

Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 129

bast

Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

von

Manfred Hase
Wiebke Beyersdorf
Anke Hase
Kathrin Rademacher

HNL Ingenieur- und Prüfgesellschaft mbH
Pinneberg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 129

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.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 07.0259/2012/AGB:
Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Fachbetreuung
Franz Bommert

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 978-3-95606-433-3

Bergisch Gladbach, Februar 2019

Kurzfassung – Abstract

Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Entgegen dem ursprünglichen Ziel des Forschungsvorhabens (Entwicklung und Optimierung eines Verfahrens zur Alterung von Asphalt-Probekörpern und prüftechnische Ansprache der Performanceeigenschaften von Asphalt) war Gegenstand der Forschungsarbeit schwerpunktmäßig die Entwicklung und Optimierung eines Alterungsverfahrens.

Für die Untersuchungen wurde überwiegend ein Asphaltbeton AC 8 D S (Gestein: Basalt, Straßenbaubitumen 50/70) eingesetzt. Weiter wurde noch ein offenporiger Asphalt PA 8 mit polymermodifiziertem Bindemittel 40/100-65 A berücksichtigt.

In den Projektphasen wurden insbesondere folgende Untersuchungsansätze gewählt:

Es wurden zwei Konditionierungsverfahren zur Alterung von Asphalt-Probekörpern angewendet – das BSS-Verfahren, ein gängiges Verfahren aus der Kunststoffindustrie zur künstlichen Bewitterung und das PAV-A-Verfahren in Anlehnung an bestehende Prüfverfahren (SATS-Prüfung, PAV-Verfahren). Für das PAV-A-Verfahren wurde zunächst eine Konditionierungsdauer von 20 h, eine Konditionierungsdruck von 2,1 MPa und Temperaturen von 30 sowie 60 °C gewählt.

Ab der zweiten Projektphase wurde nur noch das PAV-A-Verfahren berücksichtigt, wobei der Druck in zwei Stufen (1,0 und 0,5 MPa) reduziert wurde.

Im Rahmen der Projektphase 4 wurde neben Asphalt-Probekörpern auch Asphaltmischgut und Bindemittel mittels PAV-A konditioniert, wobei der Druck auf 0,1 MPa verringert wurde und die Konditionierungszeit in vier Stufen bis 80 h erhöht wurde.

In der Projektphase 5 wurde zudem noch die Art und Geschwindigkeit des Druckablassens am Ende der Konditionierung variiert.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen der Projektphasen festgehalten werden, dass die zur Asphaltalterung erforderlichen Konditionierungsbedingungen mit dem PAV-A-Verfahren zu Gefügeveränderungen bzw. -zerstörungen der Asphalt-Probekörper führen. Bedingt durch die Gefügeveränderung/-zerstörung wird, wie am Beispiel der hier durchgeführten Abkühlversuche erkannt, nicht der

Einfluss auf die Kälteflexibilität durch das gealterte und versprödete Bindemittel angesprochen, was sich durch ein geringeres Relaxationsvermögen und damit verbundenem schlechterem Abbau von Zugspannungen (Relaxieren) im Abkühlversuch zeigen müsste. Vielmehr hat der Asphalt bedingt durch die Gefügestörungen/-zerstörungen nicht mehr die Fähigkeit Spannungen aufzubauen.

Procedure for the prediction of ageing behaviour of asphalt

Contrary to the original target of the research project (development and optimization of a procedure for the ageing of asphalt samples and test-technical determination of performance characteristics of asphalt), the object of this research focused on the development and optimization of an ageing procedure.

The examinations were mostly conducted using asphalt concrete AC 8 D S (stone: basalt, road bitumen 50/70). Furthermore, porous asphalt PA 8 with polymer-modified binder 40/100-65 A was considered.

In particular the following examination approaches were chosen in the project phases:

Two conditioning procedures were used for ageing asphalt samples – the BSS-procedure, a common procedure from the plastic industry for synthetic weathering, and the PAV-A-procedure in accordance with existing test methods (SATS-testing, PAV-procedure). For the PAV-A-procedure, a conditioning duration of 20h, conditioning pressure of 2.1 MPa and temperatures of 30 and 60°C respectively were chosen at first.

As of the second process phase, only the PAV-A-procedure was considered, with the pressure being reduced in two steps (1.0 and 0.5 MPa).

In the scope of project phase 4, mixed asphalt material and binder were conditioned according to PAV-A as well as asphalt samples, with the pressure being reduced to 0.1 MPa and the conditioning time increased to 80h in four steps.

In project phase 5, the type and rate of pressure reduction at the end of conditioning was varied as well.

All in all, the results from the project phases show that the conditioning parameters required for asphalt ageing in the PAV-A-procedure lead to structural changes or destruction of the asphalt samples. Due to the structural changes/destructions, the influence on cold flexibility by the aged and brittle binder, which would have to become evident in a lesser relaxation capacity and the connected reduced reduction of tensile stresses (relaxing) in the thermal stress retained specimen test, is not reflected, as is shown in the example of the thermal stress retained specimen tests conducted here. Instead, the asphalt is no longer able to build up tensions due to the structural disturbances/destructions.

Summary

Procedure for the prediction of ageing behaviour of asphalt

Based on existing insights, a procedure was to be developed and/or optimized in the scope of this research project in which asphalt samples can be practice-adequately aged in the lab. Asphalt samples that are suitable for testing-technical determination of the performance properties of asphalt, the deformation, low temperature and fatigue behaviour were to be chosen. Regarding the ageing procedures to be developed, test conditions/parameters were to be selected so as to permit recognition or reaction to possible influences on asphalt performance from ageing using the common performance tests. The insights gained in this manner may be a basis for deriving possible conclusions as to durability in the next step. During processing of the research project, it turned out that the target formulated for the research project had to be changed due to the insights gained, and that the development and optimization of an ageing procedure was the focus object of the research project.

The research project is structured into five project phases that are based on each other:

- Project phase 1:
Development of a conditioning procedure for ageing asphalt samples.
- Project phase 2:
Determination of possible differences in ageing behaviour of asphalts with different cavity content.
- Project phase 3:
Examinations on virtually cavity-free asphalt (glass-bead asphalt).
- Project phase 4:
Determination of suitable conditioning at low pressure variation: conditioning duration.
- Project phase 5:
Determination of suitable conditioning with high pressure – Variation of the conditioning duration and type/speed of the pressure drain.

The asphalts were produced using the rock type basalt and limestone filler. Furthermore, project

phase 1 also used a Basanite/basalt lava. The binder used was a road bitumen of type 50/70 and a polymer-modified binder of type 40/100-65 A.

The binder in the delivery condition, after RTFOT-ageing (short-term ageing) and after RTFOT- and PAV-ageing (long-term ageing) was used to determine the conventional binder indices for needle penetration pursuant to DIN EN 1426 and softening point ring and ball pursuant to DIN EN 1427. Furthermore, the DSR-test was applied to determine the phase angle in the temperature sweep and the complex shear modulus, and the results were presented as a BLACK chart.

The examinations conducted in the individual project phases were mostly conducted using asphalt concrete AC 8 D S with road bitumen 50/70 and with the rock type basalt. For project phase 5, a much more cavity-rich asphalt concrete AC 8 D S with street construction bitumen 50/70 was used (degree of compaction approx. 95%). Furthermore, project phase 2 used an porous asphalt PA 8 with polymer-modified binder 40/100-65 A.

The following will cover the individual project phases.

Project phase 1

In the scope of the first project phase, two different conditioning methods for ageing of asphalt samples (prisms) were applied comparatively.

On the one hand, a procedure applied with modified parameters that is used for simulation of artificial time-lapse weathering in the plastics industries in order to simulate the effects in particular of sunlight, heat and moisture on plastics/coatings was applied. The weathering unit used corresponds to the requirements of DIN EN ISO 4892-1 and 4892-2. Parts relevant for weathering including, among others, a xenon arc lamp as a radiation source with visual filters and radiation controller, sprinkling nozzles, a control unit for humidity and a control unit for air temperature. With the target of ageing asphalt samples under still lab-economic test conditions, a conditioning time of four weeks was chosen. For the duration of the test (conditioning), the asphalt samples were virtually continually stressed/conditioned according to a defined stress cycle. The asphalt samples were alternately stored for 102 min in a dry environment (65% relative humidity) in light (exposure strength $0.51 \pm 0.02 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{nm})$),

followed by 18 min with spray water application in darkness. The temperature during conditioning was 48°C (black-standard temperature) and 32°C (test chamber temperature) respectively. This procedure is called the BSS-procedure (Bewitterungsschranksystem; weather cabinet system) below.

Furthermore, a procedure in accordance with the existing test methods (SATS-testing according to DIN EN 12697-45, PAV-procedure according to DIN EN 14769) was developed, called the PAV-A-procedure below, and used to condition asphalt samples. The principle of this conditioning procedure PAV-A, which was applied in the scope of this research project, corresponds to accelerated long-term ageing with a pressure ageing container as described in DIN EN 14769 for bitumen and bitumen-containing binders. In the scope of the first project phase, a pressure of 2.1 MPa was chosen in accordance with DIN EN 14769 (PAV-procedure) and DIN EN 12697-45, the test duration was specified at 20 hours in light of lab-economic test performance and the conditioning temperature was varied in the upper usage temperature range (30°C, 40°C, 50°C, 60°C).

Single-axial tensile tests and thermal stress retained specimen tests pursuant to TP Asphalt-StB, part 46 A, were performed on the unaged prismatic samples (zero versions) as well as the samples conditioned with the BSS- and PAV-A-procedures. The samples showed less beneficial relaxation capacities than the unconditioned samples after conditioning in the BSS-procedure (examined versions AC 8 D S with basalt or Basanite); the cryogenic tension stresses increase comparatively faster as temperatures reduce. The versions conditioned in the PAV-A (AC 8 D S with basalt), by contrast, showed a lesser increase of the cryogenic tension stresses in the thermal stress retained specimen tests as compared to the zero version at a reducing temperature. The higher the conditioning temperature during the PAV-A-procedure, the lower the increase of the cryogenic tension stresses as compared to the zero version with reducing temperature. Visual structure faults/changes can be determined at the surface of the PAV-A-conditioned sample bodies.

Project phase 2

In the scope of the second project phase, the samples were conditioned only by the PAV-A-procedure. Based on the results and insights from

the first project phase, where the chosen conditioning parameters in the PAV-A-procedure were classified as too harsh due to structural changes/faults of the asphalt samples, project phase 2 reduced the pressure application. To determine possible differences in ageing of asphalts with different cavity contents, an asphalt concrete AC 8 D S (stone type: basalt, street construction bitumen: 50/70) and an open-pored asphalt PA 8 (stone type: basalt, polymer-modified bitumen: 40/100-65 A) with a variation of temperature (30°C and 60°C) and pressure (2.1 MPa, 1.0 MPa, 0.5 MPa) were conditioned with the PAV-A-procedure. The conditioning duration was kept consistently at 20h.

Thermal stress retained specimen tests led to the result that both the asphalt concrete version conditioned at 30°C and at 60°C show flattening of the cooling curves at increasing compression stress. The version with the harshest conditioning parameters chosen here (60°C, 2.1 MPa, 20h) shows a clear reduction of tensile strength. The other examined conditioned versions showed tensile resistance values at a scope of the tensile resistances of the zero version, as well as higher values. Some individual and unsystematic increases of the elongation at break could be found. The cooling curves in all examined PA-8-versions are very flat, which is typical for porous asphalt, since the virtually only pointed binder bridges made the development of cryogenic tensile stresses nearly impossible. In the samples conditioned at 60°C, it was nearly impossible to build up any tension at all in the thermal stress retained specimen test. The conditioned versions mostly show reduction of the tensile resistance, in particular versions conditioned at a pressure of 2.1 MPa (30°C and 60°C). The examined conditioned versions show an unsystematic increase of the elongation at break. The densities of the prismatic samples were each determined before and after conditioning. In the AC 8 D S, the density before and after conditioning led to clear increase of the hollow content in the prismatic samples of the asphalt version AC 8 D S. It could be observed that increase of the hollow content is influenced by pressure as well as by temperature. The higher the pressure or temperature, the larger the increase of hollow content. Comparatively stronger conditioning parameters – a conditioning temperature of 60°C and conditioning pressure of 2.1 MPa – also showed an increase of the hollow content afterwards. PAV-A in the asphalt version PA 8. Conventional binder

indices (softening point ring and ball, needle penetration) and performance indices (from BBR, DSR test, MSCR test) were determined on the recovered binder from prismatic samples (zero version and conditioned versions). The binder indices determined on the recovered binder for the conditioned asphalt concrete versions examined here with the comparatively strongest conditioning parameters (60°C, 2.1 MPa, 20h) and the comparatively weakest conditioning parameters (30°C, 0.5 MPa, 20h) as well as the zero version correspond to the ageing condition of the binder (road bitumen 50/70) after RTFOT-ageing (short-term ageing) in size. The conventional binder indices determined on binders recovered from prismatic samples of porous asphalt (40/100-65 A) (softening point ring and ball, needle penetration) and the creepage stiffnesses determined in the BBR test and the complex shear moduli measured in the DSR test, correspond roughly to binder ageing according to RTFOT- + PAV-aged in size for the conditioned PA-versions and the zero version. The conditioned PA-versions and the zero version can be classified between the indices on the binder that was only RTFOT-aged and the binder that was RTFOT- + PAV-aged according to the index phase angle (from the DSR-test) and the indices from the MSCR-tests. The binder indices determined on extracted binder samples suggest that the conditioning parameters chosen for the second project phase with the PAV-A-procedure only cause minor ageing of the binder. The binder ageing achieved by conditioning is masked by the ageing that takes place during mixed material production, panel production and/or recovery. For dense asphalt concrete and porous asphalt, the determined binder indices do not permit differentiation between the conditioned versions and zero versions. Furthermore, no difference can be found in the severity of conditioning (variation of conditioning parameters). Instead the structure of the asphalt samples is changed or damaged in conditioning and an increase in the hollow contents of the samples from conditioning can be determined. The structure damage becomes evident in the thermal stress retained specimen tests of the conditioned versions in that the tensions that can be built up are lower, instead, as would be the case in an aged, hardened binder, of showing a comparatively faster increase of the cryogenic tensions with reducing temperature due to the lesser relaxation capacity.

Project phase 3

In order to determine whether the structure changes of the asphalt samples found in project phases 1 and 2 may also occur in virtually cavity-free asphalts and whether air may be pressed even into the smallest cavities of the stone grains under pressure, resulting in mechanical stress on the rocks, virtually hollow-free sample bodies were produced and conditioned for project phase 3, in alignment with cast asphalt. The rock grain of an asphalt was replaced by glass-beads of soda-lime glass with a dense structure. The binder indices and street-construction bitumen were used to design the virtually hollow-free glass-bead asphalt in alignment with a cast asphalt. For this, polished glass-beads of soda-lime glass with a grain size of 1.55 to 1.85 mm were mixed with street construction bitumen of type 30/45 at a ratio of 3:1. This mixture was used to produce prismatic samples that were conditioned by PAV-A-procedure. The temperature was 30°C and the test duration 20 hours. To examine possible influences of the amount of the pressure stress on the possibly existing structural changes, the pressure at conditioning with the PAV-A-procedure was varied with 0.1 MPa, 0.5 MPa, 1.0 MPa and 2.1 MPa. Before and after conditioning, the dimensions of the samples were determined by measurement and the density according to TP Asphalt-StB, part 6, procedure A. This virtually hollow-free asphalt (glass-bead asphalt) also showed an increase in the hollow share or reduction of the density. This shows that air enters even the smallest hollows during conditioning by PAV-A and disturbs the structure. Increasingly high pressure at conditioning increasingly reduces the density of the glass-bead asphalt. The changes to the density from conditioning suggest that air is pressed even into the smallest hollows in the binder under compression stress even in a virtually hollow-free asphalt (glass-bead asphalt), which generally causes a structural change/disturbance from conditioning in the PAV-A-procedure. This phenomenon can also be observed in long-term ageing (PAV) of pure

binder in the pressure ageing container. Bubble formation can be seen at the surface of the sample towards the end of conditioning here. The values determined on the recovered binder for the softening point ring and ball, along with the results from the DSR T-Sweep, also show that the outer area of the samples tends to be stressed (conditioned) more strongly than the inner area. Generally, a too-weak

conditioning can be derived from this, since the results of the binder extracted from the samples are rather on the level of the results on the binder after short-term ageing.

