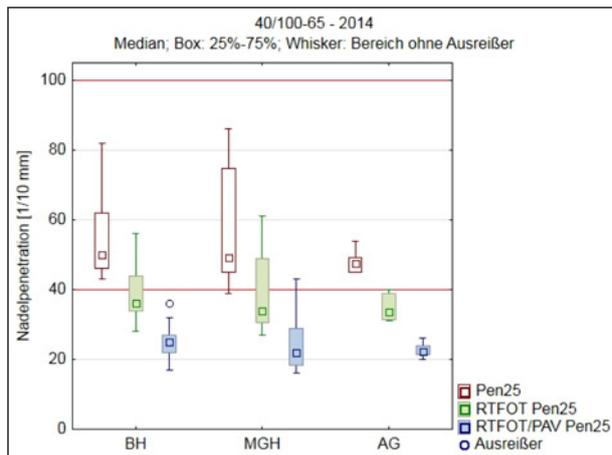


Bild 43: Nadelpenetration Bindemittel 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014

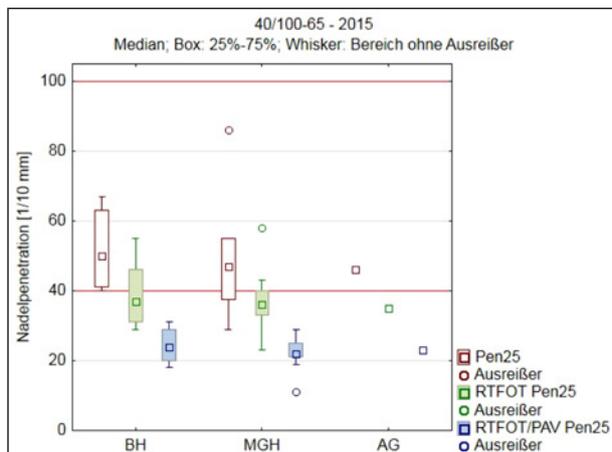


Bild 44: Nadelpenetration Bindemittel 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015

Dieser Anforderungsbereich wurde im Untersuchungsjahr 2014 lediglich einmal unterschritten, was weniger als 1,5 % der Fälle ausmacht. Der dabei festgestellte Wert lag bei 39 $\frac{1}{10}$ mm. Im Untersuchungszeitraum 2015 wurde der Anforderungsbereich in 3 Fällen unterschritten, was aufgrund der geringen Datenmenge von insgesamt 25 einem Anteil von 12 % entspricht.

Der Anforderungswert des Erweichungspunktes Ring und Kugel liegt bei dem Bindemittel 40/10065 bei mindestens 65 °C. Dieser Anforderungswert wurde im Untersuchungsjahr 2014 in ca. 11,8 % der Fälle unterschritten. Der niedrigste erfasste Wert lag

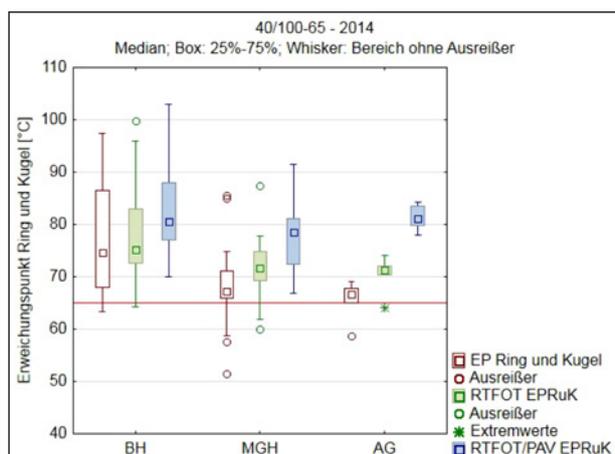


Bild 45: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014

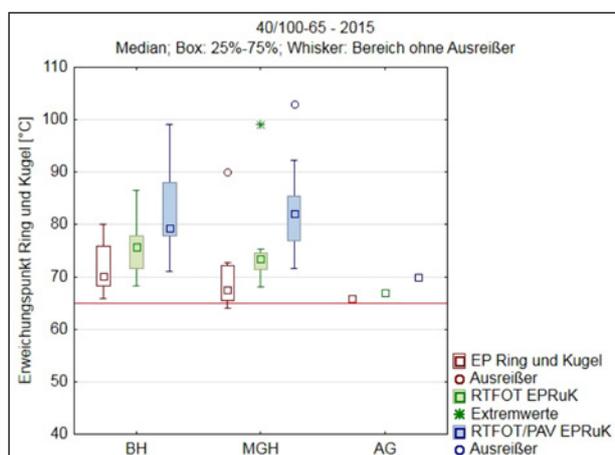


Bild 46: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	-
Anzahl unterschritten	1	Anzahl unterschritten	8
Anzahl gesamt	68	Anzahl gesamt	68
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	-
Anteil unterschritten	1,47 %	Anteil unterschritten	11,76 %

Tab. 24: Bindemittel 40/100–65–2014

dabei bei 51,4 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 wurde dieser Wert in zwei Fällen, also 8 % der Gesamtzahl, unterschritten. Der niedrigste erfasste Wert lag dabei bei 64,0 °C.

Bei der Nadelpenetration im Untersuchungsjahr 2014 lagen die Werte bei den Datensätzen der Mischguthersteller tendenziell niedriger als bei den

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	-
Anzahl unterschritten	3	Anzahl unterschritten	2
Anzahl gesamt	25	Anzahl gesamt	25
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	-
Anteil unterschritten	12,00 %	Anteil unterschritten	8,00 %

Tab. 25: Bindemittel 40/100-65–2015

Daten der Bindemittelhersteller. Im Untersuchungsjahr 2014 sind die Verteilungen ähnlich.

Auch bei den Werten für den Erweichungspunkt Ring und Kugel liegen die Daten von den Mischgutherstelern insgesamt niedriger als die Daten der Bindemittelhersteller. Dies gilt für beide Untersuchungsjahre.

7.1.9 Bindemittel 45/80–50

Da die Eingabe der Prüfergebnisse zum polymermodifizierten Bitumen 45/80–50 auf freiwilliger Basis durchgeführt wurde, standen zur Beurteilung im Untersuchungsjahr lediglich 17 gültige Datensätze zur Verfügung. Davon wurden zwei von Bindemittelherstellern geliefert, 13 von Mischgutherstelern und 2 von Auftraggebern. Für das Untersuchungsjahr 2015 wurden insgesamt 16 gültige Datensätze geliefert, davon 5 von Bindemittelherstellern, 10 von Mischgutherstelern und einer von einem Auftraggeber (Tabelle 26).

Die tabellarische statistische Auswertung dieser Datensätze ist in Anhang Tabelle A 31 bis Tabelle A 34 zu finden.

Der Anforderungsbereich für die Nadelpenetration liegt bei diesem Bindemittel zwischen 45 und $80 \frac{1}{10}$ mm. In beiden Untersuchungsjahren wurden diese Anforderungswerte eingehalten. Die gemessenen Werte der Nadelpenetration lagen dabei im Untersuchungsjahr 2014 zwischen 47 und $64 \frac{1}{10}$ mm und im Untersuchungsjahr 2015 zwischen 45 und $67 \frac{1}{10}$ mm.

Der Anforderungswert des Erweichungspunktes Ring und Kugel liegt für dieses Bindemittel bei mindestens 50 °C. Dieser Wert wurde ebenfalls in beiden Untersuchungsjahren eingehalten. Im Untersuchungsjahr 2014 betrug der niedrigste gemessene

Quelle	Untersuchungsjahr 2014	Untersuchungsjahr 2015
BH	2	5
MGH	13	10
AG	2	1

Tab. 26: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 45/80–50

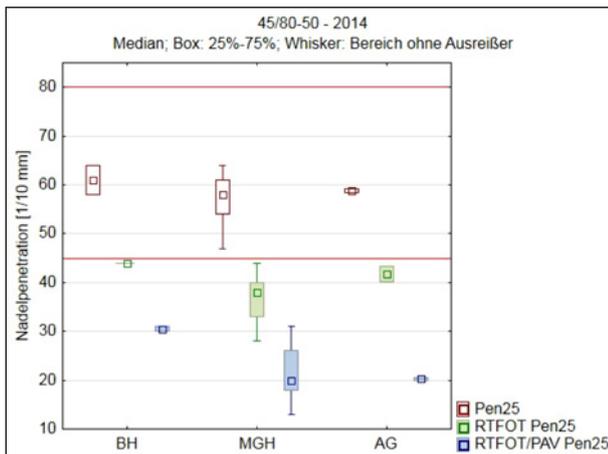


Bild 47: Nadelpenetration Bitumen 45/80–50, Untersuchungsjahr 2014

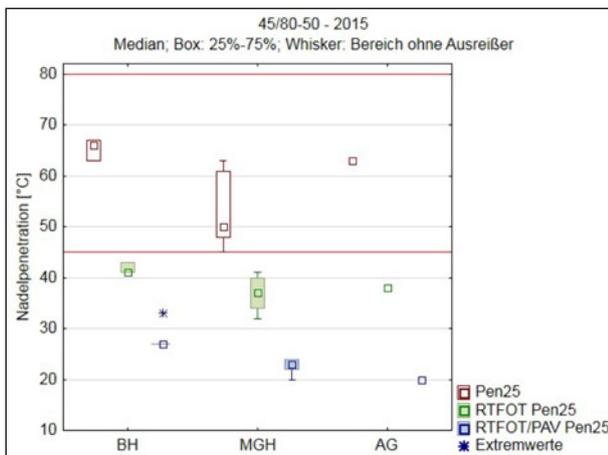


Bild 48: Nadelpenetration Bitumen 45/80–50, Untersuchungsjahr 2015

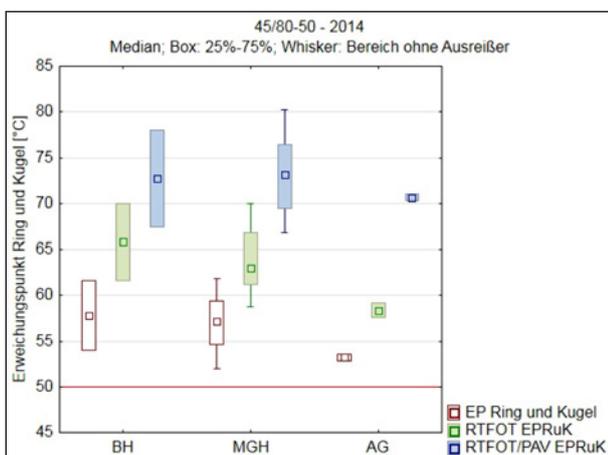


Bild 49: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 45/80/50, Untersuchungsjahr 2014

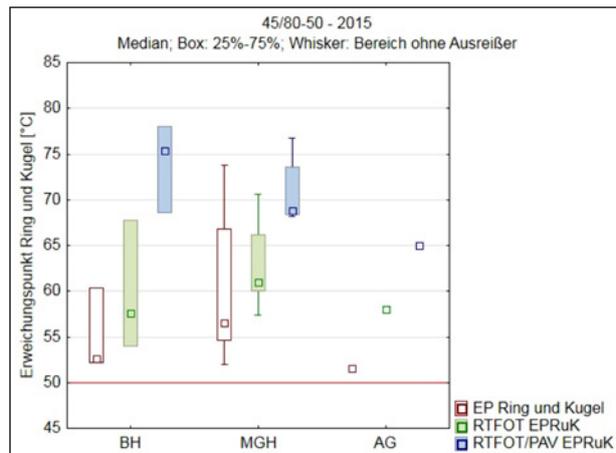


Bild 50: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 45/80–50, Untersuchungsjahr 2015

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	-
Anzahl unterschritten	0	Anzahl unterschritten	0
Anzahl gesamt	17	Anzahl gesamt	17
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	-
Anteil unterschritten	0,00 %	Anteil unterschritten	0,00 %

Tab. 27: Bindemittel 45/80–50–2014

Nadelpenetration		Erweichungspunkt Ring und Kugel	
Anzahl überschritten	0	Anzahl überschritten	-
Anzahl unterschritten	0	Anzahl unterschritten	0
Anzahl gesamt	16	Anzahl gesamt	16
Anteil überschritten	0,00 %	Anteil überschritten	-
Anteil unterschritten	0,00 %	Anteil unterschritten	0,00 %

Tab. 28: Bindemittel 45/80–50–2015

sene Wert des Erweichungspunktes Ring und Kugel 52,0 °C und im Untersuchungsjahr 2015 51,3 °C.

Tendenziell fielen die Werte der Nadelpenetration bei den Datensätzen der Mischguthersteller niedriger aus als bei den Daten der Bindemittelhersteller oder der Auftraggeber.

7.1.10 Zusammenfassung

Zur statistischen Bewertung der Datensätze der Bitumensorte 20/30 lag keine ausreichend große Grundgesamtheit an Datensätzen vor, da die Prü-

fung dieses Bindemittels kein Bestandteil der [ARS 11/2012, 2012] ist.

Bei den Straßenbaubitumen wurden der Anforderungswert an den Erweichungspunkt Ring und Kugel in der Regel eingehalten. Der Anteil an Datensätzen, bei denen dieser Anforderungswert nicht eingehalten wurde liegt – mit Ausnahme der Bindemittel 30/45 im Untersuchungsjahr 2014 – unter 1,5 %.

Der Anforderungsbereich an die Nadelpenetration wurde bei den Bindemitteln 50/70, 70/100 und 160/220 relativ häufig unterschritten, meistens in 10 bis 11 % der Fälle. Für das Untersuchungsjahr 2015 liegen bei den Bitumen 50/70 sogar ca. 17 % der Daten vor, die den Anforderungswert an die Nadelpenetration unterschreiten. Damit fallen die Straßenbaubitumen tendenziell härter aus, als dies laut Klassifizierung der Fall sein sollte.

Bei den polymermodifizierten Bindemitteln werden die Anforderungswerte an die Nadelpenetration in der Regel eingehalten. Der Anteil der Datensätze, die den Anforderungsbereich über- oder unterschreiten liegt bei weniger als 2 %. Die einzige Ausnahme bildet das Bindemittel 40/10065, bei dem im Untersuchungsjahr 2015 12 % der Datensätze den Anforderungswert unterschreiten. Hier liegt jedoch eine relativ kleine Grundgesamtheit von nur 25 Datensätzen vor. Bei den Bindemitteln 10/4065 und 40/10065 wird der Anforderungswert an den Erweichungspunkt Ring und Kugel insbesondere im Untersuchungsjahr 2014, wo jeweils ein größerer Datensatz vorliegt als im Untersuchungsjahr 2015, um 11 % bis 13,5 % unterschritten. Bei dem Bindemittel 25/55–55, bei dem die größte Anzahl an Datensätzen geliefert wurde, werden die Anforderungswerte bis auf wenige Ausnahmen eingehalten, welche nur bis zu 2,2 % der Gesamtdaten ausmachen.

Die größten Datenmengen in Abhängigkeit von den Lieferanten liegen für alle Bindemittelsorten in der Regel bei den Mischgutherstellern vor. Damit einher geht auch eine relativ große Spannweite der Datenwerte. Grundsätzlich liegt jedoch eine gute Übereinstimmung der Daten der unterschiedlichen Lieferanten vor.

Es konnten keine systematischen Unterschiede zwischen den Datensätzen aus dem Untersuchungs-jahr 2014 und dem Untersuchungs-jahr 2015 festgestellt werden.

Die detaillierte Bewertung des Alterungsverhaltens erfolgt in Kapitel 7.2.

7.2 Bewertung der Standard-Kenndaten

7.2.1 Straßenbaubitumen

In Bild 51 und Bild 52 ist der Zusammenhang zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und der Nadelpenetration für die in Kapitel 7.1 untersuchten konventionellen Bindemittel dargestellt.

Die Ergebnisse aus dem Untersuchungs-jahr 2014 und 2015 weisen eine hohe Übereinstimmung und somit Vergleichbarkeit auf. Auffällig sind die in Kapitel 7.1.1 bereits erwähnten hohen Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel beim 20/30, ebenso wie vereinzelte Ausreißer der verschiedenen Bindemittelsorten. Die hohen Erweichungspunkte Ring und Kugel der drei Bitumen 20/30 könnten auf viskositätsverändernde Zusätze zurückzuführen sein, da diese Bindemittelsorte zumeist für Gussas-

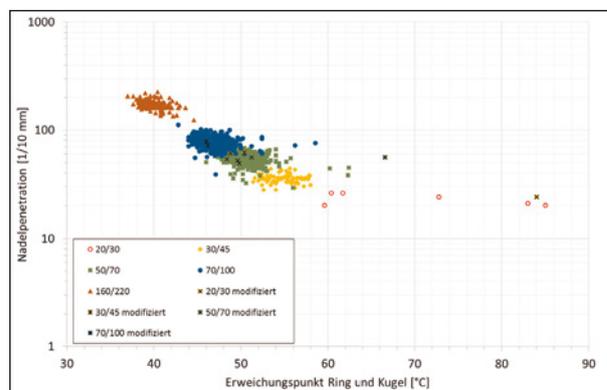


Bild 51: Zusammenhang zwischen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungs-jahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 1)

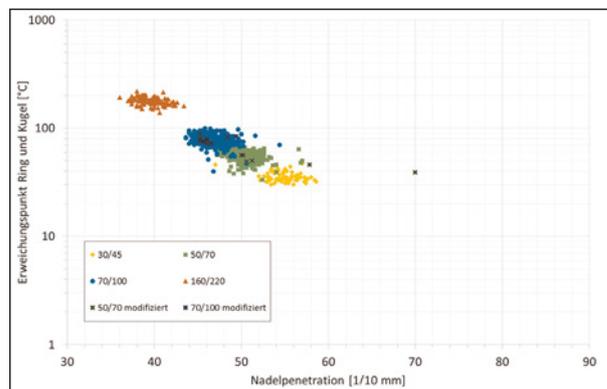


Bild 52: Zusammenhang zwischen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungs-jahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 2)

phalt eingesetzt wird, der diese Zusätze enthalten muss.

Die Prüfergebnisse der Bitumen 160/220 liegen in einem deutlich vom nächst härteren Bitumen abgegrenzten Bereich im oberen Teil der Grafik. Bei den Daten der Bitumen 70/100 und 50/70 liegt ein großer Überschneidungsbereich vor. Die Werte der Bitumen 30/45 liegen im unteren Bereich der Grafik und weisen keinen Überschneidungsbereich mit dem Bitumen 50/70 auf. Da bei den modifizierten Bindemitteln kein systematischer Unterschied zu den nicht modifizierten Bindemitteln vorlag, wurden diese bei den weiteren Bewertungen nicht mehr separat betrachtet.

Auch bei der Darstellung des Zusammenhangs des Penetrationsindex und des Erweichungspunktes Ring und Kugel ergab sich eine Abstufung der Bindemittelsorte (Bild 53 und Bild 54). Obwohl der Penetrationsindex unter anderem aus dem Erweichungspunkt Ring und Kugel berechnet wird, wurde diese Darstellungsform als erweiterte Betrachtungsweise der Forschungsergebnisse gewählt, um die Möglichkeit einer Differenzierung der Bindemittel

und ihrer Eigenschaften anhand des Penetrationsindex zu untersuchen.

Dabei liegt der Großteil der Daten unabhängig von der Bindemittelsorte bei einem Penetrationsindex zwischen 0,0 und -2,0. Die Unterscheidung der Bindemittel kann dementsprechend nur in Kombination mit einem weiteren Kennwert, hier dem Erweichungspunkt Ring und Kugel erfolgen.

Nachfolgend ist der Zusammenhang der Abnahme der Nadelpenetration und der Zunahme des Erweichungspunktes nach der Alterung der Bindemittel durch RTFOT für die Untersuchungsjahre 2014 (Bild 55) und 2015 (Bild 56) dargestellt.

Die Datensätze der Untersuchungsjahre 2014 und 2015 zeigen eine hohe Übereinstimmung. Lediglich die Anzahl und Ausprägung der Ausreißer ist in 2014 etwas höher.

Das Bindemittel 20/30 weist eine durchschnittliche Änderung der Nadelpenetration von -28,5 % und eine Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 6,6 °C auf.

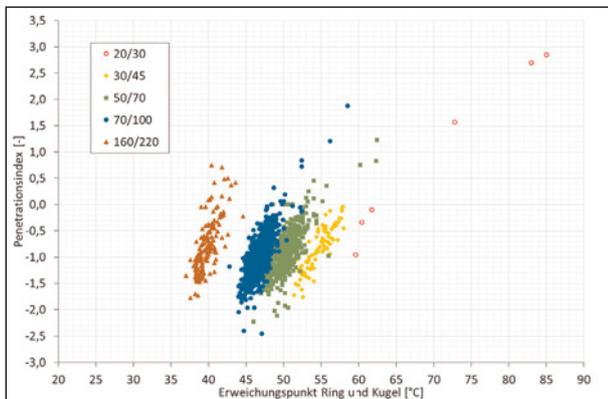


Bild 53: Penetrationsindex – Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 3)

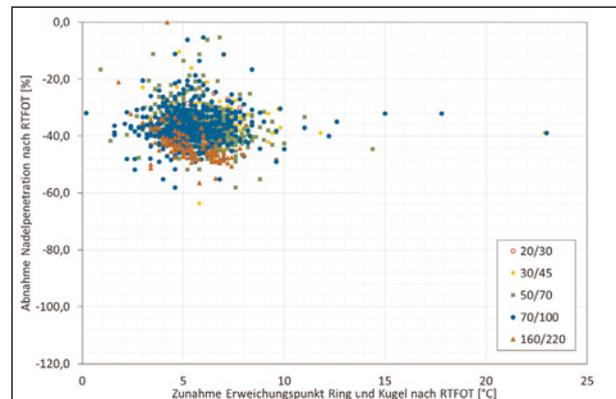


Bild 55: Alterungsverhalten nach RTFOT, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 5)

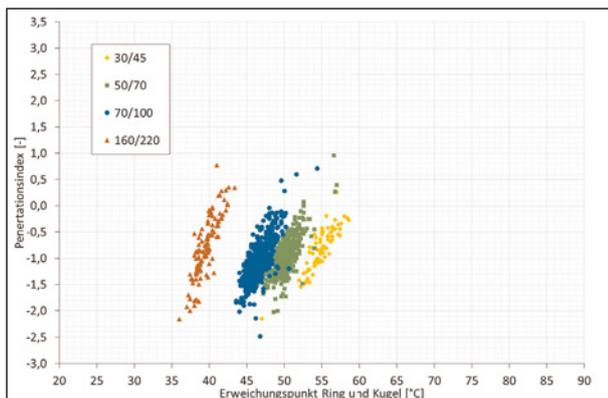


Bild 54: Penetrationsindex – Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 4)

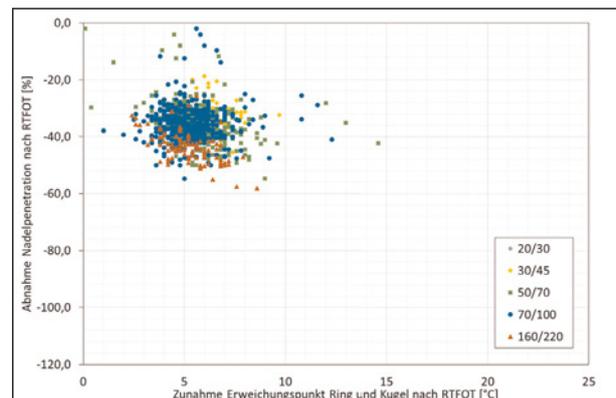


Bild 56: Alterungsverhalten nach RTFOT, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 6)

Im Untersuchungsjahr 2014 weist das Bindemittel 50/70 eine durchschnittliche Änderung der Nadelpenetration von -36,7 % auf und eine Zunahme des Erweichungspunktes von 6,0 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 beträgt die Änderung der Nadelpenetration im Durchschnitt -35,4 % und der Erweichungspunkt stieg um durchschnittlich 5,7 °C.

Das Bindemittel 70/100 weist im Untersuchungsjahr 2014 eine durchschnittliche Änderung der Nadelpenetration von -37,9 % auf und der Erweichungspunkt Ring und Kugel stieg um 5,4 °C an. Im Jahr 2015 waren die Änderungen vergleichbar. Hier sank die Nadelpenetration im Durchschnitt um -37,9 % und der Erweichungspunkt Ring und Kugel erhöhte sich ebenfalls auf 5,4 °C.

Die Änderung der Nadelpenetration im Untersuchungsjahr 2014 bei der Bindemittelsorte 160/220 beträgt im Durchschnitt -43,5 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 5,3 °C. Auch hier sind die Werte aus dem Untersuchungsjahr 2015 vergleichbar mit einer Änderung der Nadelpenetration um -43,5 % und einer Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 5,2 °C.

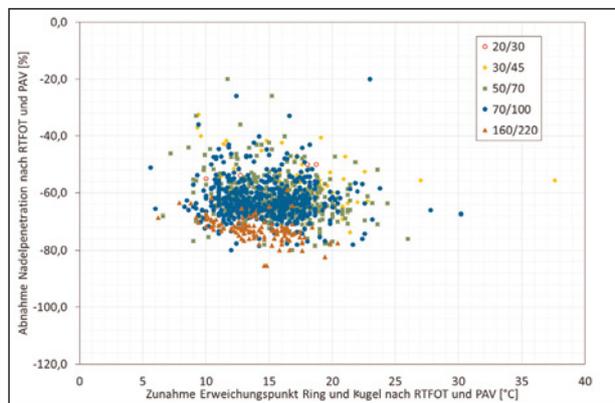


Bild 57: Alterungsverhalten nach RTFOT und PAV, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 7)

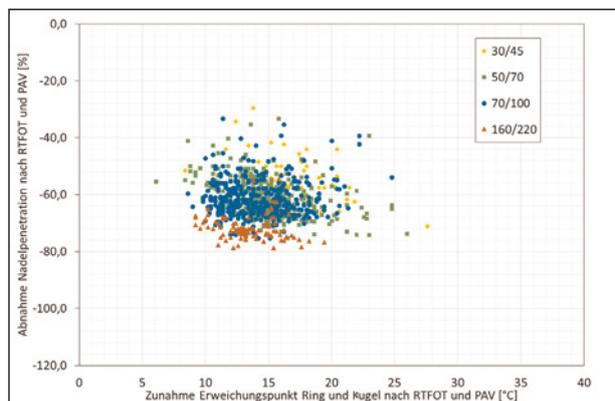


Bild 58: Alterungsverhalten nach RTFOT und PAV, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 8)

In Bild 57 und Bild 58 ist der Zusammenhang der Abnahme der Nadelpenetration und der Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach der Alterung mit dem RTFOT- und dem PAV-Verfahren für die Untersuchungsjahre 2014 und 2015 dargestellt.

Bindemittelsorte	Jahr	Änderung der Nadelpenetration nach RTFOT-Alterung		Änderung der Nadelpenetration nach RTFOT- und PAV-Alterung	
		[%]	[1/10 mm]	[%]	[1/10 mm]
20/30	2014	-28,51	-6,50	-52,78	-12,00
	2015	-	-	-	-
30/45	2014	-32,93	-11,88	-56,35	-20,36
	2015	-31,77	-11,31	-55,47	-19,70
50/70	2014	-36,72	-20,25	-62,29	-34,19
	2015	-35,43	-19,18	-61,64	-33,23
70/100	2014	-37,87	-29,69	-66,31	-51,83
	2015	-37,22	-28,99	-66,46	-51,75
160/220	2014	-43,45	-74,34	-72,83	-124,51
	2015	-43,43	-77,32	-71,84	-127,81

Die kursiv dargestellten Werte des Straßenbaubitumens 20/30 beruhen auf einer zu geringen Grundmenge, um ausreichend repräsentativ zu sein.

Tab. 29: Änderung der Nadelpenetration der Straßenbaubitumen durch Alterung

Bindemittelsorte	Jahr	Änderung Erweichungspunkt Ring und Kugel nach RTFOT-Alterung		Änderung Erweichungspunkt Ring und Kugel nach RTFOT- und PAV-Alterung	
		[%]	[°C]	[%]	[°C]
20/30	2014	9,61	6,55	22,39	15,07
	2015	-	-	-	-
30/45	2014	12,18	6,69	30,10	16,51
	2015	11,30	6,20	29,04	15,95
50/70	2014	11,88	5,96	30,72	15,42
	2015	11,27	5,67	30,09	15,12
70/100	2014	11,59	5,40	31,26	14,57
	2015	11,24	5,21	30,76	14,27
160/220	2014	13,44	5,33	35,36	14,05
	2015	13,12	5,18	34,19	13,50

Die kursiv dargestellten Werte des Straßenbaubitumens 20/30 beruhen auf einer zu geringen Grundmenge, um ausreichend repräsentativ zu sein.

Tab. 30: Änderung des Erweichungspunktes Ring und Kugel der Straßenbaubitumen durch Alterung

Auch hier zeigt sich eine relative gute Übereinstimmung der Datensätze aus den beiden Untersuchungsjahren.

Für das Bindemittel 20/30 zeigt sich eine durchschnittliche Abnahme der Nadelpenetration von -52,85 % und eine Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 15,1 °C auf.

Im Untersuchungsjahr 2014 weisen die Bindemittel 50/70 eine durchschnittliche Abnahme der Nadelpenetration von -62,3 % auf und eine Zunahme des Erweichungspunktes von 15,4 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 beträgt die Abnahme der Nadelpenetration im Durchschnitt -61,6 % und die Zunahme des Erweichungspunktes 15,1 °C.

Für die Bindemittel 70/100 wurde im Untersuchungsjahr 2014 eine durchschnittliche Abnahme der Nadelpenetration von -66,3 % und eine Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 14,6 °C festgestellt. Die Abnahme der Nadelpenetration im Untersuchungsjahr 2015 liegt hier bei -66,5 % und die Änderung des Erweichungspunktes bei 14,3 °C.

Die Abnahme der Nadelpenetration im Untersuchungsjahr 2014 bei der Bindemittelsorte 160/220 beträgt im Durchschnitt -72,8 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 14,1 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 beträgt die Abnahme der Nadelpenetration -71,8 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 13,5 °C.

Die durchschnittliche Änderung der Nadelpenetration sowie des Erweichungspunktes Ring und Kugel sind zusammenfassend in nachfolgender Tabelle 29 und Tabelle 30 dargestellt.

In Anhang A Tabelle A 35 und Tabelle A 36 sind zudem die Änderungswerte der Nadelpenetration und des Erweichungspunktes Ring und Kugel für die modifizierten Straßenbaubitumen und die zurückgewonnenen Straßenbaubitumen dargestellt.

7.2.2 Vergleich der polymodifizierten Bindemittel

In Bild 59 und Bild 60 ist der Zusammenhang des Erweichungspunktes Ring und Kugel und der Nadelpenetration für die modifizierten Bindemittel in den Untersuchungsjahren 2014 und 2015 dargestellt.

Im Vergleich zu den Straßenbaubitumen ist hier keine so eindeutige Abstufung der verschiedenen Bindemittelsorten erkennbar. Zudem liegt hier eine höhere Streuung der Daten vor.

Die Datensätze aus den Untersuchungsjahren 2014 und 2015 weisen trotz der hohen Streuung der Daten eine noch gute Übereinstimmung auf. Wie bei vielen anderen Prüfergebnissen ist die Streuung der Daten aus 2014 grundsätzlich etwas höher.

Wie bei den Straßenbaubitumen war auch hier keine systematische Änderung durch eine Modifizierung zu erkennen.

In Bild 61 und Bild 62 ist der Zusammenhang des Penetrationsindex und des Erweichungspunktes Ring und Kugel der modifizierten Bindemittel für die Untersuchungsjahre 2014 und 2015 dargestellt. Auch hier dient diese Darstellung wie in Kapitel 7.2.1 einer erweiterten Betrachtungsweise der Forschungsdaten.