Project phase 4

In order to keep the structural change/disturbance as low as possible, the pressure stress in conditioning was reduced even further in the fourth project phase. There was an attempt at causing (long-term) ageing by adjusting the conditioning duration.

Asphalt samples AC 8 D S were subjected to conditioning. In the PAV-A, the pressure level was reduced to 0.1 MPa and the test temperature was kept consistent at 30°C. The conditioning time was extended step by step to 20 hours, 40 hours, 60 hours and 80 hours respectively. In parallel to the asphalt samples, binder samples and loose mixed asphalt material were conditioned at the same time in order to get further comparison values. After PAV-A-ageing, the binder was extracted from the prismatic samples or the loose mixed asphalt material and recovered, the softening points ring and ball were determined and the T-Sweep was performed in the dynamic shear rheometer (DSR). The conditioned binder samples were examined accordingly. The conditioning parameters shown in the fourth project phase led to the conclusion, based on the binder indices determined, that long-term ageing of the binder will not be achieved on the asphalt samples, nor the loose mixed asphalt material or the pure binder.

Project phase 5

In the fifth and last project phase, further systematic tests were performed with different conditioning parameters, in order to find a suitable conditioning method with the result of (long-term) ageing of the samples. In order to minimize the structural disturbance, the pressure was partially reduced more slowly, gradually, towards the end of the conditioning phase in the subsequent examinations. For the slower, gradual reduction of the pressure, the pressure was reduced at a rate of 0.1 MPa/h. The conditioning temperature was kept stable during this. In this slow, gradual pressure reduction method, the conditioning duration was extended by 21 hours. The normal control of pressure reduction

pursuant to DIN EN 14769 uses a rate of 0.2 MPa/min. the conditioning temperature is not maintained during this process.

Two different asphalt concretes AC 8 D S (designed as dense and porous) were inspected. First, samples of the version AC 8 D S (dense) were conditioned for a duration of 20 hours and at a pressure of 2.1 MPa, at 30 and 60°C each, to determine the influence of the pressure reduction method at different temperatures. Then, the conditioning duration was clearly increased again at a temperature of 60°C and a pressure of 2.1 MPa. In addition to the tests with conditioning durations of 20 hours, tests with conditioning durations of 80 hours and 160 hours were conducted, with the pressure reduction method varying in either case as well. Binder indices of the recovered extracted binder, such as the softening point ring and ball and the deformation behaviour in the dynamic shear rheometer were determined for the conditioned asphalts, distinguishing between the inner and outer area of the conditioned samples. Additionally, the density of the samples was determined before and after conditioning, in order to record possible structural changes. This was supplemented by thermal stress retained specimen tests conducted on the respective versions.

The examinations conducted in the fifth project phase led to the following essential insights:

Slow, gradual pressure reduction at the end of conditioning reduces the structural disturbance found (reduction of density) in the asphalt, but cannot entirely avoid it. The asphalt concrete version with more hollows shows larger structural changes than the denser versions. The structural damage shown is reflected in the flatter curves in the thermal stress retained specimen tests, with the asphalt only building low tensile stresses, which results in comparatively lower values for tension at break at the end of the test. The binder indices led to spreading/differences in the ageing process in the denser asphalt concrete version depending on the chosen conditioning parameters. In the generally more strongly aged asphalt concrete version with more hollows, however, no systematic connection/influence of the varied conditioning parameters could be found. The ageing found based on the binder examinations that leads to reduction of the relaxation capacity at increasing ageing and brittleness, and that suggests a steeper increase of

the cooling curves is so strongly masked by the phenomenon of the structure disturbance, that contrary (flatter) curves tend to be found with increasing ageing.

The findings gained in the scope of the research project using the PAV-A-procedure for conditioning/ ageing of asphalt samples show that the conditioning parameters required for (long-term) ageing (of the binder) coincide with structural changes/destruction. The structural changes/destruction of the asphalt samples leads to performance indices being untypical, as reflected in the example of the cooling curves, which may lead to misinterpretation. Further adjustment of the PAV-A-procedure or the conditioning parameters to achieve accelerated ageing under pressure therefore is not considered suitable.

Inhalt

1	Einführung	13	3.3.3 Bindemittleigenschaften Gasperlen-Asphalt.	39
1.1	Ziel des Forschungsvorhabens	13	3.3.4 Zwischenfazit Projektphase 3.	41
1.2	Alterung von Asphalt	13	3.4 Projektphase 4: Ermittlung geeigneter Konditionierung mit geringem Druck – Variation: Konditionierungsdauer	41
1.3	Stand der Wissenschaft und Technik	13	3.4.1 Untersuchte Varianten	41
2	Untersuchungsmethodik	15	3.4.2 Bindemittleigenschaften	42
2.1	Projektphasen	15	3.4.3 Zwischenfazit Projektphase 4.	45
2.2	Verwendete Materialien	15	3.5 Projektphase 5: Ermittlung geeig- neter Konditionierung mit hohem Druck – Variation: Konditionierungs- dauer sowie Art/Geschwindigkeit des Druckablassens	46
2.2.1	Gesteinskörnung	15	3.5.1 Untersuchte Varianten	46
2.2.2	Bindemittel	16	3.5.2 Asphalteigenschaften	46
2.2.3	Asphalte	19	3.5.3 Bindemittleigenschaften	51
2.3	Prüfverfahren	19	3.5.4 Zwischenfazit Projektphase 5.	62
2.3.1	Asphalt	19	4 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse aus den fünf Projektphasen	65
2.3.2	Bindemittel	20	5 Handlungsempfehlung	68
3	Untersuchungsergebnisse	21	Regelwerke	68
3.1	Projektphase 1: Entwicklung eines Konditionierungsverfahrens zur Alterung von Asphaltprobekörpern.	21	Literatur	69
3.1.1	Konditionierungsverfahren	22	Bilder	69
3.1.2	Untersuchte Varianten	24	Tabellen	72
3.1.3	Untersuchungen am Asphalt	25		
3.1.4	Zwischenfazit Projektphase 1.	27		
3.2	Projektphase 2: Ermittlung möglicher Unterschiede im Alterungsverhalten von Asphalten mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt	28		
3.2.1	Untersuchte Varianten	28		
3.2.2	Performance-Eigenschaften	28		
3.2.3	Bindemittleigenschaften	31		
3.2.4	Zwischenfazit Projektphase 2.	37		
3.3	Projektphase 3: Untersuchungen am praktisch hohlraumfreien Asphalt (Gasperlen-Asphalt)	37		
3.3.1	Untersuchte Varianten	37		
3.3.2	Eigenschaften Gasperlenasphalt.	38		

1 Einführung

1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Auf Grundlage bereits existierender Erkenntnisse ist im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Verfahren zu entwickeln und/oder zu optimieren, mit dem im Laboratorium Asphaltprobekörper praxisadäquat gealtert werden können. Es sind Asphaltprobekörper zu wählen, die zur prüftechnischen Ansprache der Performanceeigenschaften von Asphalt, dem Verformungs-, Kälte- und Ermüdungsverhalten, geeignet sind. Bei dem zu entwickelnden Alterungsverfahren sind die Versuchsbedingungen/-parameter so zu wählen, dass mögliche Einflüsse auf die Performance des Asphaltes durch Alterung mit den gängigen Performance-Prüfungen erkannt bzw. angesprochen werden können. Die so gewonnenen Erkenntnisse können eine mögliche Grundlage darstellen, um in einem weiteren Schritt mögliche Rückschlüsse auf die Dauerhaftigkeit abzuleiten.

Während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens stellte sich heraus, dass das formulierte Ziel des Forschungsvorhabens aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse geändert werden musste und schwerpunktmäßig die Entwicklung und Optimierung eines Alterungsverfahrens Gegenstand des Forschungsvorhabens war.

1.2 Alterung von Asphalt

Für die Alterung von Asphalt und damit einhergehenden Veränderungen im Gebrauchsverhalten ist maßgeblich das enthaltene und gealterte Bindemittel verantwortlich. Durch die Alterung wird Bitumen härter und spröder.

Bei der Alterung von Bindemittel wird unterschieden in destillative Alterung, oxidative Alterung sowie Strukturalterung. Destillative Alterung tritt praktisch nur bei hohen Temperaturen bei der Asphaltherstellung und -verarbeitung auf, wobei niederviskose Ölanteile aus dem Bitumen verdunsten. Durch Einwirkung von Luftsauerstoff, aber auch Radikalen oder Ozon, kommt es zur chemischen Reaktion, der Oxidation, mit Bitumen. Der Fortschritt der oxidativen Alterung ist u. a. abhängig von der Temperatur, der Licht-/Strahlungsintensität, den Luftzutrittsmöglichkeiten (Hohlräumen) sowie der spezifischen Oberfläche und Dicke des Bindemittelfilms. Zur Oxidation kommt es sowohl bei der Verarbeitung des Bindemittels/Asphaltes sowie im Gebrauch wäh-

rend der Nutzungsdauer der eingebauten Asphalt-schicht. Die Strukturalterung beschreibt die Veränderung/Vergrößerung der Kolloidstruktur des Bitumens, wofür wiederum ursächlich die Prozesse der destillativen und oxidativen Alterung sind [1].

Zur Bitumenalterung im Laboratorium gibt es Verfahren, mit denen eine Kurzzeitalterung sowie eine Langzeitalterung simuliert werden können. Im Rahmen von Prüfungen gemäß den TL Bitumen-StB 07/13 ist zur Simulation der Kurzzeitalterung das RTFOT-Verfahren gemäß DIN EN 12607-1 vorgesehen und zur Simulation einer Langzeitalterung eine zusätzliche Beanspruchung mit dem PAV-Verfahren gemäß DIN EN 14769 durchzuführen. Dabei wird mit dem RTFOT-Verfahren die Beanspruchung/Alterung während des Misch- und Einbauprozesses des Asphaltmischgutes nachgebildet – die sogenannte Kurzzeitalterung. Die Beanspruchung/Alterung des Bitumens im Gebrauch während der Nutzungsdauer wird im Labor mit dem PAV-Verfahren (Langzeitalterung) angesprochen.

Die Verhärtung und Versprödung des Bindemittels wirkt sich unmittelbar auf die Gebrauchseigenschaften des Asphaltes aus.

Bedingt durch eine vergleichsweise höhere Viskosität eines gealterten Bitumens im Asphalt, kann dieser beispielsweise bei tiefen Temperaturen weniger Zugspannungen aufnehmen bzw. durch Relaxation abbauen. Weiterhin nehmen bei tiefen sowie hohen Temperaturen die Bruchdehnungen deutlich ab. Bei tiefen Temperaturen macht sich das unmittelbar in einer schlechteren Kälteflexibilität bemerkbar. Andererseits ist gleichzeitig ein Asphalt mit einem gealterten, vergleichsweise viskoserem Bindemittel verformungsbeständiger. Ein gealtertes Bindemittel macht sich außerdem in einer höheren Steifigkeit des Asphaltes bemerkbar, die sich insbesondere bei tiefen Temperaturen in einem ungünstigeren Ermüdungsverhalten infolge Versprödung widerspiegelt.

Zur Ansprache der Alterung von Asphalt gibt es bisher kein Laborverfahren, mit dem in Analogie zur Langzeitalterung von Bitumen Alterungsprozesse praxisadäquat simuliert werden können.

1.3 Stand der Wissenschaft und Technik

In der DIN EN 12697-45 ist für Heißasphalt „die Alterungsprüfung an gesättigten Asphalt-Probekörper

(SATS-Prüfung)“ beschrieben. Die SATS-Prüfung (Saturation Ageing Tensile Stiffness) ist ein Prüfverfahren zur Bewertung der Dauerhaftigkeit des Verbundes in Asphalttrag- und Asphaltbinderemischgütern. Die SATS-Prüfung setzt sich zusammen aus einer Konditionierung von Probekörpern (Klimatisierungsverfahren) und einer sich anschließenden Vergleichsprüfung. Zunächst werden dafür zylindrische Probekörper in einem Vakuum mit Feuchtigkeit gesättigt. Im anschließenden Klimatisierungsverfahren werden fünf Probekörper in einem druckbeaufschlagten (2,1 MPa) und teilweise mit Wasser gefülltem Behälter für 65 Stunden bei einer Temperatur von 85 °C gelagert. Zur Abschätzung der Empfindlichkeit des Asphaltes in Bezug auf Alterung und Feuchtigkeit wird das Steifigkeitsverhältnis (SATS-Dauerhaftigkeitsindex) durch Bestimmung der mittleren Steifigkeit (IT-CY-Steifigkeitsmodul bei 20 °C) im nicht klimatisierten und klimatisierten Zustand (der vier über dem Wasser gelagerten Probekörper) gebildet. Weiterhin wird nach der DIN EN 12697-45 die Sättigung der Probekörper vor und nach der Klimatisierung bestimmt.

Die SATS-Prüfung wurde für vergleichsweise hohlraumreiche (6 bis 10 Vol.-%) Asphaltmischgutarten mit vergleichsweise geringen Bindemittelgehalten (3,5 bis 5,5 M.-%) und einer harten Bindemittelsorte (10/20pen) entwickelt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FE 07.0229/2008/ERB „Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt“ [2] wurde die SATS-Prüfung insbesondere im Hinblick auf die Eignung hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse für in Deutschland übliche Asphalte angewendet und beurteilt. Dafür wurden bei der Bearbeitung des genannten Forschungsvorhabens Asphalttrag- und Asphaltbinderemischgüter mit Straßenbaubitumen sowie polymermodifizierten Bindemitteln, mit unterschiedlichen Gesteinsarten sowie einer Variation des Hohlraumgehaltes und Variation des Bindemittelgehaltes hergestellt und untersucht. Für die SATS-Prüfung wurden zusätzlich zum dynamischen Spaltzugversuch noch direkte Zugversuche in Anlehnung an die DIN EN 12697-46 durchgeführt.

Als Grundlage für das vorliegende Forschungsvorhaben sind die folgenden genannten Erkenntnisse aus dem FE 07.0229/2008/ERB von Interesse.

Aus den Ergebnissen des genannten Forschungsvorhabens geht hervor, dass die Konditionierungsbedingungen beim Klimatisierungsvorgang im

Druckalterungsbehälter der SATS-Prüfung nach DIN EN 12697-45 eine starke Wirkung haben, was anhand von deutlich höheren Steifigkeiten nach der Klimatisierung erkannt wird. Nach dem Klimatisierungsvorgang gleichen sich die Steifigkeiten der untersuchten Asphaltvarianten allerdings soweit an, dass praktisch keine Differenzierung zwischen den Varianten zu erkennen ist. Vor der Klimatisierung war anhand der ermittelten Steifigkeitswerte noch eine plausible Reihenfolge bezüglich der Bitumenart und -sorte sowie des Hohlraumgehaltes zu erkennen.

Anhand der Ergebnisse von im Rahmen des FE 07.0229/2008/ERB an ausgewählten Varianten in Anlehnung an die DIN EN 12697-46 durchgeführten direkten Zugversuche bei 20, 5 und 0 °C sind Tendenzen zu erkennen die darauf hinweisen, dass eine deutlichere Differenzierung der Ergebnisse im Vergleich zu den mittels dynamischem Spaltzugversuch bestimmten Steifigkeiten möglich ist.

Das für Bitumen in der DIN EN 14769 aufgenommene PAV-Verfahren zur Simulation der beschleunigten Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter entspricht in Grundzügen dem Klimatisierungsverfahren der SATS-Prüfung. Beim PAV-Verfahren für Bitumen wird analog eine Probe bei erhöhten Temperaturen (i. d. R. zwischen 90 und 110 °C für 20 h oder alternativ bei 85 °C für 65 h) und mit einem Überdruck von 2,1 MPa beansprucht.

Neben dem in der Europäischen Normung aufgenommenen Konditionierungsverfahren (als Bestandteil der SATS-Prüfung), das in Großbritannien zur Simulation der Alterung von Asphalt entwickelt worden ist, wurden in den letzten Jahren weitere Verfahren zur Alterung von Asphalt in Deutschland entwickelt und erprobt.

Dabei ist bei der Alterung von Asphalt im Laboratorium allgemein zu unterscheiden zwischen der Alterung von losem Asphaltmischgut bzw. Gemischen aus Gesteinskörnung und Bitumen sowie der Alterung von Asphaltprobekörpern oder -platten. Im Folgenden werden beispielhaft ausgewählte Asphalt-Alterungsverfahren mit unterschiedlichen Vorgehensweisen genannt.

Beispiele für Alterungsverfahren von Asphaltmischgut bzw. Gemischen aus Gesteinskörnung und Bitumen:

- Der Modelltopf nach POTSCHKA (1987) ist ein elektrisch beheiztes und von außen wärmeisoliertes Gefäß, in dem lose mit Bitumen um-

hüllte Splitte gelagert und gealtert werden. Dabei wird die Probe eine Stunde bei einer Temperatur von 140 °C mit synthetischer Luft (20 % Sauerstoff und 80 % Stickstoff) umströmt [5].

- Bei dem Braunschweiger Alterungsverfahren (BSA) (2010) wird granuliertes Asphaltmischgut auf einem Drahtblech/-gitter ausgebreitet und in einem Trockenschrank bei einer Temperatur von 80 °C für 96 Stunden gelagert. Während der Konditionierung wird die Probe stets von Luft umflossen [3].

Beispiele für Alterungsverfahren von Asphaltprobekörpern/-platten:

- Auf dem Warmboldscher Alterungstisch (1996) werden Asphaltprobekörper einer Beanspruchung aus Temperatur (40 °C) und UV-Strahlung ausgesetzt. Von der Unterseite des Tisches wird durch Löcher den Probekörpern 40 °C warme Luft zugeführt, die bedingt durch eine seitliche Abdichtung des Systems, die Probekörper zwangsdurchströmt. Der Druck an der Unterseite der Probekörper beträgt dabei 0,02 bar [6].
- Bei dem Bochumer Alterungsverfahren (BAV) (2011) werden hohlraumreiche Asphaltplatten in einen Aluminiumbehälter eingebaut und die Seitenwandungen (luftdicht) abgedichtet. In den Behälter mit der Asphaltplatte wird von oben eine definierte Menge von 7,5 l/min Druckluft bei 100 °C eingeleitet. Die erhitzte Druckluft wird durch die Asphaltplatte geführt und kann an der Unterseite des Aluminiumbehälters durch ein Lochblech entweichen. In einem Forschungsvorhaben wurden Beanspruchungsdauern von 72 und 120 Stunden gewählt [7].

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Wien (2006) [8] wurden Probekörper im Druckalterungsbehälter (PAV) bei einem Druck von 2,07 MPa und einer Temperatur von 100 °C zwei bzw. sieben Tage gelagert. Bedingt durch eine durch die Konditionierung hervorgerufene Gefügestörung musste bei diesem Verfahren für anschließende Untersuchungen das Asphaltmischgut erneut verdichtet werden.

In Frankreich wurde zur Konditionierung von Asphaltprobekörpern für Griffigkeitsuntersuchungen ein Prüfgerät (Alterungsmaschine) erprobt, mit dem zwecks beschleunigter Bindemittelalterung eine natürliche Klimabeanspruchung zeitraffend simuliert werden soll. [4] Mit diesem Prüfgerät erfolgt eine Konditionierung durch Wärme, Bestrahlung und Feuchtigkeit. Prüfgeräte dieser Bauart sind in der

Kunststoff- oder Beschichtungsindustrie zur Ansprache und Prüfung der Bewitterungsbeständigkeit gängig und in normierten Verfahren geregelt. Die Beurteilung erfolgt dabei in der Regel anhand visueller Kriterien.

Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es, ein Asphalt-Alterungsverfahren zu entwickeln bzw. zu optimieren, mit dem die Langzeit-Alterung an Probekörpern simuliert werden kann, wobei diese (gealterten) Probekörper zur Ansprache der Performanceeigenschaften mit den gängigen Prüfungen aus den Technischen Regelwerken geeignet sind.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Projektphasen

Die einzelnen Projektphasen des Forschungsvorhabens wurden in enger Abstimmung und einvernehmlich mit dem Betreuungsausschuss ergebnisabhängig festgelegt. Das Forschungsvorhaben ist unterteilt in fünf Projektphasen, die aufeinander aufbauen:

- Projektphase 1:
Entwicklung eines Konditionierungsverfahrens zur Alterung von Asphaltprobekörpern.
- Projektphase 2:
Ermittlung möglicher Unterschiede im Alterungsverhalten von Asphalten mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt.
- Projektphasen 3:
Untersuchungen am praktisch hohlraumfreien Asphalt (Glasperlen-Asphalt).
- Projektphase 4:
Ermittlung geeigneter Konditionierung mit geringem Druck – Variation: Konditionierungsdauer.
- Projektphase 5:
Ermittlung geeigneter Konditionierung mit hohem Druck – Variation Konditionierungsdauer sowie Art/Geschwindigkeit des Druckablasses.

2.2 Verwendete Materialien

2.2.1 Gesteinskörnung

Zur Herstellung der Asphalte wurde als Gesteinsart Basalt sowie Kalksteinfüller verwendet. Die Ge-



Bild 1: Basanit/Basaltlava (links) und Basalt (rechts) der Korngruppe 8/11 (ungewaschen)

Bindemittelsorte: 50/70	Penetration [0,1 mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
Original	53	50,6
nach RTFOT-Alterung	32	59,0
nach RTFOT- + PAV-Alterung	17	72,6

Tab. 1: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – Straßenbaubitumen 50/70 (1. Probe)

steinsart Basalt wurde aufgrund seiner eher haftungskritischen Eigenschaften gewählt.

Bei der Projektphase 1 wurde noch neben dem Basalt ein poröses Gestein, ein Basanit/Basaltlava, eingesetzt (siehe Bild 1).

2.2.2 Bindemittel

Für die hier durchgeführten Versuche wurden Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 und ein polymermodifiziertes Bindemittel der Sorte 40/100-65 A eingesetzt.

Aufgrund der erst im Laufe des Forschungsvorhabens festgelegten abweichenden Vorgehensweise zum Angebot, musste in der letzten, fünften Projektphase eine zweite Probe des Straßenbaubitumens eingesetzt werden.

Die konventionellen Bindemittelkenndaten für das Straßenbaubitumen 50/70 im Lieferzustand (Original), nach RTFOT- sowie nach RTFOT- + PAV-Alterung können Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 entnommen werden. Die Bindemittelkennwerte für die erste und zweite Probe des Straßenbaubitumens 50/70 sind in Bild 2 (Erweichungspunkt Ring und Kugel) und Bild 3 (Nadelpenetration) sowie Bild 4 (verbleibende Penetration) gegenübergestellt.

Bindemittelsorte: 50/70	Penetration [0,1 mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
Original	60	52,0
nach RTFOT-Alterung	38	58,2
nach RTFOT- + PAV-Alterung	31	69,2

Tab. 2: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – Straßenbaubitumen 50/70 (2. Probe)

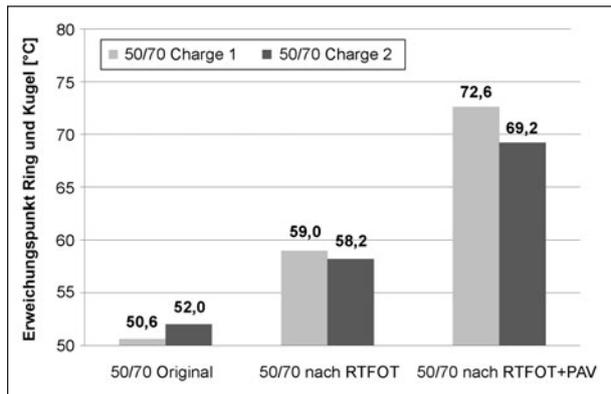


Bild 2: Erweichungspunkt Ring und Kugel – Straßenbaubitumen 50/70 (1. und 2. Probe)

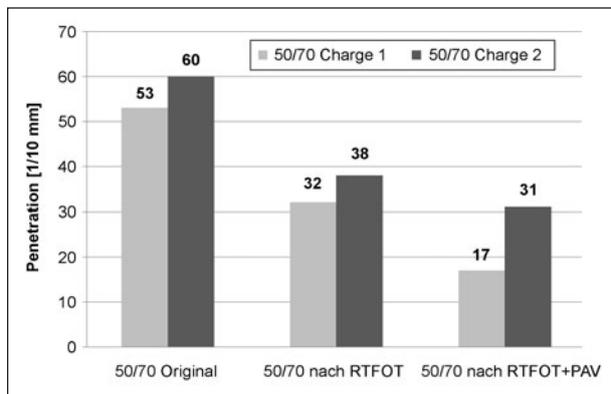


Bild 3: Nadelpenetration – Straßenbaubitumen 50/70 (1. und 2. Probe)

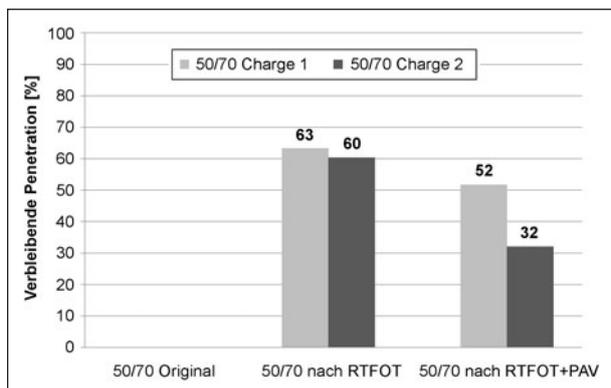


Bild 4: Verbleibende Penetration – Straßenbaubitumen 50/70 (1. und 2. Probe)

Aus Tabelle 3 und Tabelle 4 sowie Bild 5 bzw. Tabelle 5 und Tabelle 6 sowie Bild 6 können für das Straßenbaubitumen 50/70 für die drei untersuchten Al-

terungsstufen der im DSR-Versuch (T-Sweep) ermittelte komplexe Schermodul und Phasenwinkel entnommen werden.

Bindemittelsorte: 50/70	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	540.004	103.796	20.730	5.170	1.451	467	176
nach RTFOT-Alterung	1.090.739	225.320	48.352	12.265	3.456	1.055	358
nach RTFOT- + PAV-Alterung	3.379.205	840.540	210.397	58.010	17.163	5.209	1.629

Tab. 3: Komplexer Schermodul DSR – Straßenbaubitumen 50/70 (1. Probe)

Bindemittelsorte: 50/70	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	65,6	72,2	77,8	82,0	85,0	87,0	88,1
nach RTFOT-Alterung	58,0	65,1	71,1	76,4	80,8	84,2	86,7
nach RTFOT- + PAV-Alterung	44,8	52,9	59,0	64,6	70,2	75,7	80,4

Tab. 4: Phasenwinkel DSR – Straßenbaubitumen 50/70 (1. Probe)

Bindemittelsorte: 50/70	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	395.029	78.487	16.474	3.890	1.093	362	138
nach RTFOT-Alterung	762.853	161.490	35.040	8.411	2.332	729	258
nach RTFOT- + PAV-Alterung	2.584.465	619.416	149.515	38.253	10.777	3.199	1.010

Tab. 5: Komplexer Schermodul DSR – Straßenbaubitumen 50/70 (2. Probe)

Bindemittelsorte: 50/70	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	67,2	73,2	78,3	82,7	85,9	88,2	89,8
nach RTFOT-Alterung	60,4	66,9	72,6	77,9	82,3	85,6	88,1
nach RTFOT- + PAV-Alterung	47,6	55,5	61,6	67,3	72,9	78,0	82,0

Tab. 6: Phasenwinkel DSR – Straßenbaubitumen 50/70 (2. Probe)

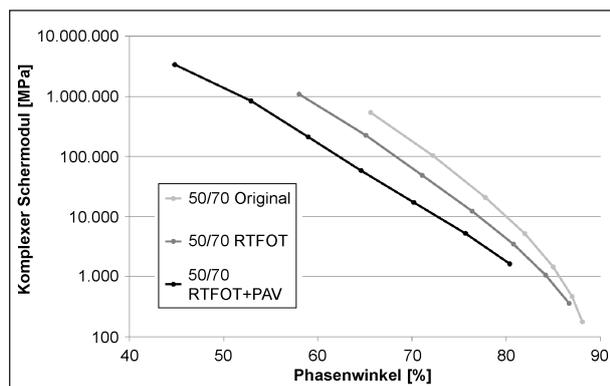


Bild 5: BLACK-Diagramm – Straßenbaubitumen 50/70 (1. Probe)

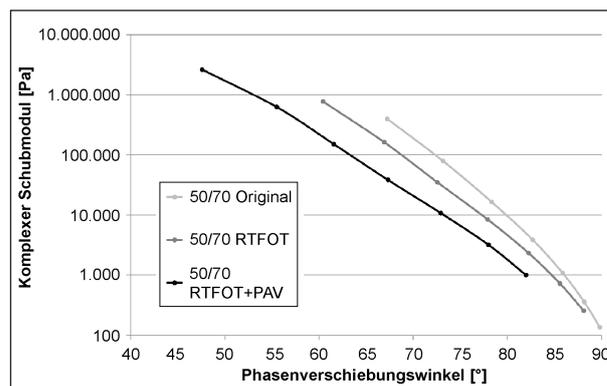


Bild 6: BLACK-Diagramm – Straßenbaubitumen 50/70 (2. Probe)

Für die Herstellung des in der Projektphase 2 ergänzend untersuchten offenporigen Asphaltens wurde ein polymermodifiziertes Bindemittel der Sorte 40/100-65 A eingesetzt. Die konventionellen Bindemittelkennwerte im Lieferzustand (Original), nach RTFOT- sowie nach RTFOT- + PAV-Alterung für das polymermodifizierte Bindemittel 40/100-65 können Tabelle 7 sowie Bild 7 (Erweichungspunkt Ring und Kugel) Bild 8 (Nadelpenetration) sowie

Bild 9 (verbleibende Penetration) entnommen werden.

Für das polymermodifizierte Bindemittel 40/100-65 A sind in Tabelle 8 und Tabelle 9 sowie Bild 10 für die drei untersuchten Alterungsstufen der im DSR-

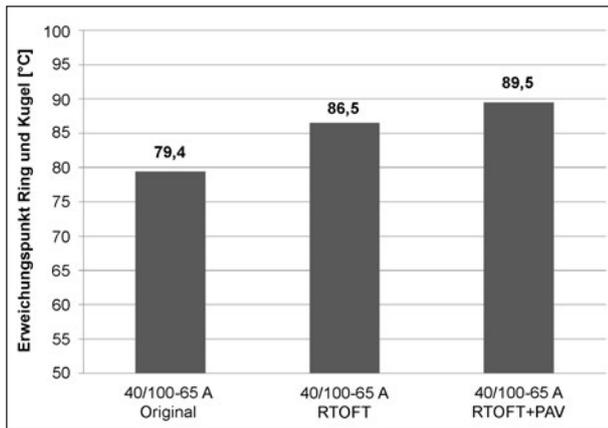


Bild 7: Erweichungspunkt Ring und Kugel – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

Bindemittelsorte: 40/100-65 A	Penetration [0,1 mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
Original	56	79,4
nach RTFOT- Alterung	45	86,5
nach RTFOT- + PAV-Alterung	28	89,5

Tab. 7: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

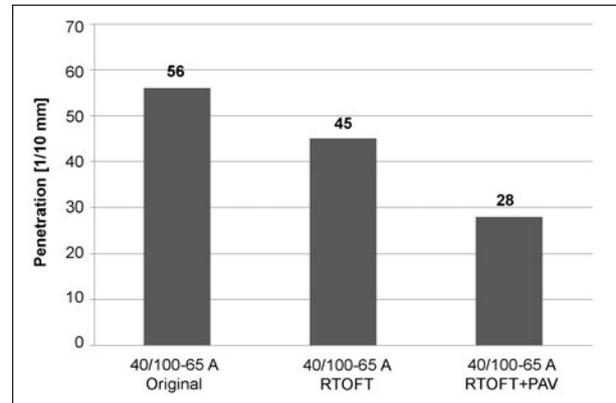


Bild 8: Nadelpenetration – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

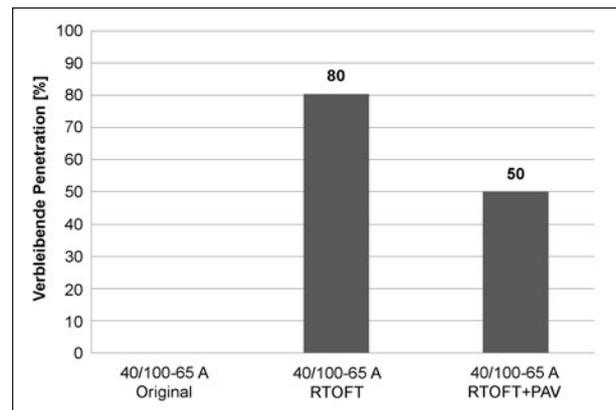


Bild 9: Verbleibende Penetration – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

Bindemittelsorte: 40/100-65 A	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	224.958	58.778	19.202	7.913	3.777	1.916	970
nach RTFOT-Alterung	316.912	82.136	26.852	11.227	5.467	2.812	1.455
nach RTFOT- + PAV-Alterung	879.910	228.054	74.270	30.690	14.706	7.719	4.178

Tab. 8: Komplexer Schermodul DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

Bindemittelsorte: 40/100-65 A	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	60,9	58,8	56,5	55,2	55,0	55,9	59,2
nach RTFOT-Alterung	58,8	56,9	54,0	52,1	51,4	52,1	55,0
nach RTFOT- + PAV-Alterung	52,3	52,6	49,9	47,1	45,4	45,2	46,7

Tab. 9: Phasenwinkel DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

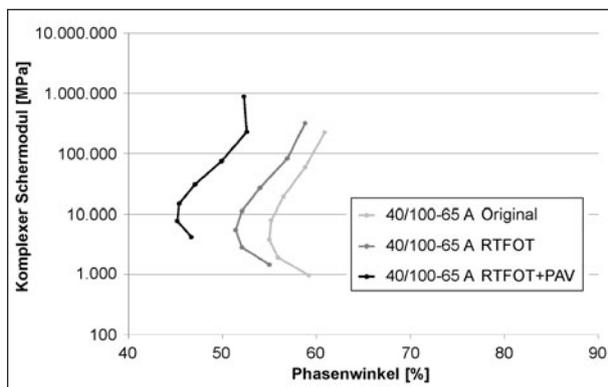


Bild 10: BLACK-Diagramm – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

Versuch (T-Sweep) ermittelte komplexe Schermodul und Phasenwinkel zu entnehmen.