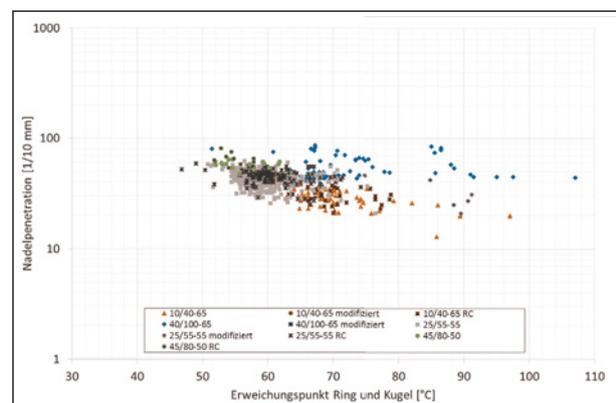


Bild 59: Zusammenhang zwischen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 9)

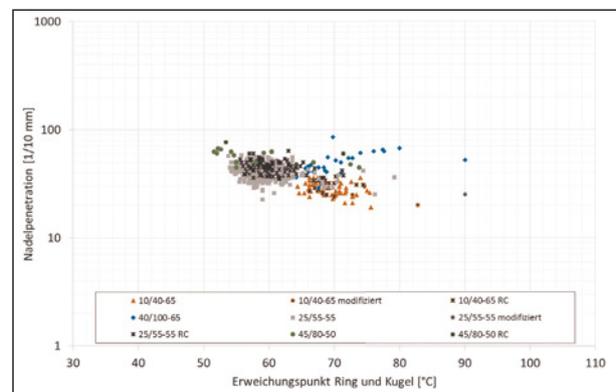


Bild 60: Zusammenhang zwischen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 10)

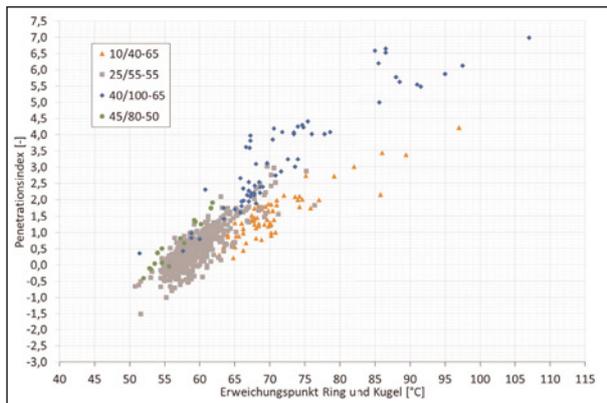


Bild 61: Zusammenhang zwischen Penetrationsindex und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 11)

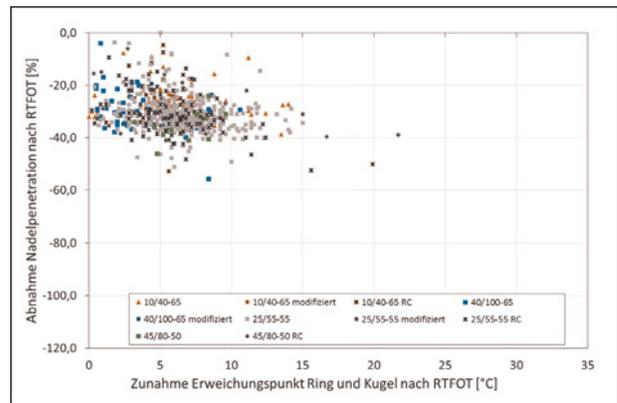


Bild 63: Alterungsverhalten nach RTFOT, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 13)

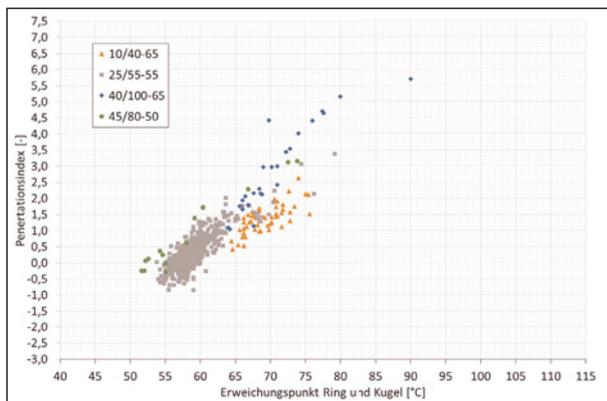


Bild 62: Zusammenhang zwischen Penetrationsindex und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 12)

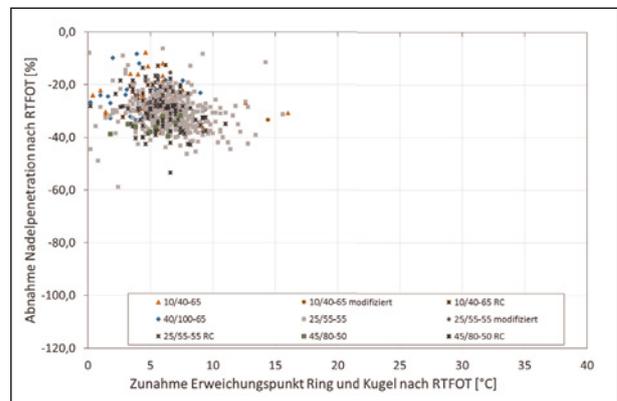


Bild 64: Alterungsverhalten nach RTFOT, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 14)

Es zeigte sich, dass der Penetrationsindex bei den Bindemittelsorten 25/55–55 und 45/80–50 zwischen 1,5 und -1,0 lag. Bei der Bindemittelsorte 10/40–65 lag der Penetrationsindex zwischen 2,0 und 0,0, vereinzelte Werte lagen noch höher. Die größte Streuung des Penetrationsindexes wies das Bindemittel 40/100–65 auf. Hier lag der Großteil der Daten zwischen 4,0 und 1,0. Einzelne Datensätze erreichten Werte von bis zu 7,0.

Die Daten der Bindemittelsorte 25/55–55 weisen mit denen der übrigen Bindemittel Überschneidungsbereiche auf.

In Bild 63 und Bild 64 ist der Zusammenhang der Nadelpenetration und des Erweichungspunktes Ring und Kugel der modifizierten Bindemittel nach Alterung mit dem RTFOT-Verfahren dargestellt.

Bei der Bindemittelsorte 10/40–65 wurde durch die Alterung eine mittlere Änderung der Nadelpenetration von 26,4 % im Untersuchungsjahr 2014 erreicht und eine Zunahme des Erweichungspunktes Ring

und Kugel von 6,2 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 betrug die durchschnittliche Änderung der Nadelpenetration 26,1 und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 5,7 °C.

Die mittlere Abnahme der Nadelpenetration bei der Bindemittelsorte 25/55–55 betrug im Untersuchungsjahr 2014 im Durchschnitt 31,2 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 6,5 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 lagen diese Werte in einem vergleichbaren Bereich mit einer Änderung der Nadelpenetration von 30,8 % und einer Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 6,6 °C.

Für die Daten aus dem Untersuchungsjahr 2014 lag die durchschnittliche Abnahme der Nadelpenetration bei der Bindemittelsorte 40/100–65 bei 29,7 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel bei 2,5 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 bewirkte die RTFOT-Alterung eine Abnahme der Nadelpenetration von 24,5 % und eine Zunahme des Erweichungspunktes um 4,5 °C.

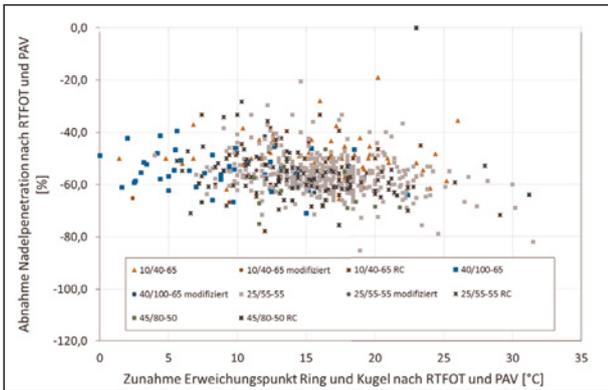


Bild 65: Alterungsverhalten nach RTFOT und PAV, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 15)

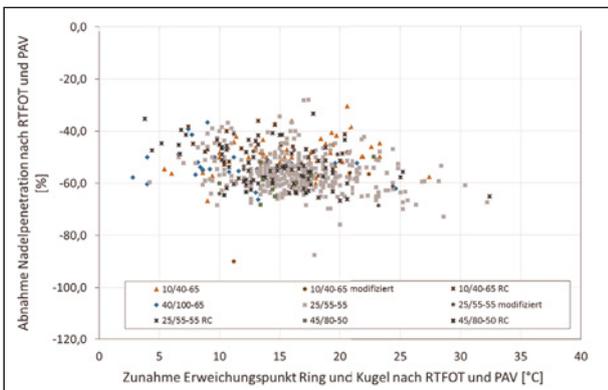


Bild 66: Alterungsverhalten nach RTFOT und PAV, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 16)

Bei der Bindemittelsorte 45/80–50 wurde im Untersuchungsjahr 2014 eine durchschnittliche Abnahme der Nadelpenetration von 34,5 % erreicht und eine mittlere Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 6,8 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 betrug die Abnahme der Nadelpenetration im Durchschnitt 35,7 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 5,0 °C.

In Bild 65 und Bild 66 ist der Zusammenhang der Abnahme der Nadelpenetration und der Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach der Alterung mit dem RTFOT-Verfahren und dem PAV-Verfahren dargestellt.

Bei den Bindemitteln der Sorte 10/40–65 wurde für das Untersuchungsjahr 2014 durch die Alterung eine mittlere Abnahme der Nadelpenetration von 49,9 % und eine mittlere Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 16,2 °C festgestellt. Für das Untersuchungsjahr 2015 beträgt die durchschnittliche Abnahme der Nadelpenetration 49,6 % und Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 15,9 °C.

Bindemittelsorte	Jahr	Änderung der Nadelpenetration nach RTFOT-Alterung		Änderung der Nadelpenetration nach RTFOT- und PAV-Alterung	
		[%]	[°C]	[%]	[°C]
10/40-65	2014	-26,44	-7,80	-49,93	-14,54
	2015	-26,06	-7,62	-49,59	-14,36
25/55-55	2014	-31,16	-13,47	-56,38	-24,20
	2015	-30,82	-12,87	-56,01	-23,34
40/100-65	2014	-29,67	-16,49	-54,58	-30,10
	2015	-24,47	-12,62	-53,06	-27,11
45/80-50*	2014	-34,49	-19,92	-60,72	-35,08
	2015	-35,66	-21,82	-59,09	-36,09

* nur sehr geringe Datenbasis

Die in kursiv dargestellten Werte des polymermodifizierten Bitumens 45/80–50 beruhen auf einer zu geringen Grundmenge, um ausreichend repräsentativ zu sein.

Tab. 31: Änderung der Nadelpenetration der polymermodifizierten Bitumen durch Alterung

Bindemittelsorte	Jahr	Änderung Erweichungspunkt Ring und Kugel nach RTFOT-Alterung		Änderung Erweichungspunkt Ring und Kugel nach RTFOT- und PAV-Alterung	
		[%]	[°C]	[%]	[°C]
10/40-65	2014	9,04	6,24	23,56	16,24
	2015	8,38	5,75	23,08	15,90
25/55-55	2014	11,00	6,49	27,48	16,21
	2015	11,15	6,56	27,72	16,47
40/100-65	2014	4,09	2,54	11,51	7,50
	2015	6,30	4,49	15,23	10,82
45/80-50	2014	11,95	6,83	27,42	15,65
	2015	8,87	5,02	27,81	15,47

* nur sehr geringe Datenbasis

Die in kursiv dargestellten Werte des polymermodifizierten Bitumens 45/80–50 beruhen auf einer zu geringen Grundmenge, um ausreichend repräsentativ zu sein.

Tab. 32: Änderung der Nadelpenetration der polymermodifizierten Bitumen durch Alterung

Die Abnahme der Nadelpenetration bei der Bindemittelsorte 25/55–55 betrug im Untersuchungsjahr 2014 im Durchschnitt 56,4 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel betrug 16,2 °C. Im Untersuchungsjahr 2015 lag die durchschnittliche Zunahme der Nadelpenetration bei 56,0 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel bei 11,2 °C.

Für die Daten aus dem Untersuchungsjahr 2014 betrug die durchschnittliche Abnahme der Nadel-

penetration bei der Bindemittelsorte 40/100–65 54,6 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 7,5°C. Im Untersuchungsjahr 2015 bewirkte die Alterung eine Abnahme der Nadelpenetration von 53,1 % und eine Zunahme des Erweichungspunktes um 10,8°C.

Bei der Bindemittelsorte 45/80–50 wurde im Untersuchungsjahr 2014 eine durchschnittliche Abnahme der Nadelpenetration von 60,7 % erreicht und eine Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel von 15,6°C. Im Untersuchungsjahr 2015 betrug die Abnahme der Nadelpenetration im Durchschnitt 59,1 % und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel 15,5°C.

Die durchschnittliche Änderung der Nadelpenetration sowie des Erweichungspunktes Ring und Kugel ist in Tabelle 31 und Tabelle 32 dargestellt.

7.2.3 Zusammenfassung

Grundsätzlich war bei den Straßenbaubitumen eine relativ gute Identifizierung durch die kombinatorische Betrachtung der Standard-Kenndaten Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel möglich. Dabei wiesen die Bitumensorten 50/70 und 70/100 jedoch Überschneidungsbereiche auf.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass etwa gleiche mittlere Veränderungen der Erweichungspunkte Ring und Kugel der Bindemittel infolge der beiden Alterungsstufen festgestellt wurden. Diese lagen bei ca. +6°C (RTFOT-gealtert) und +15°C (RTFOT- und PAV-gealtert). Die mittleren Veränderungen der Nadelpenetration zeigten hingegen eine Abhängigkeit von der Bitumenhärte. Die prozentuale Abnahme der Nadelpenetration erhöhte sich mit abnehmender Bitumenhärte. Dies ist nicht unwesentlich auf die Relativbetrachtung auf die unterschiedlich hohen Bezugswerte im frischen Zustand zurückzuführen.

Bei den polymermodifizierten Bindemitteln hingegen war keine deutliche Identifizierung der Bindemittelsorte anhand der Standard-Kennwerte möglich.

Die Abnahme der Nadelpenetration und die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel variierte je nach Bindemittelsorte. Aufgrund dieser Variationen kam es bei der Betrachtung der Daten nach RTFOT- und nach RTFOT- und PAV-Alterung zu einer deutlichen Streuung der Datenwerte.

7.3 BBR-Ergebnisse

Die statistische Bewertung der BBR-Ergebnisse erfolgte anhand von Box-Whisker-Plots sowie in detaillierter tabellarischer Form (Anhang B, Tabelle B 1 bis Tabelle B 32).

7.3.1 Statistische Bewertung

Für die Bindemittelsorte 20/30 wurde sowohl im Untersuchungsjahr 2014 als auch 2015 jeweils nur ein gültiger Datensatz geliefert, daher war eine statistische Bewertung hier nicht möglich.

Für das Untersuchungsjahr 2014 wurden für die Bindemittelsorte 30/45 insgesamt 21 gültige Datensätze geliefert, die alle von Bindemittelherstellern stammen. Im Untersuchungsjahr 2015 wurden 45 gültige Datensätze geliefert, ebenfalls ausschließlich von Bindemittelherstellern.

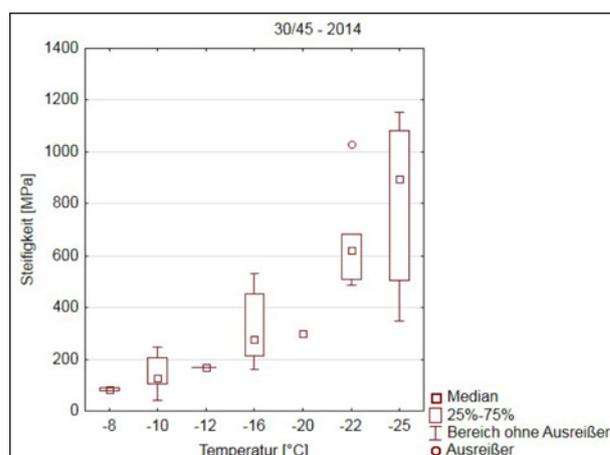


Bild 67: Steifigkeit Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 1)

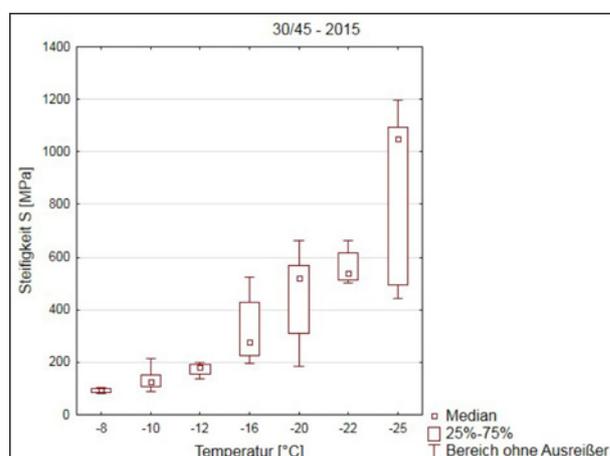


Bild 68: Steifigkeit Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 2)

In beiden Untersuchungsjahren wurden insgesamt sieben Prüftemperaturen verwendet (Bild 67 und Bild 68).

Die Werte der Biegekriechsteifigkeit weisen eine typische exponentielle Zunahme mit der Verringerung der Prüftemperatur auf. Der m-Wert hingegen schien mit abnehmender Prüftemperatur tendenziell linear abzufallen.

Es lagen keine statistischen Extremwerte bei der Biegekriechsteifigkeit und dem m-Wert vor (Bild 67 bis Bild 70). Im Untersuchungsjahr 2014 lag bei einer Prüftemperatur von -22 °C ein einzelner Ausreißer vor, welcher mit einem Wert von 1.029 MPa fast doppelt so hoch war, wie der Mittelwert der Biegekriechsteifigkeit (ca. 660 MPa). Derselbe Datensatz lieferte auch für den m-Wert einen Ausreißer mit einem geringen Wert auf. Der m-Wert betrug hier 0,213, während der Mittelwert bei dieser Prüftemperatur bei 0,256 lag. Die statistische Bewertung be-

ruhte hier jedoch nur auf insgesamt 6 Datensätzen, die für diese Prüftemperatur geliefert wurden.

Im Untersuchungsjahr 2015 lagen für den m-Wert Ausreißer bei den Prüftemperaturen -20 °C und -22 °C vor, die jedoch keine Gemeinsamkeiten bezüglich der Herkunft (Schlüssel) haben.

Für die Bindemittelorte 50/70 wurden im Untersuchungsjahr 2014 40 Datensätze von Bindemittelherstellern geliefert, 13 von Mischgutherstellern und 5 von Auftraggebern. Diese wurden bei insgesamt sechs verschiedenen Prüftemperaturen untersucht. Für das Untersuchungsjahr 2015 liegen 44 Datensätze von Bindemittelherstellern vor, 4 von Mischgutherstellern und 6 von Auftraggebern. Hier fand eine zusätzliche Prüftemperatur (-12 °C) Berücksichtigung.

Die Beigekriechsteifigkeiten in den beiden Untersuchungsjahren waren vergleichbar (Bild 71 und

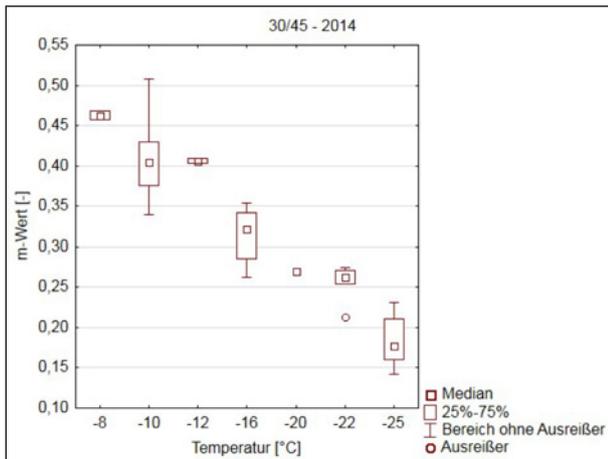


Bild 69: m-Wert Bindemittelorte 30/45, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 3)

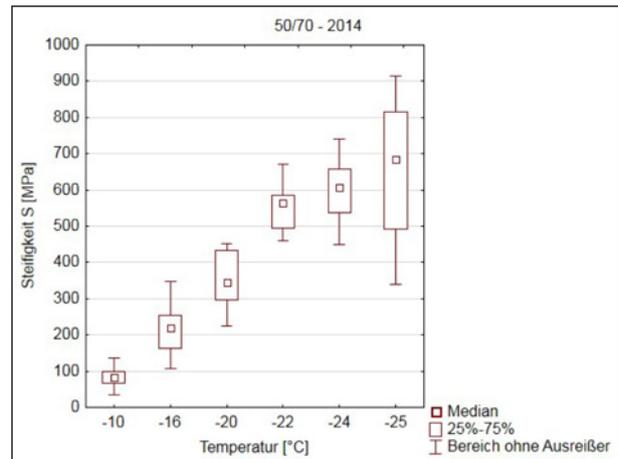


Bild 71: Steifigkeit Bindemittelorte 50/70, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 5)

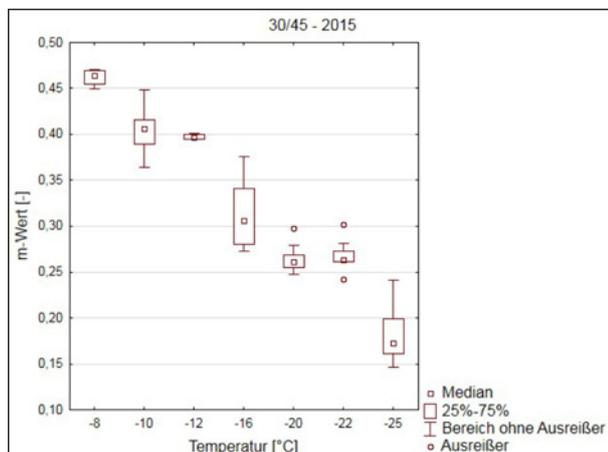


Bild 70: m-Wert Bindemittelorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 4)

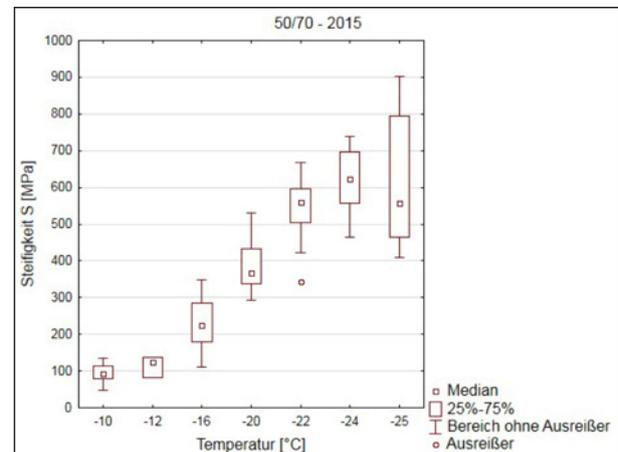


Bild 72: Steifigkeit Bindemittelorte 50/70, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 6)

Bild 72). Jedoch lag ein vereinzelter Ausreißer im Untersuchungsjahr 2015 bei einer Prüftemperatur von -22 °C vor mit einem Wert von 344 MPa vor. Der Mittelwert bei dieser Prüftemperatur betrug ca. 542 MPa . Derselbe Datensatz bildete bei der Betrachtung des m-Wertes zwar den hier höchsten Wert, jedoch war dieser aus statistischer Sicht kein Ausreißer.

Im Untersuchungsjahr 2014 lagen beim m-Wert mehrere Extremwerte und Ausreißer vor (Bild 73). Die beiden höchsten Extremwerte bei einer Prüftemperatur von -16 °C und -25 °C sind bei demselben Bindemittel festgestellt worden. Der Ausreißer bei einer Prüftemperatur von -10 °C und der zweite Extremwert bei einer Prüftemperatur von -16 °C sind ebenfalls auf ein Bindemittel zurückzuführen. Die Ausreißer, die bei den Prüftemperaturen -22 °C und -24 °C festgestellt wurden, waren auf eine generell sehr geringe Streuung der Werte zurückzuführen, die in einem geringen Pro-

benumfang von nur sieben, bzw. neun Datensätzen begründet lag.

Die im Untersuchungsjahr 2015 als Ausreißer bei einer Prüftemperatur von -16 °C festgestellten Datensätze wiesen bei den übrigen Prüftemperaturen keine Besonderheiten auf (Bild 74).

Für die Bindemittelsorte 70/100 wurden für das Untersuchungsjahr 2014 insgesamt 106 gültige Datensätze berücksichtigt, 46 davon stammen von Bindemittelherstellern, 56 von Mischgutherstellern und vier von Auftraggebern. Für das Untersuchungsjahr 2015 wurden 42 Datensätze von Bindemittelherstellern geliefert, 15 von Mischgutherstellern und drei von Auftraggebern.

Bezüglich der Biegebruchsteifigkeit war in beiden Untersuchungsjahren auffällig, dass die Streuung bei den Prüftemperaturen -22 °C , -24 °C und -25 °C sehr groß war (Bild 75 und Bild 76). Die Mittelwerte

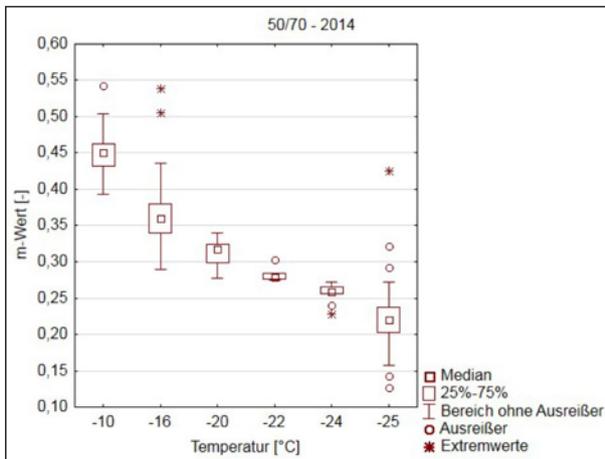


Bild 73: m-Wert Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 7)

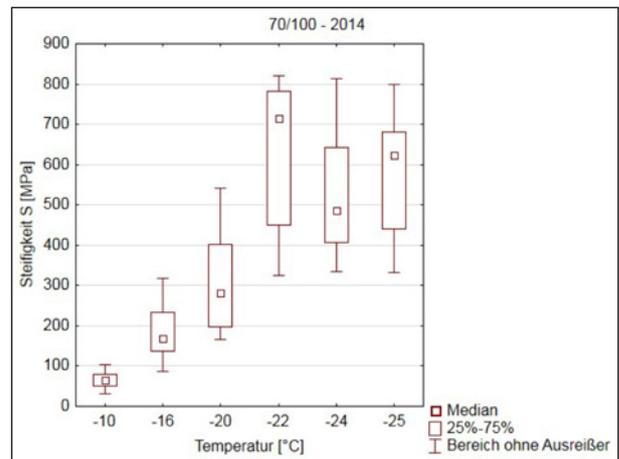


Bild 75: Steifigkeit Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 9)

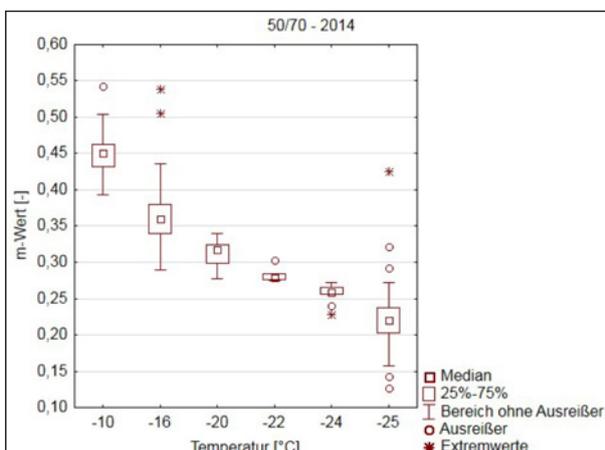


Bild 74: m-Wert Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 8)

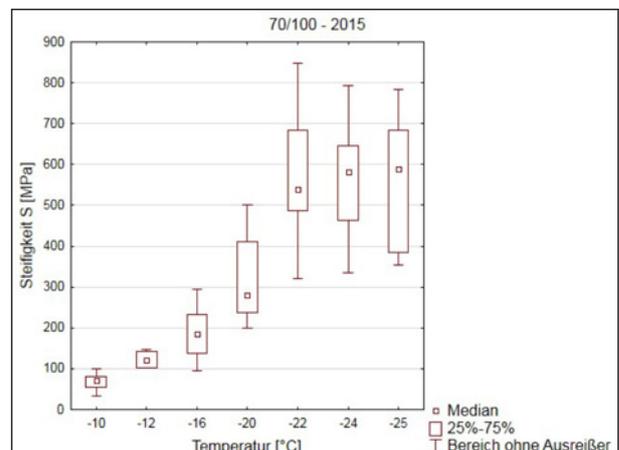


Bild 76: Steifigkeit Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 10)

der Biegekiechsteifigkeit lagen im Untersuchungsjahr 2014 bei 580 MPa (-22 °C), bei 562 MPa (-24 °C) und bei 550 MPa (-25 °C). Im Untersuchungsjahr 2015 lagen die Mittelwerte bei 616 MPa (-22 °C), bei 530 MPa (-24 °C) und bei 580 MPa (-25 °C). Damit ließ sich keine klare Differenzierung der Biegekiechsteifigkeit bei den drei verschiedenen Prüftemperaturen erkennen.

Für das Untersuchungsjahr 2014 wurden vermehrt Ausreißer und Extremwerte beim m-Wert identifiziert (Bild 77). Dabei handelte es sich um Datensätze, die tendenziell zu hohe m-Werte lieferten und zwei Datensätze, die zu niedrige Werte aufwiesen. Im Untersuchungsjahr 2015 beruhen die Ausreißer bei den Prüftemperaturen -10 °C und -22 °C auf demselben Datensatz (Bild 78).

Für das Untersuchungsjahr 2014 lagen für die Bindemittelsorte 160/220 44 Datensätze von Bindemittelherstellern vor, 22 von Mischgutherstellern und 2 von Auftraggebern und für das Untersuchungsjahr

2015 betrug die Gesamtzahl an Datensätzen 30, mit 25 Datensätzen von Bindemittelherstellern, 4 von Mischgutherstellern und einer von einem Auftraggeber.

Für diese Bindemittelsorte lagen Daten für Prüftemperaturen unterhalb von -25 °C vor. Im Untersuchungsjahr 2014 wurden zwei Bindemittel bei einer Prüftemperatur von -32 °C geprüft, zwei bei -34 °C und eines bei -34,5 °C (Bild 79). Im Untersuchungsjahr 2015 wurde ein Bindemittel bei -28 °C geprüft und 4 bei -34 °C (Bild 80).

Bei der Biegekiechsteifigkeit lagen wieder bei den Prüftemperaturen -22 °C, -24 °C und -25 °C sich überschneidende Wertebereiche mit unterschiedlicher Streuung vor.

Die im Untersuchungsjahr 2014 festgestellten Extremwerte bzw. Ausreißer mit zu niedrigem m-Wert stammen alle von derselben Bindemittelprobe (Bild 81).

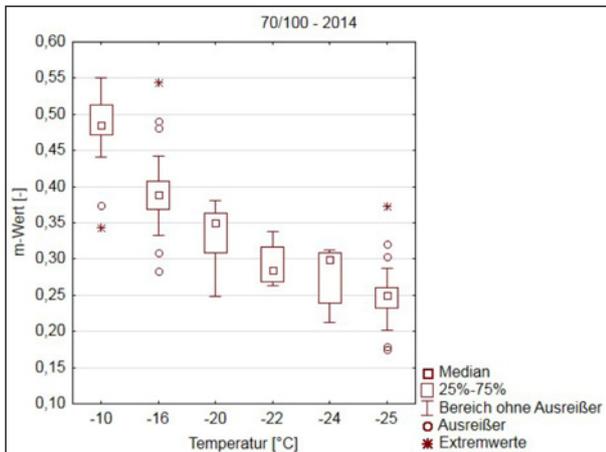


Bild 77: m-Wert Bindemittelsorte 70/ 100, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 11)

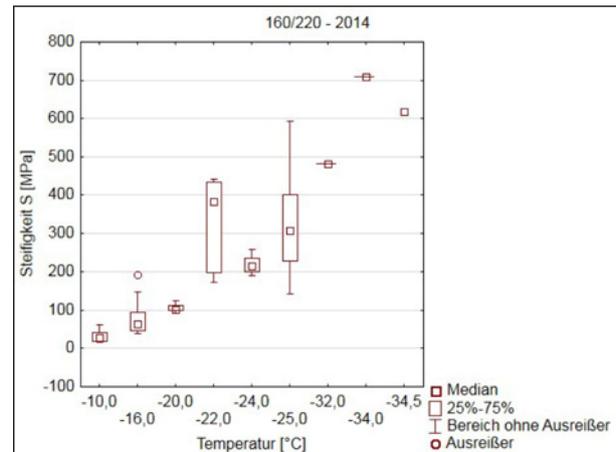


Bild 79: Steifigkeit Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 13)

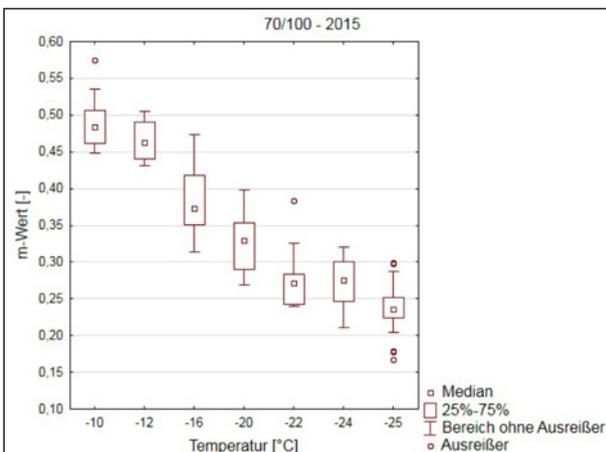


Bild 78: m-Wert Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 12)

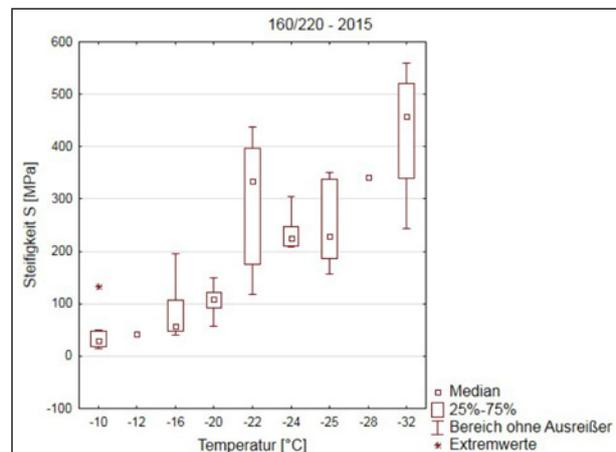


Bild 80: Steifigkeit Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 14)

Im Untersuchungsjahr 2015 fielen die Spannweiten des m-Wertes deutlich größer aus als im Untersuchungsjahr 2014 (Bild 82).

Für das Untersuchungsjahr 2014 wurden 15 gültige Datensätze für die Bindemittelsorte 10/40–65 von Bindemittelherstellern geliefert, 34 von Mischgutherstellern und einer von einem Auftraggeber. Für das Untersuchungsjahr 2015 liegen nur Datensätze von Bindemittelherstellern (31) und Mischgutherstellern (18) vor.

Auch hier wurden wieder vereinzelte Bindemittel bei weniger als -25 °C geprüft.

Die im Untersuchungsjahr 2014 bei der Biege-kriechsteifigkeit festgestellten Ausreißer und Extremwerte sind auf insgesamt vier verschiedene Bindemittel zurückzuführen, von denen zwei dieselbe Herkunft haben (Bild 83). Im Untersuchungsjahr 2015 wurden weniger Prüftemperaturen angegeben (Bild 84).

Beim m-Wert wurden für das Untersuchungsjahr 2015 statistische Ausreißer festgestellt (Bild 85), die jedoch teilweise im Streubereich der Daten aus dem Untersuchungsjahr 2014 liegen (Bild 86). Die Ausreißer, die tendenziell zu hohe Werte anzeigten, stammen von insgesamt sechs verschiedenen Bindemitteln, von denen die mit den höchsten Werten dieselbe Herkunft haben.

Für die Bindemittelsorte 25/55–55 lagen die meisten Datensätze vor. Für das Untersuchungsjahr 2014 wurde 33 Datensätze von Bindemittelherstellern geliefert, 299 von Mischgutherstellern und 39 von Auftraggebern und im Untersuchungsjahr 2015 wurden 59 Datensätze von Bindemittelherstellern geliefert, 240 von Mischgutherstellern und 50 von Auftraggebern.

Die erfassten Prüftemperaturen reichten von -10 °C bis -35 °C . Im Untersuchungsjahr 2014 sind zusätzliche einzelne Bindemittel bei Zwischentemperaturen geprüft worden ($-17,48\text{ °C}$, $-22,73\text{ °C}$ und $-24,24\text{ °C}$).

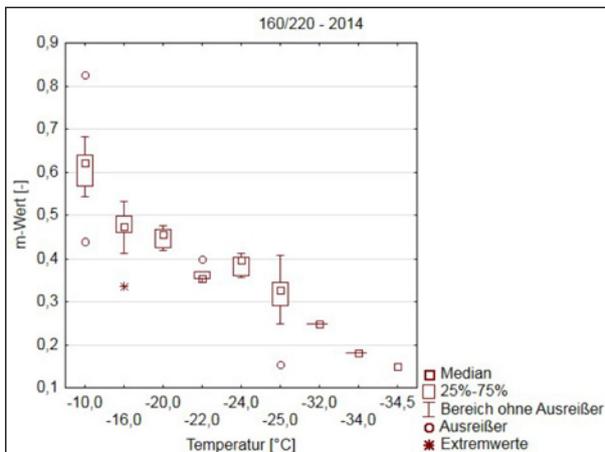


Bild 81: m-Wert Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 15)

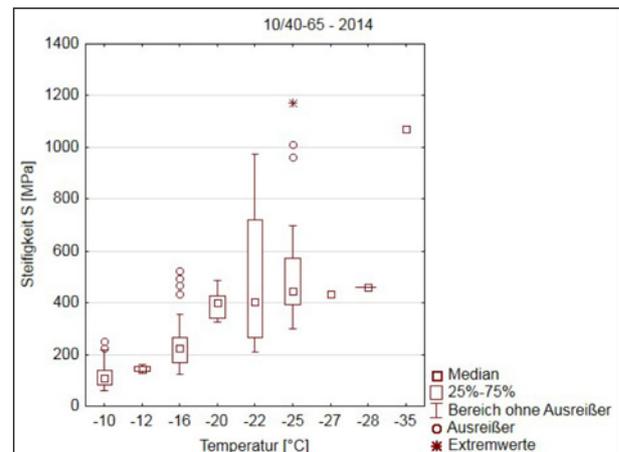


Bild 83: Steifigkeit Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 17)

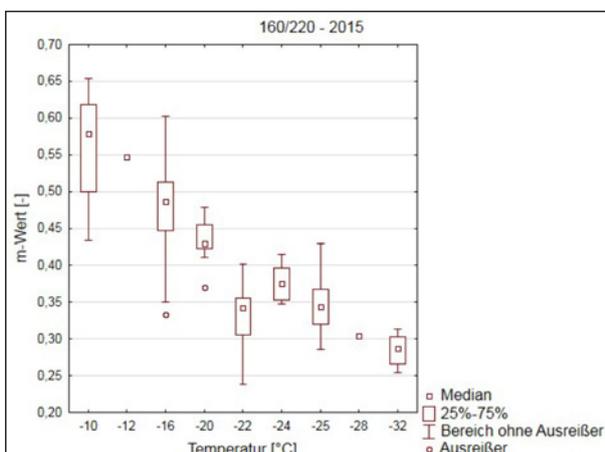


Bild 82: m-Wert Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 16)

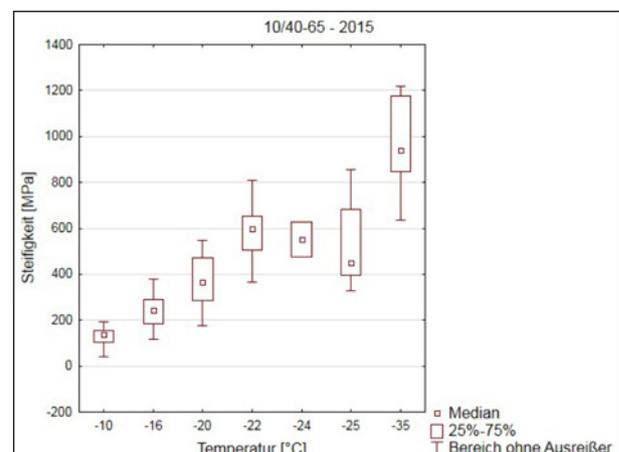


Bild 84: Steifigkeit Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 18)

Bei der Biegekiechsteifigkeit (Bild 87 und Bild 88) zeigte sich auch hier wieder ein exponentieller Anstieg mit sinkender Prüftemperatur. Ab einer Prüftemperatur von -22 °C schien diese jedoch zu stagnieren. Lediglich bei einer Prüftemperatur von -35 °C konnten noch deutlich höhere Biegekiech-

steifigkeiten festgestellt werden, jedoch liegt hier auch eine sehr starke Streuung der Werte vor.

Beim m-Wert wurden in beiden Untersuchungsjahren sehr viele statistische Ausreißer und Extremwerte festgestellt (Bild 89 und Bild 90). Teilweise wiesen

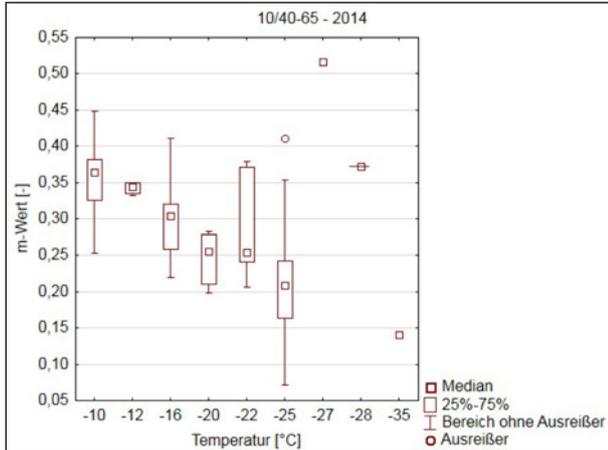


Bild 85: m-Wert Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 19)

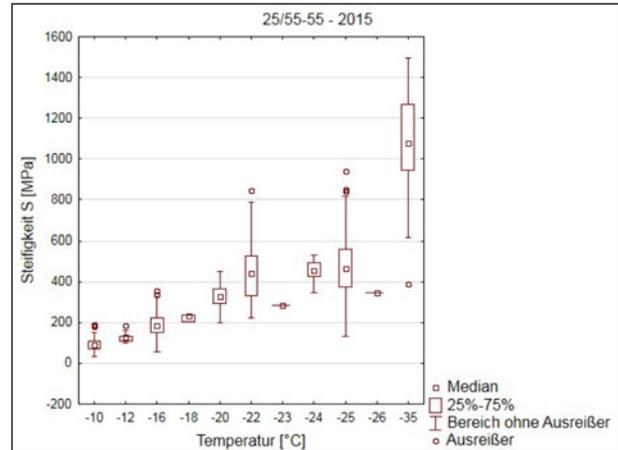


Bild 88: Steifigkeit Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 22)

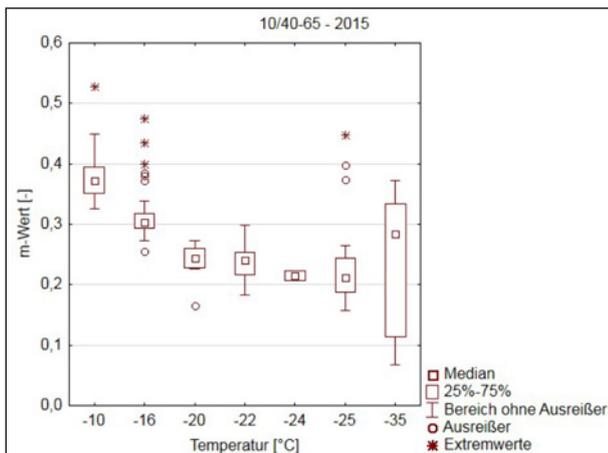


Bild 86: m-Wert Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 20)

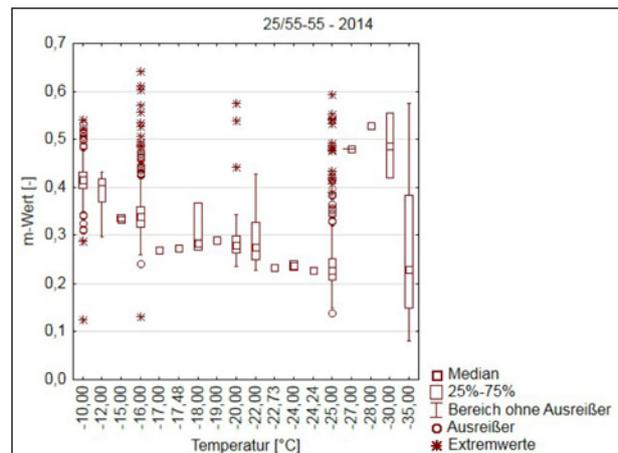


Bild 89: m-Wert Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 23)

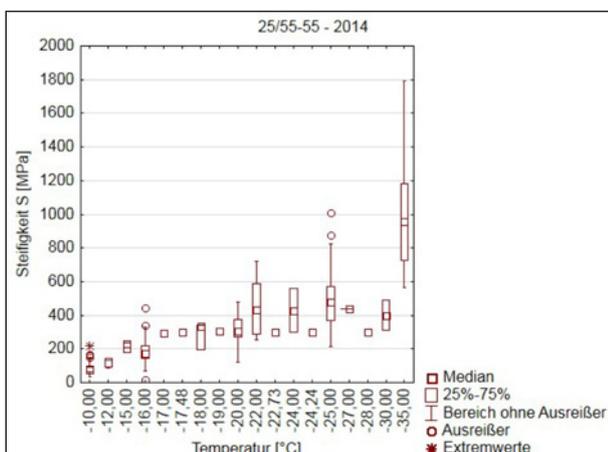


Bild 87: Steifigkeit Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 21)

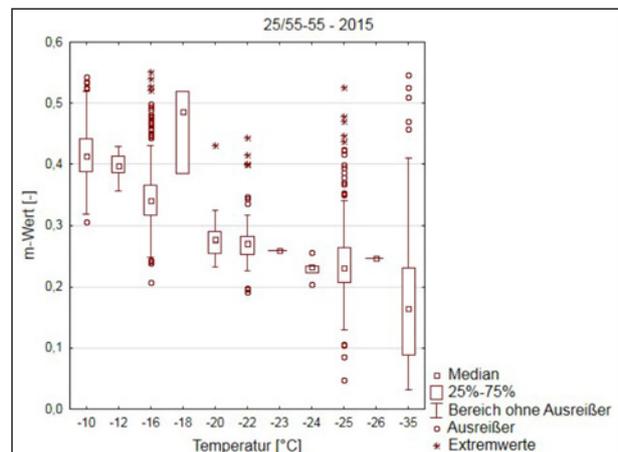


Bild 90: m-Wert Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 24)

diese Datensätze dieselbe Herkunft auf. Grundsätzlich gab es deutlich mehr Ausreißer, die einen erhöhten m-Wert aufweisen als einen niedrigen.

Für die Bindemittelsorte 40/10065 lagen 26 Datensätze für das Untersuchungsjahr 2014 von Bindemittelherstellern vor, 20 von Mischgutherstellern und 4 von Auftraggebern. Im Untersuchungsjahr 2015 haben 15 Bindemittelhersteller, 5 Mischguthersteller und ein Auftraggeber Datensätze geliefert.

Der Prüftemperaturbereich liegt zwischen -10 °C und -28 °C .

Bezüglich der Biegekiechsteifigkeit lagen keine Ausreißer vor. Die Streuung war in beiden Untersuchungsjahren vergleichbar (Bild 91 und Bild 92).

Auch für den m-Wert lagen vergleichbare Streuungen der Daten aus den beiden Untersuchungsjahren vor (Bild 93 und Bild 94). Im Untersuchungsjahr

2014 lagen Ausreißer bei den Prüftemperaturen -10 °C und -12 °C vor, die auf dasselbe Bindemittel zurückzuführen waren, welches nur bei diesen beiden Temperaturen geprüft wurde.

Für das Bindemittel 45/8050 wurden für das Untersuchungsjahr 2014 insgesamt 8 Datensätze von Mischgutherstellern geliefert. Im Untersuchungsjahr 2015 lagen 5 Datensätze von Bindemittelherstellern vor, 6 von Mischgutherstellern und einer von einem Auftraggeber.

Die Grafiken der Biegekiechsteifigkeiten und der m-Werte über der Prüftemperatur befinden sich im Anhang B, Bild B 29 bis Bild B 32.

Aufgrund der geringen Datenmenge streuen die Daten im Untersuchungsjahr 2014 nur sehr gering und vereinzelte Werte wurden daher als Ausreißer erkannt (m-Wert bei -16 °C). Auch im Untersuchungsjahr 2015 werden beim m-Wert Ausreißer erreicht.

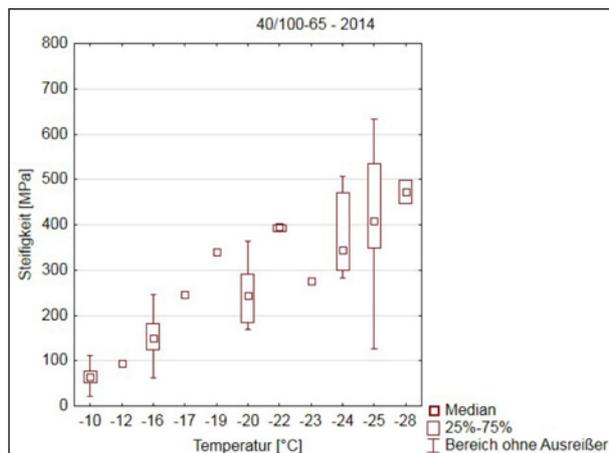


Bild 91: Steifigkeit Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 25)

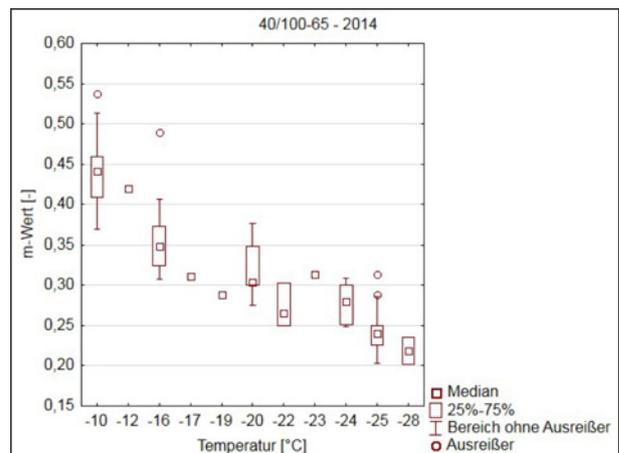


Bild 93: m-Wert Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 27)

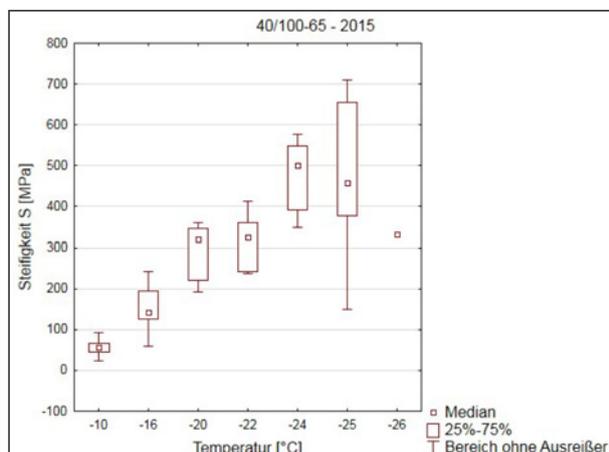


Bild 92: Steifigkeit Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 26)

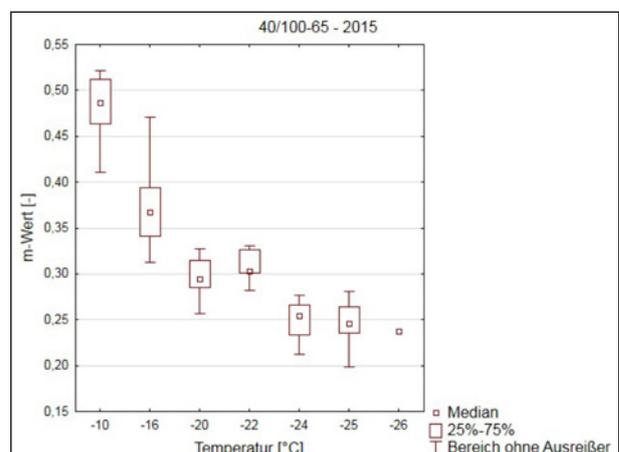


Bild 94: m-Wert Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 28)

Insgesamt ist hier die Grunddatenmenge zu gering, um eine ausreichend belegbare statistische Bewertung vornehmen zu können.

7.3.2 Weitere Bewertungsansätze

Um mögliche Abhängigkeiten der Prüfergebnisse (Steifigkeiten und m-Werte) und eine Differenzierbarkeit der Bindemittelarten und sorten erkennen zu können, wurden die Prüfergebnisse der drei häufigsten Prüftemperaturen (-25 °C, -16 °C und -10 °C) in halblogarithmischer Weise grafisch dargestellt.

Zur weiterführenden Beurteilung der BBR-Ergebnisse wurden zudem die Temperaturen ermittelt, bei denen die Steifigkeit und der m-Wert jeweils ihren kritischen Wert erreichen [ANDERSON, et al., 2011]. Der Parameter T_{S300} entspricht demnach der Temperatur, bei der eine Steifigkeit von 300 MPa erreicht ist und $T_{m0,300}$ entspricht der Temperatur, bei der ein m-Wert von 0,3 erreicht ist [AL BBR, Stand: 01/2017].

Werden die Temperaturen im Diagramm gegeneinander aufgetragen, so lässt sich anhand der Winkelhalbierenden bestimmen, ob das Bindemittel S-bestimmt oder m-bestimmt ist. Liegt die Temperatur $T_{m0,300}$ höher als die Temperatur T_{S300} , so bedeutet dies, dass der Wert des m-Wertes erreicht wird, bevor der Steifigkeitswert erreicht wird. Bindemittel, die diese Eigenschaft erfüllen, gelten als m-bestimmt und liegen in der Grafik entsprechend unterhalb der Winkelhalbierenden.

7.3.3 Straßenbaubitumen

In Bild 96 bis Bild 100 ist für die Straßenbaubitumen und die drei am häufigsten vorkommenden Prüftemperaturen -25 °C, -16 °C und -10 °C die Biegekriechsteifigkeit gegen den m-Wert nach einer Prüfdauer von 60 s aufgetragen.

Bei den Prüftemperaturen -10 °C und -16 °C war insbesondere für das Bitumen 160/220 eine gute Abgrenzung von den übrigen Bitumen zu erkennen.

Für die übrigen Straßenbaubitumen waren sehr große Überschneidungsbereiche festzustellen.

Grundsätzlich waren aber mit abnehmender Härte des Bitumens eine geringere Biegekriechsteifigkeit und ein zunehmender m-Wert ersichtlich.

Eine detaillierte Übersicht über den Einfluss der Wahl der Prüftemperaturen zur Berechnung der

Temperaturen T_{S300} und $T_{m0,3}$ ist in Anhang B Tabelle B 61 bis Tabelle B 63 tabellarisch dargestellt.

Da bei niedrigen Temperaturen (≤ -20 °C) hohe Streuungen der Prüfergebnisse festgestellt wurden, wurden zur Ermittlung der T_{S300} -Werte und $T_{m0,300}$ -Werte nur die beiden höchsten Prüftemperaturen oberhalb von -20 °C verwendet. In der Regel handelte es sich dabei um die Prüftemperaturen zwischen -10 °C und -16 °C. Zwischen diesen Messwerten wurde jeweils eine Exponentialfunktion berechnet, mit deren Hilfe

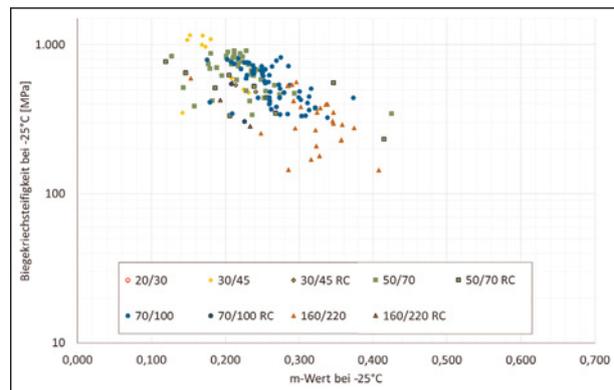


Bild 95: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -25°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 33)

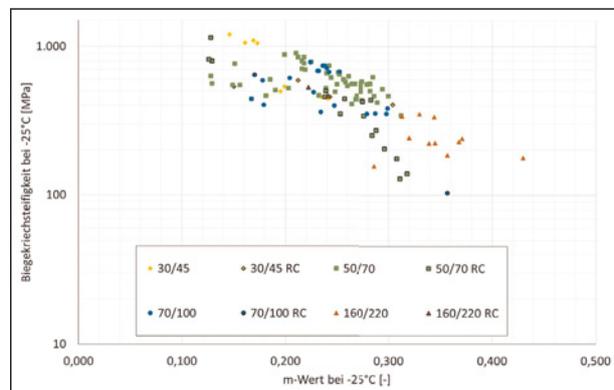


Bild 96: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -25°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 34)

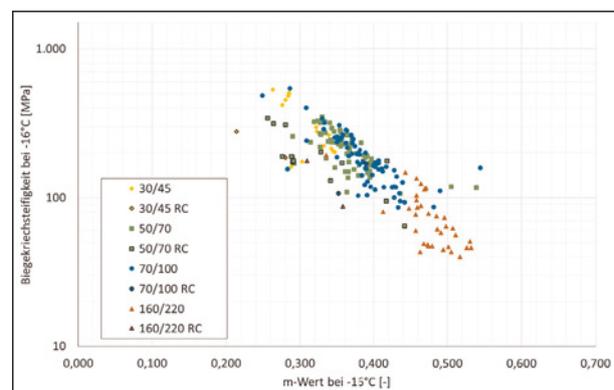


Bild 97: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -16°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 35)

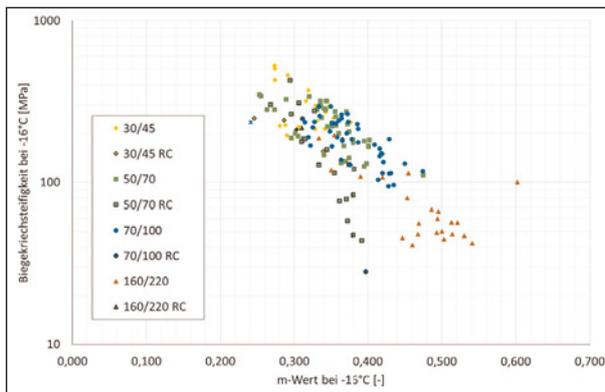


Bild 98: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -16°C , Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 36)

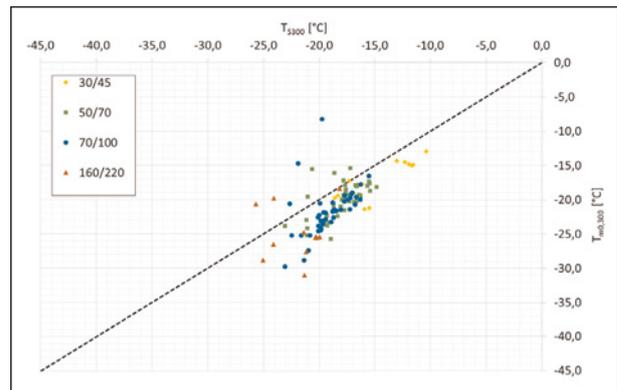


Bild 101: BBR-Ergebnisse der Straßenbaubitumen, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 39)

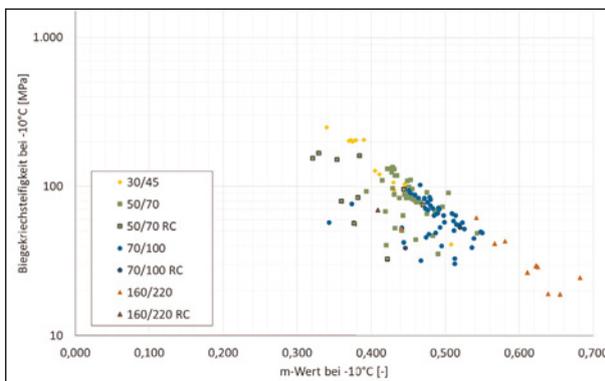


Bild 99: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -10°C , Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 37)

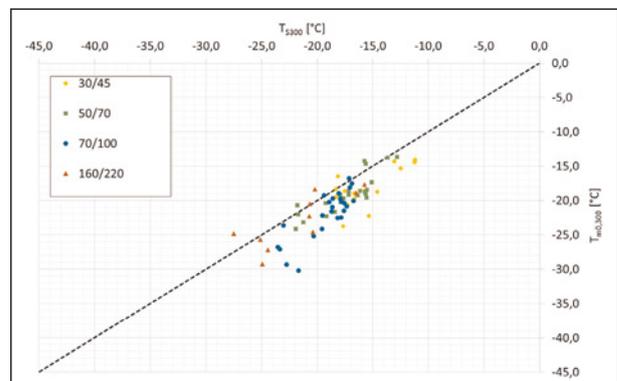


Bild 102: BBR-Ergebnisse der Straßenbaubitumen, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 40)

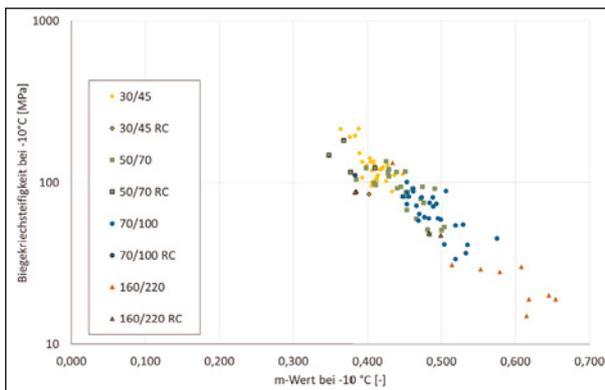


Bild 100: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -10°C , Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 38)

die Werte für T_{S300} und $T_{m0,300}$ inter-, bzw. extrapoliert werden konnten. Grundsätzlich ist die Extrapolation von Prüfdaten als kritisch anzusehen, da dieser eine rein mathematische Berechnung zu Grunde liegt, durch die eine mögliche Änderung des Materialverhaltens bei sinkender Prüftemperatur nicht berücksichtigt wird.

In Bild 101 und Bild 102 sind die entsprechenden Ergebnisse für die Untersuchungsjahre 2014 und 2015 dargestellt.

Die verschiedenen Bindemittelsorten wiesen hierbei ebenfalls relativ große Überschneidungsbereiche auf, wobei die Temperaturen des 30/45 tendenziell am höchsten lagen und mit Zunahme der Bindemittelhärte die ermittelten Temperaturen absanken. Auffällig war, dass der Großteil der Datensätze unabhängig von der Bindemittelsorte als mbestimmt definiert werden kann. Fast alle Datensätze lagen unterhalb der Winkelhalbierenden.

7.3.4 Polymermodifizierte Bindemittel

In Bild 103 bis Bild 108 sind die Biegekrechstetfigkeiten der polymermodifizierten Bindemittel gegen den m-Wert aufgetragen. Bild 103 und Bild 104 beziehen sich auf die Daten bei einer Prüftemperatur von -25°C in den Untersuchungsjahren 2014 und 2015, Bild 105 und Bild 106 berücksichtigen eine Prüftemperatur von -16°C und Bild 107 und Bild 108 berücksichtigen eine Prüftemperatur von -10°C .

Im Vergleich zu den Straßenbaubitumen ließ sich bei den polymermodifizierten Bindemitteln keine Abstufung der Bindemittel erkennen. Die Bindemittelsorte 25/55–55 erstreckte sich in allen Fällen über den gesamten Ergebnisbereich. Das Bindemittel

10/40–65 wies tendenziell eine hohe Biegekrechsteifigkeit und einen niedrigen m-Wert auf, wohingegen die Bindemittel 45/80–50 und 40/100–65 tendenziell niedrigere Biegekrechsteifigkeiten und höhere m-Werte aufwiesen. Mit sinkender Prüftemperatur näherten sich diese Werte jedoch immer mehr an und die Überschneidungsbereiche der verschiedenen Bindemittel wuchsen an. Gleichzeitig wuchs die Streuung der Daten, insbesondere des m-Wertes an.

Auch für die polymermodifizierten Bindemittel wurden die Temperaturen T_{S300} und $T_{m0,300}$ berechnet und grafisch gegeneinander aufgetragen (Bild 109 und Bild 110).

Im Gegensatz zu den Straßenbaubitumen war hier keine Gruppierung der Daten unterhalb der Winkelhalbierenden erkennbar. Zwar befindet sich der etwas größere Teil der Daten unterhalb der Winkelhalbierenden, jedoch streuten hier die Werte sehr stark

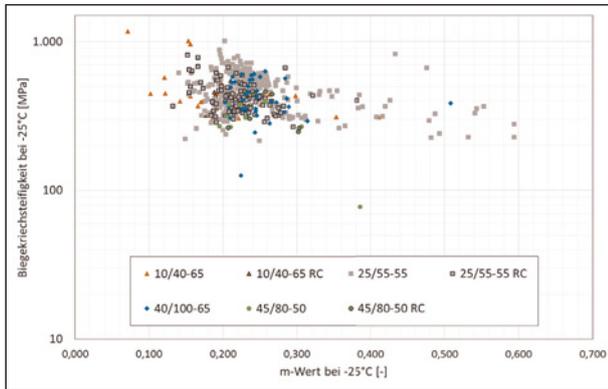


Bild 103: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei -25°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 41)

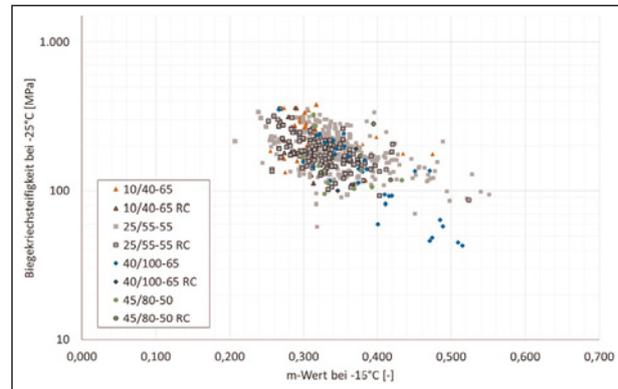


Bild 106: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei -16°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 44)

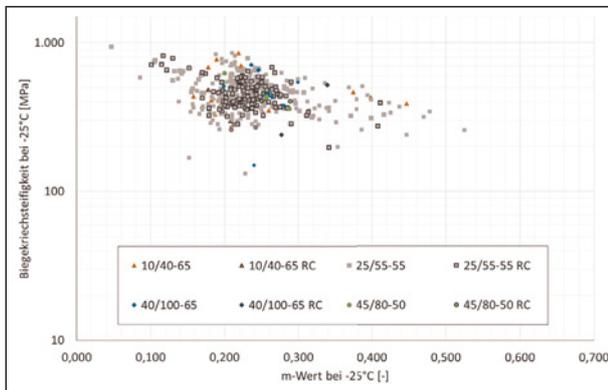


Bild 104: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bitumen bei -25°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 42)

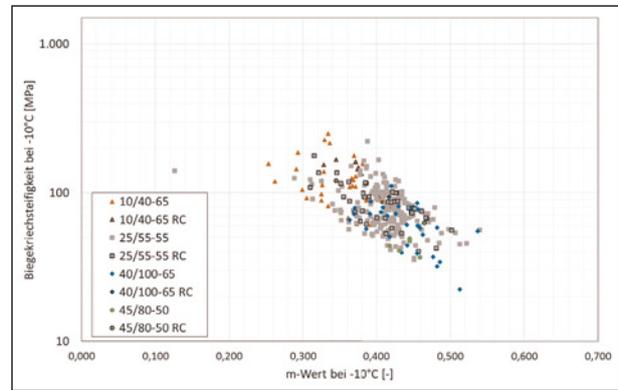


Bild 107: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei -10°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 45)

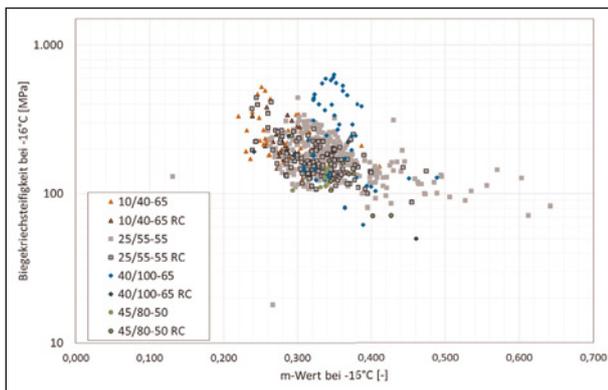


Bild 105: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei -16°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 43)

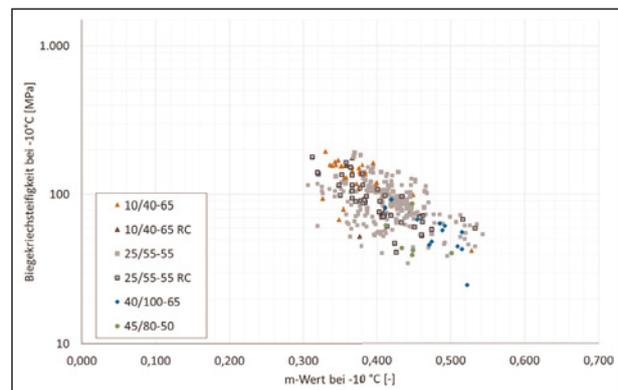


Bild 108: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei -10°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 46)

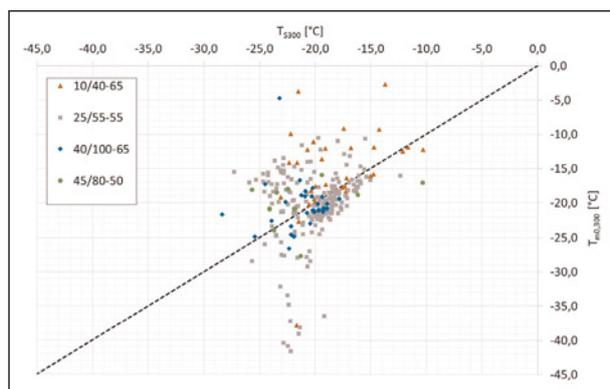


Bild 109: BBR-Ergebnisse der modifizierten Bindemittel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 47)

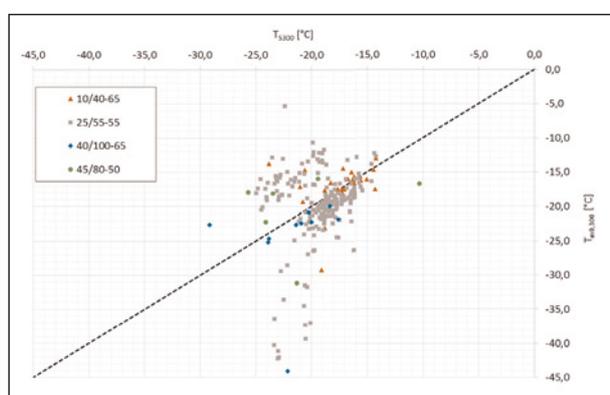


Bild 110: BBR-Ergebnisse der modifizierten Bindemittel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 48)

sowohl unterhalb als auch oberhalb der Winkelhalbierenden.