2.2.3 Asphalte

Mit den in Kapitel 2.2.1 (Gesteine) und Kapitel 2.2.2 (Bindemittel) genannten Ausgangsstoffen wurden Asphalte konzipiert.

Die in den einzelnen Projektphasen durchgeführten Untersuchungen wurden überwiegend an einem Asphaltbeton AC 8 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 und mit der Gesteinsart Basalt durchgeführt.

Der Asphaltbeton wurde zunächst so konzipiert, dass bei Variation der Gesteinsart (Basalt und Basanit), der Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper ähnlich ist, um vergleichbare Konditionen für die Alterungsversuche zu schaffen. Insgesamt wurde dieser Asphaltbeton sehr dicht konzipiert.

Für die Projektphase 5 wurde abweichend ein deutlich hohlraumreicher Asphaltbeton AC 8 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 und mit der Gesteinsart Basalt eingesetzt, wofür die Rezeptur verändert wurde (u. a. Reduzierung des Bindemittelgehalts) und weiterhin bei der Herstellung von Probeplatten bewusst ein schlechter Verdichtungsgrad von 95 % angestrebt wurde.

Weiterhin wurde in der Projektphase 2 ein offener Asphalt PA 8 mit polymermodifiziertem Bindemittel 40/100-65 A berücksichtigt.

2.3 Prüfverfahren

Untersuchungen zur Ansprache möglicher Unterschiede im Alterungsverhalten vom Asphalt werden an Asphaltprobekörpern sowie Bindemittelproben



Bild 11: Prüfvorrichtung mit eingebauten Probekörpern für Zug- bzw. Abkühlversuche

durchgeführt. In den folgenden Kapiteln sind die angewandten Asphalt- und Bindemittelprüfverfahren beschrieben.

2.3.1 Asphalt

Neben konditionierten Proben wurden Referenzvarianten (Nullvarianten) geprüft.

Einaxiale Zug- und Abkühlversuche

Mit einaxialen Zugversuchen und Abkühlversuchen kann das Kälteverhalten von Asphalten angesprochen werden. Die Prüfverfahren (einaxialer Zug- und Abkühlversuch, siehe Bild 11) sind in den Technischen Prüfvorschriften (TP Asphalt-StB, Teil 46 A) beschrieben.

Für die beiden Versuchstypen werden prismatische Probekörper, die aus walzsektor-verdichteten Platten herausgesägt werden, benötigt.

Beim Zugversuch wird der Probekörper mit einer konstanten Verformungsgeschwindigkeit von 1 mm/min gezogen, bis dieser reißt. Erfasst werden zum Zeitpunkt des Probekörperversagens die Zugfestigkeit β_t und die Bruchdehnung ϵ_{Br} .

Zugversuche werden bei konstanten Prüftemperaturen von 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C durchgeführt.

Für den Abkühlversuch wird die Länge des Probekörpers konstant gehalten. Beginnend bei einer Starttemperatur von 20 °C wird diese mit konstanter Temperaturrate von -10 K/h abgesenkt. Der auf konstanter Länge gehaltene Probekörper kann sich nicht zusammenziehen, sodass sich im Probekör-

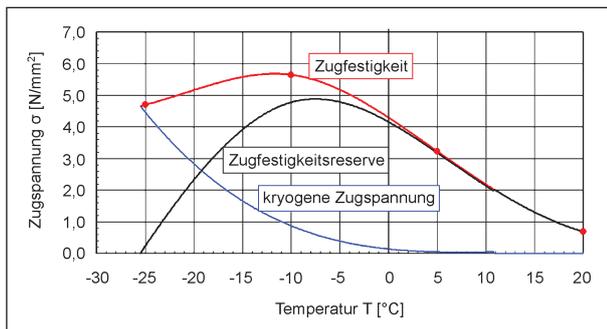


Bild 12: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse von Zug- und Abkühlversuchen

per kryogene Zugspannungen aufbauen, bis der Probekörper reißt. Neben den während des Versuchs kontinuierlich erfassten kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur werden die Bruchtemperatur T_{Br} sowie die Bruchspannung σ_{Br} zum Zeitpunkt des Probekörperversagens (Spannungsabfall) erfasst.

Aus den Ergebnissen von Zug- und Abkühlversuchen kann rechnerisch die Zugfestigkeitsreserve bestimmt werden. Die Zugfestigkeitsreserve ist die Differenz zwischen der Zugfestigkeit und der kryogenen Zugspannung. Sie ist ein Maß dafür, welche Spannung der Asphalt durch mechanogene Beanspruchung neben den thermisch induzierten, kryogenen Zugspannungen noch aufnehmen kann.

Eine Darstellung der Ergebnisse aus Zug- (rote Kurve) und Abkühlversuchen (blaue Kurve) ist in Bild 12 wiedergegeben. Die schwarze Kurve ist die rechnerisch ermittelte Zugfestigkeitsreserve in Abhängigkeit von der Temperatur.

2.3.2 Bindemittel

Neben konventionellen Bindemittelprüfungen wurden Prüfverfahren zur Ansprache der Bindemittel-Performance angewandt.

Bindemittelkennwerte wurden an rückgewonnenen, extrahierten Bindemittelproben aus Asphalten sowie an Referenzvarianten, Bindemittel im Lieferzustand, nach Kurzzeit-Alterung sowie nach Langzeit-Alterung, ermittelt.

Konventionelle Prüfverfahren

Als konventionelle Bindemittelkennwerte wurden der Erweichungspunkt Ring und Kugel nach DIN EN 1427 sowie die Nadelpenetration nach DIN EN 1426 bestimmt.

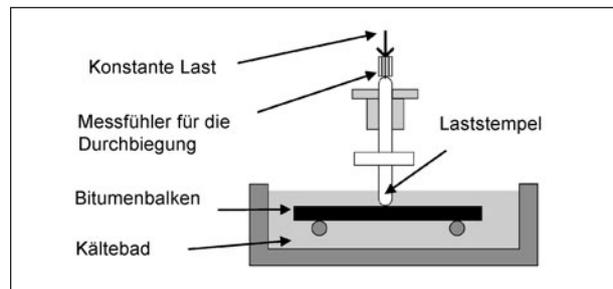


Bild 13: Prinzip Bending-Beam-Rheometer

Bending-Beam-Rheometer (BBR)

Um das Tieftemperaturverhalten bitumenhaltiger Bindemittel zu untersuchen werden Versuche mit dem Bending-Beam-Rheometer nach DIN EN 14771 durchgeführt.

Ein an beiden Enden aufgelagerter Bitumenbalken wird bei einer Prüftemperatur im Temperaturbereich von 0 °C bis -40 °C mittig von einer konstanten Einzellast von 930 mN bis 1.030 mN für 240 s belastet (siehe Bild 13).

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

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

$$S(t) = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot \delta(t) \cdot b \cdot h^3} \text{ [MPa]} \quad (\text{Gl. 1})$$

P Auflast [N]

l Abstand zw. den Auflagern [mm]

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

b Balkenbreite [mm]

h Balkenhöhe [mm]

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

Die Biegekrechstetigkeit und der m -Wert sind für die Belastungszeiten 8 s, 15 s, 30 s, 60 s, 120 s und 240 s als arithmetischer Mittelwert aus mindestens zwei Werten anzugeben. Wenn ein Einzelergebnis

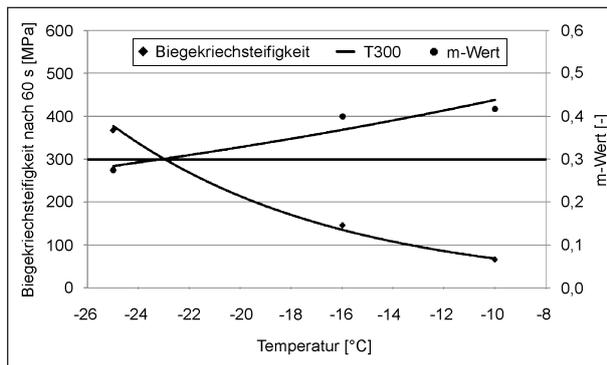


Bild 14: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung von $T_{y=300}$ und $T_{m\text{-Wert}=0,3}$

der Biegekriechsteifigkeit anzugeben ist, so ist der Wert der Belastungsdauer von 60 s zu verwenden.

Die Einzelwerte der Biegekriechsteifigkeit und des m-Wertes bei 60 s wurden innerhalb dieses Forschungsvorhabens für alle drei Prüftemperaturen in einem Diagramm aufgetragen. Dabei wurden die Mittelwerte der Biegekriechsteifigkeit S auf der Primär- und die Mittelwerte der m-Werte auf der Sekundärachse aufgezeichnet (siehe Bild 14).

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

Dynamisches Scherrheometer (DSR)

Mithilfe des dynamischen Scherversuchs wird das viskoelastische Verhalten von Bitumen nach DIN EN 14770 sowie der Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung Temperatursweep (AL DSR-Prüfung (T-Sweep)) geprüft. Eine Bindemittelprobe wird zwischen zwei parallelen Metallplatten eingebaut und einer schwingenden (oszillierenden) Scherbeanspruchung ausgesetzt.

Die Oszillation der oberen Platte bewirkt eine Deformation des Prüfgutes, wobei zwei Arten der Messungen unterschieden werden:

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

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden weggeregelte Versuche durchgeführt. Die Untersuchungen wurden als Temperatursweep bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz und bei den Temperaturen von 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 80 °C und 90 °C durchgeführt.

Als Messsystem wurde ein Platte/Platte-System mit Plattendurchmesser von 25 mm und einem Messspalt von 1 mm verwendet.

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

$$G^* = \frac{\tau_{\max}}{d_{\max}} \quad [\text{Pa}] \quad (\text{Gl. 2})$$

mit

τ_{\max} maximale Scherspannung

d_{\max} maximale Verformung

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

$$\delta = \omega(\Delta t) \quad [^\circ] \quad (\text{Gl. 3})$$

mit

ω Winkelgeschwindigkeit

Δt Zeitintervall

ermittelt werden.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Projektphase 1: Entwicklung eines Konditionierungsverfahrens zur Alterung von Asphaltprobekörpern

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden im Rahmen der ersten Projektphase zunächst zwei unterschiedliche Konditionierungsverfahren für die Alterung von Asphaltprobekörpern vergleichend angewendet. Einerseits wurden die Asphaltprobekörper mit einem Bewitterungssystem konditioniert, welches als gängiges Verfahren beispielsweise in der Kunststoffindustrie zur künstlichen Bewitterung eingesetzt wird (BSS-Verfahren). Des Weiteren wurde ein optimiertes Verfahren in Anlehnung an beste-

hende Prüfverfahren (SATS-Prüfung, PAV-Verfahren) entwickelt (PAV-A-Verfahren) und zur Konditionierung von Asphaltprobekörpern angewendet.

Nach Ermittlung der Performanceeigenschaften (Zug- und Abkühlversuche am Asphalt, DSR- sowie BBR-Versuche am rückgewonnenen Bindemittel) im Rahmen dieser Projektphase wurden anhand der ermittelten Kennwerte die beiden Konditionierungsverfahren (BSS- und PAV-A-Verfahren) gegenübergestellt und bewertet sowie die entsprechend gewählten Prüfbedingungen validiert bzw. angepasst.

3.1.1 Konditionierungsverfahren

Im Folgenden werden die beiden Konditionierungsverfahren näher erläutert.

Bewitterungsschranksystem (BSS)

Das hier mit modifizierten Parametern angewandte Verfahren wird in der Kunststoffindustrie zur Simulation einer zeitraffenden künstlichen Bewitterung eingesetzt, um so die Wirkung insbesondere von Sonnenstrahlung, Wärme und Feuchtigkeit auf Kunststoffen/Beschichtungen zu simulieren.

Das hier beschriebene und zur Alterung von Asphaltprobekörpern angewandte Verfahren wird im Weiteren als Bewitterungsschranksystem (BSS)-Verfahren bezeichnet.

Die Versuchsdurchführung (Bewitterung der Proben) erfolgte in Kooperation mit der Firma Kiwa Product Cert GmbH.

Die Bewitterung der Asphaltprobekörper wurde in Anlehnung an die DIN EN ISO 4892-2, nach der Kunststoffe durch künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten mit Xenonbogenlampen beansprucht werden, sowie in Anlehnung an die DIN EN 513, nach der die Wet-terechtheit und Wetterbeständigkeit durch künstliche Bewitterung von Fenster- und Türprofilen aus PVC-U geprüft wird, durchgeführt.

Auf Bild 15 ist schematisch das Bewitterungsgerät dargestellt. Die für die Bewitterung maßgebenden Bauteile/Parameter sind auf der schematischen Abbildung zu erkennen.

Das verwendete Bewitterungsgerät entspricht den Anforderungen der DIN EN ISO 4892-1 und 4892-2.

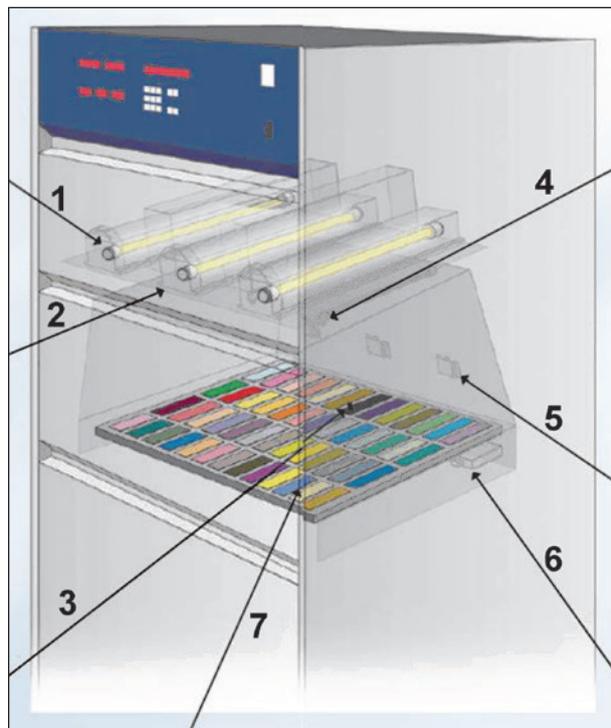


Bild 15: Schematische Darstellung Bewitterungsgerät [Q-Sun]

Relevante Bauteile für die Bewitterung sind demnach u. a. (vgl. Bild 15) die

- Xenonbogenlampen (1) als Strahlungsquelle mit optischen Filtern (2) und Strahlungsregler (5),
- Beregnungsdüsen (4),
- Regeleinheit für die Luftfeuchtigkeit (6),
- Regeleinheit für die Lufttemperatur (3) (Schwarz- und Weißstandardthermometer) sowie der
- Probenträger (7).