7.3.5 Zusammenfassung

Bei den Straßenbaubitumen lag anhand der BBR-Ergebnisse eine klare Abstufung der Bindemittel in Abhängigkeit von ihrer Härte vor. Dabei stieg der m-Wert mit abnehmender Härte und die Biegekriechsteifigkeit nahm zu. In Tabelle 33 sind die durchschnittlichen Werte des m-Wertes und der Biegekriechsteifigkeit für die beiden Untersuchungsjahre zusammengefasst dargestellt. Diese können für weitere Untersuchungen als Erfahrungswerte berücksichtigt werden.

Bei den polymermodifizierten Bindemitteln ist diese Abstufung nicht möglich gewesen. Die hier festgestellten Durchschnittswerte des m-Wertes und der Biegekriechsteifigkeit sind in Tabelle 34 zusammengefasst.

Bindemittel-sorte	m-Wert [-]	Biegekriechsteifigkeit S [MPa]
30/45	0,31	313
50/70	0,34	237
70/100	0,39	178
160/220	0,47	76

Tab. 33: Durchschnittliche Werte der BBR-Prüfung der Straßenbaubitumen bei der Prüftemperatur -16 °C

Bindemittel-sorte	m-Wert [-]	Biegekriechsteifigkeit S [MPa]
10/40-65	0,30	239
25/55-55	0,35	186
40/100-65	0,35	158

Tab. 34: Durchschnittliche Werte der BBR-Prüfung der polymermodifizierten Bindemittel bei der Prüftemperatur -16 °C

7.4 DSR-Ergebnisse

Die Daten der DSR-Ergebnisse wurden zunächst durch Box-Whisker-Plots statistisch bewertet. Zusätzlich wurde eine Analyse der deskriptiven Statistik in tabellarischer Form durchgeführt (Anhang B Tabelle B 33 bis Tabelle B 60).

Für diese Auswertung wurden jeweils alle Datensätze einer Bindemittelsorte betrachtet. Dabei wurden vereinzelte Datensätze, die deutlich von dem Großteil der Daten abwichen, als Ausreißer betrachtet und entsprechend nicht berücksichtigt. Zur weitergehenden Bewertung der DSR-Ergebnisse wurden Äquisteifigkeitstemperaturen herangezogen. Dazu wurde die Temperatur ermittelt, bei der der komplexe Schermodul einen Wert von 15.000 Pa erreicht [Projekt 16639 N/1, 2014]. Zusätzlich wurde der Phasenwinkel bestimmt, der bei dieser Äquisteifigkeitstemperatur vorliegt.

7.4.1 Statistische Bewertung

Für das Straßenbaubitumen 20/30 standen keine gültigen Datensätze zur Verfügung.

Für das Untersuchungsjahr 2014 waren für das Straßenbaubitumen 30/45 insgesamt 6 gültige Datensätze eingegangen, die alle von Bindemittelherstellern geliefert wurden. Für das Untersuchungsjahr 2015 sind 33 gültige Datensätze von Bindemittelherstellern und einer von einem Auftraggeber geliefert worden.

In beiden Untersuchungsjahren wurden sehr ähnliche Mittelwerte der Schermodule je Prüftemperatur

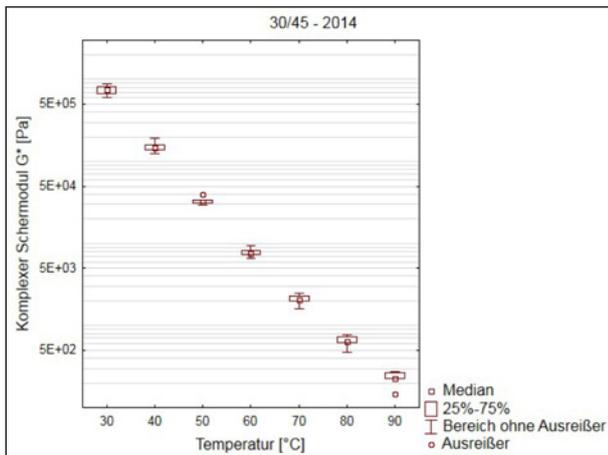


Bild 111: Komplexer Schermodul des 30/45, Untersuchungsjahr 2014

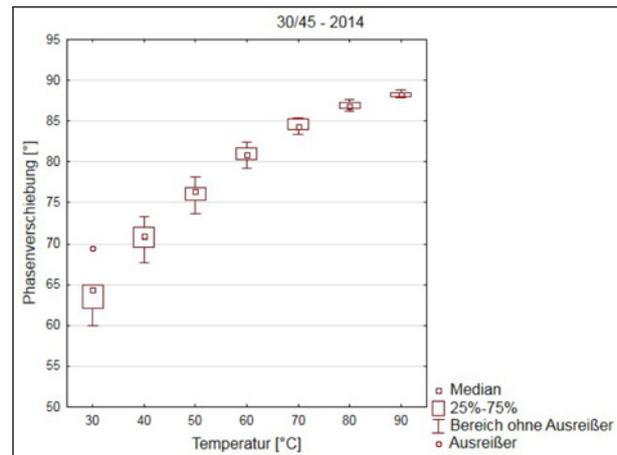


Bild 113: Phasenwinkel des 30/45, Untersuchungsjahr 2014

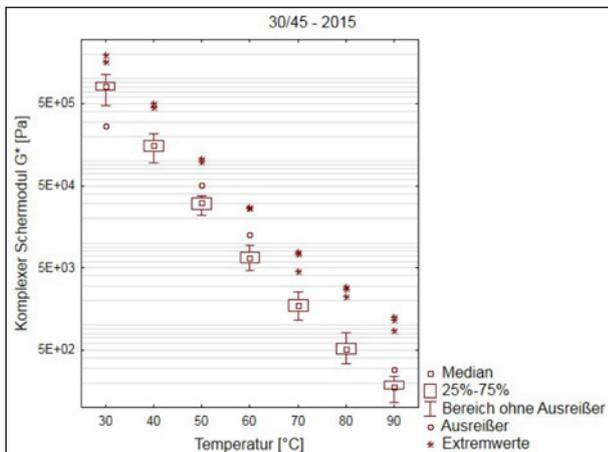


Bild 112: komplexer Schermodul des 30/45, Untersuchungsjahr 2015

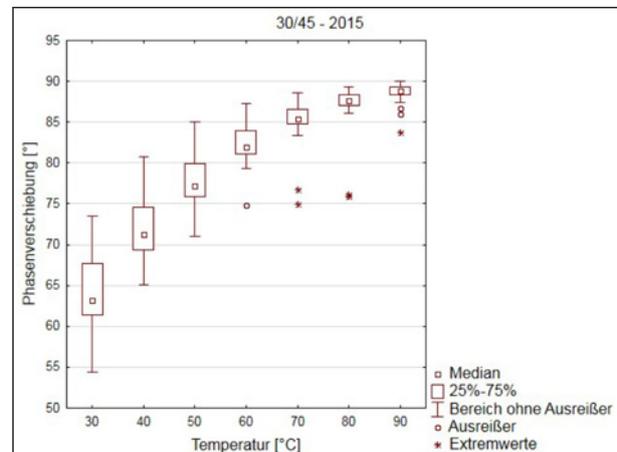


Bild 114: Phasenwinkel des 30/45, Untersuchungsjahr 2015

erreicht (Bild 111 und Bild 112). Im Untersuchungsjahr 2015 war jedoch die Streuung der Daten größer, was sich in einer mehr als doppelt so hohen Standardabweichung bei allen Prüftemperaturen äußerte. Dies war vermutlich in der erhöhten Datenmenge im Vergleich zum Untersuchungsjahr 2014 begründet. Zudem lagen hier bei allen Prüftemperaturen zwei Extremwerte und bei vereinzelter Prüftemperaturen Ausreißer vor, die erhöhte Schermodule aufwiesen. Bei den Prüftemperaturen 70 °C bis 90 °C lag ein zusätzlicher Extremwert vor. Die festgestellten Extremwerte stammten von ein und demselben Produzenten.

Bei dem Phasenwinkel lag im Untersuchungsjahr 2015 ebenfalls eine größere Streuung vor als im Untersuchungsjahr 2014 (Bild 113 und Bild 114). Die Mittelwerte der Phasenwinkel wichen jedoch um nicht mehr als 1° von denen im Untersuchungsjahr 2014 ab.

Ab einer Prüftemperatur von 60 °C lagen auch hier Ausreißer bzw. Extremwerte vor, die einen relativ

niedrigen Phasenwinkel anzeigten. Bei diesen Extremwerten handelte es sich um dieselben drei Datensätze, die auch beim Schermodul als solche auffällig waren.

Für das Bindemittel 50/70 wurden im Untersuchungsjahr 2014 insgesamt 94 gültige Datensätze geliefert. Davon waren 57 von Bindemittelherstellern, 17 von Mischgutherstellern und 20 von Auftraggebern. Für das Untersuchungsjahr 2015 wurden insgesamt 53 gültige Datensätze geliefert, von denen 41 von Bindemittelherstellern geliefert wurden 3 von Mischgutherstellern und 9 von Auftraggebern.

Auch hier zeigte sich eine hohe Übereinstimmung der komplexen Schermodule in den beiden Untersuchungsjahren (Bild 115 und Bild 116), welche sich in einer sehr geringen Abweichung der Mittelwerte voneinander äußerte. Jedoch streuten die Werte im Untersuchungsjahr 2014 deutlich stärker, die Standardabweichung je Prüftemperatur war im Vergleich zum Untersuchungsjahr 2015 im Prüftemperaturbe-

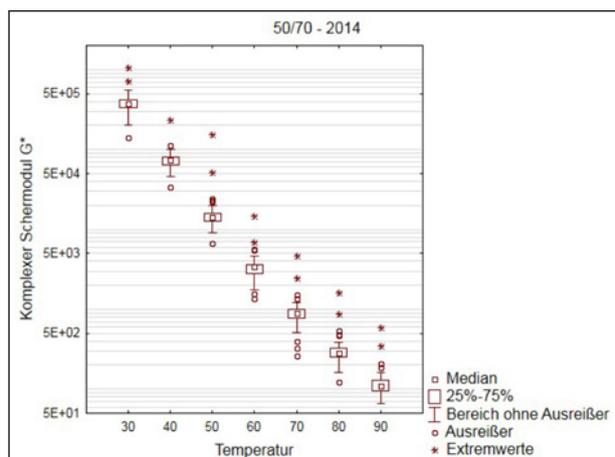


Bild 115: Komplexer Schermodul des 50/70, Untersuchungsjahr 2014

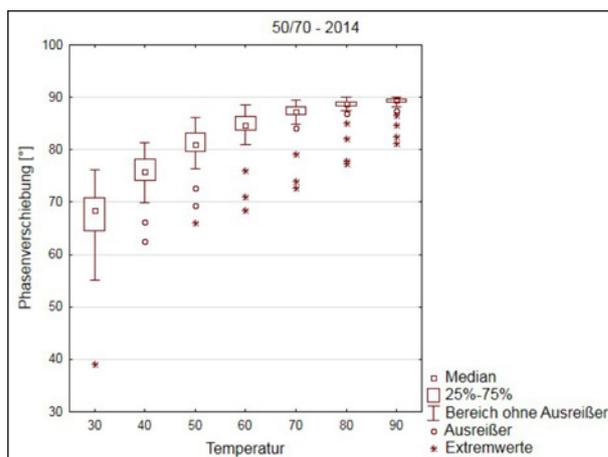


Bild 117: Phasenwinkel des 50/70, Untersuchungsjahr 2014

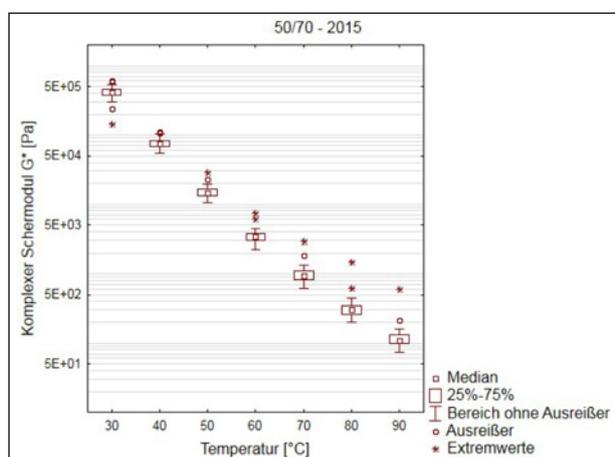


Bild 116: Komplexer Schermodul des 50/70, Untersuchungsjahr 2015

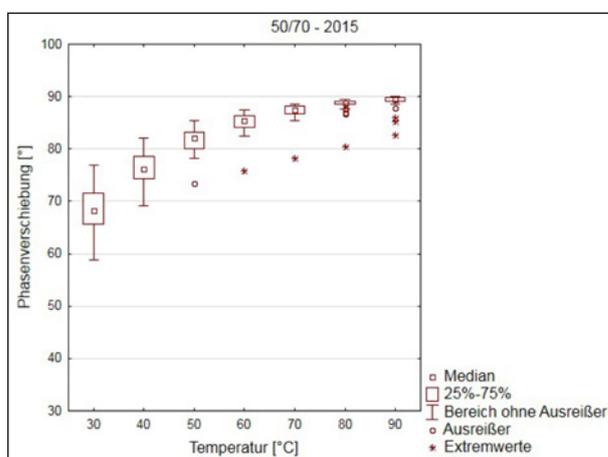


Bild 118: Phasenwinkel des 50/70, Untersuchungsjahr 2015

reich von 30 °C bis 70 °C deutlich höher. Hier lagen zwei Datensätze vor, die als Extremwert identifiziert wurden, da sie einen sehr hohen Schermodul bei allen Prüftemperaturen aufweisen. Diese Datensätze wiesen keine gemeinsame Provenienz auf. Zudem lag hier ein Ausreißer vor, der einen tendenziell niedrigen komplexen Schermodul aufwies. Auch im Untersuchungsjahr 2015 lagen zwei Datensätze als Ausreißer bzw. Extremwerte vor mit einem sehr hohen komplexen Schermodul. Beide stammten von Mischgutherstellern weisen aber bezüglich ihrer Herkunft keine Gemeinsamkeiten auf.

Dieselben Datensätze, die als Ausreißer bei den komplexen Schermoduln identifiziert wurden, lagen auch bei den Phasenwinkeln als Ausreißer bzw. Extremwerte in Form eines verringerten Phasenwinkels vor (Bild 146 und Bild 147). Die Streuung der Daten war in beiden Untersuchungsjahren vergleichbar. Auch die Mittelwerte der Phasenwinkel wichen in den beiden Untersuchungsjahren um weniger als 1 ° voneinander ab.

Für das Untersuchungsjahr 2014 standen 12 gültige Datensätze für das Straßenbaubitumen 70/100 von Bindemittelherstellern, 6 von Mischgutherstellern und 7 von Auftraggebern zur Verfügung. Somit ergab sich eine Gesamtanzahl von 25 Datensätzen. Für das Untersuchungsjahr 2015 wurden insgesamt 38 Datensätze geliefert, davon 27 von Bindemittelherstellern, 5 von Mischgutherstellern und 6 von Auftraggebern.

In beiden Untersuchungsjahren war die Streuung der Daten sehr gering (Bild 119 und Bild 120). Die Mittelwerte der komplexen Schermodule je Temperatur lagen in einem ähnlichen Bereich, wobei der komplexe Schermodul im Untersuchungsjahr 2014 im Durchschnitt etwas höher ausfiel. Im Untersuchungsjahr 2014 lagen zwei Datensätze vor, die aufgrund erhöhter Werte für den komplexen Schermodul als Extremwerte identifiziert wurden. Einer dieser Datensätze wurde von einem Bindemittelhersteller geliefert, der andere von einem Mischguthersteller.

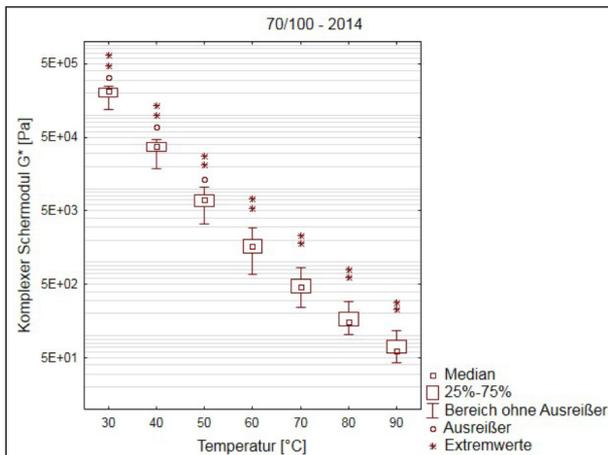


Bild 119: Komplexer Schermodul des 70/100, Untersuchungsjahr 2014

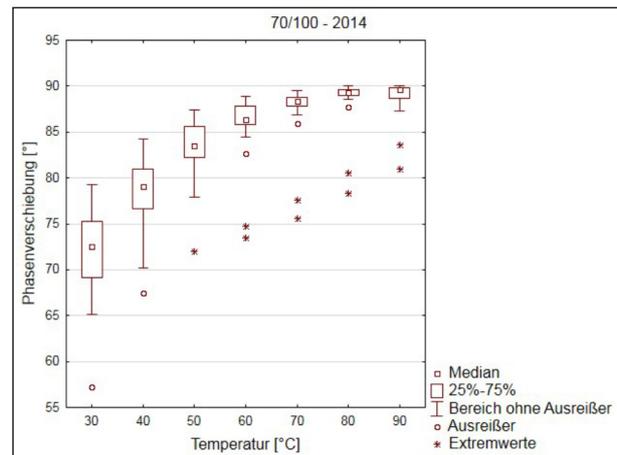


Bild 121: Phasenwinkel des 70/100, Untersuchungsjahr 2014

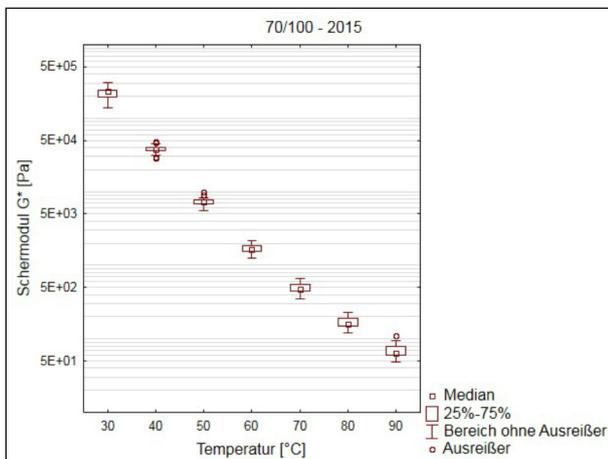


Bild 120: Komplexer Schermodul des 70/100, Untersuchungsjahr 2015

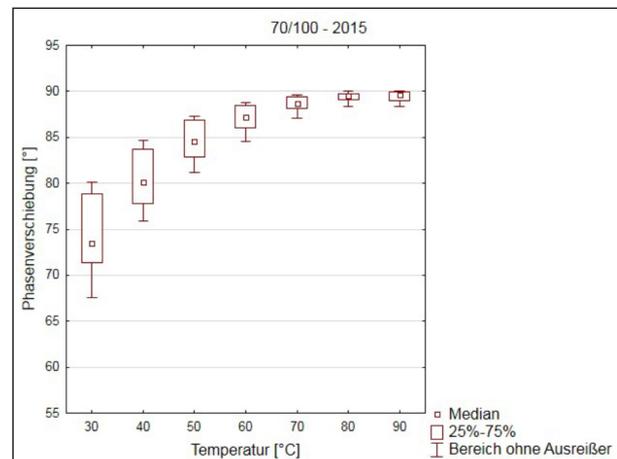


Bild 122: Phasenwinkel des 70/100, Untersuchungsjahr 2015

Diese beiden Datensätze wiesen beim Phasenwinkel so geringe Werte auf, dass diese auch hier als Ausreißer bzw. Extremwerte galten.

Im Untersuchungsjahr 2015 lagen beim Schermodul nur sehr geringfügige Ausreißer vor und beim Phasenwinkel weder Ausreißer noch Extremwerte. Zudem war die Streuung der Werte für den Phasenwinkel in diesem Jahr deutlich geringer als im Untersuchungsjahr 2014, was sich in einer entsprechend niedrigen Standardabweichung äußerte (Bild 121 und Bild 122). Die Mittelwerte des Phasenwinkels wiesen in beiden Untersuchungsjahren vergleichbare Werte auf.

Für die Bindemittelsorte 160/220 wurden für das Untersuchungsjahr 2014 insgesamt 10 gültige Datensätze geliefert, von denen 9 von Bindemittelherstellern stammte und einer von einem Auftraggeber. Für das Untersuchungsjahr 2015 lagen 21 gültige Datensätze von Bindemittelherstellern vor, 4 von

Mischgutherstellern und einer von einem Auftraggeber.

Die Mittelwerte der komplexen Schermodule zeigten für beide Untersuchungsjahre eine gute Übereinstimmung, jedoch war die Standardabweichung im Untersuchungsjahr 2015 bei allen Prüftemperaturen ca. dreimal so hoch wie im Untersuchungsjahr 2014.

Der Datensatz, der vom Auftraggeber geliefert wurde, ist aufgrund eines hohen komplexen Schermoduls ein Ausreißer, bzw. Extremwert. Auch im Untersuchungsjahr 2015 lag ein vereinzelter Ausreißer vor, welcher ebenfalls einen zu hohen komplexen Schermodul aufwies. Hier wurde der Datensatz von einem Bindemittelhersteller geliefert. Zudem waren für dieses Untersuchungsjahr vereinzelte Ausreißer vorhanden, die jedoch nur geringfügig außerhalb der Whisker der Box-Whisker-Plots lagen.

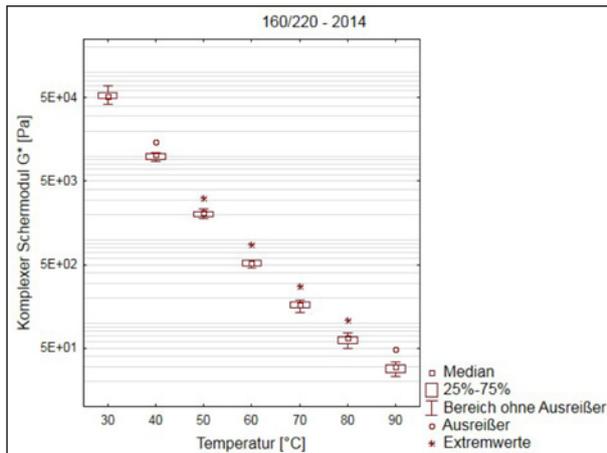


Bild 123: Komplexer Schermodul des 160/220, Untersuchungsjahr 2014

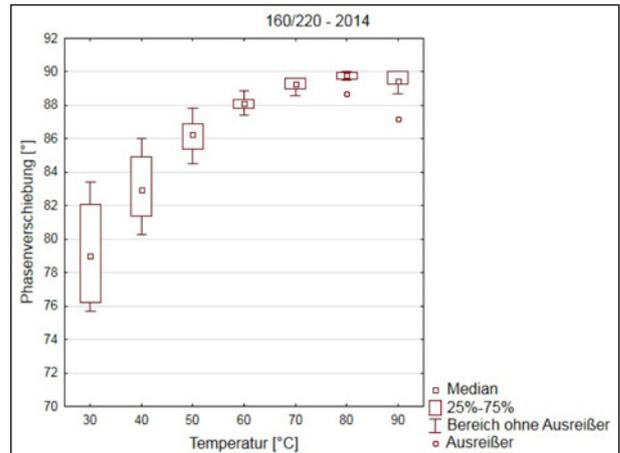


Bild 125: Phasenwinkel des 160/220, Untersuchungsjahr 2014

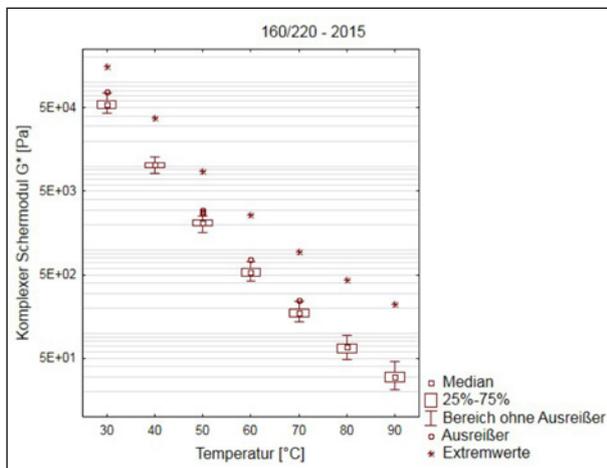


Bild 124: Komplexer Schermodul des 160/220, Untersuchungsjahr 2015

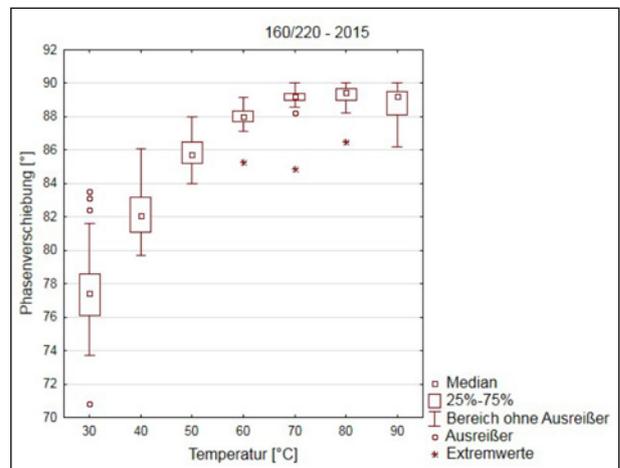


Bild 126: Phasenwinkel des 160/220, Untersuchungsjahr 2015

Bei den Phasenwinkeln wurden zwar in beiden Untersuchungsjahren vereinzelte Ausreißer- und Extremwerte festgestellt, jedoch waren diese nicht identisch mit den Ausreißer-Datensätzen der komplexen Schermodule.

Die Mittelwerte der Phasenwinkel der beiden Untersuchungsjahre lagen auch hier wieder weniger als 1° je Prüftemperatur voneinander entfernt und auch die Streuung erreichte hier in beiden Untersuchungsjahren ein sehr ähnliches und insgesamt geringes Niveau.

Für das Bindemittel 10/40–65 standen im Untersuchungsjahr 2014 insgesamt 69 gültige Datensätze zur Verfügung. 33 Datensätze wurden von Bindemittelherstellern geliefert, 32 von Mischgutherstellern und 4 von Auftraggebern. Im Untersuchungsjahr 2015 standen 27 gültige Datensätze von Bindemittelherstellern zur Verfügung, 13 von Mischgutherstellern und keiner von Auftraggebern.

In beiden Untersuchungsjahren waren die Mittelwerte der komplexen Schermoduln je Prüftemperatur sehr ähnlich, jedoch lag im Untersuchungsjahr 2014 eine größere Standardabweichung der Daten vor (Bild 127 und Bild 128). Auch lagen hier sowohl Ausreißer als auch Extremwerte vor, die einen erhöhten komplexen Schermodul aufweisen. Die beiden Extremwerte und der auffälligste der Ausreißer stammen von demselben Hersteller. Die entsprechenden Datensätze wurden durch einen Mischguthersteller geliefert.

Einer der Datensätze, die sich als Extremwerte herausgestellt hatten, lag bei den Phasenwinkeln als Ausreißer mit einem tendenziell zu niedrigen Wert vor (Bild 158). Zusätzlich lag ein Datensatz als Ausreißer mit einem tendenziell zu hohen Phasenwinkel vor.

Sowohl die Mittelwerte der Phasenwinkel je Prüftemperatur als auch die Standardabweichung waren in

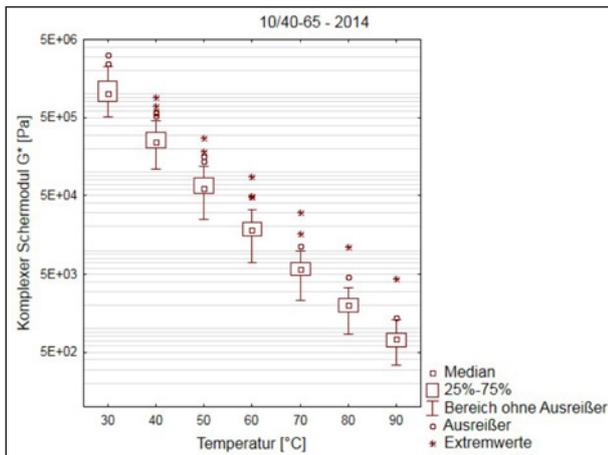


Bild 127: Komplexer Schermodul des 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014

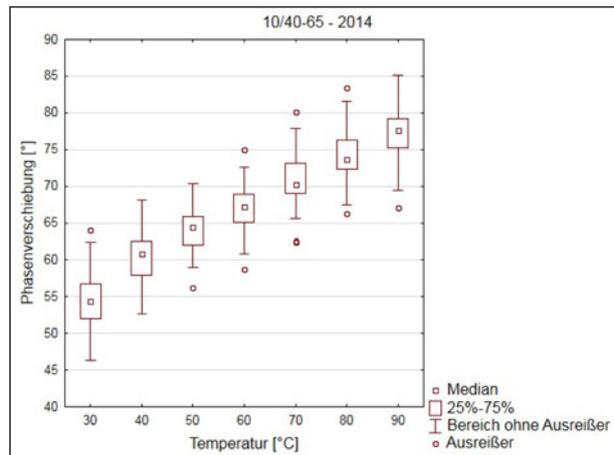


Bild 129: Phasenwinkel des 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014

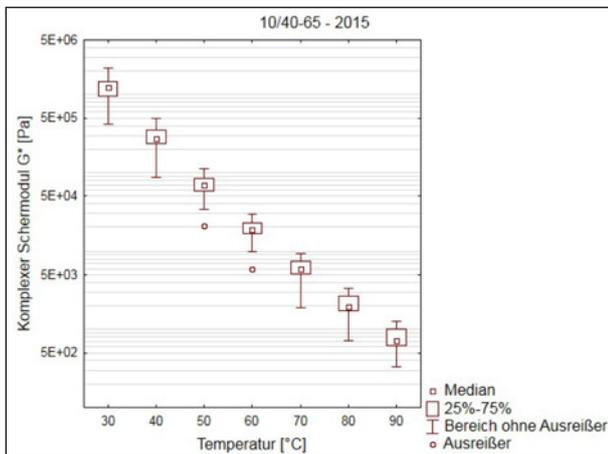


Bild 128: Komplexer Schermodul des 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015

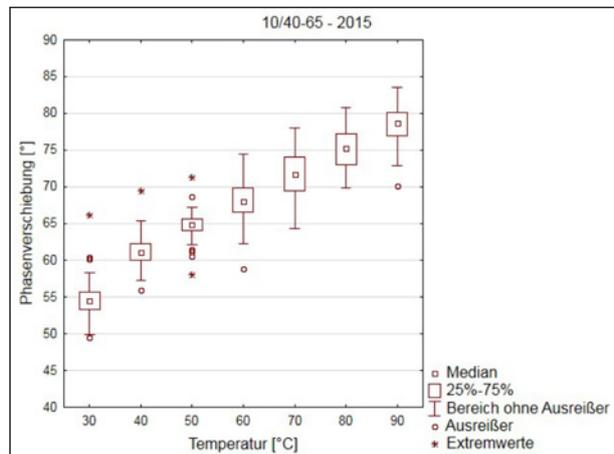


Bild 130: Phasenwinkel des 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015

beiden Untersuchungsjahren auf vergleichbarem Niveau.