In Anlehnung an die DIN EN ISO 4892-2 (Verfahren A, Zyklus 1) und die DIN EN 513 (Verfahren 1) wurden Prüfbedingungen festgelegt, um Bewitterungseffekte nachzubilden, die praktisch einer gemäßigten Klimazone (gilt für die Region Deutschland) entsprechen bzw. diese simulieren. Dabei werden Bewitterungseffekte (Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Benässung) in der Umgebung der Globalstrahlung simuliert.

Der Tabelle 10 können Prüfbedingungen aus der DIN EN ISO 4892-2 (Verfahren A, Zyklus 1) sowie DIN EN 513 (Verfahren 1) entnommen werden. Auf diesen Regelwerken basierend wurden die Prüfbedingungen für das BSS-Verfahren abgeleitet.

Aus der Tabelle 10 kann entnommen werden, dass insbesondere bei der für das BSS-Verfahren ge-

wählten Temperatur von den Prüfbedingungen der einschlägigen Regelwerke abgewichen wurde. Anhand von Vorversuchen mit einem Asphaltprobekörper, bei denen die Temperatur in der Prüfkammer (Beanspruchungsperiode trocken) variiert und die Schwarzstandard-Temperatur sowie die Temperatur der Probenoberfläche dokumentiert wurde, ist unter Berücksichtigung, dass die Asphaltprobekörper keine deutliche Änderung der Geometrie/Form erfahren sollten, als Prüfbedingung eine Schwarzstandard-Temperatur BST von 48 °C gewählt worden, was einer Oberflächentemperatur des Asphaltprobekörpers von etwa 41 bis 44 °C entspricht.

Mit dem Ziel für die Alterung von Asphaltprobekörpern noch laborökonomische Prüfbedingungen zu schaffen, wurde eine Konditionierungszeit von vier Wochen gewählt. Während der Versuchsdauer (Konditionierung) wurden die Asphaltprobekörper entsprechend dem definierten Beanspruchungszyklus praktisch kontinuierlich beansprucht/konditioniert.

Der Probenträger des Bewitterungsgerätes hat Abmessungen von etwa 2 x 332 mm (Breite) x 450 mm (Tiefe), siehe auch Bild 16. Im Rahmen der ersten Projektphase wurden zwei Asphaltvarianten (Varianten siehe Kapitel 3.1.2) bewittert. Aufgrund der begrenzten Größe des Probenträgers wurden ausschließlich prismatische Probekörper für Abkühlversuche sowie einaxiale Zugversuche (siehe auch Kapitel 3.1.3) konditioniert.

Zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Konditionierung der Probekörper (Oberflächen) wurden die einzelnen Probekörper während der vierwöchigen Bewitterung dreimal um 90° um die Längsachse gedreht, sodass jede Oberfläche (mit Ausnahme der

Stirnflächen) jeweils eine Woche der Strahlungsquelle zugewandt ist. Des Weiteren wurde nach der Hälfte der Konditionierungszeit (zwei Wochen) die Lage/Position der Probekörper auf dem Probenträger gewechselt, indem die Probekörper (vgl. Bild 17) der Varianten A (Basalt) und B (Basanit/Basalt-

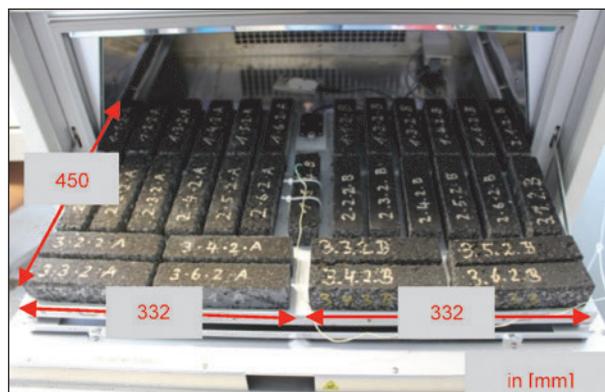


Bild 16: Probenträger mit prismatischen Asphaltprobekörpern [KIWA]

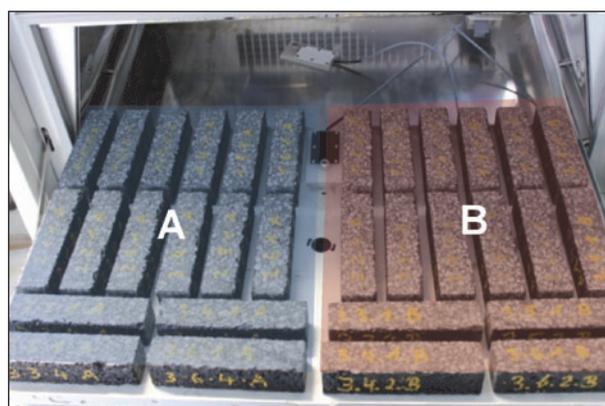


Bild 17: Probenträger mit prismatischen Asphaltprobekörpern Variante A und B [KIWA]

Verfahren	Beanspruchungsperiode	Bestrahlungsstärke Schmalband (340 nm) [W/(m ² ·nm)]	Schwarzstandard-Temperatur (BST) [°C]	Prüfkammertemperatur [°C]	Relative Luftfeuchtigkeit [%]
DIN EN ISO 4892-2 Verfahren A Zyklus 1	102 min trocken 18 min Sprühwasser ¹	0,51 ± 0,02 0,51 ± 0,02	65 ± 3 –	38 ± 3 –	65 ± 10* – * für feuchtigkeitsempfindliche Prüfmateriale
DIN EN 513 Verfahren 1	102 min trocken 18 min Sprühwasser	Bestrahlungsbedingungen nach Verfahren A in ISO 4892-2	65 ± 3 –	ist in Abhängigkeit von BST zu wählen	65 ± 10 –
BSS-Verfahren (gewählt)	102 min trocken/Licht 18 min Sprühwasser/dunkel	0,51 ± 0,02 –	48 48	32 32	65 –

¹ Entsprechend Kapitel 6.5 (Zyklen mit Dunkelphasen) der DIN EN ISO 4892-2 können Zyklen Dunkelphasen einschließen, bei denen hohe Luftfeuchtigkeiten und/oder Bildung von Kondensat auf der Probekörperoberfläche möglich ist.

Tab. 10: Prüfbedingungen gemäß DIN EN ISO 4892-2, DIN EN 513 und BSS-Verfahren

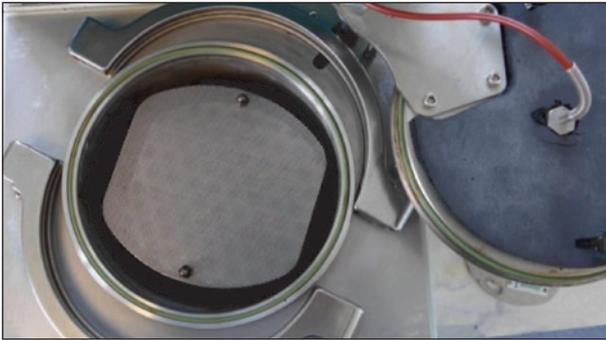


Bild 18: Druckalterungsbehälter mit Gestell für die Konditionierung von Asphalt-Probekörpern

lava) auf dem Probenträger einmalig vollständig gegeneinander getauscht wurden.

Konditionierungsverfahren PAV-A

Das Prinzip des im Rahmen dieses Forschungsvorhabens angewandten Konditionierungsverfahren PAV-A entspricht dem der beschleunigten Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV; pressure ageing vessel) wie in der DIN EN 14769 für Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel beschrieben. Mit entsprechend für die Ansprache von Asphalt (A) angepassten Randbedingungen wurden Asphaltprobekörper in dem Druckalterungsbehälter (PAV) konditioniert.

Auf Bild 18 ist der Druckalterungsbehälter (Draufsicht mit eingesetztem Gestell für Asphalt-Probekörper) abgebildet.

Für die Konditionierung werden die Asphalt-Probekörper auf einem Gestell gelagert, das in den Druckalterungsbehälter eingesetzt wird (siehe Bild 18). Bild 19 zeigt das Gestell mit Böden aus Lochblech, auf denen jeweils zwei prismatische Probekörper nebeneinander in vier Lagen übereinander gelagert und konditioniert werden können.

Aus dem Forschungsvorhaben FE 07.0229/2008/ERB [2] ist bekannt, dass durch zu scharfe Konditionierungsbedingungen wie u. a. einer zu hohen Temperatur (85 °C bei SATS-Prüfung nach DIN EN 13697-45) die Bindemittel (Strukturen) so stark zerstört werden, dass eine Differenzierung im Alterungsverhalten zwischen untersuchten Asphaltvarianten nicht mehr erkannt bzw. prüftechnisch angesprochen werden kann.

Voraussetzung für die Wahl der Konditionierungsbedingungen ist, dass die Asphaltprobekörper beim Alterungsprozess (Konditionierung) – insbesondere



Bild 19: Gestell mit Asphalt-Probekörpern für die Konditionierung im Druckalterungsbehälter

durch zu hohe Temperaturen – keine Änderung der Geometrie/Form erfahren.

3.1.2 Untersuchte Varianten

Bei der Auswahl der zu untersuchenden Varianten wurde in Abstimmung mit dem Betreuungsausschuss am 20.01.2015 einvernehmlich festgelegt, dass abweichend von dem vorliegenden Angebot der HNL Ingenieur- und Prüfgesellschaft mbH vom 02.12.2013 in der ersten Projektphase zunächst an zwei Asphaltdeckschichtvarianten AC 8 D S mit Gesteinsarten mit unterschiedlicher Porosität und Straßenbaubitumen durchgeführt werden.

Es wurden zwei Asphaltdeckschichtvarianten AC 8 D S mit Straßenbaubitumen 50/70 hergestellt. Die Varianten unterscheiden sich in der Porosität der Gesteinsart.

Die AC 8 D S-Varianten A (Basalt) und B (Basanit/Basaltlava) wurden so konzipiert, dass der Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper ähnlich ist, um vergleichbare Konditionen für die Alterungsversuche zu schaffen.

Im Rahmen der ersten Projektphase erfolgte zusätzlich eine Variation der Konditionierungstempe-

ratur beim PAV-A-Verfahren (30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C) wobei insbesondere hinsichtlich der Simulation der Langzeitalterung eine Konditionierungstemperatur im oberen Gebrauchstemperaturbereich anzustreben war. Zur Beschleunigung der Alterung wurde dabei zunächst ein Druck von 2,1 MPa in Analogie zu DIN EN 14769 (PAV-Verfahren) und DIN EN 12697-45 (SATS-Prüfung) gewählt. Mit dem Ziel einer laborökonomischen Versuchsdurchführung wurde die Versuchsdauer zunächst auf 20 Stunden festgelegt.

Es wurden an den ungealterten Probekörpern (Nullvariante) sowie an konditionierten Probekörpern (mit BSS- bzw. PAV-A-Verfahren, vgl. Kapitel 3.1.1), im Laboratorium Abkühl- und Zugversuche durchgeführt.

Zur Festlegung geeigneten Konditionierungsbedingungen für das PAV-A-Verfahren wurde die Konditionierungstemperatur mit dem Ziel variiert, anhand von Abkühlversuchen mögliche Viskositätsveränderungen des Bindemittels durch Alterung ansprechen und erkennen zu können.

Zudem wurde an den extrahierten Bindemitteln neben den konventionellen Bindemittelprüfungen (Erweichungspunkt Ring und Kugel und Nadelpenetration) Untersuchungen zum Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer und zum Tieftemperaturverhalten im Bending-Beam-Rheometer durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden den Bindemittelergebnissen der unterschiedlichen Alterungsstufen (siehe Kapitel 2.2.2) gegenübergestellt.

3.1.3 Untersuchungen am Asphalt

Im Rahmen der ersten Projektphase wurden an BSS-konditionierten Prismen der Variante A (Basalt) sowie der Variante B (Basanit) Abkühlversuche durchgeführt. Die kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur sind in Bild 20 dargestellt. Weiterhin können in Bild 20 die Abkühlkurven der ungealterten Nullvarianten A und B entnommen werden.

Bei den BSS-konditionierten Varianten nimmt während des Abkühlprozesses mit abnehmender Temperatur im Mittel die kryogene Zugspannung tendenziell vergleichsweise schneller gegenüber der jeweiligen Nullvariante zu, d. h. das Relaxationsvermögen ist bei den konditionierten Varianten vergleichsweise geringer. Die BSS-konditionierten Varianten weisen somit jeweils im Vergleich zu der zu-

gehörigen Nullvariante eine tendenziell ungünstigere Kälteflexibilität auf.

Der Tabelle 11 können die im Mittel (aus zwei Einzelversuchen) am Versuchsende bestimmten Werte für die Bruchtemperatur sowie die Bruchspannung der vier untersuchten Varianten (siehe auch Bild 20) entnommen werden.

An im Rahmen der ersten Projektphase mit dem PAV-A-Verfahren und gewählten Konditionierungsbedingungen von 2,1 MPa Druckbeaufschlagung und 20 h Konditionierungsdauer sowie bei den vier Temperaturen 30 °C, 40 °C, 50 °C und 60 °C gealterten Prismen der Variante A (Basalt) wurden Abkühlversuche durchgeführt. Zudem wurde vor und nach Konditionierung der Hohlraumgehalt an den Prismen ermittelt (siehe Bild 21). Diesbezüglich ist anzumerken, dass die zur Ermittlung des Hohlraumgehaltes nach Konditionierung mit PAV-A herangezogenen Raumdichten, hilfsweise aus den Abmessungen der Probekörper für die Abkühlversuche ermittelt worden sind, da die Vermutung einer Gefügestörung der Probekörper durch die Konditio-

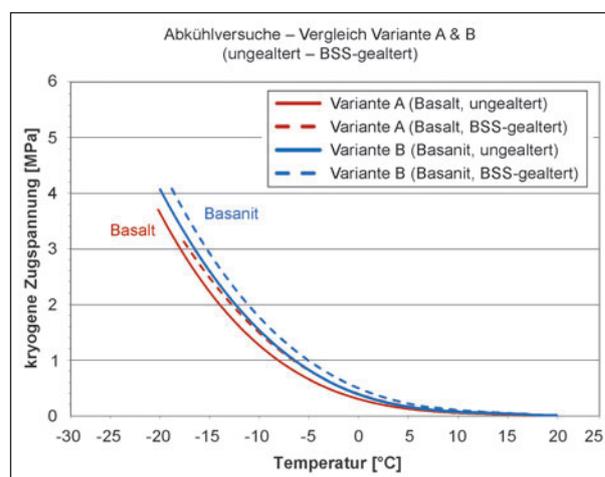


Bild 20: Ergebnisse von Abkühlversuche – BSS-Alterung – Variante A und B (AC 8 D S mit Basalt bzw. Basanit)

Variante	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
Variante A Nullvariante	-20,3	3,632
Variante A BSS-kondit.	-18,9	3,352
Variante B Nullvariante	-20,5	4,153
Variante B BSS-kondit.	-19,3	4,164

Tab. 11: Bruchtemperatur und -spannung – BSS-Verfahren

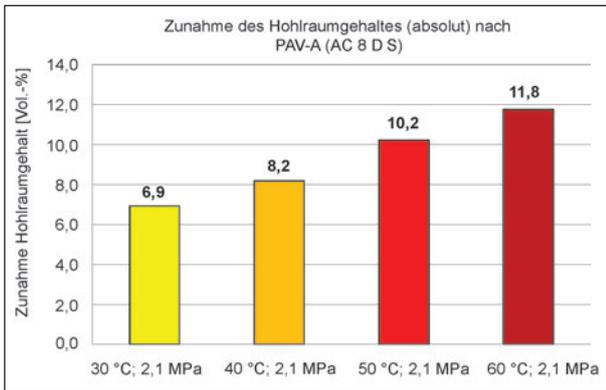


Bild 21: Zunahme des Hohlraumgehaltes nach Konditionierung PAV-A bei 2,1 MPa und 20 h; Variation: Konditionierungstemperatur

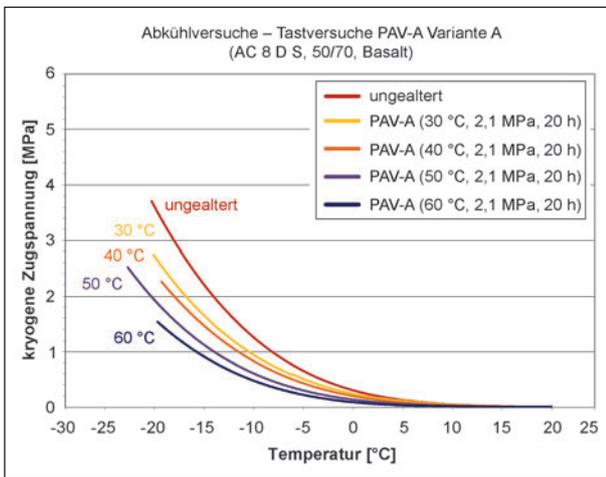


Bild 22: Ergebnisse von Abkühlversuchen – Tastversuche PAV-A-Alterung – Variante A (AC 8 D S)

Variante	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
Variante A Nullvariante	-20,3	3,632
Var. A PAV-A 30 °C, 2,1 MPa, 20 h	-20,0*	2,665*
Var. A PAV-A 40 °C, 2,1 MPa, 20 h	-21,1**	2,551
Var. A PAV-A 50 °C, 2,1 MPa, 20 h	-22,9	2,445
Var. A PAV-A 60 °C, 2,1 MPa, 20 h	-22,0***	1,888

* nur ein Einzelwert
 ** Δ Einzelwerte Bruchtemperatur > 2 °C
 *** Δ Einzelwerte Bruchtemperatur > 2 °C; Verläufe Abkühlkurven ähnlich

Tab. 12: Bruchtemperatur und -spannung – Tastversuche PAV-A-Konditionierung mit 2,1 MPa und 20 h – Variante A (AC 8 D S)

nierung erst zu einem späteren Zeitpunkt der Bearbeitung des Forschungsvorhabens erkannt wurde.