Für das Bindemittel 25/55–55 stand die größte Menge an Datensätze zur Verfügung. Hier wurden im Untersuchungsjahr 2014 63 gültige Datensätze von Bindemittelherstellern geliefert, 230 Datensätze von Mischgutherstellern und 59 Datensätze von Auftraggebern. Im Untersuchungsjahr 2015 lagen 48 Datensätze von Bindemittelherstellern vor, 217 von Mischgutherstellern und 49 von Auftraggebern.

Die Mittelwerte der komplexen Schermodule weisen in beiden Untersuchungsjahren vergleichbare Werte auf (Bild 131 und Bild 132). Auch die Werte der Streuung waren bei den verschiedenen Prüftemperaturen ähnlich. In beiden Untersuchungsjahren lagen Ausreißer und Extremwerte mit erhöhten komplexen Schermodulen vor.

Die beiden Datensätze mit Extremwerten im Untersuchungsjahr 2014 stammten von Bindemittel-

herstellern, wiesen jedoch keine Gemeinsamkeit bezüglich ihrer Herkunft auf. Die Ausreißer sind sowohl von Mischgutherstellern als auch von Bindemittelherstellern und kamen von unterschiedlichen Herstellern. Im Untersuchungsjahr 2015 lagen ebenfalls mehrere Ausreißer bzw. Extremwerte vor. Dabei sind Datensätze aus allen drei Quellen vertreten. Zwei der Datensätze, die als Ausreißer identifiziert wurden und von einem Mischguthersteller geliefert wurden, wiesen denselben Hersteller auf, die übrigen Ausreißer zeigten keine Verbindung untereinander.

Die festgestellten Ausreißer bzw. Extremwerte waren bei den Phasenwinkeln ebenfalls als Ausreißer mit einem tendenziell zu niedrigen Phasenwinkel zu erkennen (Bild 133 und Bild 134). Zusätzlich lagen hier im Untersuchungsjahr 2014 Datensätze vor, die einen tendenziell zu hohen Phasenwinkel aufzeigten. Dabei handelte es sich um zwei Bindemittel gleicher Herkunft, die von einem Auftraggeber geliefert wurden und zwei Bindemittel, die durch Misch-

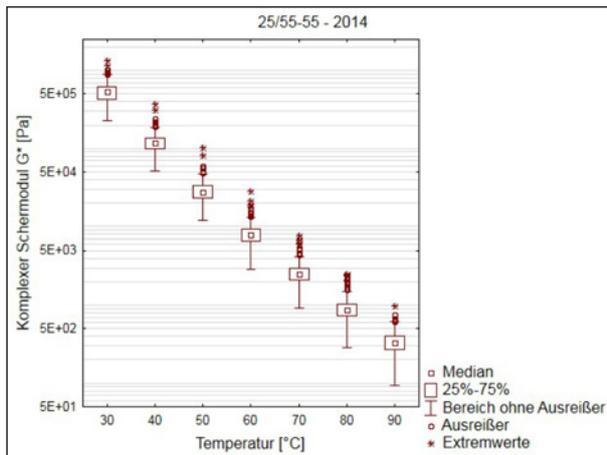


Bild 131: Komplexer Schermodul des 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014

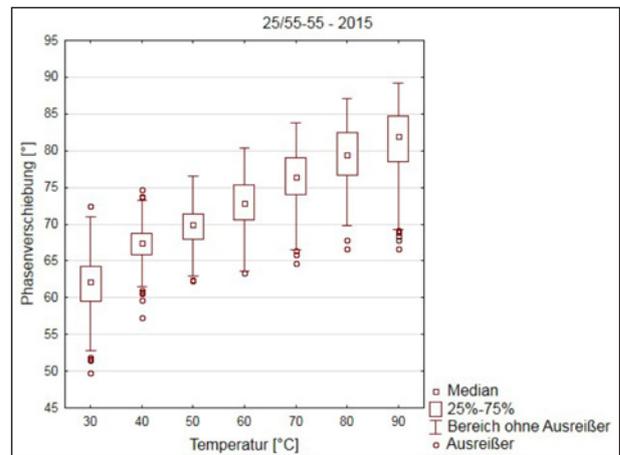


Bild 134: Phasenwinkel des 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015

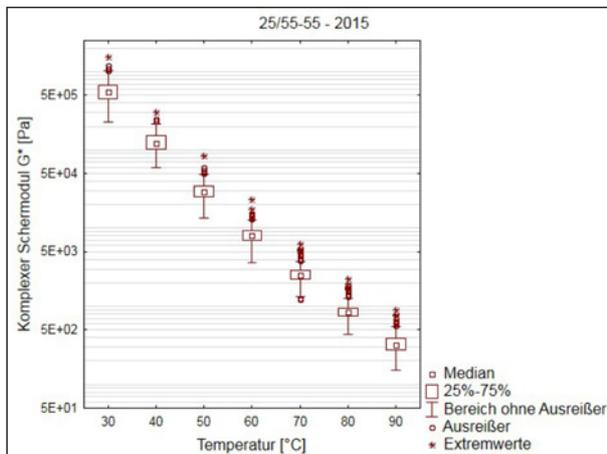


Bild 132: Komplexer Schermodul des 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015

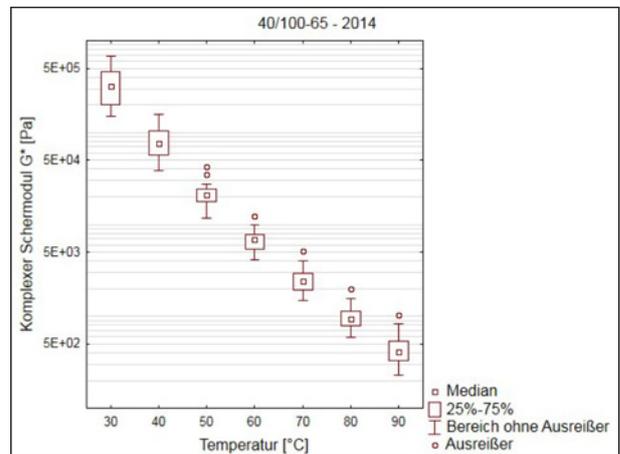


Bild 135: Komplexer Schermodul des 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014

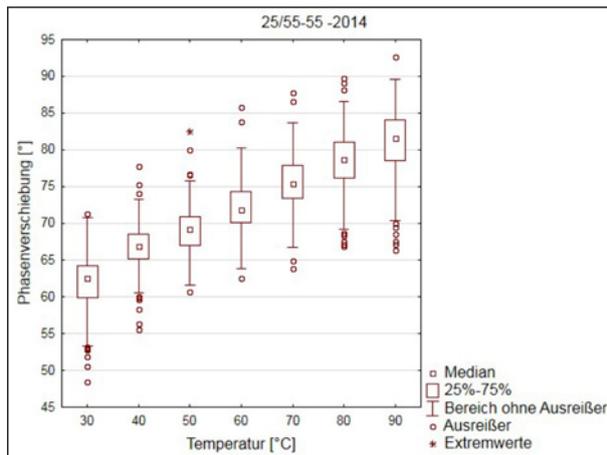


Bild 133: Phasenwinkel des 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014

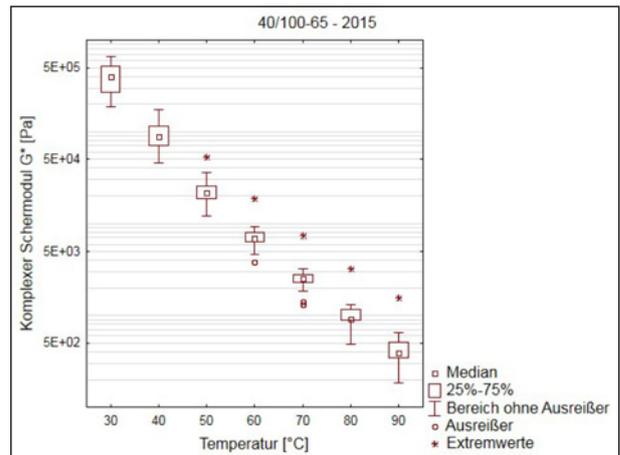


Bild 136: Komplexer Schermodul des 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015

guthersteller geliefert wurden, jedoch nicht die gleiche Herkunft hatten.

Sowohl die Mittelwerte der Phasenwinkel als auch die Standardabweichung waren in beiden Unters-

chungsjahren sehr ähnlich und weisen keine Auffälligkeiten auf.

Für das Bindemittel 40/100–65 wurden im Untersuchungsjahr 2014 12 gültige Datensätze von Bindemittelherstellern geliefert, 9 von Mischgutherstellers

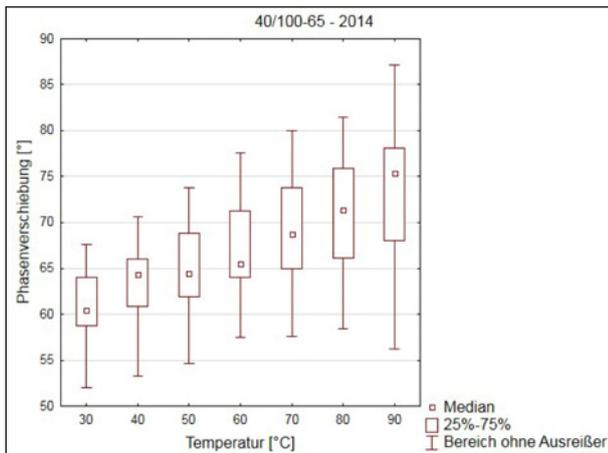


Bild 137: Phasenwinkel des 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014

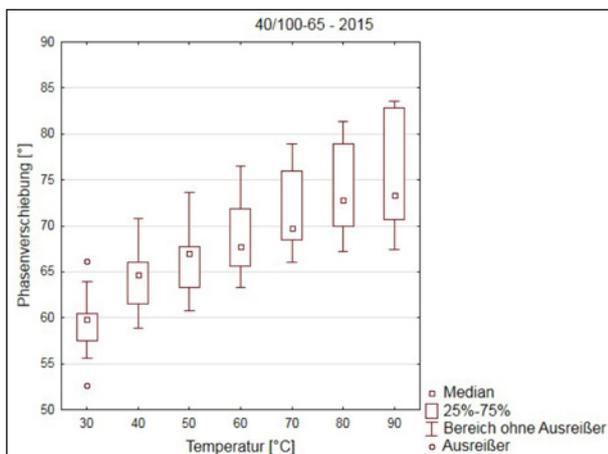


Bild 138: Phasenwinkel des 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015

und 4 von Auftraggebern. Für das Untersuchungsjahr 2015 lagen 11 Datensätze von Bindemittelherstellern, 3 von Mischgutherstellern und einer von einem Auftraggeber vor.

Auch hier war wieder eine gute Übereinstimmung der Mittelwerte und der Standardabweichung des komplexen Schermoduls zu erkennen (Bild 135 und Bild 136). Die Mittelwerte aus dem Untersuchungsjahr 2015 lagen jedoch insgesamt etwas höher als im Untersuchungsjahr 2014, jedoch nicht signifikant.

Im Untersuchungsjahr 2014 wurde ein Datensatz als Ausreißer identifiziert. Dieser wurde von einem Mischguthersteller geliefert. Im Untersuchungsjahr 2015 lag ein Datensatz eines Bindemittelherstellers als Extremwert vor.

Bei den Phasenwinkeln sind die Mittelwerte aus dem Untersuchungsjahr 2014 tendenziell kleiner als im Untersuchungsjahr 2015 (Bild 137 und Bild

138). Die Abweichung lag jedoch je Temperatur bei weniger als $1,5^\circ$. Die Standardabweichung war im Untersuchungsjahr 2015 geringer als im Untersuchungsjahr 2014. Dies machte sich vor allem bei den höheren Prüftemperaturen in Form von deutlich größeren Boxen bzw. Whisker bemerkbar. Bei einer Prüftemperatur von 30°C war die Streuung statistisch gesehen so gering, dass zwei Werte als Ausreißer identifiziert wurden, die jedoch innerhalb des Whiskers des Box-Plots für das Untersuchungsjahr 2014 liegen würden.

7.4.2 Straßenbaubitumen

In Bild 139 und Bild 140 sind die komplexen Schermoduln der Straßenbaubitumen gegen die Temperatur aufgetragen; dargestellt für die beiden Untersuchungsjahre. Es zeigte sich eine deutliche Abstufung der verschiedenen Bindemittelsorten mit minimalen Überschneidungsbereichen und einigen wenigen Ausreißern bzw. Extremwerten.

Auffällig war, dass im Untersuchungsjahr 2015 die Streuung der Daten geringer war als im Jahr 2014. Dadurch zeichnete sich die Abstufung der Bindemittelsorten klarer ab und die Überschneidungsbereiche waren deutlich geringer als im Untersuchungsjahr 2014. Dies könnte ggf. auf eine Verbesserung der Anwendung der Prüfmethode durch die zunehmende Erfahrungen der Prüfer im Untersuchungsjahr 2014 zurückzuführen sein.

In den beiden Bildern (Bild 139 und Bild 140) sind jeweils die ermittelten Äquisteifigkeitstemperaturen ($T_{(G^*=15\text{ kPa})}$) bei 15 kPa angegeben. Zudem wurden für jede Bindemittelsorte der Phasenwinkel bei $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ bestimmt ($\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$).

Grundlage für die Bestimmung von $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ und $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$ war eine statistische Analyse zur Bestimmung der Ausreißer (Bild 141 bis Bild 144).

Für beide Untersuchungsjahre zeigten sich Extremwerte und Ausreißer, die sich in den meisten Fällen so erheblich vom Großteil der Datensätze unterschieden, dass diese sehr klar als Ausreißer erkennbar waren.

Bei der Bestimmung der Datensätze, welche bei der Ermittlung von $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ und $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$ berücksichtigt werden sollten, wurde sich zunächst auf die Ergebnisse der statistischen Auswertung gestützt. Jedoch wurden bei der Festlegung auch Datensätze

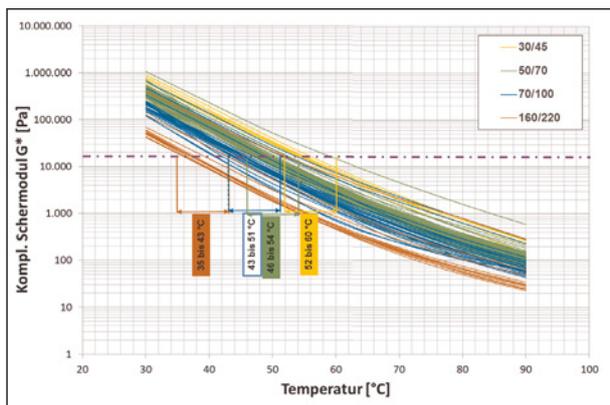


Bild 139: Äquisteifigkeitstemperatur der Straßenbaubitumen im Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 49)

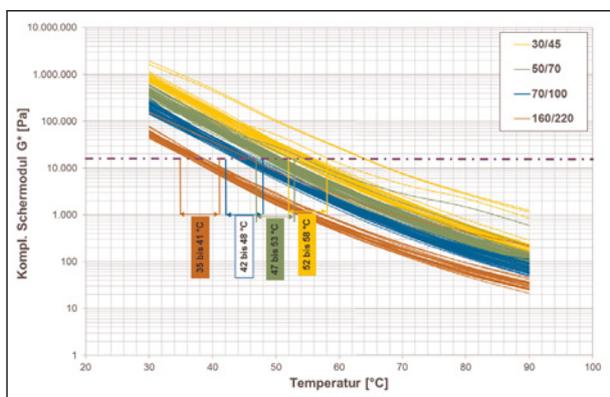


Bild 140: Äquisteifigkeitstemperatur der Straßenbaubitumen im Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 50)

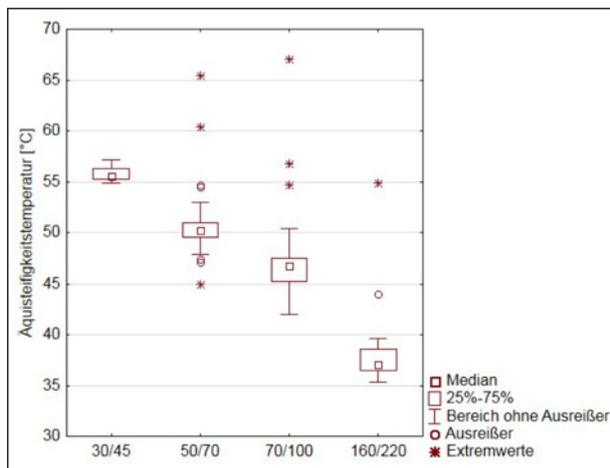


Bild 141: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2014

ze berücksichtigt, die als Ausreißer identifiziert wurden, wenn diese nicht allein standen und in Verlauf und Höhe aus materialtechnischer Sicht sinnvoll erschienen. Andererseits blieben Werte unberücksichtigt, die zwar statistisch gesehen nicht als Ausreißer identifiziert wurden, die sich jedoch von den übrigen Datensätzen deutlich absetzten oder einen untypischen Verlauf aufwiesen.

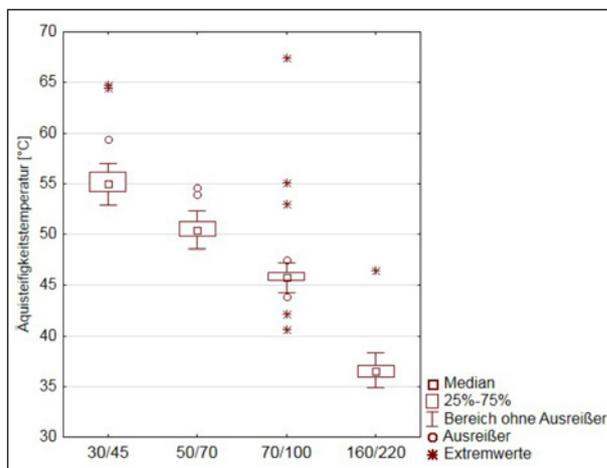


Bild 142: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2015

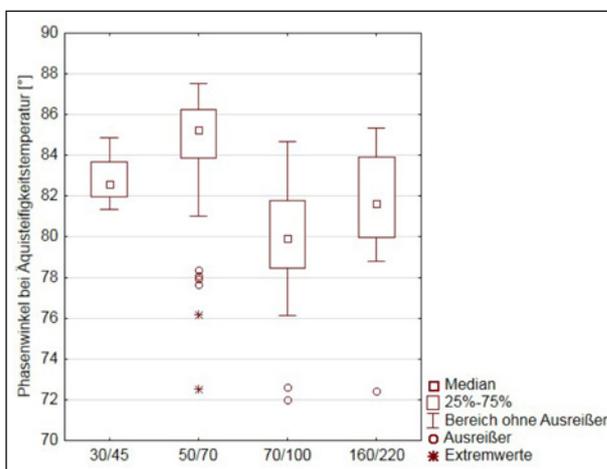


Bild 143: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2014

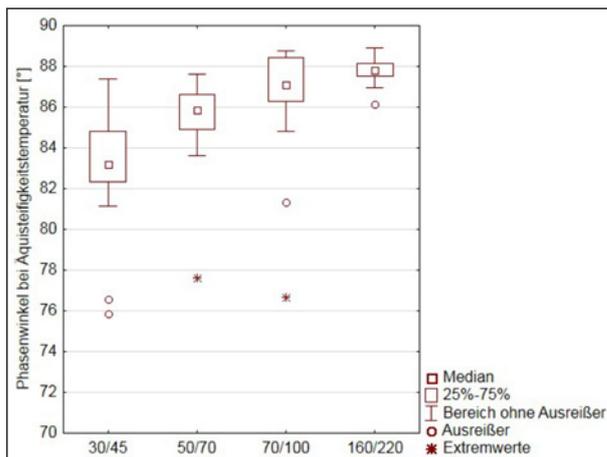


Bild 144: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2015

Die vergleichende Auswertung dieser Daten erfolgt in Kapitel 7.4.4.

In Bild 145 ist die Bestimmung des Bereichs von $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ für ein 30/45 bei $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ von 52 °C bis 60 °C für das Untersuchungsjahr 2014 dargestellt. Der Phasenwinkel liegt hier zwischen 74° und 83°.

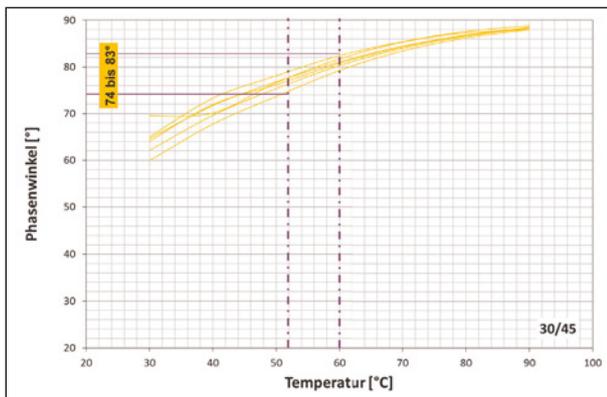


Bild 145: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 51)

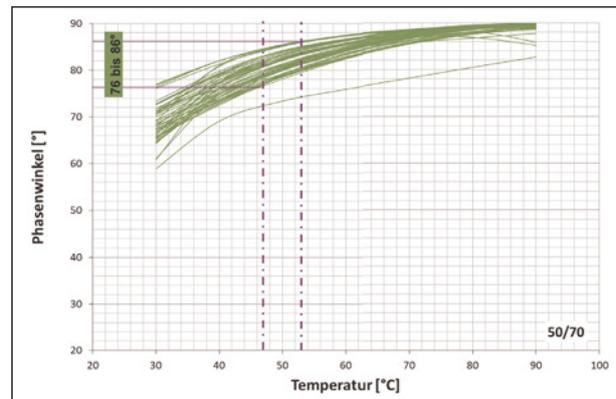


Bild 148: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 54)

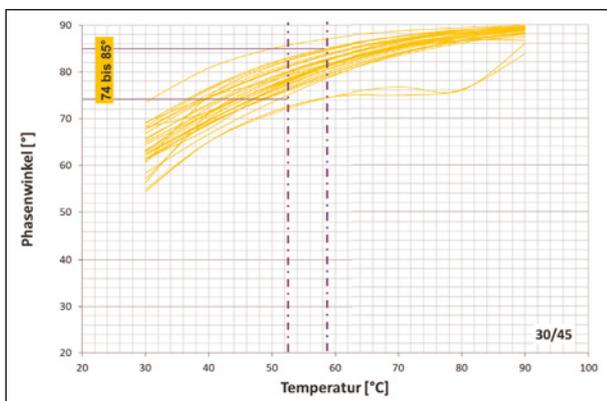


Bild 146: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 52)

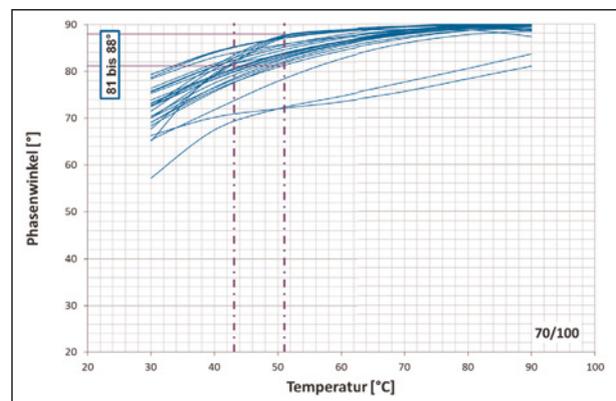


Bild 149: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 55)

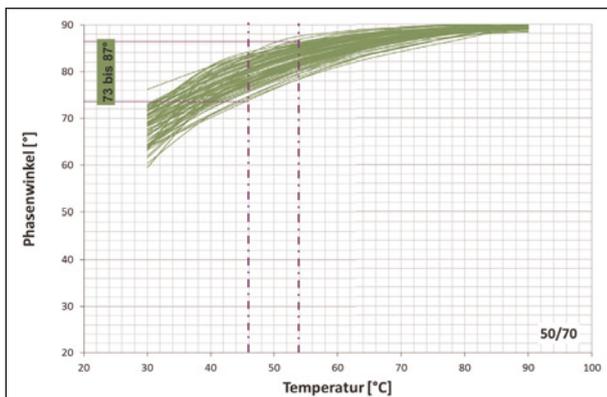


Bild 147: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 53)

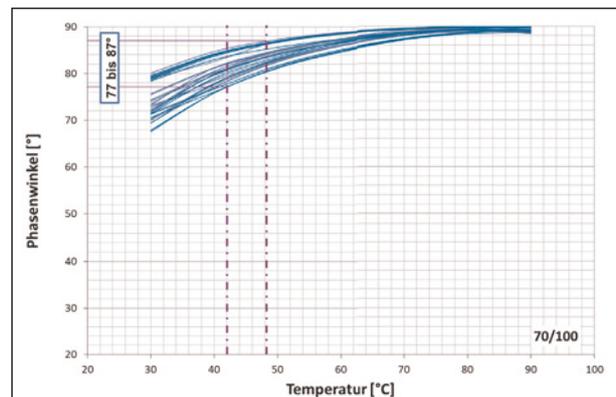


Bild 150: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 56)

In Bild 146 ist entsprechend die Bestimmung des Wertebereichs des Phasenwinkels bei $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ von 52° bis 58 °C dargestellt. Hier betrug der Phasenwinkels zwischen 74° bis 85°.

Im Untersuchungsjahr 2014 lag der Bereich von $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ für das Bindemittel 50/70 zwischen 46 °C und 54 °C. Daraus ergibt sich ein Bereich $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ von 73° bis 87° (Bild 147). Im Untersuchungsjahr 2015 lag $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ in einem engeren Bereich zwi-

schen 47 °C und 53 °C. Dementsprechend konnte auch ein engerer Bereich für den Phasenwinkel bestimmt werden, mit einer Spanne von $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ zwischen 76° bis 86° (Bild 148).

$T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ des Bindemittels 70/100 lag im Untersuchungsjahr 2014 zwischen 43 °C und 51 °C. Daraus wurde ein Bereich $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ von 81° bis 88° ermittelt (Bild 149). Auch hier war der Bereich der $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ im Untersuchungsjahr 2015 kleiner. Dieser

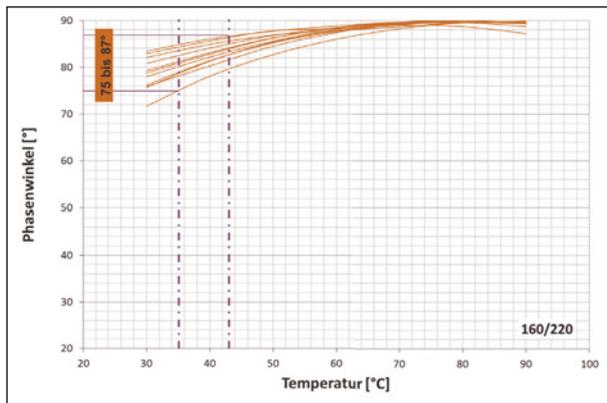


Bild 151: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$; Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 57)

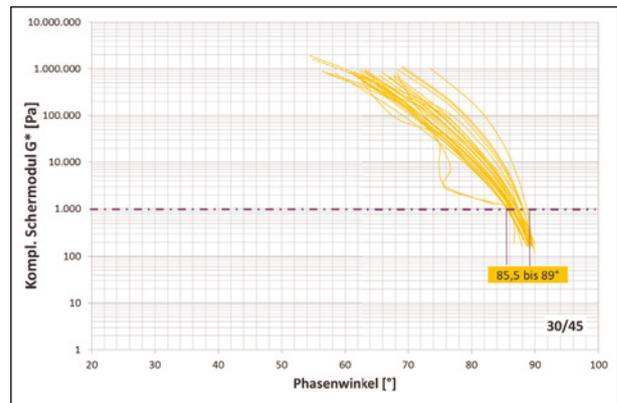


Bild 154: Phasenwinkel bei $G^*=1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 60)

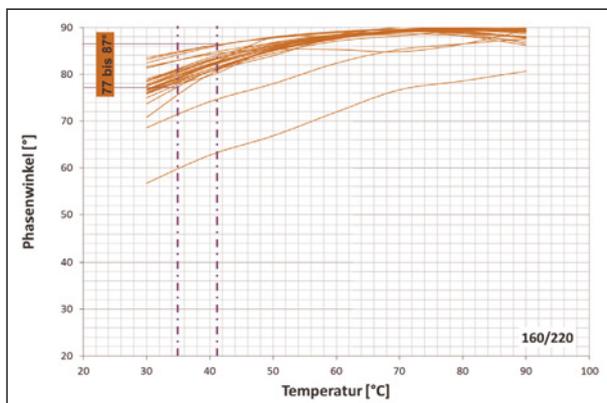


Bild 152: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$; Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 58)

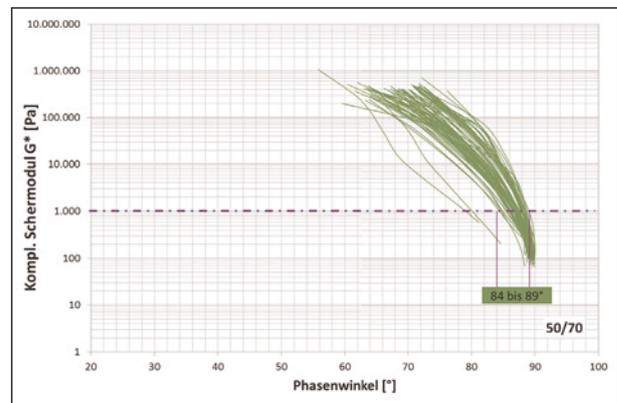


Bild 155: Phasenwinkel bei $G^*=1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 61)

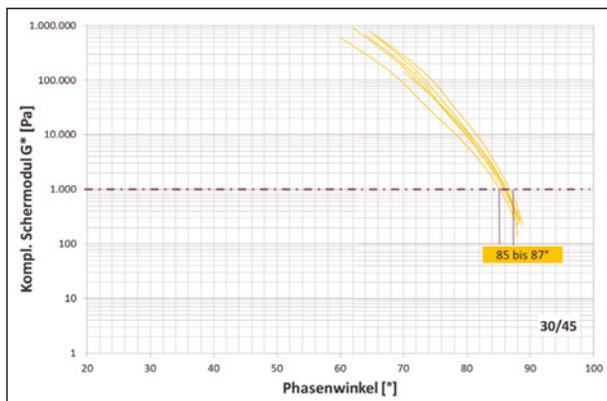


Bild 153: Phasenwinkel bei $G^*=1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 59)

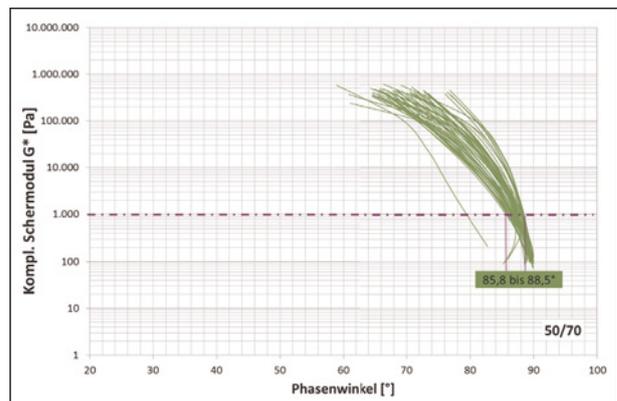


Bild 156: Phasenwinkel bei $G^*=1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 62)

lag zwischen 42 °C und 48 °C und der dazu gehörige $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ wurde mit einer Spanne von 77° bis 87° bestimmt (Bild 150).

Für das Bindemittel 160/220 lag der Bereich der $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ im Untersuchungsjahr 2014 und 2015 zwischen 35 °C und 43 °C . Der entsprechende $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ lag im Untersuchungsjahr 2014 zwischen 75° und 87° (Bild 151) und im Untersuchungsjahr 2015 zwischen 77° und 87° (Bild 152).