Die Abkühlkurven dieser vier PAV-A-gealterten Varianten sowie der zugehörigen Nullvariante können dem Bild 22 entnommen werden.

Je höher die Konditionierungstemperatur während der Konditionierung mit PAV-A ist, desto flacher verläuft die Abkühlkurve bzw. geringer sind die kryogenen Zugspannungen und umso kleiner ist der ermittelte Wert der Bruchspannung am Versuchsende.

Der Tabelle 12 können die im Mittel bestimmten Werte für die Bruchtemperatur und die Bruchspannung der in Bild 22 dargestellten Abkühlkurven entnommen werden.

Weiterhin wurden zunächst an drei Varianten A mit Basalt (Nullvariante, BSS-konditionierte und PAV-A-konditionierte (60 °C, 2,1 MPa, 20 h) Variante) ergänzend einaxiale Zugversuche bei 20 °C, 5 °C, -10 °C und -25 °C durchgeführt. Im Bild 23 sind die Ergebnisse von Zug- und Abkühlversuchen der drei genannten Variante A gegenübergestellt. Ergänzend sind in Tabelle 13 die Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen der untersuchten Varianten als Zahlenwerte angegeben.

Die Probekörper wurden vor und nach der Konditionierung visuell begutachtet. In Bild 24 bzw. Bild 25 ist beispielhaft die Stirnfläche eines Probekörpers der Variante A vor bzw. nach Konditionierung (PAV-A

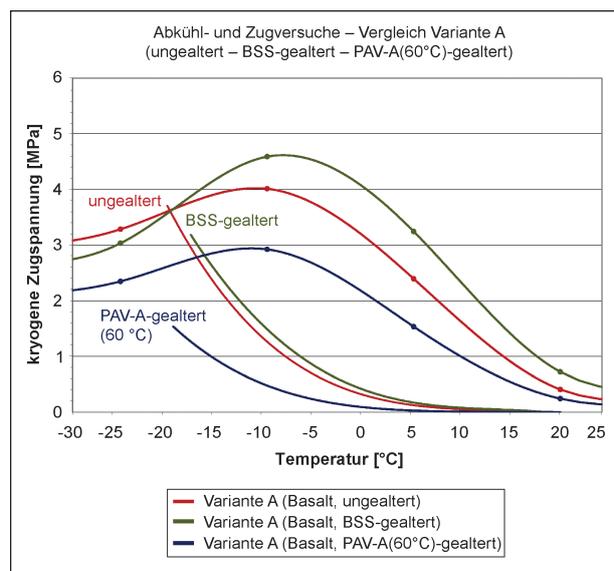


Bild 23: Gegenüberstellung Ergebnisse einaxialer Zug- und Abkühlversuche – BSS- und PAV-A – Variante A (AC 8 D S)

Variante	Zugfestigkeit [MPa] bei				Bruchdehnung [%] bei			
	-25 °C	-10 °C	5 °C	20 °C	-25 °C	-10 °C	5 °C	20 °C
Variante A Nullvariante	3,282	4,009	2,392	0,407	0,189	0,468	4,418	11,918
Variante A BSS-kondit.	3,031	4,585	3,242	0,721	0,178	0,490	3,211	9,806
Var. A PAV-A 60 °C, 2,1 MPa, 20 h	2,346	2,921	1,533	0,243	0,202	0,431	3,876	12,809

Tab. 13: Zugfestigkeit und Bruchdehnung – BSS- und PAV-A-Verfahren – Variante A (AC 8 D S)

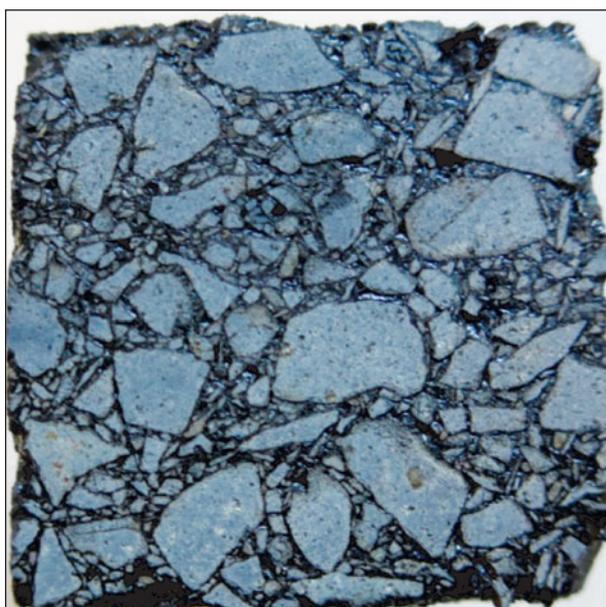


Bild 24: Variante A – AC 8 D S mit 50/70, Basalt Nullvariante (ohne Konditionierung)

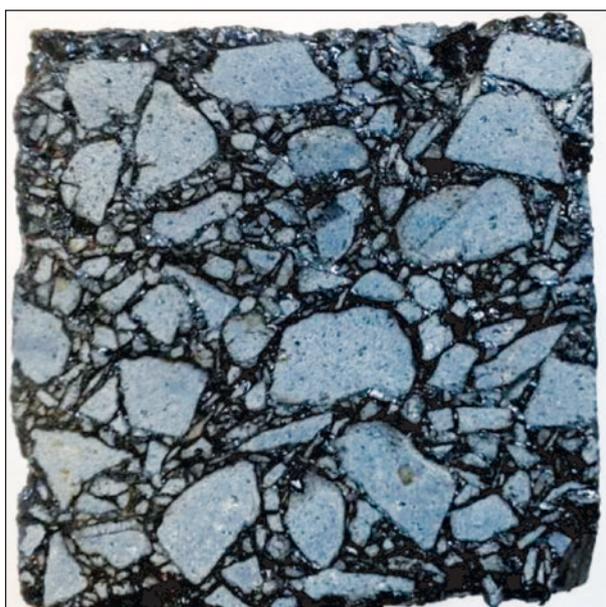


Bild 25: Variante A – AC 8 D S mit 50/70, Basalt nach PAV-A-Konditionierung (50 °C, 2,1 MPa, 20 h)

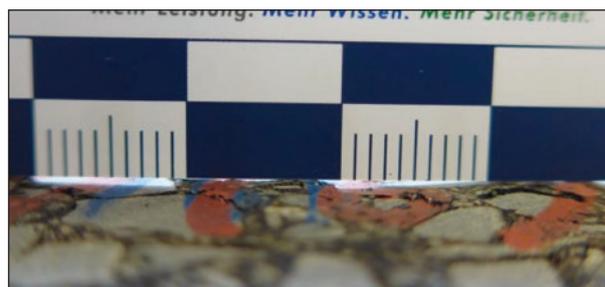


Bild 26: Oberfläche eines Probekörpers der Variante A nach PAV-A (40 °C, 2,1 MPa, 20 h)

50 °C, 2,1 bar, 20 h) abgebildet. Anhand der Gegenüberstellung ist zu erkennen, dass Bindemittel und feine Gesteinskörnung (Mastix) an der Oberfläche praktisch aus dem Korngerüst zwischen größeren Gesteinskörnern herausgedrückt worden sind.

Der Überstand der herausgedrückten Mastix liegt im mm-Bereich (siehe auch Bild 26) und ist mit zunehmender Temperatur ausgeprägter.

3.1.4 Zwischenfazit Projektphase 1

Es kann mittels Abkühlversuchen an den Varianten A (Basalt) und B (Basanit) konstatiert werden, dass die Asphaltvariante mit dem poröseren Gestein Basanit tendenziell eine ungünstigere Kälteflexibilität aufweist. Zudem wurde an den Probekörpern der beiden Varianten nach Konditionierung mit dem BSS-Verfahren ein ungünstigeres Relaxationsvermögen gegenüber nicht konditionierten Probekörpern festgestellt, die kryogenen Zugspannungen nehmen mit abnehmender Temperatur vergleichsweise schneller zu.

Bei den PAV-A konditionierten Varianten wurde hingegen bei den Abkühlversuchen eine geringere Zunahme der kryogenen Zugspannungen gegenüber der Nullvariante mit abnehmender Temperatur konstatiert. Desto höher die Konditionierungstemperatur während des PAV-A-Verfahren ist, umso gerin-

ger ist die Zunahme der kryogenen Zugspannungen gegenüber der Nullvariante mit abnehmender Temperatur. An der Oberfläche der PAV-A-konditionierten Probekörper konnten bereits visuell Gefügestörungen/-veränderungen konstatiert werden, woraus in der folgenden Projektphase 2 Konditionierungsbedingungen geändert bzw. angepasst wurden, da die zunächst gewählten Bedingungen als zu scharf eingestuft wurden.

Basierend auf den vorangestellten Ergebnissen aus Zug- und Abkühlversuchen wurde während der 2. Betreuungsausschusssitzung am 19.05.2015 die weitere Vorgehensweise – abweichend zum geplanten, angebotenen Vorgehen – festgelegt.

Es wurde einvernehmlich beschlossen, dass in der nächsten Projektphase nur noch mit dem PAV-A-Verfahren konditioniert wird. Weiterhin wurde in den folgenden Untersuchungen auf eine Variation in der Porosität der Gesteinsart verzichtet, da der Einfluss gegenüber dem Einfluss durch die Konditionierungsbedingungen sowie dem Hohlraumgehalt des Asphaltes als vernachlässigbar eingestuft wurde.

3.2 Projektphase 2: Ermittlung möglicher Unterschiede im Alterungsverhalten von Asphalten mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt

Im Rahmen der zweiten Projektphase erfolgte die Konditionierung der Probekörper nur mit dem PAV-A-Verfahren.

Basierend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der ersten Projektphase, wo die gewählten Konditionierungsbedingungen mit dem PAV-A-Verfahren (Variation der Temperatur (30 bis 60 °C), 2,1 MPa und 20 h) aufgrund von Gefügeveränderungen/-störungen der Asphaltprobekörper als zu scharf eingestuft wurden, wurde bei der Projektphase 2 die Druckbeaufschlagung verringert.

3.2.1 Untersuchte Varianten

Zur Ermittlung möglicher Unterschiede im Alterungsverhalten von Asphalten mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten wurden ein Asphaltbeton AC 8 D S (Gesteinsart: Basalt, Straßenbaubitumen: 50/70) sowie ein offener Asphalt PA 8

(Gesteinsart: Basalt, polymermodifiziertes Bitumen: 40/100-65 A) mit einer Variation der Temperatur (30 °C und 60 °C) und des Druckes (2,1 MPa, 1,0 MPa, 0,5 MPa) mittels PAV-A-Verfahren konditioniert. Die Konditionierungsdauer wurde mit 20 h konstant gehalten. Insgesamt wurden in dieser Projektphase zwölf Varianten konditioniert und die Ergebnisse den Nullvarianten gegenübergestellt. An den Asphalt-Probekörpern der Varianten wurden Zug- sowie Abkühlversuche durchgeführt und am extrahierten Bindemittel wurde das Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer sowie das Tieftemperaturverhalten im Biegebalkenrheometer ermittelt.

3.2.2 Performance-Eigenschaften

Für den Asphaltbeton AC 8 D S sind die Ergebnisse der einaxialen Zug- und Abkühlversuche in grafischer Form in Bild 27 dargestellt. Der Tabelle 14 bzw. Tabelle 15 können die Ergebnisse aus Zug- bzw. Abkühlversuchen als Zahlenwerte entnommen werden.

Aus Bild 27 ist zu entnehmen, dass sowohl bei den mit 30 °C sowie bei den mit 60 °C konditionierten Varianten mit zunehmender Druckbeanspruch, die Abkühlkurven einen flacheren Verlauf aufweisen.

Für die Variante mit den hier gewählten stärksten Konditionierungsbedingungen (60 °C, 2,1 MPa, 20 h) ist eine deutliche Abnahme der Zugfestigkeit zu konstatieren. An den übrigen untersuchten, konditionierten Varianten wurden Werte für die Zugfes-

Variante	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
Variante A Nullvariante	-20,3	3,632
Varianten A nach PAV-A:		
30 °C, 0,5 MPa, 20 h	-19,9	3,384
30 °C, 1,0 MPa, 20 h	-21,2	3,516
30 °C, 2,1 MPa, 20 h	-20,0*	2,665*
60 °C, 0,5 MPa, 20 h	-22,0	3,395
60 °C, 1,0 MPa, 20 h	-22,1	3,357
60 °C, 2,1 MPa, 20 h	-22,0***	1,888
* nur ein Einzelwert		
*** Δ Einzelwert Bruchtemperatur > 2 °C; Verläufe Abkühlkurven ähnlich		

Tab. 14: Bruchtemperatur und -spannung PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – Variante A (AC 8 D S)

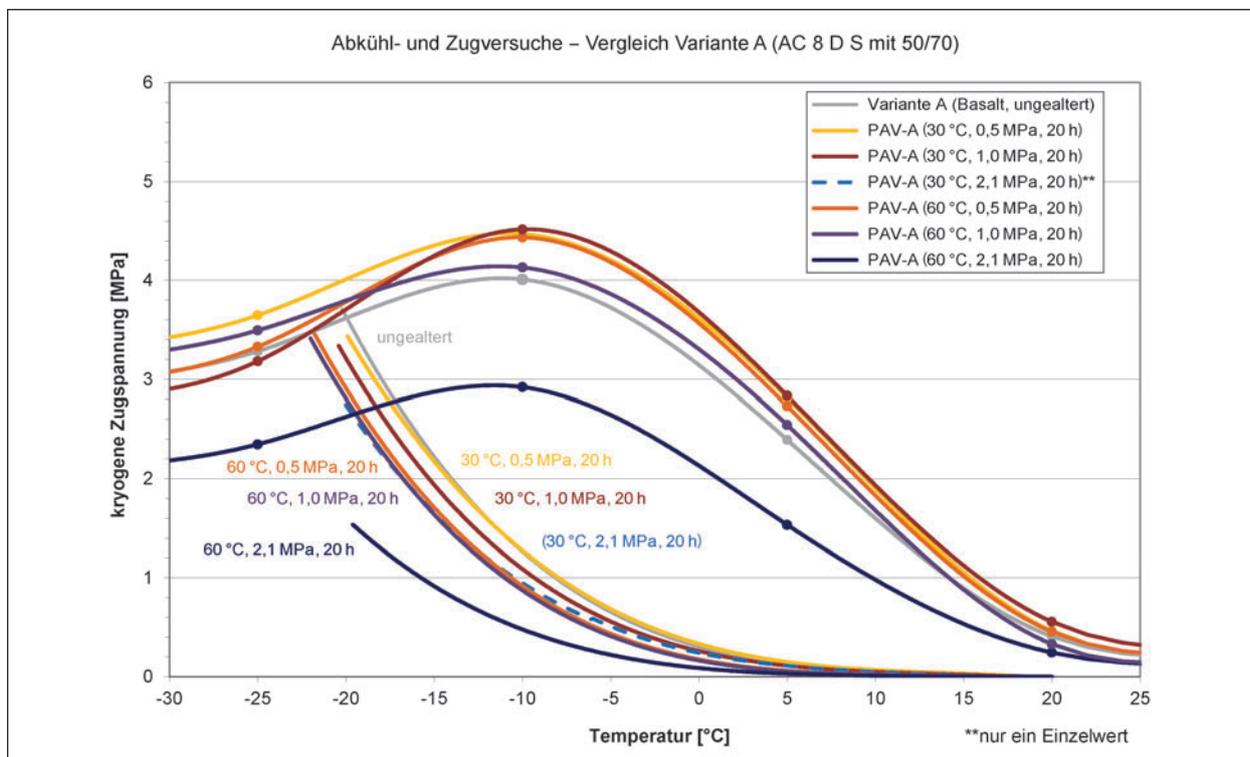


Bild 27: Gegenüberstellung Ergebnisse einaxialer Zug- und Abkühlversuche – PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – Variante A (AC 8 D S)

Variante	Zugfestigkeit [MPa] bei				Bruchdehnung [%] bei			
	-25 °C	-10 °C	5 °C	20 °C	-25 °C	-10 °C	5 °C	20 °C
Variante A Nullvariante	3,282	4,009	2,392	0,407	0,189	0,468	4,418	11,918
Varianten A nach PAV-A:								
30 °C, 0,5 MPa, 20 h	3,646	4,468	2,811	0,462	0,177	0,480	3,939	11,677
30 °C, 1,0 MPa, 20 h	3,181	4,515	2,835	0,554	0,213	0,549	4,082	9,854
30 °C, 2,1 MPa, 20 h	Nicht ermittelt							
60 °C, 0,5 MPa, 20 h	3,327	4,434	2,732	0,453	0,205	0,522	4,052	14,036
60 °C, 1,0 MPa, 20 h	3,493	4,130	2,542	0,329	0,198	0,501	4,324	14,386
60 °C, 2,1 MPa, 20 h	2,346	2,921	1,533	0,243	0,202	0,431	3,876	12,809

Tab. 15: Zugfestigkeit und Bruchdehnung Tastversuche PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – Variante A (AC 8 D S)

tigkeit in der Größenordnung der Zugfestigkeiten der Nullvariante sowie größere Werte ermittelt. Vereinzelt und unsystematisch ist eine Zunahme der Bruchdehnung zu konstatieren (siehe Tabelle 15).