Zusätzlich zu den vorangegangenen Auswertungen der DSR-Ergebnisse wurde für alle Bindemittelsorten der Phasenwinkel bei einem komplexen Schermodul von $1,0 \text{ kPa}$ bestimmt ($\delta_{(G^*=1,0 \text{ kPa})}$). Auch hier wurde wieder eine Fallentscheidung darüber vorgenommen, welche Datensätze Berücksichtigung finden und welche als Ausreißer bestimmt werden. Ebenso wie bei der Bestimmung der Äquisteifigkeitstemperatur wurde dabei der Abstand des Datensatzes zu den übrigen Daten berücksichtigt und

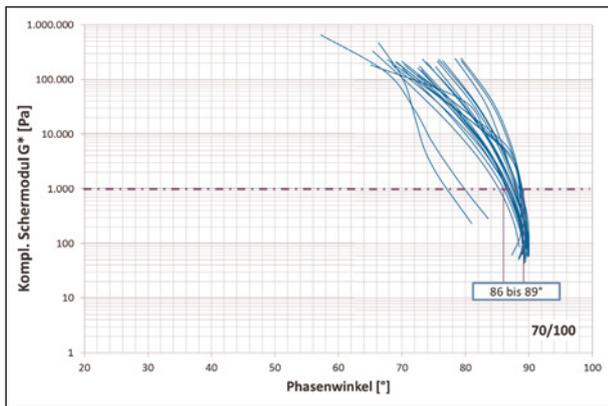


Bild 157: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 63)

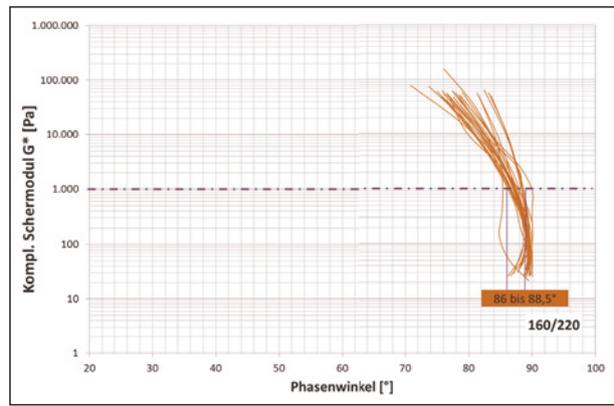


Bild 160: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 66)

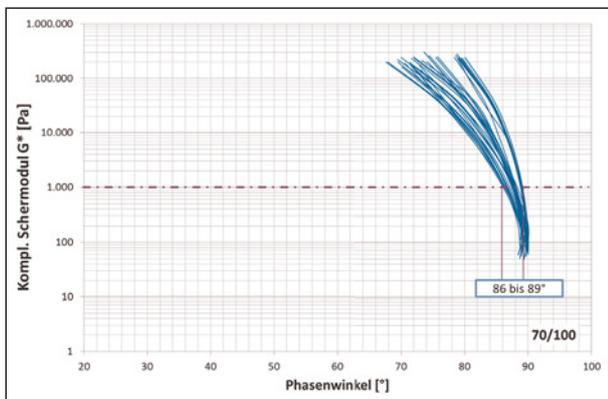


Bild 158: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 64)

Bindemittelsorte	$\delta_{(G^*=1,0 \text{ kPa})}$ [°]	
	2014	2015
30/45	85,0 bis 87,0	85,8 bis 89,0
50/70	84,0 bis 89,0	85,5 bis 88,5
70/100	86,0 bis 89,0	86,0 bis 89,0
160/220	86,0 bis 88,5	86,0 bis 88,5

Tab. 35: $\delta_{(G^*=1,0 \text{ kPa})}$ in Abhängigkeit von der Bindemittelsorte

7.4.3 Polymermodifizierte Bitumen

In Bild 161 und Bild 162 ist der komplexe Schermodul der polymermodifizierten Bindemittel in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

Im Vergleich zu den Straßenbaubitumen zeigten sich hier größere Überschneidungen der Daten der verschiedenen Bindemittelsorten. Auch der Streubereich je Bindemittel war im Vergleich zu den Straßenbaubitumen größer (siehe auch Bild 167, Bild 169, Bild 171, Bild 173, Bild 175 und Bild 177).

Analog zu den Daten der Straßenbaubitumen wurde vor der Bestimmung der Äquifeigigkeitstemperatur ($T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$) zunächst eine statistische Analyse der Daten durchgeführt, um Ausreißer filtern zu können (Bild 163 bis Bild 166).

Die mit Abstand höchste Anzahl an Ausreißern wurde für die Bindemittelsorte 25/55–55 festgestellt. In den beiden Untersuchungsjahren wurden jedoch verschieden große Streubereiche ermittelt, sodass einige der Ausreißer des einen Untersuchungsjahres im anderen Untersuchungsjahr nicht als Ausreißer identifiziert worden wären.

Auch hier erfolgte bei der Bestimmung der $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ und des $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ eine Orientierung an

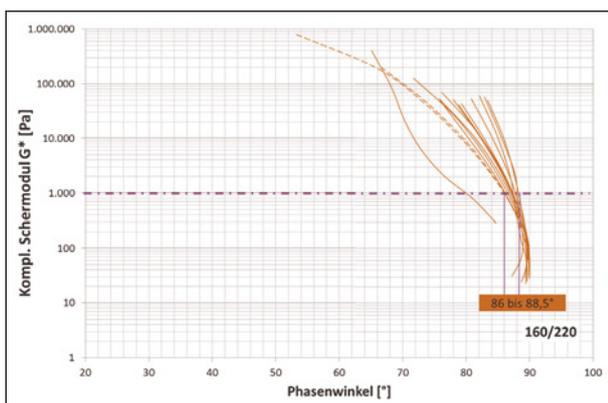


Bild 159: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 65)

auch der Verlauf des Schermoduls über den Phasenwinkel.

Die Darstellung der Ergebnisse mit den jeweiligen Auswertungen sind mit sogenannten Black-Diagrammen vorgenommen worden (Bild 153 und Bild 160). Eine Übersicht über die ermittelten Werte von $\delta_{(G^*=1,0 \text{ kPa})}$ liefert Tabelle 35.

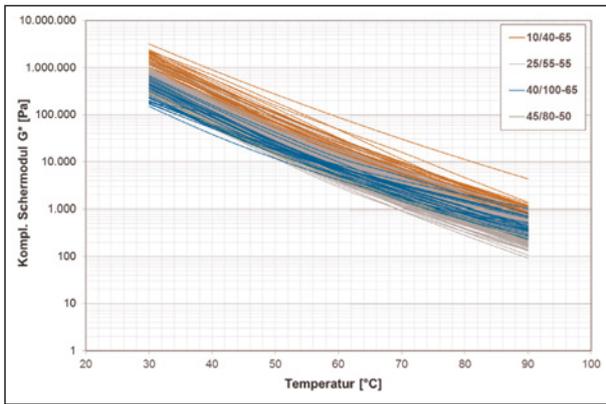


Bild 161: Komplexer Schermodul der polymermodifizierten Bindemittel im Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 67)

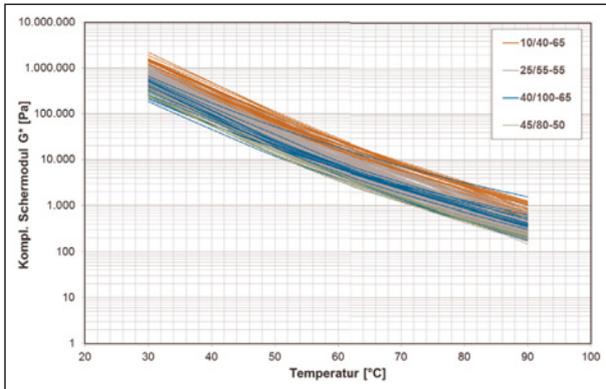


Bild 162: Komplexer Schermodul der polymermodifizierten Bindemittel im Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 68)

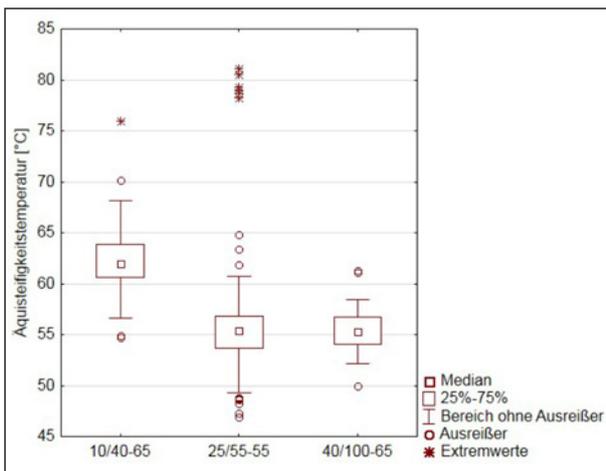


Bild 163: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2014

den statistischen Ergebnissen, jedoch wurde in einer Einzelfallbetrachtung anhand des Verlaufs des komplexen Schermoduls über den Phasenwinkel sowie anhand des Abstandes einzelner am Rand liegender Datensätze zu den übrigen Daten entschieden, welche Datensätze Berücksichtigung finden sollen.

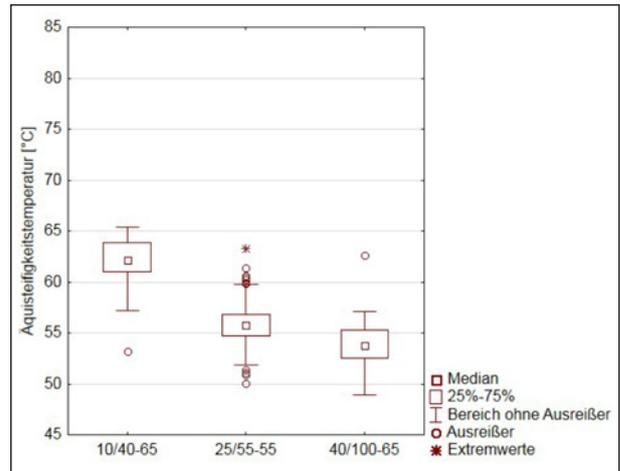


Bild 164: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2015

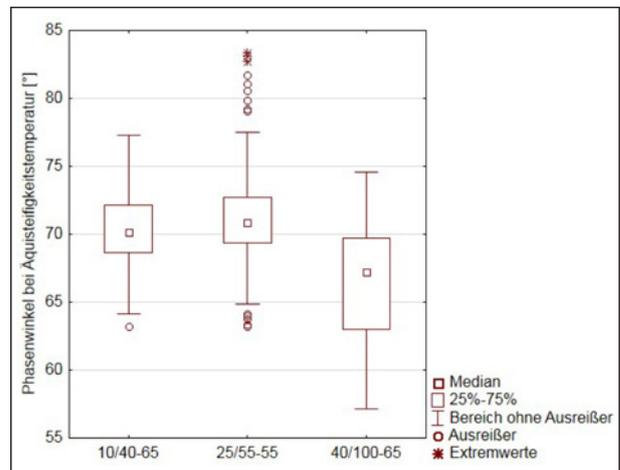


Bild 165: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2014

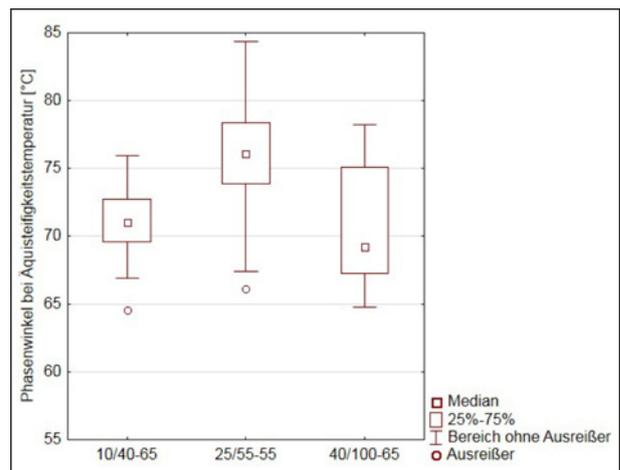


Bild 166: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2015

In den nachfolgenden Abbildungen sind die komplexen Schermodule mit den jeweiligen Bereichen der $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ der verschiedenen Bindemittelsorten sowie der $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ und der Phasenwinkel bei einem komplexen Schermodul von 1,0 kPa dargestellt.

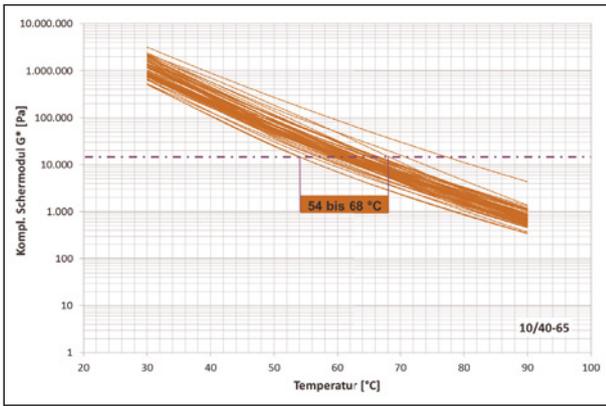


Bild 167: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 69)

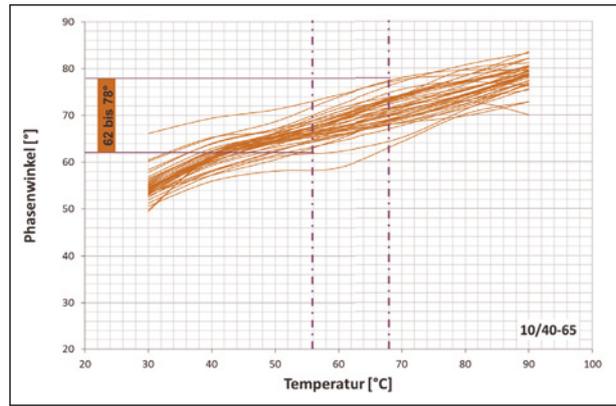


Bild 170: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 72)

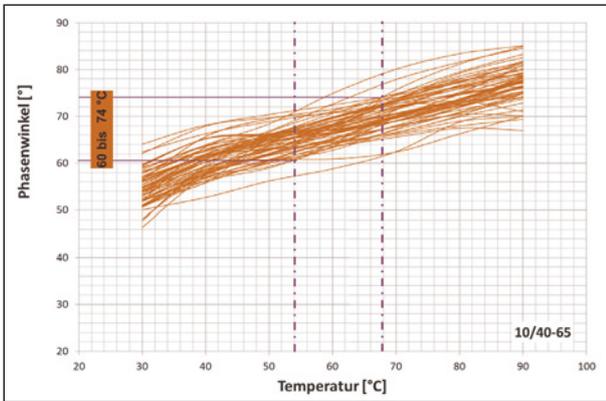


Bild 168: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 70)

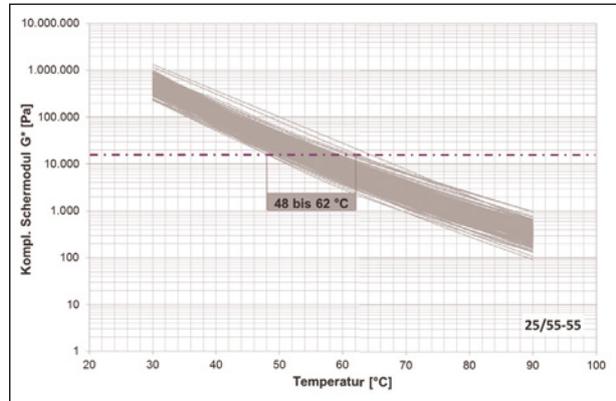


Bild 171: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 73)

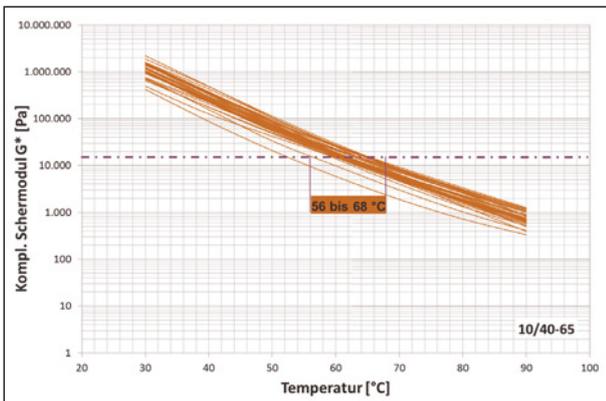


Bild 169: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 71)

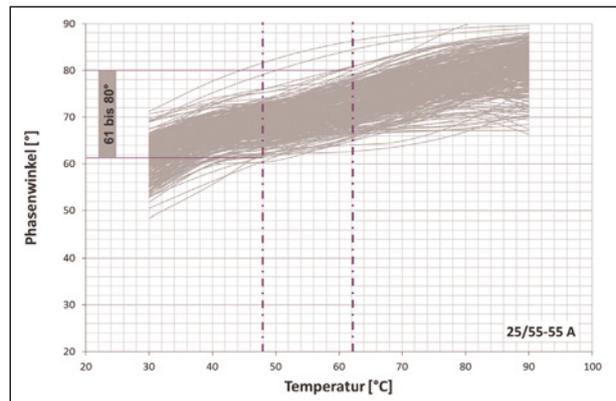


Bild 172: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 74)

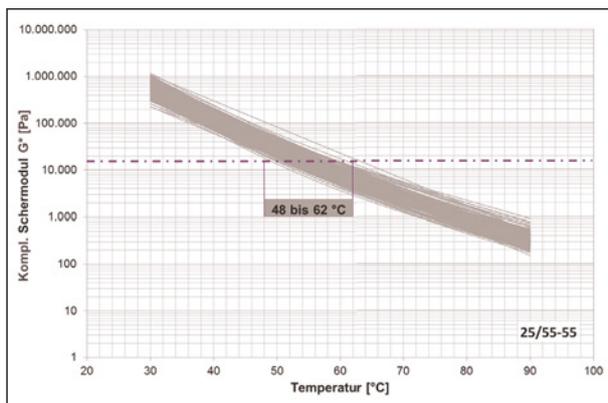


Bild 173: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 75)

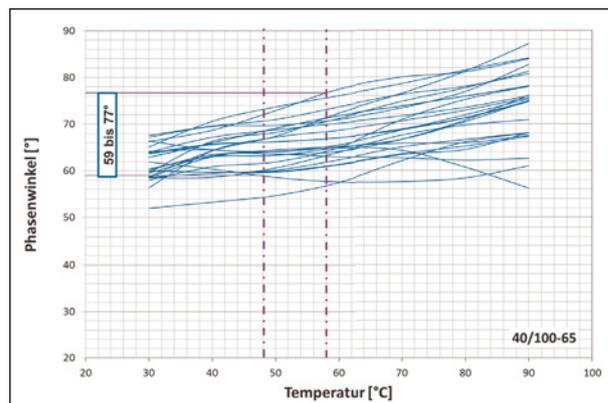


Bild 176: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 78)

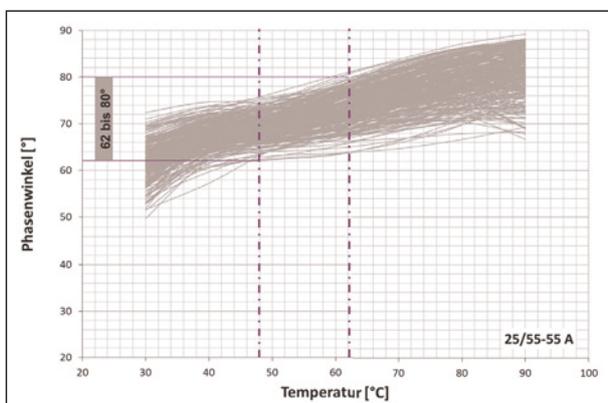


Bild 174: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 76)

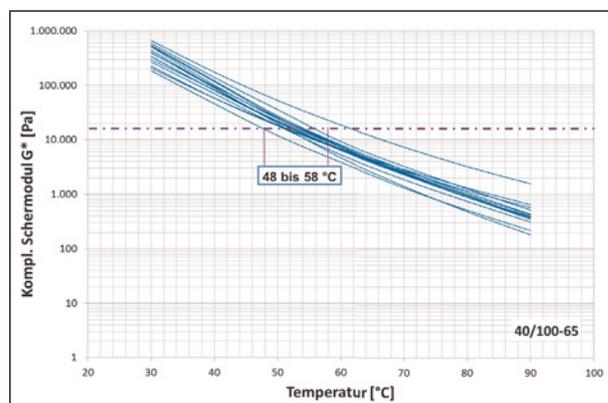


Bild 177: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 79)

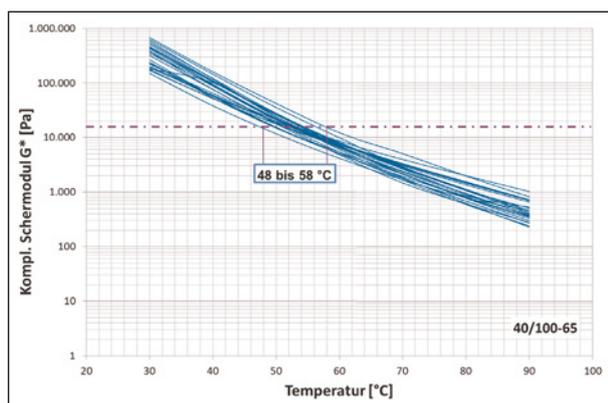


Bild 175: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 77)

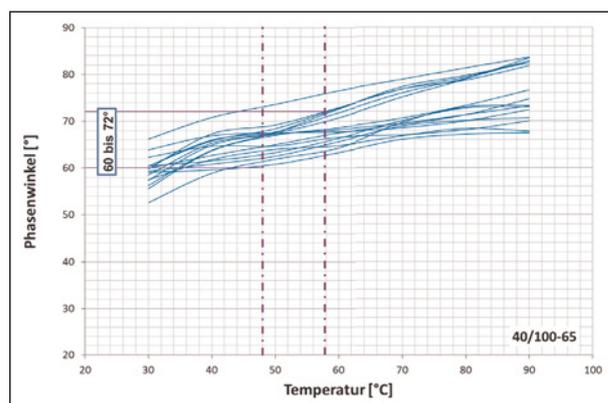


Bild 178: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 80)

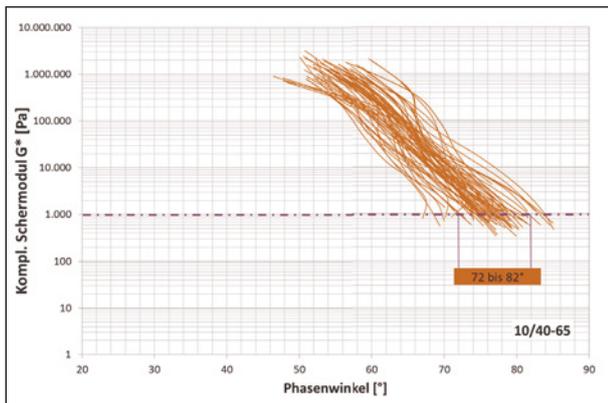


Bild 179: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 83)

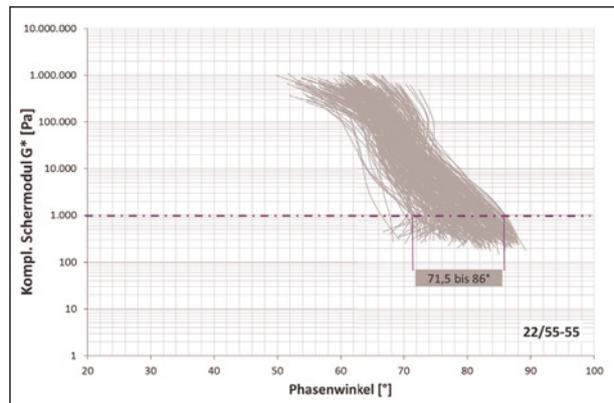


Bild 182: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 22/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 86)

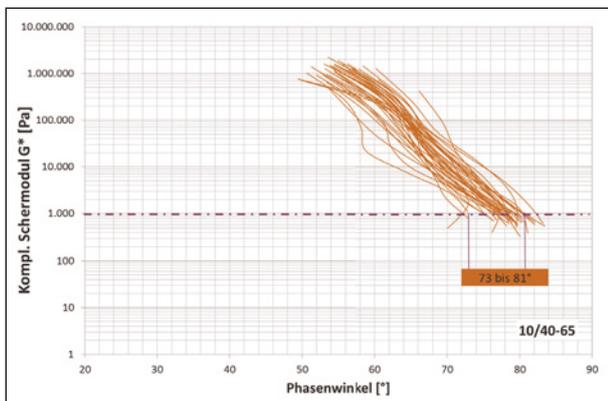


Bild 180: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 84)

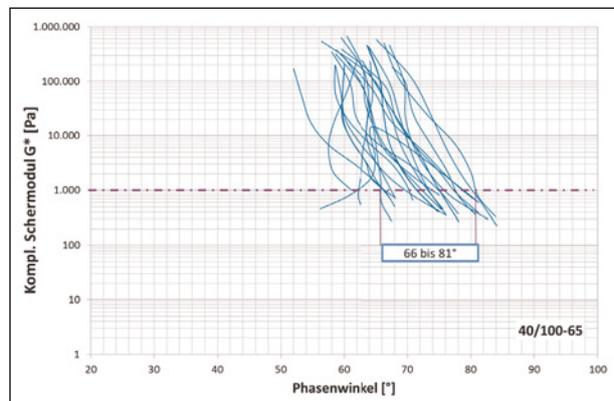


Bild 183: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 87)

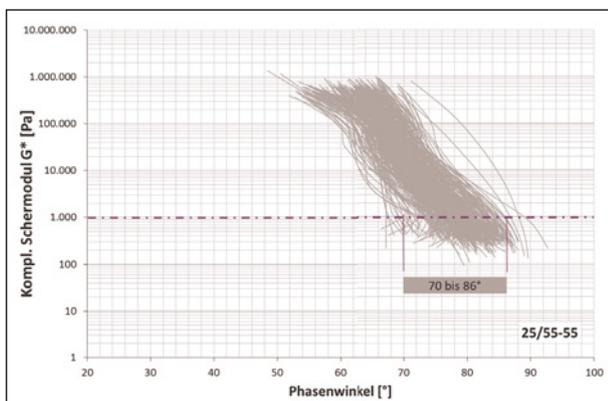


Bild 181: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 85)

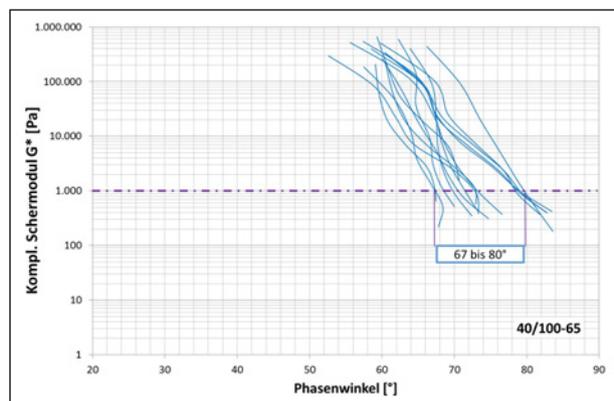


Bild 184: Phasenwinkel bei $G^*=1,0$ kPa, Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 88)

Diese Ergebnisse sind in Tabelle 36 und Tabelle 37 zusammengefasst. Die Auswertung der so erfassten Parameter wird im Kapitel 7.4.4 beschrieben.

Für die polymermodifizierten Bindemittel wurde ebenso wie für die Straßenbaubitumen als zusätzliche Bewertungsmöglichkeit der jeweilige Phasenwinkel bei einem komplexen Schermodul von 1,0

kPa bestimmt. Die Ergebnisse der Auswertungen sind in Tabelle 36 und Tabelle 37 zusammengefasst.

Auch bei dieser Auswertemethodik sind die Ergebnisse der Bindemittelsorte 45/80-50 aufgrund der geringen Grundgesamtheit als kritisch zu erachten. Die jeweiligen Darstellungen der Untersuchungser-

Bindemittel-sorte	2014		2015	
	$T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ [°C]	$\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ [°]	$T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ [°C]	$\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ [°]
10/40-65	54 bis 68	60 bis 74	56 bis 68	65 bis 68
25/55-55	48 bis 62	61 bis 80	48 bis 62	62 bis 80
40/100-65	48 bis 58	59 bis 77	48 bis 58	60 bis 72
45/80-50*	-	-	48 bis 52	70 bis 74

*nur sehr geringe Datenbasis

Tab. 36: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ und $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$

Bindemittelsorte	$\delta_{(G^*=1,0 \text{ kPa})}$ [°]	
	2014	2015
10/40-65	72,0 bis 82,0	73,0 bis 81,0
25/55-55	70,0 bis 86,0	71,5 bis 86,0
40/100-65	66,0 bis 81,0	67,0 bis 80,0
45/80-50*	-	74,5 bis 83,5

*nur sehr geringe Datenbasis

Tab. 37: Phasenwinkel bei $G^*=1,0 \text{ kPa}$

gebnisse sind im Anhang B, Bild B 81, Bild B 82 und Bild B 89 zu finden.

7.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei der Betrachtung der Phasenwinkel bei einem komplexen Schermodul von 1,0 kPa ließ sich eine sichere Einteilung aller Straßenbaubitumen mit einen Bereich von 85° bis 89° erkennen (Bild 185 und Bild 186). Die polymermodifizierte Bindemittel hingegen lagen in einem Bereich von 67° bis 86° (Bild 187 und Bild 188) und grenzten sich damit hinreichend gut von den Straßenbaubitumen ab. Somit ließe sich aus dem Phasenwinkel bei einem Schermodul von 1,0 kPa die Bindemittelart ableiten.

In Tabelle 38 sind die ermittelten rheologischen Kenndaten für die Straßenbaubitumen zusammengefasst dargestellt. Aufgrund der geringen Datenmenge zur Bindemittelsorte 20/30 wurde hier auf Daten aus [Projekt 16639 N/1, 2014] zurückgegriffen, die allerdings bezüglich der Anzahl der Datensätze noch nicht ausreichend belastbar ist.

Für die verschiedenen Straßenbaubitumen zeigte sich eine gute Abstufung der $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ mit nur geringen Überschneidungsbereichen. Somit eignet sich die Äquisteifigkeitstemperatur gut zur Klassifikation dieser Bindemittel.

Die ermittelten Phasenwinkel bei einem komplexen Schermodul von 15,0 kPa und 1,0 kPa lagen jedoch

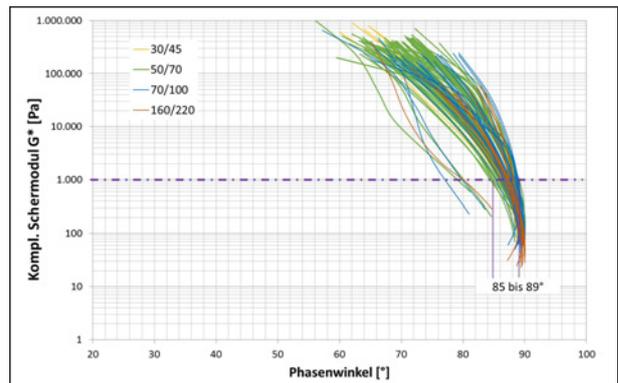


Bild 185: Black-Diagramm Straßenbaubitumen, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 90)

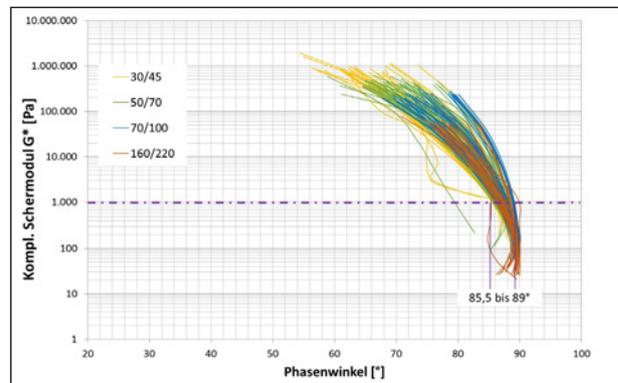


Bild 186: Black-Diagramm Straßenbaubitumen, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 91)

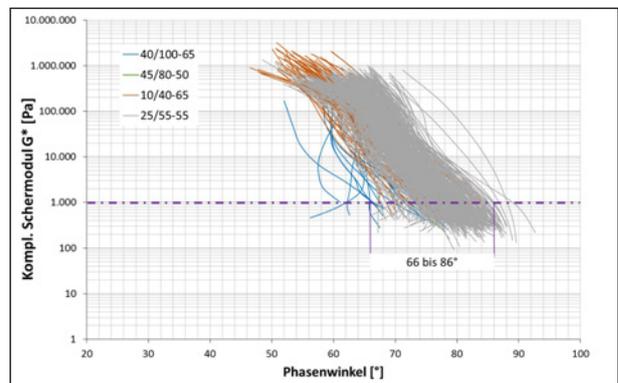


Bild 187: Black-Diagramm polymermodifizierte Bindemittel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 92)

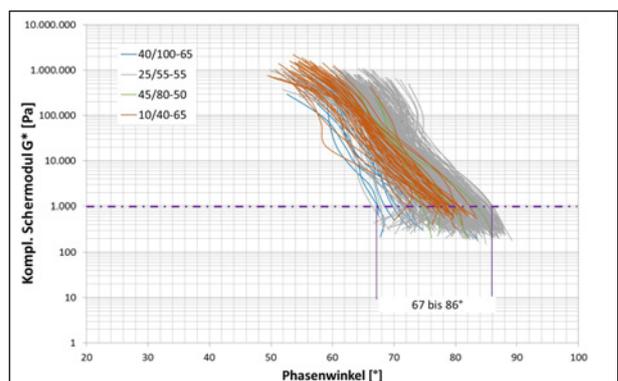


Bild 188: Black-Diagramm Polymermodifizierte Bindemittel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 93)

Binde- mittel	T bei G* = 15,0 kPa		Phasen- winkel bei G* = 15,0 kPa		Phasen- winkel bei G* = 1,0 kPa	
	min T [°C]	max T [°C]	min δ [°]	max δ [°]	min δ [°]	max δ [°]
20/30*	58	63	75	82	-	-
30/45	52	58	76	86	85	89
50/70	47	53	76	86	85	89
70/100	42	48	77	86	85	89
160/220	35	41	77	86	85	89

* Daten aus [Projekt 16639 N/1, 2014]

Tab. 38: Zusammenfassung der rheologischen Kenndaten der Straßenbaubitumen

Binde- mittel	T bei G* = 15,0 kPa		Phasen- winkel bei G* = 15,0 kPa		Phasen- winkel bei G* = 1,0 kPa	
	min T [°C]	max T [°C]	min δ [°]	max δ [°]	min δ [°]	max δ [°]
45/80-50 A*	48	52	70	74	74	84
25/55-55 A	48	62	62	78	71	86
10/40-65 A	56	68	62	78	73	81
40/100-65 A	48	58	60	72	67	80

* nur sehr geringe Datenbasis

Tab. 39: Zusammenfassung der rheologischen Kenndaten der polymermodifizierten Bitumen

für alle Bindemittelsorten im Bereich von 76° bis 86° bzw. 85° bis 89°, sodass hier keine Unterscheidung der einzelnen Bindemittelsorten möglich war.

In Tabelle 39 sind die rheologischen Kenndaten der polymermodifizierten Bindemittel zusammengefasst. Die Werte der Bindemittelsorte 45/80–50 waren dabei aufgrund der geringen Datenmenge als kritisch zu betrachten.

Bei den polymermodifizierten Bindemitteln war die Spannweite der Äquisteifigkeitstemperatur deutlich größer als bei den Straßenbaubitumen. Zudem waren die Überschneidungsbereiche relativ groß, vor allem bei den Bindemittelsorten 25/55–55 und 40/10065. Auch die Phasenwinkel bei einem Schermodul von 15,0 kPa bzw. 1,0 kPa wiesen sehr große Überschneidungsbereiche auf, wodurch eine Klassifizierung der einzelnen Bindemittelsorten anhand dieser Kennwerte nicht möglich ist.

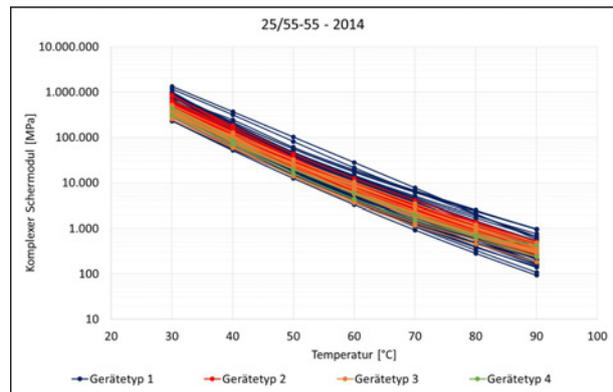


Bild 189: Komplexer Schermodul über die Zeit in Abhängigkeit vom Prüfgerät (siehe Anhang B, Bild B 94)

7.4.5 Einfluss des Geräteherstellers

Da auf freiwilliger Basis bei den DSR-Ergebnissen auch Angaben zum Prüfgerätetypen gemacht werden konnte, bestand die Möglichkeit einen potentiellen Zusammenhang zwischen den DSR-Ergebnissen und dem Prüfgerät zu untersuchen.

Diese Untersuchungen wurden stichprobenartig durchgeführt. Bild 189 zeigt exemplarisch den Verlauf des komplexen Schermoduls für unterschiedliche Prüfgeräte.

Es konnte keine systematische Abhängigkeit der DSR-Ergebnisse von dem Prüfgerätetypen festgestellt werden.

7.5 MSCR-Ergebnisse

Mithilfe der MSCR-Prüfung können die prozentuale Erholung und der nicht rückverformbare Anteil von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln bestimmt werden. Anhand dieser Kennwerte kann das Verformungspotential des Bindemittels beschrieben werden. Aufgrund der relativ hohen aufgetragenen Belastung während der Prüfdurchführung soll das Polymernetzwerk im Bindemittel möglichst gut angesprochen werden, sodass eine hinreichend gute Aussage über die Steifigkeit des Bindemittels und seine elastischen Fähigkeiten getroffen werden kann. [FHWA-HIF-11-038, 2011]

In der Vergangenheit konnte eine hinreichend gute Korrelation zwischen der Spurbildung und dem nicht rückverformbaren Anteil J_{nr} ermittelt werden. [D'ANGELO, et al., 2007]

Für die Auswertung von MSCR-Prüfergebnissen stehen gemäß [AL MSCR-Prüfung, 2012] verschie-

dene Parameter zur Verfügung. Aus den erfassten Dehnungen wird zunächst der resultierende Wert der Verformung am Ende der Kriechphase, also nach 1 s, je Zyklus bestimmt:

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

Zudem wird der resultierende Wert der Verformung am Ende der Erholungsphase, also nach 10 s ermittelt:

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

Für jeden Zyklus lässt sich aus diesen Verformungen die prozentuale Erholung ermitteln:

$$R_N = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_{10}}{\varepsilon_1} \right) \cdot 100$$

Zudem lässt sich der durchschnittliche nicht rückverformbare Anteil berechnen, indem ε_{10} auf die jeweilige Kriechspannung bezogen wird.

$$J_{nr}(3,2 \text{ kPa}) = \frac{\varepsilon_{10}}{3,2}$$

Sowohl die prozentuale Erholung als auch der nicht rückverformbare Anteil können als Durchschnitt über alle zehn Zyklen angegeben werden.

Im Verlauf des Projektes hat sich durch die Analyse der Daten herausgestellt, dass die Ansprache des Bitumens auf die angesetzte Spannung umso besser war, je höher diese Spannung war. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus [ZOOBOB, et al., 2012]. Deutlich wird dies bei der Betrachtung der J_{nr} -Werte bei einer Kriechspannung von 0,1 kPa und 3,2 kPa (Bild 190).

Der nicht rückverformbare Anteil war bei den Polymermodifizierten Bindemitteln bei einer Kriech-

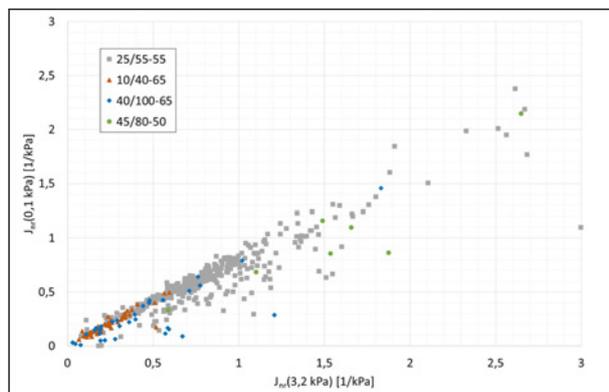


Bild 190: Vergleich des nicht rückverformbaren Anteils bei einer Kriechspannung von 0,1 kPa und 3,2 kPa (siehe Anhang B, Bild B 95)

spannung von 3,2 kPa durchgehend höher als bei einer Kriechspannung von 0,1 kPa. Daher wurden für die nachfolgende Auswertung lediglich die Verformungsergebnisse bei einer Kriechspannung von 3,2 kPa berücksichtigt.

7.5.1 Straßenbaubitumen

Wird der durchschnittliche Wert der prozentualen Erholung gegen den durchschnittlichen nicht rückverformbaren Anteil aufgetragen, so ergibt sich für die Straßenbaubitumen folgendes Bild 191 für das Untersuchungsjahr 2014 bzw. Bild 192 für das Untersuchungsjahr 2015. Dabei war zu erkennen, dass über den nicht rückverformbaren Anteil eine deutliche Einstufung der Bindemittelsorten vorgenommen werden kann. Jedoch fiel auf, dass für die Bindemittel in der Regel eine negative prozentuale Erholung errechnet wurde. Diese ergab sich, wenn die Verformung am Ende der neunsekündigen Erholungsphase nicht gefallen, sondern stattdessen angestiegen ist ($\varepsilon_r > \varepsilon_c$). Dieser Effekt trat bei den weichen Bitumen 50/70, 70/100 und 160/220 auf. Das Bitumen 30/45 wies hauptsächlich positive Werte für R_N auf.

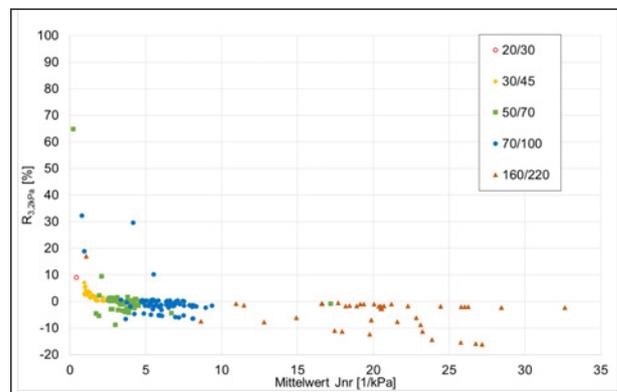


Bild 191: Ergebnisse der MSRC-Auswertung für Straßenbaubitumen im Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 96)

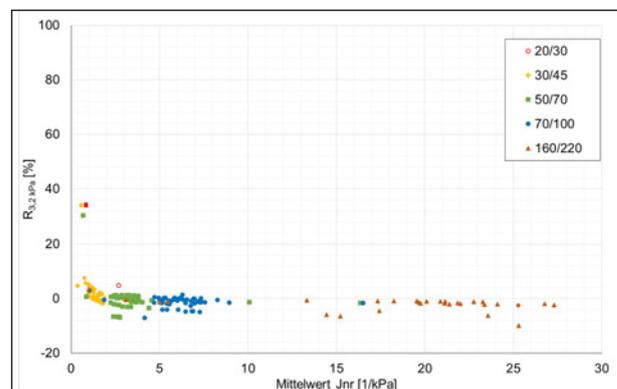


Bild 192: Ergebnisse der MSRC-Auswertung für Straßenbaubitumen im Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 97)

Die Ursache für die festgestellten negativen R_N -Werte könnte in einer unzureichend genauen Erfassung der Verformung am Ende der Belastungsphase liegen. Es besteht die Möglichkeit, dass die maximale Verformung nicht richtig erfasst wurde, weil das Material in dem Prüfspalt aufgrund der Massenträgheit noch bis in die Erholungsphase hinein eine ansteigende Verformung aufweist, sozusagen nachschwingt. Zudem weisen die weichen Straßenbaubitumen bei einer Temperatur von 60 °C hauptsächlich viskose Eigenschaften auf. Da der R_N -Wert ein Maß für die elastischen Materialanteile ist, wäre es schlüssig, dass dieser einen Wert von Null annimmt. Jedoch ist ein negativer R_N -Wert auch bei komplett viskosem Materialverhalten physikalisch nicht plausibel.

Somit ist die MSCR-Prüfung nach [AL MSCR-Prüfung, 2012] für Straßenbaubitumen kritisch zu hinterfragen.

7.5.2 Polymermodifizierte Bindemittel

In Bild 193 und Bild 194 ist für die Untersuchungsjahre 2014 und 2015 die prozentuale Erholung gegen den nicht rückverformbaren Anteil der polymermodifizierten Bindemittel aufgetragen.

Im Gegensatz zu den Straßenbaubitumen lag der Hauptteil der Werte des nicht rückverformbaren Anteils in einem relativ eng gefassten Bereich zwischen 0 kPa^{-1} und 2 kPa^{-1} . Die Werte für die prozentuale Erholung lagen zwischen 0 % und 100 %.

Erkennbar war, dass sich die Bindemittel alle in einem tendenziell exponentiell verlaufenden Bereich befanden. Dabei lag das Bindemittel 10/40–65 am unteren Rand dieses Bereich und das Bindemittel 40/100–65 am oberen Rand. Das Bindemittel 25/55–55 streute über den kompletten Bereich. Zur Bindemittelsorte 45/80–50 lagen in beiden Untersuchungsjahren nur sehr wenige Datensätze vor (8 Datensätze im Untersuchungsjahr 2014 und 7 Datensätze im Untersuchungsjahr 2015 an frischen Bindemitteln). Jedoch war in beiden Untersuchungsjahren festzustellen, dass die prozentuale Erholung bei diesem Bindemittel niedriger und der nicht rückverformbare Anteil tendenziell höher ist als bei den Bindemitteln 10/40–65 und 40/100–65.

Gemäß dem amerikanischen Regelwerk [AASHTO M320, 2006] wird der MSCR-Test nur bei polymermodifizierten Bindemittel angewendet, die vor der Prüfung mit dem RTFOT-Verfahren gealtert wurden.

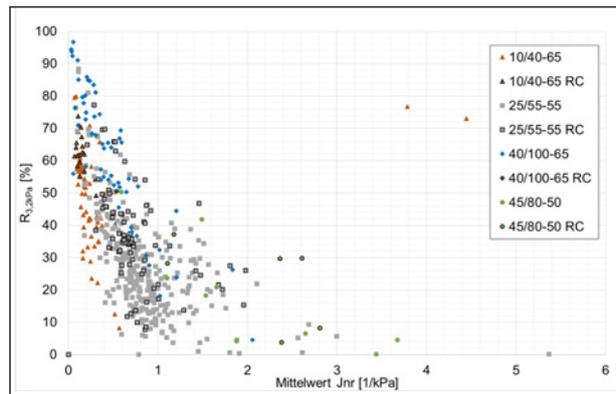


Bild 193: Ergebnisse der MSCR-Auswertung für Polymermodifizierte Bitumen, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 98)

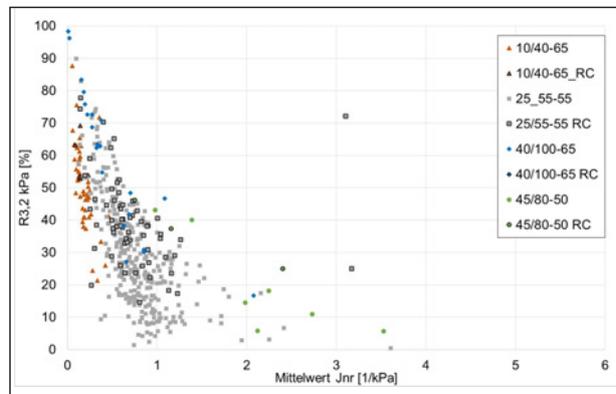


Bild 194: Ergebnisse der MSCR-Auswertung für Polymermodifizierte Bitumen, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 99)

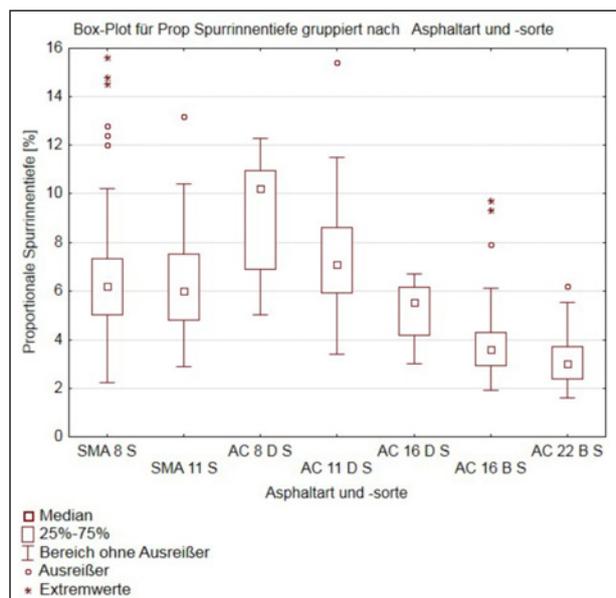


Bild 195: Zusammenfassung der Datensätze zur proportionalen Spurrinnentiefe

Die Wahl der Prüftemperatur erfolgt bei der Prüfung nach [AASHTO M320, 2006] in Abhängigkeit von dem Bindemittel

Zur Bewertung der Bindemittel wird eine Grenzkurve angesetzt, anhand der die elastischen Eigenschaften der Bindemittel identifiziert werden können (Anhang B, Bild B 100). Bindemittel, die oberhalb der Grenzkurve liegen weisen ein signifikant elastisches Verhalten auf, welches durch die Modifizierung mit elastischen Polymeren erreicht wird.

Gegebenenfalls ließe sich dieser Ansatz auch auf frische polymermodifizierte Bitumen beziehen. Dazu wären weiterführende Untersuchungen an Bindemitteln mit bekannten Modifizierungsgrad notwendig.

7.6 Anzugebende Werte

7.6.1 Proportionale Spurrinnentiefe

Zur Bewertung der proportionalen Spurrinnentiefe lagen insgesamt 813 Datensätze vor. Es wurden sieben verschiedene Asphaltkonzepte berücksichtigt (Bild 195). Die detaillierten Angaben zur deskriptiven Statistik sind dem Anhang A zu entnehmen (Tabelle A 37).

Der Hauptteil der Datensätze der Splittmastixasphaltkonzepte SMA 8 S und SMA 11 S zeigte eine große Übereinstimmung (Bild 195). Bei dem SMA 8 S lagen die Werte zum größten Teil zwischen 2,25 % und 10,2 %. Beim SMA 11 S zwischen 2,9 % und 10,4 %. Beim SMA 8 S lagen jedoch drei Ausreißer zwischen 12,0 % und 12,8 % und drei Ausreißer zwischen 14,5 % und 15,6 %. Beim SMA 11 S lag ein vereinzelter Ausreißer mit einem Wert von 13,2 % vor. Dementsprechend war die Gesamtspannweite beim SMA 8 S mit 3,05 % größer als beim SMA 11 S.

Bei den Asphaltbetonkonzepten zeigte sich eine Abstufung der proportionalen Spurrinnentiefe in Abhängigkeit von dem Größtkorn. Dabei nahm die proportionale Spurrinnentiefe mit zunehmenden Größtkorn ab. Dennoch lagen für alle geprüften Konzepte Überschneidungsbereiche vor. So lag die proportionale Spurrinnentiefe bei dem AC 8 D S zwischen 5,0 % und 12,3 % und beim AC 22 B S zwischen 1,6 % und 5,5 %, wenn der einzelne Ausreißer bei 6,2 % unberücksichtigt blieb. Der Überschneidungsbereich liegt somit zwischen 5,0 % und 5,5 %.

Bei den Konzepten mit einem Größtkorn von 8 und 11 % lag eine relativ große Streuung vor. Die Standardabweichung betrug bei beiden Konzepten mehr als 2,5 %. Beim AC 11 D S lag zudem ein Ausrei-

Asphaltart und -sorte	Gült. N	Mittelw. [%]	Minimum [%]	Maximum [%]	Spannw [%].
SMA 8 S	185	6,35	2,25	15,60	13,35
SMA 11 S	183	6,18	2,90	13,20	10,30
AC 8 D S	8	9,18	5,00	12,30	7,30
AC 11 D S	27	7,34	3,40	15,40	12,00
AC 16 D S	4	5,18	3,00	6,70	3,70
AC 16 B S	264	3,68	1,90	9,70	7,80
AC 22 B S	142	3,13	1,60	6,20	4,60

Tab. 40: Werte der proportionalen Spurrinnentiefe

Asphaltart und -sorte	Proportionale Spurrinnentiefe	
	Minimum [%]	Maximum [%]
SMA 8 S	2	10
SMA 11 S	2	10
AC 8 D S	5	12
AC 11 D S	3	11
AC 16 B S	2	6
AC 22 B S	1	5

Tab. 41: Erfahrungswerte für die proportionale Spurrinnentiefe

ßer in der Höhe von 15,4 % vor. Bei den Konzepten mit einem Größtkorn von 16 % betrug die Standardabweichung 1,6 % bzw. 1,1 %. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei dem Konzept AC 16 D S nur 4 Datensätze vorhanden waren. Das Asphaltkonzept AC 16 B S, welches mit 264 Datensätzen am häufigsten vertreten war, weist einen Ausreißer mit einem Wert von 7,9 % und zwei Extremwerte bei 9,3 und 9,7 % auf.

Bei dem Asphaltbetonkonzept mit einem Größtkorn von 22 % betrug die Standardabweichung weniger als 0,9 %, somit wies dieses Konzept die geringste Streuung auf.

Anhand dieser Daten ließen sich Erfahrungswerte für die proportionale Spurrinnentiefe in Abhängigkeit von der Asphaltart und -sorte formulieren (Tabelle 41). Dabei handelt es sich um die Datenspannweite ohne Ausreißer.

7.6.2 Hohlraumausfüllungsgrad

Zur Bewertung des Hohlraumausfüllungsgrades konnten 19 verschiedene Asphaltkonzepte berücksichtigt werden. Jedoch waren nicht von jedem Asphaltkonzept genügend Datensätze vorhanden, um eine ausreichende Aussagekraft zu besitzen. So la-

gen für das Konzept SMA 5 N lediglich 2 Datensätze vor und für das Konzept SMA 8 LA sogar nur ein einzelner Datensatz.

Die detaillierte statistische Auswertung der Daten ist in tabellarischer Form in Anhang A zu finden (Bild A 20 und Tabelle A 38).

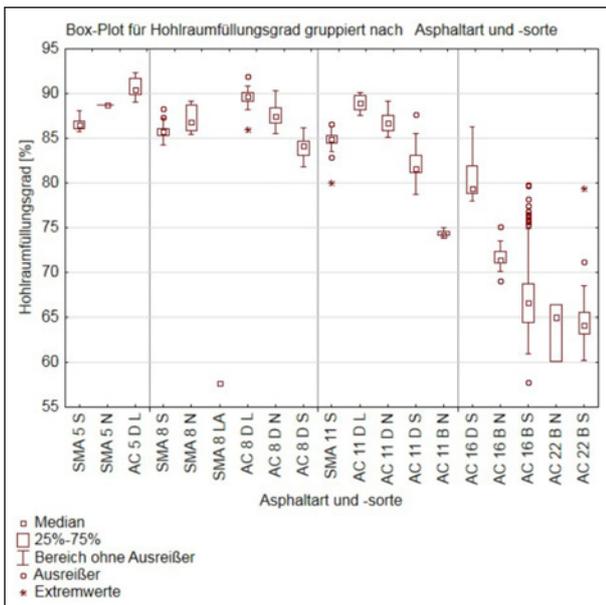


Bild 196: Hohlraumausfüllungsgrad in Abhängigkeit von der Asphaltart und -sorte

Asphaltart und -sorte	Minimum Hohlraumausfüllungsgrad [%]	Maximum Hohlraumausfüllungsgrad [%]
SMA 5 S	85 (VFB _{min83})	90 (VFB _{max92})
SMA 8 S	83 (VFB _{min83})	88 (VFB _{max89})
SMA 8 N	85 (VFB _{min83})	90 (VFB _{max92})
SMA 11 S	82 (VFB _{min80})	87 (VFB _{max89})
AC 5 D L	87 (VFB _{min85})	93 (VFB _{max89})
AC 8 D L	87 (VFB _{min85})	93 (VFB _{max93})
AC 8 D N	85 (VFB _{min85})	90 (VFB _{max})
AC 8 D S	82 (VFB _{min82})	87 (VFB _{max89})
AC 11 D L	88 (VFB _{min88})	92 (VFB _{max93})
AC 11 D N	85 (VFB _{min85})	90 (VFB _{max93})
AC 11 D S	80 (VFB _{min78})	85 (VFB _{max86})
AC 16 D S	77 (VFB _{min75})	87 (VFB _{max89})
AC 11 B N	72 (VFB _{min72})	77 (VFB _{max77})
AC 16 B N	67 (VFB _{min65})	77 (VFB _{max77})
AC 16 B S (1)	62 (VFB _{min60})	72 (VFB _{max74})
AC 16 B S (2)	75 (VFB _{min75})	80 (VFB _{max80})
AC 22 B N	60 (VFB _{min60})	70 (VFB _{max71})
AC 22 B S	60 (VFB _{min60})	70 (VFB _{max71})

(1) konventionelle Konzepte gemäß [TL Asphalt-StB 07/13, 2007]
 (2) dichtere Asphaltbinderkonzepte

Tab. 42: Erfahrungswerte für den Hohlraumausfüllungsgrad in Abhängigkeit von der Asphaltart

Grundsätzlich war zu erkennen, dass mit einem steigenden Größtkorn der Hohlraumausfüllungsgrad sank. Dieser Effekt trat bei den Asphaltbetonen stärker auf als bei den Splittmastixasphalten. Asphalte, die für eine leichte Beanspruchung ausgelegt sind, wiesen im Vergleich zu Asphalten mit demselben Größtkorn tendenziell die höchsten Hohlraumausfüllungsgrad auf und die Asphalte für eine besondere Belastung die niedrigsten.

Die Deckschichten wiesen alle einen Hohlraumausfüllungsgrad von mehr als 78 % auf. Für das Asphaltbindermischgut AC 16 B S wurde jedoch eine auffallend hohe Anzahl an Ausreißern festgestellt, die vermutlich auf dichte Asphaltbinderkonzepte zurückzuführen ist („SG-Binder“). Die Ausreißer deckten eine Bandbreite des Hohlraumausfüllungsgrades von 75 % bis 80 % ab.

Durchaus erwartungsgemäß war der Hohlraumausfüllungsgrad des einzelnen Datensatzes für einen SMA 8 LA mit ca. 58 %.

Bei einer detaillierten Betrachtung der Daten konnte kein direkter Zusammenhang zwischen der verwendeten Bindemittelsorte und dem Hohlraumausfüllungsgrad festgestellt werden. Tendenziell stieg der Hohlraumausfüllungsgrad zwar mit zunehmenden Bindemittelgehalt an und ebenso mit der Zunahme des fiktiven Hohlraumgehaltes, jedoch ließ sich hier kein vereinfachender mathematischer Zusammenhang finden, der alle Asphaltkonzepte umfasst (Anhang A, Bild A 17 und Bild A 18).

Daher wurde empfohlen, sich bezüglich des Hohlraumausfüllungsgrad an Erfahrungswerten zu orientieren, die sich ausschließlich auf eine Asphaltart beziehen:

Dabei wurde bis zu einem Größtkorn von 11 mm eine Spannweite von 5 % angesetzt und bei einem Größtkorn von 16 mm und 22 mm eine Spannweite von 10 %. Da von mehreren Asphaltarten nur sehr wenige Datensätze vorlagen, wird empfohlen diese Richtwerte durch weitere Erfahrungssammlung gezielt zu ergänzen und gegebenenfalls zu korrigieren.

7.6.3 Dynamische Stempelleindringtiefe

Zur Bewertung der dynamischen Stempelleindringtiefe an Gussasphalt wurden 15 Datensätze zu einem Gussasphalt MA 5 S geliefert, 69 Datensätze für einen MA 11 S und 136 Datensätze für einen

MA 11 S. In Bild 197 sind die Werte der dynamischen Stempelindringtiefe in Abhängigkeit von der Asphaltart dargestellt. Die detaillierte statistische Bewertung ist in Anhang A Tabelle A 39 dargestellt.

Es lagen nur sehr wenige Ausreißer bei den drei verschiedenen Gussasphaltarten vor. Dabei waren keine Besonderheiten bezüglich des verwendeten Bindemittels festgestellt worden.

Bei weiterführenden Analysen konnte kein Zusammenhang zwischen der dynamischen Stempelindringtiefe und dem fiktiven Hohlraumgehalt bzw. dem Bindemittelgehalt festgestellt werden (Anhang A, Bild A 19 und Bild A 20).

Auch konnte kein systematischer Zusammenhang zwischen den verwendeten Bindemittelsorten, bzw. der Modifizierung der Bindemittel, und den Werten der dynamischen Stempelindringtiefe festgestellt werden.

Aus den vorliegenden Ergebnissen ließen sich Erfahrungswerte für die dynamische Stempelindringtiefe in Abhängigkeit von der Asphaltart darstellen.

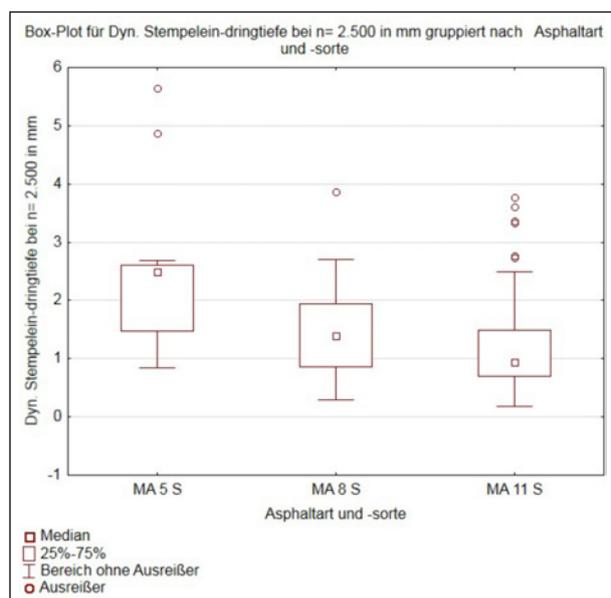


Bild 197: Dynamische Stempelindringtiefe in Abhängigkeit von der Asphaltart

Asphaltart	Minimalwert der Stempelindringtiefe [mm]	Maximalwert der Stempelindringtiefe [mm]
MA 5 S	1,0	3,5
MA 8 S	0,8	3,0
MA 11 S	0,5	2,5

Tab. 43: Erfahrungswerte für die dynamische Stempelindringtiefe an Gussasphalten bei n=2.500

dringtiefe in Abhängigkeit von der Gussasphaltart formulieren. Diese sind in Tabelle 43 zusammengefasst dargestellt. Für die untere Grenze wurde im Sinne eines hinreichenden Kälteverhaltens der untere Whisker eingegrenzt.

Die obere Grenze für den MA 5 S wurde aufgrund der vergleichsweise geringen Datenmenge und des auffällig kleinen oberen Whiskers auf 3,5 mm erhöht.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde eine Datenbank erstellt, um die Ergebnisse der gemäß [ARS 11/2012, 2012] bzw. [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] durchzuführenden Prüfungen an Straßenbaubitumen und polymermodifizierten Bitumen zu sammeln, mit dem Ziel durch die Analyse der Ergebnisse einen repräsentativen Bewertungshintergrund für die Bindemittelprüfungen zu schaffen.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Bindemittelprüfungen wurden Daten zu den gemäß [TL Asphalt-StB 07/13, 2007] als „ist anzugeben“ gekennzeichneten Asphaltprüfungen (proportionale Spurrinntiefe, Hohlraumausfüllungsgrad und dynamische Stempelindringtiefe) gesammelt und bewertet.

Die Grundlage zur statistischen Bewertung der Bindemittelprüfergebnisse bildeten Box-Whisker-Plots und die Durchführung einer deskriptiven Statistik, welche in tabellarischer Form ausgegeben wurde.

Die Analysen fanden für die gesammelten Daten aus den Untersuchungsjahren 2014 und 2015 statt.

Zur Bewertung der Standard-Kennwerte Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel wurde die Einhaltung der Anforderungswerte gemäß [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] überprüft. Zudem wurde die Verteilung der Daten anhand der Box-Whisker-Plots bewertet.

Bei dem Vergleich der Datensätze für die beiden Untersuchungsjahre 2014 und 2015 konnte kein systematischer Unterschied der Datenwerte festgestellt werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass für das Untersuchungsjahr 2015 weniger Daten vorlagen als für 2014 waren die Verteilungen der Daten und die Spannweite dieser in den beiden Jahren vergleichbar.

Bei der Überprüfung der Einhaltung der Anforderungswerte, zeigte sich, dass die Anforderungswerte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel bei den Straßenbaubitumen in der Regel eingehalten wurden.

Bei den Bitumen 50/70, 70/100 und 160/220 wurde der Anforderungswert an die Nadelpenetration je nach Bitumensorte in 10 % bis 17 % der Fälle unterschritten. Somit wiesen die Bindemittel tendenziell eine höhere Härte auf, als dies laut Regelwerk der Fall sein sollte.

Bei den polymermodifizierten Bindemitteln wurden die Anforderungswerte an die Nadelpenetration hingegen in der Regel eingehalten. Jedoch wurde bei den Bindemitteln 10/40–65 und 40/100–65 der Anforderungswert an den Erweichungspunkt Ring und Kugel in bis zu 11 % bzw. 13 % der Fälle unterschritten.

Für die Bitumen 20/30 und 45/80–50, die kein Bestandteil des [ARS 11/2012, 2012] sind, lag keine ausreichend große Datenmenge vor, um eine belegbare Bewertung durchführen zu können.

Die bei den Straßenbaubitumen festgestellten Unterschreitungen des Anforderungswertes an die Nadelpenetration betrafen hauptsächlich, aber nicht ausschließlich, Datensätze, die von Mischgutherstellern geliefert wurden. Hier lag jedoch auch die größte Datenmenge vor, sodass die Streuung bei diesen Datensätzen entsprechend groß war.

Um die Möglichkeit einer eindeutigen Identifizierung der Bindemittel anhand der Standard-Kenndaten zu überprüfen, wurden die Nadelpenetration und der Erweichungspunkt Ring und Kugel in halblogarithmischer Weise gegeneinander aufgetragen.

Bei den Straßenbaubitumen ist durch die kombinierte Betrachtung der Standard-Kenndaten eine relativ gute Identifizierung der Bindemittelsorte möglich. Dabei wiesen die Bitumen 50/70 und 70/100 jedoch Überschneidungsbereiche auf.

Bei den polymermodifizierten Bindemitteln hingegen war keine eindeutige Identifizierung der Bindemittelsorte anhand der Standard-Kennwerte möglich.

Zur Beurteilung des Einflusses der Alterung auf die Bindemittel wurden jeweils die prozentuale Abnahme der Nadelpenetration und die absolute Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach Alterung

durch das RTFOT-Verfahren sowie durch das RTFOT- und PAV-Verfahren bestimmt.

Durch die Langzeit- bzw. Kurzzeitalterung zeigt sich bei den Straßenbaubitumen eine systematische Veränderung der Standard-Kenndaten. Der Erweichungspunkt Ring und Kugel nahm durch die RTFOT-Alterung im Mittel um 6 °C zu und durch die RTFOT- und PAV-Alterung um 15 °C. Die mittlere Veränderung der Werte der Nadelpenetration hingegen war abhängig von der Bindemittelhärte. Mit zunehmender Bindemittelhärte erhöhte sich die prozentuale Abnahme der Nadelpenetration.