Die Ergebnisse der einaxialen Zug- und Abkühlversuche für den offenporigen Asphalt PA 8 sind in Bild 28 dargestellt und die zugehörigen Zahlenwerte können Tabelle 16 und Tabelle 17 entnommen werden.

Die Abkühlkurven verlaufen bei allen untersuchten PA-8-Varianten, für einen offenporigen Asphalt ty-

pisch sehr flach, da aufgrund der praktisch nur punktuellen Bindemittelbrücken praktisch keine kryogenen Zugspannungen aufgebaut werden können. Bei den bei 60 °C konditionierten Probestkörpern konnten im Abkühlversuch praktisch überhaupt keine Spannungen mehr aufgebaut werden.

Für die konditionierten Varianten ist überwiegend eine Abnahme der Zugfestigkeit, insbesondere bei den mit einem Druck von 2,1 MPa konditionierten Varianten (30 °C sowie 60 °C) zu erkennen. Unsys-

Variante	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
PA 8 Nullvariante	-28,4*	1,202*
PA 8 nach PAV-A:		
30 °C, 0,5 MPa, 20 h	-28,8*	1,084*
30 °C, 1,0 MPa, 20 h	-25,2*	0,731*
30 °C, 2,1 MPa, 20 h	-26,1*	0,522*
60 °C, 0,5 MPa, 20 h	praktisch kein Spannungsaufbau	
60 °C, 1,0 MPa, 20 h	Nicht ermittelt	
60 °C, 2,1 MPa, 20 h	praktisch kein Spannungsaufbau	
* nur ein Einzelwert		

Tab. 16: Bruchtemperatur und -spannung PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – Variante PA 8

tematisch ist bei den untersuchten, konditionierten Varianten eine Zunahme der Bruchdehnung zu verzeichnen.

Bei der Ermittlung der Raumdichte vor und nach Konditionierung konnte eine deutliche Zunahme des Hohlraumgehaltes an den prismatischen Probekörpern der Asphaltvariante AC 8 D S ermittelt werden. Hierbei konnte beobachtet werden, dass die Zunahme des Hohlraumgehaltes durch den Druck, sowie durch die Temperatur beeinflusst wird. Je höher der Druck bzw. die Temperatur, desto größer ist die Zunahme im Hohlraumgehalt (siehe Bild 29 und Bild 30).

Variante	Zugfestigkeit [MPa] bei				Bruchdehnung [%] bei			
	-25 °C	-10 °C	5 °C	20 °C	-25 °C	-10 °C	5 °C	20 °C
PA 8 Nullvariante	0,884	1,489	0,586	0,116	0,172	1,041	7,052	21,934
PA 8 nach PAV-A:								
30 °C, 0,5 MPa, 20 h	1,360	1,542	0,541	0,082	0,203	1,302	8,964	23,196
30 °C, 1,0 MPa, 20 h	1,184	1,365	0,562	0,085	0,237	0,972	7,121	22,765
30 °C, 2,1 MPa, 20 h	0,799	1,058	0,331	0,049	0,259	1,969	16,220	22,487
60 °C, 0,5 MPa, 20 h	0,803	1,326	0,627	0,102	0,223	1,410	7,085	24,668
60 °C, 1,0 MPa, 20 h	Nicht ermittelt							
60 °C, 2,1 MPa, 20 h	0,597	0,729	0,197	0,014	0,367	4,201	20,511	20,414

Tab. 17: Zugfestigkeit und Bruchdehnung PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – PA 8

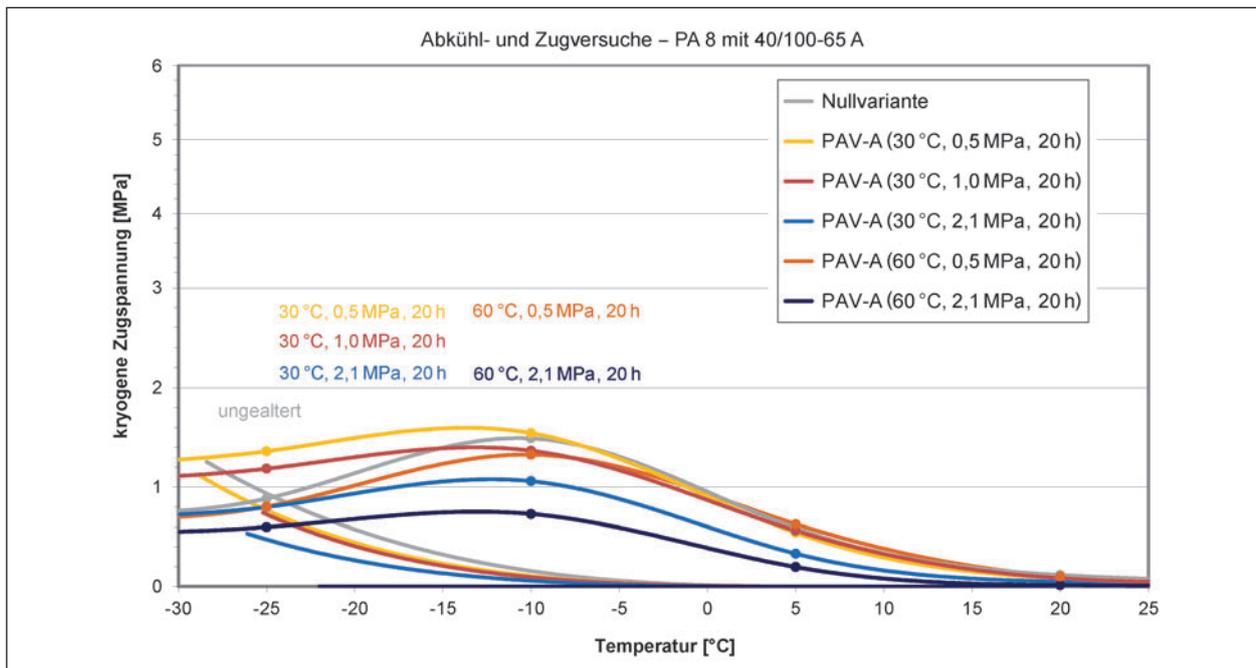


Bild 28: Gegenüberstellung Ergebnisse einaxialer Zug- und Abkühlversuche – PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – PA 8

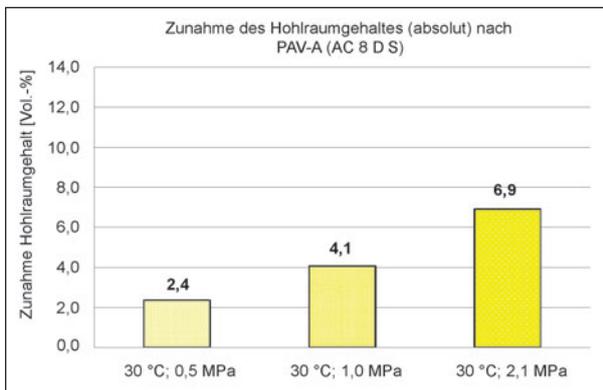


Bild 29: Zunahme des Hohlraumgehaltes (absolut) an der Asphaltvariante AC 8 D S nach PAV-A; 30 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck

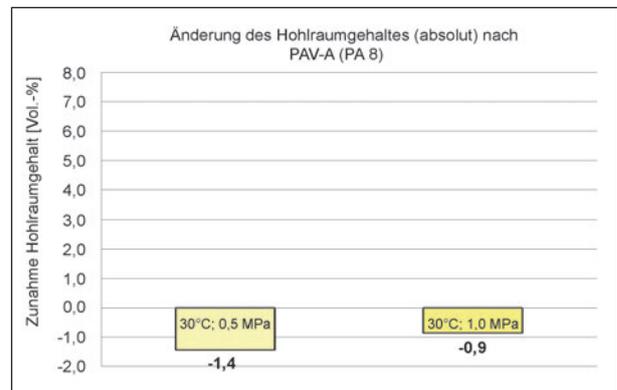


Bild 31: Änderung des Hohlraumgehaltes (absolut) nach PAV-A an der Asphaltvariante PA 8; 30 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck

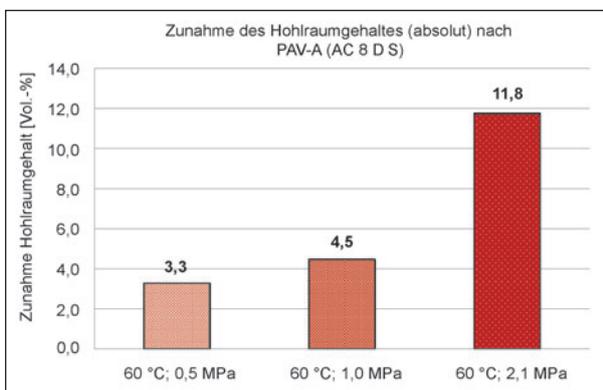


Bild 30: Zunahme des Hohlraumgehaltes (absolut) an der Asphaltvariante AC 8 D S nach PAV-A; 60 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck

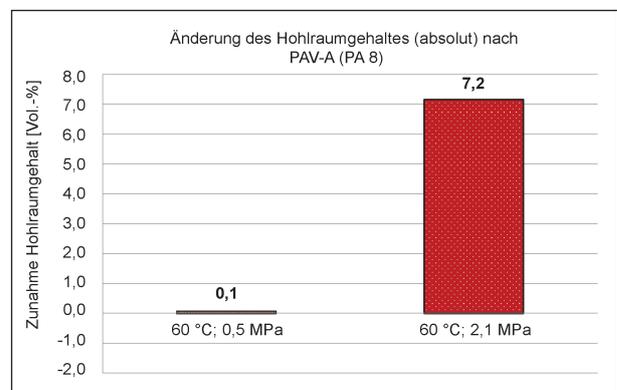


Bild 32: Änderung des Hohlraumgehaltes (absolut) nach PAV-A an der Asphaltvariante PA 8; 60 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck

Vor Konditionierung wurde die Raumdichte gemäß TP Asphalt, Teil 6, Verfahren A bestimmt. Hilfsweise wurden für die Bestimmung der Raumdichte am AC 8 D S nach Konditionierung mittels PAV-A die Abmessungen der Probekörper für die Zug- bzw. Abkühlversuche verwendet (gemäß TP Asphalt, Teil 6 Verfahren D (Ausmessen)).

Eine Zunahme des Hohlraumgehaltes der Asphaltvariante PA 8 bei vergleichsweise schwachen Konditionierungsbedingungen – Konditionierungstemperatur von 30 °C, einer Konditionierungsdauer von 20 h sowie einem Konditionierungsdruck von 0,5 bzw. 1,0 MPa – kann nicht konstatiert werden (Bild 31). Im Gegensatz zum AC 8 D S ist hier eine Abnahme des Hohlraumgehaltes zu beobachten. Bei vergleichsweise stärkeren Konditionierungsbedingungen – Konditionierungstemperatur von 60 °C und einem Konditionierungsdruck von 2,1 MPa – wurde auch bei der Asphaltvariante PA 8 eine Zunahme des Hohlraumgehaltes nach PAV-A festgestellt (Bild 32).

Vor und nach Konditionierung mittels PAV-A wurden die Raumdichten gemäß TP Asphalt, Teil 6, Verfahren D (Ausmessen) ermittelt.

3.2.3 Bindemittleigenschaften

Im Vorwege wurden die in den untersuchten Asphaltmischgutarten eingesetzten Bindemittelsorten untersucht.

Für die Bindemittelsorten wurden die Bindemittelkennwerte jeweils im Lieferzustand Original, nach RTFOT-Alterung sowie nach RTFOT-+PAV-Alterung ermittelt (siehe Kapitel 2.2.2). Weiterhin wurde Bindemittel aus Asphaltprobekörpern extrahiert. Es wurde jeweils rückgewonnenes Bindemittel aus Prismen der ungealterten Nullvariante sowie den PAV-A-konditionierten Varianten mit den stärksten Konditionierungsbedingungen (60 °C, 2,1 MPa, 20 h) sowie den schwächsten Konditionierungsbedingungen (30 °C, 0,5 MPa, 20 h) untersucht.

Es wurden die konventionellen Bindemittelkennwerte „Erweichungspunkt Ring und Kugel“ sowie „Nadelpenetration“ bestimmt. Ergänzend wurden zur Ansprache der rheologischen Bindemittelleigenschaften Versuche mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) sowie mit dem dynamischen Scherrheometer (DSR-Versuch, MSCR-Test) durchgeführt.

Der Tabelle 18 können die ermittelten Bindemittelkennwerte (Penetration, Erweichungspunkt Ring und Kugel) für das Straßenbaubitumen 50/70 (Probe 1) entnommen werden, das im Asphaltmischgut AC 8 D S (Variante A) eingesetzt wurde.

Bindemittelsorte: 50/70	Penetration [0,1 mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
Original	53	50,6
nach RTFOT-Alterung	32	59,0
nach RTFOT- + PAV-Alterung	17	72,8
extrahiert aus AC 8 D S Nullvariante	29	60,6
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	34	56,4
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	29	57,6

Tab. 18: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – Straßenbaubitumen 50/70

In Bild 33 sind für die Prüftemperaturen -10, -16 und -25 °C die mittels Biegebalkenrheometer bestimmten Biegekriechsteifigkeiten nach 60 Sekunden für das Straßenbaubitumen 50/70 dargestellt. Ergänzend sind in der Tabelle 19 neben den Zahlenwerten für die Biegekriechsteifigkeiten die mit dem BBR-Versuch ermittelten m-Werte genannt.

Bild 34 zeigt die im DSR-Versuch ermittelten Ergebnisse des Straßenbaubitumens 50/70 in den Alterungszuständen Original, nach RTFOT-Alterung und nach RTFOT+PAV-Alterung sowie des extrahierten Bindemittels aus Probekörpern, die mit dem PAV-A-Verfahren mit unterschiedlichen Randbedingungen beansprucht worden sind. Aus Tabelle 20 und Tabelle 21 können die Zahlenwerte für den komplexen Schermodul und den Phasenwinkel (DSR-Versuch) entnommen werden. In Tabelle 22 sind die mittels MSCR-Prüfung bei 60 °C ermittelte Wert für die Kriecherholung und der nicht rückverformbare Anteil für drei Laststufen des Straßenbaubitumens 50/70 angegeben.