Bei den polymermodifizierten Bindemitteln variierte die Zunahme des Erweichungspunktes Ring und Kugel und die Abnahme der Nadelpenetration bei den verschiedenen Bindemittelsorten. Im Vergleich zu den Straßenbaubitumen ergab sich dadurch eine größere Streuung der Werte durch die beiden Alterungszustände.

Zur Analyse der DSR-Ergebnisse wurden der komplexe Schermodul und der Phasenwinkel zunächst anhand von Box-Whisker-Plots bewertet.

Statistisch gesehen waren die Werte des Schermoduls und des Phasenwinkels aus den DSR-Untersuchungen in den Untersuchungsjahren 2014 und 2015 vergleichbar. Auffällig war jedoch, dass bei den Straßenbaubitumen 50/70 und 70/100 eine Verkleinerung der Streuung der Werte erreicht wurde. Dies könnte auf eine verbesserte Handhabung des Prüfgeräts aufgrund der Prüferfahrung aus dem Vorjahr zurück zu führen sein.

Bei den Untersuchungen konnten die Bindemittel 20/30 und 45/80–50 keine Berücksichtigung finden, da zu wenige, bzw. keine gültigen Datensätze hierzu eingegangen sind. Auch für das Bindemittel 30/45 lagen für das Untersuchungsjahr 2014 lediglich 6 gültige Datensätze vor, weshalb die statistische Auswertung als kritisch anzusehen ist.

Für eine weitergehende Analyse der Daten wurden die Äquisteifigkeitstemperatur, also die Temperatur bei einem komplexen Schermodul von 15,0 kPa, für jede Bindemittelsorte ermittelt. Danach wurde der jeweilige Phasenwinkel, welcher bei der Äquisteifigkeitstemperatur vorliegt, bestimmt.

Anhand der Äquisteifigkeitstemperatur und des dazugehörigen Phasenwinkels sowie des Phasenwin-

kels, der bei einem Schermodul von 1,0 kPa vorliegt, konnte eine gute Identifizierung der Straßenbaubitumen erreicht werden. Dementsprechend wurden Erfahrungswerte in Abhängigkeit von der Bindemittelsorte für diese Parameter erstellt, die bei zukünftigen Auswertungen Berücksichtigung finden sollten.

Bei den polymermodifizierten Bindemitteln war diese Identifizierung nicht möglich, da hier sehr große Überschneidungsbereiche bei den verschiedenen Bindemittelsorten vorlagen.

Auch zur Bewertung der BBR-Ergebnisse wurden zunächst statistische Bewertungen anhand von Box-Whisker-Plots durchgeführt.

Die Biegekiechsteifigkeit nahm im Allgemeinen mit sinkender Prüftemperatur exponentiell zu. Bei der Betrachtungen der Biegekiechsteifigkeit und des m -Wertes zeigte sich eine Erhöhung der Streuung der Werte mit abnehmender Prüftemperatur.

In einer weiterführenden Analyse wurden die Temperaturen bestimmt, bei denen die Biegekiechsteifigkeit einen Wert von 300 MPa (T_{S300}) erreicht und der m -Wert einen Wert von 0,300 ($T_{m0,3}$). Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse zeigte sich die Verwendung der Ergebniswerte bei lediglich zwei Prüftemperaturen als hinreichend zielführend dafür. Da die Extrapolation zur Bestimmung der Temperaturen T_{S300} und $T_{m0,3}$ als kritisch zu erachten ist, sieht die Neufassung der AL BBR ([AL BBR, Stand: 01/2017]) vor, dass lediglich bei zwei Prüftemperaturen gemessen wird. Diese Prüftemperaturen sollen dabei so gewählt werden, dass T_{S300} und $T_{m0,3}$ durch Interpolation der Werte bestimmt werden können.

Bei den Straßenbaubitumen zeigt sich anhand der derart ermittelten Temperaturen eine Tendenz zur m -Bestimmtheit. Diese konnte bei den Polymermodifizierten Bindemitteln nicht festgestellt werden.

Für die BBR-Ergebnisse der Bindemittel 20/30 und 45/80–50 lagen nicht genügend Datensätze vor, um eine repräsentative statistische Bewertung durchführen zu können.

Zur Bewertung der MSCR-Ergebnisse wurden aus den eingegangenen Dehnungswerten der nicht rückverformbare Anteil und die prozentuale Erholung ermittelt.

Die Ergebnisse bei den drei verschiedenen Belastungsspannungen zeigten, dass die beste Differenzierbarkeit der Werte bei der höchsten Spannung von 3,2 kPa gegeben war. Dementsprechend erfolgte die weitere Bewertung ausschließlich an den Ergebnissen aus dieser Belastungsspannung.

Die MSCR-Prüfung nach aktuellem Regelwerk hat sich für die im Rahmen dieses Projektes untersuchten Straßenbaubitumen als nicht zweckmäßig erwiesen, da insbesondere bei den weichen Bindemitteln negative Werte der prozentualen Erholung festgestellt wurden. Da für diese Prüfung lediglich die Dehnungen vor und am Ende der Belastung sowie am Ende der Erholungsphase gesammelt wurden und keine detaillierten Dehnungsverläufe über die gesamte Prüfzeit vorliegen, war nicht erkennbar, ob die festgestellte negative prozentuale Erholung auf das Materialverhalten zurückzuführen ist oder ob ein systematischer Fehler bei der Erfassung der Dehnung am Ende der Belastung vorliegt. Hierzu werden weiterführende Untersuchungen empfohlen.

Für die polymermodifizierten Bindemittel ist das MSCR-Prüfverfahren grundsätzlich geeignet. Anhand der prozentualen Erholung und des nicht rückverformbaren Anteils lässt sich eine grobe Einteilung der Bindemittel vornehmen, wobei das Bindemittel 25/55–55 große Überschneidungsbereiche mit den übrigen Bindemitteln aufwies. Hier scheint die hohe Vielfalt an Bindemittel-eigenschaften innerhalb dieser Sorte eine hinreichende Abgrenzung zu den anderen PmB-Sorten zu erschweren.

Nach amerikanischem Regelwerk erfolgt diese Prüfung an gealterten Bindemitteln bei einer Prüftemperatur, die von der Bindemittelsorte abhängig gewählt wird. Anhand einer Bewertungskurve erfolgt dann die Einteilung in elastische und nicht-elastische Bindemittel.

Es wird empfohlen, weiterführende Untersuchungen bei verschiedenen Prüftemperaturen und in verschiedenen Alterungszuständen der polymermodifizierten Bindemittel durchzuführen, um einen detaillierten Bewertungshintergrund für die Ergebnisse der MSCR-Prüfung zu schaffen. Für das PmB 25/55–55 A sollte eine Eingrenzung der Eigenschaftsvielfalt überlegt werden.

Die Asphalt-Kenndaten Spurrinnentiefe, Hohlraumausfüllungsgrad und dynamische Stemperein-

dringtiefe wurden statistisch anhand von Box-Whisker-Plots bewertet. Für alle drei Kennwerte lagen nur relativ wenige Ausreißer vor.

Bei der Spurrinntiefe konnte eine klare Abhängigkeit von der jeweiligen Asphaltart bzw. -sorte festgestellt werden. Die Spurrinntiefe war bei den Splittmastixasphalten zwar tendenziell konstant, bei den Asphaltbetonen jedoch sank die Spurrinntiefe mit zunehmendem Größtkorn.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wurden Empfehlungsbereiche für die Spurrinntiefe in Abhängigkeit von der Asphaltart und -sorte formuliert.

Auch bei dem Hohlraumausfüllungsgrad zeigte sich eine Abhängigkeit von dem verwendeten Größtkorn. Je größer dieses war, desto niedriger war der Hohlraumausfüllungsgrad. Zusätzlich konnte eine Abhängigkeit von der Art der Belastung, für die die jeweilige Asphaltart konzipiert wurde, festgestellt werden. Asphaltkonzepte für eine leichte Beanspruchung wiesen einen größeren Hohlraumausfüllungsgrad auf, als für eine normale Beanspruchung. Bei besonderer Beanspruchung, sankt der Hohlraumausfüllungsgrad erneut. Die Deckschichten und Binderschichten ließen sich anhand des Hohlraumausfüllungsgrades klar voneinander trennen.

Auch hier wurden anhand der Ergebnisse Empfehlungswerte in Abhängigkeit von der Asphaltart und -art formuliert werden. Diese wiesen für die Deckschichten eine Spannweite von 5 % auf und für die Binderschichten aufgrund der festgestellten größeren Streuung eine Spannweite von 5 % bis 10 %.

Bei den Gussasphalten war eine gute Abstufung der Werte der dynamischen Stempelindringtiefe in Abhängigkeit von dem Größtkorn zu erkennen. Mit steigendem Größtkorn nahm die proportionale Spurrinntiefe ab.

Für die Formulierung von Empfehlungswerten der Stempelindringtiefe wurden die ermittelten Bereiche angepasst, um ein hinreichendes Kälteverhalten zu berücksichtigen.

9 Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise

Im Rahmen dieses Projektes konnten für einige der ausgewerteten Prüfparameter Erfahrungswerte for-

muliert werden, die bei der Weiterentwicklung der Regelwerke Berücksichtigung finden können. Dabei sollten die Entwicklungen bei der europäischen Normung beachtet werden.

Durch die Analyse der DSR-Ergebnisse wurde die in vorangegangenen Forschungsprojekten festgestellte Möglichkeit zur Klassifizierung der Bindemittel bestätigt. Die hieraus formulierten Empfehlungswerte für die Äquisteifigkeitstemperatur, für den Phasenwinkel bei der Äquisteifigkeitstemperatur sowie für den Phasenwinkel bei einem Schermodul von 1,0 kPa sollten in den Diskussionen über zukünftige Klassifikationen von Bindemitteln im Regelwerk berücksichtigt werden. Mit dem Blick auf mögliche zukünftige europäische Spezifikationen für Prüfergebnisse mit dem DSR wäre es darüber hinaus wünschenswert, wenn zusätzliche Erfahrungswerte nach Laboralterung (RTFOT und ggf. PAV) ergänzt würden. Inwieweit auch das Kälteverhalten mit dem DSR hinreichend präzise angesprochen werden kann, sollte durch weitere Forschung ergründet werden.

Die an den Straßenbaubitumen ermittelten Prüfergebnisse mit dem MSCR-Verfahren bringen keine weiterführenden rheologischen Erkenntnisse, sodass bereits im Laufe der Datensammlung diese Untersuchungen nicht weiter durchgeführt wurden. Ob sich durch Anpassung der Prüfungsrandbedingungen brauchbarere Materialkennwerte ableiten lassen und die zum Teil festgestellten Inplausibilitäten (negative prozentuale Erholungen) unterbunden werden, könnte ggf. durch weitere Forschung ermittelt werden. Allerdings ist dabei zu bedenken, dass mit den konventionellen Untersuchungen im DSR bereits hinreichende rheologische Kenndaten für Straßenbaubitumen im ungebrauchten Zustand vorliegen.

Grundsätzlich scheint das MSCR-Verfahren geeignet zur Prüfung von rheologischen Kennwerten für polymermodifizierte Bindemittel. Wider Erwarten zeigt die vorliegende Datenbasis noch keinen ausreichend differenzierenden Bewertungsansatz, mit dem sich die PmB-Sorten klassifizieren ließen. Inwieweit der derzeitige Bewertungsansatz oder die Vielfalt der rheologischen Eigenschaften einer Bindemittelsorte (z. B. 25/55–55 A) dies verursachen, ist zu hinterfragen. Darüber hinaus wäre aufgrund der europäischen Diskussionen auch für die MSCR-Prüfung eine vorgeschaltete Laboralterung mit dem RTFOT sinnvoll.

Die Bindemittelbewertung nach Laboralterung scheint besonders zur Beurteilung des Kälteverhaltens notwendig zu sein. Die in dieser Datensammlung ausgewerteten Prüfergebnisse mit dem BBR wurden ausschließlich an nicht gealterten Proben durchgeführt, womit eine Klassifikation oder Spezifikation der Bindemittelarten und -sorten schwer fällt. In wie weit die Erkenntnisse aus der CEN Data Collection dazu hilfreich wären, ist durch kritische Prüfung zu klären. Für die nicht gealterten Bindemittel könnten ggf. die in Kapitel 7.3.5 vorgeschlagenen Werte zur Spezifikation verwendet werden. Allerdings ließ sich hier nur für die Straßenbaubitumen eine sinnvolle Abstufung der Sorten vornehmen.

Mit Untersuchungen nach Bindemittelalterung sollten weitere Abstufungen, insbesondere für polymermodifizierte Bindemittel oder auch Korrelationen der BBR-Ergebnisse mit speziellen DSR-Verfahren überprüft werden. Eine Prüfmethode zur Beurteilung des Kälteverhaltens mit dem DSR hätte zudem den großen Vorteil, dass eine deutlich geringere Probenmenge des gealterten Bindemittels notwendig ist.

Die in diesem Projekt formulierten Erfahrungswerte der Asphalt-Kenndaten sollten in die Diskussion über die Überarbeitung des Regelwerkes (TL Asphalt-StB/ ZTV Asphalt-StB) eingebracht werden, um diese ggf. als (Anforderungs-)/Orientierungswerte einzubringen.

Um zu beschreiben, wie sich die in diesem Projekt festgestellten Bindemittelleigenschaften auf die Dauerhaftigkeit von Asphalt auswirken, könnte mit weiteren Untersuchungen ein Monitoring ausgewählter Bindemittel stattfinden. Dazu sollten Bindemittel mit möglichst unterschiedlichen Eigenschaften insbesondere des Alterungsverhaltens ausgewählt und deren Einsatz im Asphalt rückverfolgt werden. Von diesen Asphalten sollten dann in regelmäßigen Abständen Proben genommen und untersucht werden, um eine Änderung der Bindemittelleigenschaften über die Liegedauer zu analysieren. Aus dem Vergleich der Ergebnisse der ausgewählten Bindemittel soll dann eine Ableitung der Bindemittelleigenschaften auf die Dauerhaftigkeit des Asphaltes erfolgen.

Literatur

- AASHTO M320. 2006. Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binders M320. s.l.: American Association of the State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2006.
- AL BBR. Stand: 01/2017. Entwurf: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR). Köln : Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Stand: 01/2017.
- AL MSCR-Prüfung. 2012. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test). Köln: FGSV Verlag, 2012.
- ANDERSON, R. M., KING, G. N. und HANSON, D. I., BLANKENSHIP, P. B. 2011. Evaluation of the Relationship between Asphalt Binder Properties and Non-Load Related Cracking. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. s.l.: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2011. Bd. 80.
- ARAND, W. 2005. Hohlraumgehalt oder Hohlraumausfüllungsgrad – Welches Merkmal eignet sich besser zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphaltbeton? s.l.: Asphalt, Heft 7. Giesel Verlag GmbH., 2005.
- ARS 11/2012. 2012. Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 11/2012 (ARS 11/2012)-Änderungen und Ergänzungen des Technischen Regelwerkes Asphaltstraßen. s.l.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2012.
- Asphalt Institut. 2012. Guidance on the Use of the MSCR Test with the AASHTO M320 Specification. s.l.: Executive Offices and Research Center, 2012.
- D'ANGELO, J., et al. 2007. Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: Multiple Stress Creep Recovery Test. Journal of the Association of Asphalt Paving Techno-

- logists. s.l. : Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), 2007. Bd. 76.
- DIN EN 12591. 2009. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Anforderungen an Straßenbaubitumen. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2009.
- DIN EN 12607-1. 2007. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren. Fassung 2014. Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- DIN EN 12697-22. 2007. Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 22: Spurbildungstest. Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- DIN EN 12697-8. 2003. Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern. Berlin: Beuth Verlag, 2003.
- DIN EN 1426. 2007. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration. Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- DIN EN 1427. 2007. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren. Berlin: Beuth Verlag, 2007.
- DIN EN 14769. 2012. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV). Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- DIN EN 14770. 2012. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR). Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- DIN EN 14771. 2012. Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekrebstei-figkeit – Biegebalkenrheometer (BBR). Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- European Round Robin MSCRT. 2013. Final Draft MSCRT TG1. Brüssel : s.n., 2013.
- FHWA-HIF-11-038. 2011. The Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Procedure. Tech-Brief. s.l.: US. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2011.
- GIERHART, D. 2011. [Online] 2011. <http://www.asphaltinstitute.org/dotAsset/613bee-ab-112b-49b3-8b0b-36a98ccf04a7.pdf>.
- HAGNER, T. 2013. Anwendungen von Prüfungen im DSR. Köln: Workshop Dynamisches Sherrheometer der FGSV, 2013.
- HIRSCH, V. 2007. Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005. Bergisch Gladbach: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S. 52, 2007.
- PFEIFFER, J. Ph. und VAN DOORMAAL, P. M. 1936. The rheological properties of asphaltic bitumens. Journal of the Institute of Petroleum Technologists. 1936. Bd. Vol. 22.
- Projekt 16639 N/1. 2014. Einfluss der chemischen, rheologischen und physikalischen Grundeigenschaften von Straßenbaubitumen auf das Adhäsionsverhalten unterschiedlicher Gesteinskörnungen – Schlussbericht. Vorhaben 16639 N/1. Bochum: Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr Universität Bochum, 2014.
- RADENBERG, M. und GEHRKE, M. 2012. Rheologische Charakterisierung bitumenhaltiger Bindemittel im Temperaturbereich von -10 bis 150 °C. s.l.: Straße und Autobahn, Heft 7. Kirschbaum Verlag, 2012.
- SCELLENBERG, K. und EULITZ, H.-J. 2000. Ansprache des Verformungswiderstandes von Gussasphalt mit dem dynamischen Eindringversuch mit einem Stempel – Weiterentwicklung und Bewertungshintergrund. Bonn : Bundesministerium für Verkehrs und digitale Infrastruktur, 2000.
- SCELLENBERG, K. 2009. Welche kompositionellen Einflüsse bestimmen die Eigenschaften des Gussasphaltes? Essen: Vortrag auf dem Gussasphalt-Symposium im Ausbildungszentrum der Bauindustrie NRW, 2009.
- SCELLENBERGER, W. 2002. Zusammenhang zwischen Hohlraumausfüllungsgrad, Verkehrsbelastung, Spurrinnenbildung und Griffigkeit. s.l.: Bitumen Heft 3., 2002.
- STEINAUER, B. und SCHARNIGG, K. 2007. Vergleich der Prüfverfahren zur Ansprache der Verformungseigenschaften von Asphalt. Bonn: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 959. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007. Symphony. Symphony. [Online] <https://symphony.com/>.

- TL Asphalt-StB 07/13. 2007. Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. Fassung 2013. Köln: FGSV Verlag, 2007. Fassung 2013.
- TL Bitumen-StB 07/13. 2007. Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen. Fassung 2013. Köln: FGSV Verlag, 2007.
- TP Asphalt-StB, Teil 20. 2007. Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 20: Eindringtiefe an Gussasphaltwürfeln. Köln: FGSV Verlag, 2007.
- TP Asphalt-StB, Teil 22. 2007. Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau – Spurbildungsversuch. Köln : FGSV Verlag, 2007.
- TP Asphalt-StB, Teil 25A1. 2009. Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25A1: Dynamischer Stempeldringversuch an Gussasphalt. Köln: FGSV Verlag, 2009.
- ZOOROB, S. E., et al. 2012. Investigating the Multiple Stress Creep Recovery bitumen characterisation test. Construction and Building Materials. 2012. Bd. 30.
- ZTV Asphalt-StB 07. 2007. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt. Fassung 2013. Köln: FGSV Verlag, 2007.
- ## Bilder
- Bild 1: Gesamtziel des Forschungsprojektes
- Bild 2: Beispielhafte Bestimmung des Phasenwinkels
- Bild 3: Beispielhafte Auswertung des BBR-Versuchs (Durchbiegung und m-Wert)
- Bild 4: Beispiel für ein Box-Whisker-Plot
- Bild 5: Datenvolumenentwicklung
- Bild 6: Aufteilung der Datensätze in Quellen
- Bild 7: Drei-Schichten-Architektur
- Bild 8: Verlauf einer Abfrage (Request) bis zur Antwort (Response) [Quelle: symfony.com]
- Bild 9: Aufruf einer Webseite und XHR
- Bild 10: Verarbeitung von Datensätzen
- Bild 11: Liste aller Uploads (Details verfremdet)
- Bild 12: Detailseite eines Eintrags
- Bild 13: Eintrag ohne DSR/MSCR-Daten
- Bild 14: „Passwort ändern“-Funktion
- Bild 15: Benutzerverwaltung
- Bild 16: Firmenverwaltung
- Bild 17: Nadelpenetration Bitumen 20/30, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 18: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 20/30, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 19: Nadelpenetration Bitumen 30/45, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 20: Nadelpenetration Bitumen 30/45, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 21: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 30/45, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 22: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 30/45, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 23: Nadelpenetration Bitumen 50/70, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 24: Nadelpenetration Bitumen 50/70, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 25: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 50/70, Untersuchungsjahr 2014

- Bild 26: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 50/70, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 27: Nadelpenetration Bitumen 70/100, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 28: Nadelpenetration Bitumen 70/100, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 29: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 70/100, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 30: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 70/100, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 31: Nadelpenetration Bitumen 160/220, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 32: Nadelpenetration Bitumen 160/220, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 33: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 160/220, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 34: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bitumen 160/220, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 35: Nadelpenetration Bindemittel 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 36: Nadelpenetration Bindemittel 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 37: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 38: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 39: Nadelpenetration Bindemittel 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 40: Nadelpenetration Bindemittel 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 41: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 42: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 43: Nadelpenetration Bindemittel 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 44: Nadelpenetration Bindemittel 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 45: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 46: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 47: Nadelpenetration Bitumen 45/80–50, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 48: Nadelpenetration Bitumen 45/80–50, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 49: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 45/80–50, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 50: Erweichungspunkt Ring und Kugel Bindemittel 45/80–50, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 51: Zusammenhang zwischen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 1)
- Bild 52: Zusammenhang zwischen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 2)
- Bild 53: Penetrationsindex – Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 3)
- Bild 54: Penetrationsindex – Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 4)
- Bild 55: Alterungsverhalten nach RTFOT, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 5)
- Bild 56: Alterungsverhalten nach RTFOT, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 6)
- Bild 57: Alterungsverhalten nach RTFOT und PAV, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 7)
- Bild 58: Alterungsverhalten nach RTFOT und PAV, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 8)
- Bild 59: Zusammenhang zwischen

- Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 9)
- Bild 60: Zusammenhang zwischen Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 10)
- Bild 61: Zusammenhang zwischen Penetrationsindex und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 11)
- Bild 62: Zusammenhang zwischen Penetrationsindex und Erweichungspunkt Ring und Kugel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 12)
- Bild 63: Alterungsverhalten nach RTFOT, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 13)
- Bild 64: Alterungsverhalten nach RTFOT, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 14)
- Bild 65: Alterungsverhalten nach RTFOT und PAV, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang A, Bild A 15)
- Bild 66: Alterungsverhalten nach RTFOT und PAV, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang A, Bild A 16)
- Bild 67: Steifigkeit Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 1)
- Bild 68: Steifigkeit Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 2)
- Bild 69: m-Wert Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 3)
- Bild 70: m-Wert Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 4)
- Bild 71: Steifigkeit Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 5)
- Bild 72: Steifigkeit Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 6)
- Bild 73: m-Wert Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 7)
- Bild 74: m-Wert Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 8)
- Bild 75: Steifigkeit Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 9)
- Bild 76: Steifigkeit Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 10)
- Bild 77: m-Wert Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 11)
- Bild 78: m-Wert Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 12)
- Bild 79: Steifigkeit Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 13)
- Bild 80: Steifigkeit Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 14)
- Bild 81: m-Wert Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 15)
- Bild 82: m-Wert Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 16)
- Bild 83: Steifigkeit Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 17)
- Bild 84: Steifigkeit Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 18)
- Bild 85: m-Wert Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 19)
- Bild 86: m-Wert Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 20)
- Bild 87: Steifigkeit Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 21)
- Bild 88: Steifigkeit Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 22)

- Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 22)
- Bild 89: m-Wert Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 23)
- Bild 90: m-Wert Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 24)
- Bild 91: Steifigkeit Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 25)
- Bild 92: Steifigkeit Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 26)
- Bild 93: m-Wert Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 27)
- Bild 94: m-Wert Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 28)
- Bild 95: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -25°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 33)
- Bild 96: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -25°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 34)
- Bild 97: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -16°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 35)
- Bild 98: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -16°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 36)
- Bild 99: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -10°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 37)
- Bild 100: BBR-Ergebnisse an Straßenbaubitumen bei -10°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 38)
- Bild 101: BBR-Ergebnisse der Straßenbaubitumen, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 39)
- Bild 102: BBR-Ergebnisse der Straßenbaubitumen, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 40)
- Bild 103: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei 25°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 41)
- Bild 104: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bitumen bei 25°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 42)
- Bild 105: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei 16°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 43)
- Bild 106: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei 16°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 44)
- Bild 107: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei 10°C, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 45)
- Bild 108: BBR-Ergebnisse an modifizierten Bindemittel bei 10°C, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 46)
- Bild 109: BBR-Ergebnisse der modifizierten Bindemittel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 47)
- Bild 110: BBR-Ergebnisse der modifizierten Bindemittel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 48)
- Bild 111: Komplexer Schermodul des 30/45, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 112: komplexer Schermodul des 30/45, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 113: Phasenwinkel des 30/45, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 114: Phasenwinkel des 30/45, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 115: Komplexer Schermodul des 50/70, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 116: Komplexer Schermodul des 50/70, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 117: Phasenwinkel des 50/70, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 118: Phasenwinkel des 50/70, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 119: Komplexer Schermodul des 70/100, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 120: Komplexer Schermodul des 70/100, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 121: Phasenwinkel des 70/100,

- Untersuchungsjahr 2014
- Bild 122: Phasenwinkel des 70/100, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 123: Komplexer Schermodul des 160/220, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 124: Komplexer Schermodul des 160/220, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 125: Phasenwinkel des 160/220, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 126: Phasenwinkel des 160/220, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 127: Komplexer Schermodul des 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 128: Komplexer Schermodul des 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 129: Phasenwinkel des 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 130: Phasenwinkel des 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 131: Komplexer Schermodul des 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 132: Komplexer Schermodul des 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 133: Phasenwinkel des 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 134: Phasenwinkel des 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 135: Komplexer Schermodul des 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 136: Komplexer Schermodul des 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 137: Phasenwinkel des 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 138: Phasenwinkel des 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 139: Äquisteifigkeitstemperatur der Straßenbaubitumen im Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 49)
- Bild 140: Äquisteifigkeitstemperatur der Straßenbaubitumen im Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 50)
- Bild 142: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 143: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 144: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 145: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 51)
- Bild 146: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 52)
- Bild 147: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 53)
- Bild 148: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 54)
- Bild 149: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 55)
- Bild 150: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 56)
- Bild 151: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 57)
- Bild 152: $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 58)
- Bild 153: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 59)
- Bild 154: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 30/45, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 60)
- Bild 155: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 61)
- Bild 156: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 50/70, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 62)
- Bild 157: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0 \text{ kPa}$, Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 63)

- Bild 158: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 70/100, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 64)
- Bild 159: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 65)
- Bild 160: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 160/220, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 66)
- Bild 161: Komplexer Schermodul der polymermodifizierten Bindemittel im Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 67)
- Bild 162: Komplexer Schermodul der polymermodifizierten Bindemittel im Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 68)
- Bild 163: $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 164: $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 165: $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2014
- Bild 166: $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Untersuchungsjahr 2015
- Bild 167: $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 69)
- Bild 168: $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$ Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 70)
- Bild 169: $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 71)
- Bild 170: $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 72)
- Bild 171: $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 73)
- Bild 172: $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 74)
- Bild 173: $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 75)
- Bild 174: $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 76)
- Bild 175: $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 77)
- Bild 176: $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 78)
- Bild 177: $T_{(G^*=15\text{ kPa})}$ 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 79)
- Bild 178: $\delta_{(G^*=15\text{ kPa})}$, Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 80)
- Bild 179: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 10/40–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 83)
- Bild 180: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 10/40 65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 84)
- Bild 181: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 85)
- Bild 182: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 25/55–55, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 86)
- Bild 183: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 87)
- Bild 184: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0$ kPa, Bindemittelsorte 40/100–65, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 88)
- Bild 185: Black-Diagramm Straßenbaubitumen, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 90)
- Bild 186: Black-Diagramm Straßenbaubitumen, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 91)
- Bild 187: Black-Diagramm polymermodifizierte Bindemittel, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 92)
- Bild 188: Black-Diagramm polymermodifizierte Bindemittel, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 93)

Bild 189: Komplexer Schermodul über die Zeit in Abhängigkeit vom Prüfgerät (siehe Anhang B, Bild B 94)	Straßenbaubitumens 50/70
Bild 190: Vergleich des nicht rückverformbaren Anteils bei einer Kriechspannung von 0,1 kPa und 3,2 kPa (siehe Anhang B, Bild B 95) Bild B 93	Tab. 9: Bitumen 50/70 – 2014
Bild 191: Ergebnisse der MSRC-Auswertung für Straßenbaubitumen im Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 96)	Tab. 10: Bitumen 50/70 – 2015
Bild 192: Ergebnisse der MSCR-Auswertung für Straßenbaubitumen im Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 97)	Tab. 11: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 70/100
Bild 193: Ergebnisse der MSRC-Auswertung für polymermodifizierte Bitumen, Untersuchungsjahr 2014 (siehe Anhang B, Bild B 98)	Tab. 12: Bitumen 70/100 – 2014
Bild 194: Ergebnisse der MSCR-Auswertung für polymermodifizierte Bitumen, Untersuchungsjahr 2015 (siehe Anhang B, Bild B 99)	Tab. 13: Bitumen 70/100 – 2015
Bild 195: Zusammenfassung der Datensätze zur proportionalen Spurrinnentiefe	Tab. 14: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 160/220
Bild 196: Hohlraumausfüllungsgrad in Abhängigkeit von der Asphaltart und -sorte	Tab. 15: Bitumen 160/220 – 201
Bild 197: Dynamische Stempel Eindringtiefe in Abhängigkeit von der Asphaltart	Tab. 16: Bitumen 160/220 – 2015
	Tab. 17: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 10/40–65
	Tab. 18: Bitumen 10/40–65 – 2014
	Tab. 19: Bindemittel 10/40–65 – 2015
	Tab. 20: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 25/55–55
	Tab. 21: Bindemittel 25/55–55 – 2014
	Tab. 22: Bindemittel 25/55–55 – 2015
	Tab. 23: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 40/100–65
	Tab. 24: Bindemittel 40/100–65 – 2014
	Tab. 25: Bindemittel 40/100–65 – 2015
	Tab. 26: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 45/80–50
	Tab. 27: Bindemittel 45/80–50 – 2014
	Tab. 28: Bindemittel 45/80–50 – 2015

Tabellen

Tab. 1: Ergänzende Bindemittelprüfungen gemäß [TL Bitumen-StB 07/13, 2007] bzw. [ARS 11/2012, 2012]	Tab. 29: Änderung der Nadelpenetration der Straßenbaubitumen durch Alterung
Tab. 2: Richtwerte für die dynamischen Eindringtiefen	Tab. 30: Änderung des Erweichungspunktes Ring und Kugel der Straßenbaubitumen durch Alterung
Tab. 3: Schlüsselformat	Tab. 31: Änderung der Nadelpenetration der polymermodifizierten Bitumen durch Alterung
Tab. 4: Bitumen 20/30 – 2014	Tab. 32: Änderung der Nadelpenetration der polymermodifizierten Bitumen durch Alterung
Tab. 5: Anzahl der Datensätze des Straßenbaubitumens 30/45	Tab. 33: Durchschnittliche Werte der BBR-Prüfung der Straßenbaubitumen bei der
Tab. 6: Bitumen 30/45 – 2014	
Tab. 7: Bitumen 30/45 – 2015	
Tab. 8: Anzahl der Datensätze des	

Prüftemperatur -16 °C

- Tab. 34: Durchschnittliche Werte der BBR-Prüfung der polymermodifizierten Bindemittel bei der Prüftemperatur -16 °C
- Tab. 35: $\delta_{(G^*=1,0 \text{ kPa})}$ in Abhängigkeit von der Bindemittelsorte
- Tab. 36: $T_{(G^*=15 \text{ kPa})}$ und $\delta_{(G^*=15 \text{ kPa})}$
- Tab. 37: Phasenwinkel bei $G^* = 1,0 \text{ kPa}$
- Tab. 38: Zusammenfassung der rheologischen Kenndaten der Straßenbaubitumen
- Tab. 39: Zusammenfassung der rheologischen Kenndaten der polymermodifizierten Bitumen
- Tab. 40: Werte der proportionalen Spurrinntiefe
- Tab. 41: Erfahrungswerte für die proportionale Spurrinntiefe
- Tab. 42: Erfahrungswerte für den Hohlraumausfüllungsgrad in Abhängigkeit von der Asphaltart
- Tab. 43: Erfahrungswerte für die dynamische Stempeldringtiefe an Gussasphalten bei $n = 2.500$

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2016

S 97: Einheitliche Bewertungskriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel

Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt

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

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

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

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen

R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb

Wacker, Scherkenbach, Rabe, Golkowski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial

Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 – 2013

Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

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

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

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

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester(Kokosester)

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

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

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

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen

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

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischtem Kaltbauweisen – Asphalt

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

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisingerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

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

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehlung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau

Böhm, Tiemann, Ulrich, Verges, Muschalla
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

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

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

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

S 120: **Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme**
Wacker, Scherckenbach, Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: **Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen**
Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler, Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: **Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine**
Möller, Bundschuh, Birle, Heyer € 18,50

S 123: **Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils**
Stephan, Weigel € 19,00

S 124: **Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte**
Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: **Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie**
Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: **Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke**
Freudenstein, Neudert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**
Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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

S 140: **Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**
Radenberg, Flottmann, Drewes, König, Hilfert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://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 03-63

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

www.schuenemann-verlag.de

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