Die am rückgewonnenen Bindemittel aus prismatischen Probekörpern bestimmten konventionelle Bindemittelkenndaten (Erweichungspunkt Ring und Kugel, Nadelpenetration) sowie die Performance-Kennwerte (aus BBR-, DSR-Versuch, MSCR-Test) entsprechen sowohl für die hier untersuchten konditionierten Asphaltbetonvarianten mit den ver-

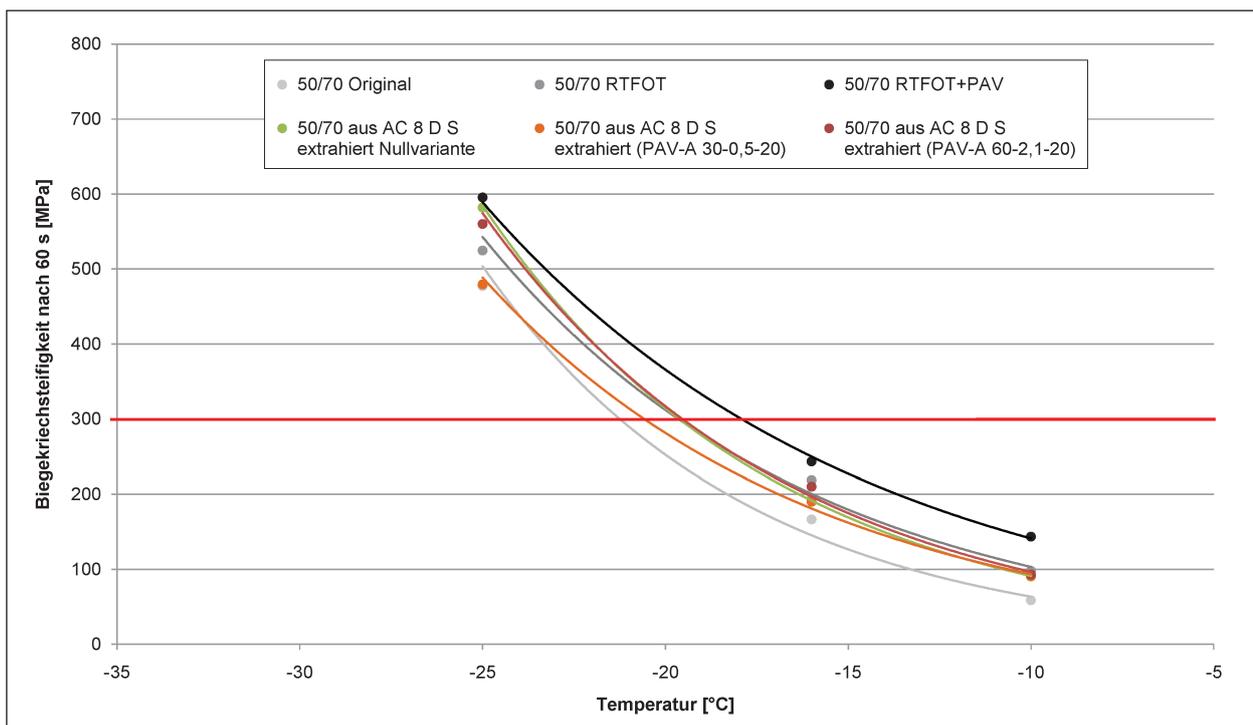


Bild 33: Biegekriechsteifigkeit – Straßenbaubitumen 50/70

Bindemittelsorte: 50/70	Biegekriechsteifigkeit [MPa] bei			m-Wert [-] bei		
	-10 °C	-16 °C	-25 °C	-10 °C	-16 °C	-25 °C
Original	58,478	166,295	477,158	0,465	0,377	0,243
nach RTFOT-Alterung	98,010	218,372	524,429	0,384	0,322	0,226
nach RTFOT- + PAV-Alterung	143,395	243,211	595,402	0,319	0,266	0,199
extrahiert aus AC 8 D S Nullvariante	90,322	193,712	581,843	0,380	0,318	0,213
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	90,711	189,758	479,335	0,392	0,327	0,239
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	92,803	210,045	559,854	0,398	0,330	0,223

Tab. 19: Ergebnisse BBR (Biegekriechsteifigkeit und m-Wert) – Straßenbaubitumen 50/70

Bindemittelsorte: 50/70	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	540.004	103.796	20.730	5.170	1.451	467	176
nach RTFOT-Alterung	1.090.739	225.320	48.352	12.265	3.456	1.055	358
nach RTFOT- + PAV-Alterung	3.379.205	840.540	210.397	58.010	17.163	5.209	1.629
extrahiert aus AC 8 D S Nullvariante	1.294.774	267.769	57.751	14.588	4.110	1.254	418
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	914.967	186.846	39.220	9.805	2.802	866	302
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	1.115.853	228.188	48.541	12.179	3.430	1.030	350

Tab. 20: Komplexer Schermodul DSR – Straßenbaubitumen 50/70

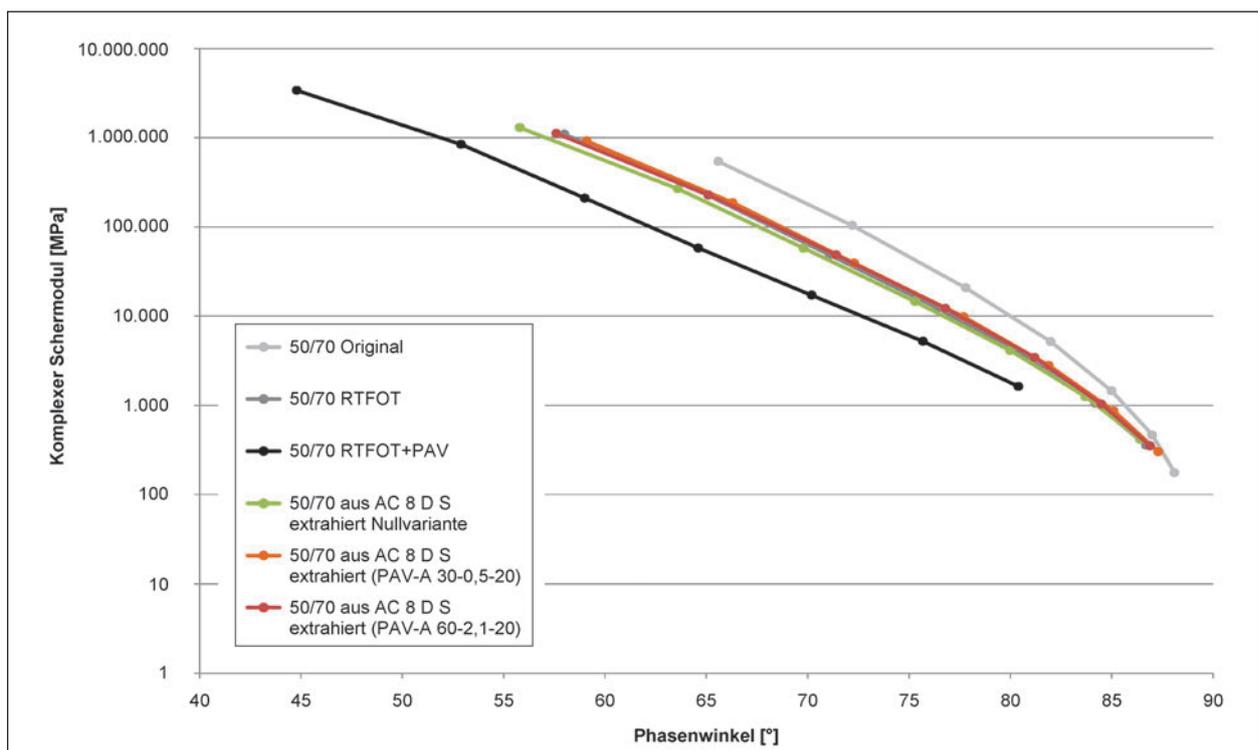


Bild 34: BLACK-Diagramm DSR – Straßenbaubitumen 50/70

Bindemittelsorte: 50/70	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	65,6	72,2	77,8	82,0	85,0	87,0	88,1
nach RTFOT-Alterung	58,0	65,1	71,1	76,4	80,8	84,2	86,7
nach RTFOT- + PAV-Alterung	44,8	52,9	59,0	64,6	70,2	75,7	80,4
extrahiert aus AC 8 D S Nullvariante	55,8	63,6	69,8	75,3	80,0	83,7	86,4
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	59,1	66,3	72,3	77,7	81,9	85,1	87,3
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	57,6	65,1	71,4	76,8	81,2	84,5	86,9

Tab. 21: Phasenwinkel DSR – Straßenbaubitumen 50/70

Bindemittelsorte: 50/70	Kriecherholung [%] bei			nicht rückverformbarer Anteil [1/kPa] bei		
	100 Pa	1.600 Pa	3.200 Pa	100 Pa	1.600 Pa	3.200 Pa
Original	12,0	10,3	7,0	0,941	0,926	0,958
nach RTFOT-Alterung	15,2	12,8	8,9	0,725	0,761	0,811
nach RTFOT- + PAV-Alterung	39,1	40,0	39,4	0,081	0,080	0,081
extrahiert aus AC 8 D S Nullvariante	17,2	15,5	11,9	0,552	0,570	0,601
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	13,8	11,3	7,6	0,803	0,839	0,893
extrahiert aus AC 8 D S nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	14,4	12,8	9,2	0,676	0,699	0,745

Tab. 22: Ergebnisse der MSCR-Prüfung bei 60 °C – Straßenbaubitumen 50/70

Bindemittelsorte: 40/100-65 A	Penetration [0,1 mm]	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
Original	56	79,4
nach RTFOT-Alterung	45	86,5
nach RTFOT- + PAV-Alterung	28	89,5
extrahiert aus PA 8 Nullvariante	25	101
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	29	94,5
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	27	95,0

Tab. 23: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

gleichsweise stärksten Konditionierungsbedingungen (60 °C, 2,1 MPa, 20 h) bzw. mit den vergleichsweise schwächsten Konditionierungsbedingungen (30 °C, 0,5 MPa, 20 h) sowie für die Nullvariante in der Größenordnung dem Alterungszustand

vom Bindemittel (Straßenbaubitumen 50/70) nach RTFOT-Alterung (Kurzzeitalterung).

Die Ergebnisse aus Bindemitteluntersuchungen sind für das polymermodifizierte Bindemittel 40/100-65 A in der Tabelle 23 (Penetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel) wiedergegeben. Die Bindemittelsorte 40/100-65 A wurde im Asphaltmischgut PA 8 eingesetzt.

In Bild 35 sind für die Prüftemperaturen -16, -25 und -32 °C die mittels Biegebalkenrheometer bestimmten Biegekriechsteifigkeiten nach 60 Sekunden für das polymermodifizierte Bindemittel 40/100-65 A dargestellt. Ergänzend sind in der Tabelle 24 neben den Zahlenwerten für die Biegekriechsteifigkeiten die mit dem BBR-Versuch ermittelten m-Werte genannt.

Bild 36 zeigt die im DSR-Versuch ermittelten Ergebnisse des polymermodifizierten Bindemittels 40/100-65 A in den Alterungszuständen Original, nach RTFOT-Alterung und nach RTFOT-+PAV-Alterung

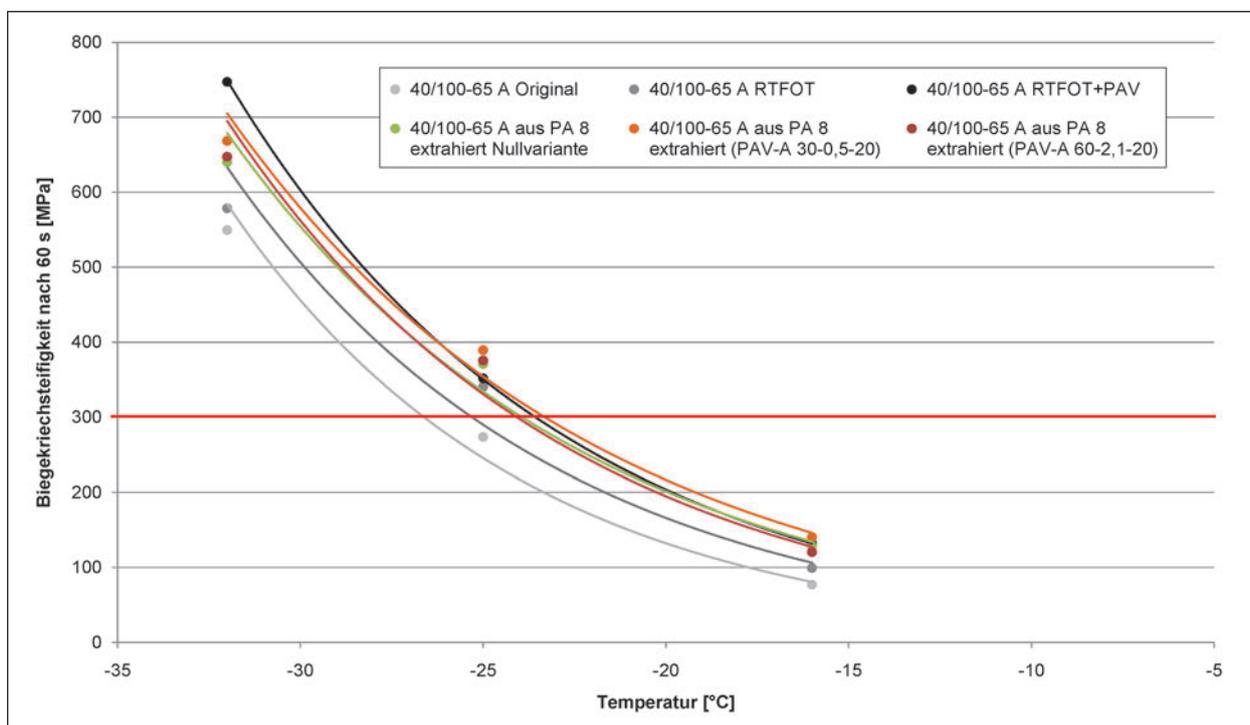


Bild 35: Biegekriechsteifigkeit – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

Bindemittelsorte: 40/100-65 A	Biegekriechsteifigkeit [MPa] bei			m-Wert [-] bei		
	-16 °C	-25 °C	-32 °C	-16 °C	-25 °C	-32 °C
Original	76,787	273,485	549,524	0,414	0,304	0,214
nach RTFOT-Alterung	98,944	340,381	578,398	0,398	0,281	0,236
nach RTFOT- + PAV-Alterung	131,518	351,703	747,206	0,348	0,270	0,186
extrahiert aus PA 8 Nullvariante	128,158	370,675	640,089	0,337	0,254	0,199
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	140,061	389,149	668,425	0,355	0,262	0,205
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	120,49	375,492	647,142	0,363	0,268	0,207

Tab. 24: Ergebnisse BBR (Biegekriechsteifigkeit und m-Wert) – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

sowie des extrahierten Bindemittels aus Probekörpern, die mit dem PAV-A-Verfahren mit unterschiedlichen Randbedingungen beansprucht worden sind. Tabelle 25 und Tabelle 26 können die Zahlenwerte für den komplexen Schermodul und den Phasenwinkel (DSR-Versuch) entnommen werden. In Tabelle 27 sind der mittels MSCR-Prüfung bei 60 °C ermittelte Wert für die Kriecherholung und der nicht rückverformbare Anteil für drei Laststufen des polymermodifizierten Bindemittels 40/100-65 A angegeben.

Die am aus prismatischen Probekörpern rückgewonnenen Bindemittel (40/100-650 A) bestimmten konventionelle Bindemittelkenndaten (Erweichungspunkt Ring und Kugel, Nadelpenetration)

sowie die im BBR-Versuch bestimmten Biegekriechsteifigkeiten und im DSR-Versuch gemessenen komplexen Schermoduln entsprechen für die konditionierten PA-Varianten sowie für die Nullvariante in der Größenordnung etwa der Bindemittelalterung nach RTFOT- + PAV-Alterung.

Nach dem Kennwert Phasenwinkel (aus DSR-Versuch) sowie den Kennwerten aus den MSCR-Tests lassen die konditionierten PA-Varianten sowie die Nullvariante zwischen den Kennwerten am nur RTFOT-gealterten und dem RTFOT- + PAV-gealterten Bindemittel einordnen.

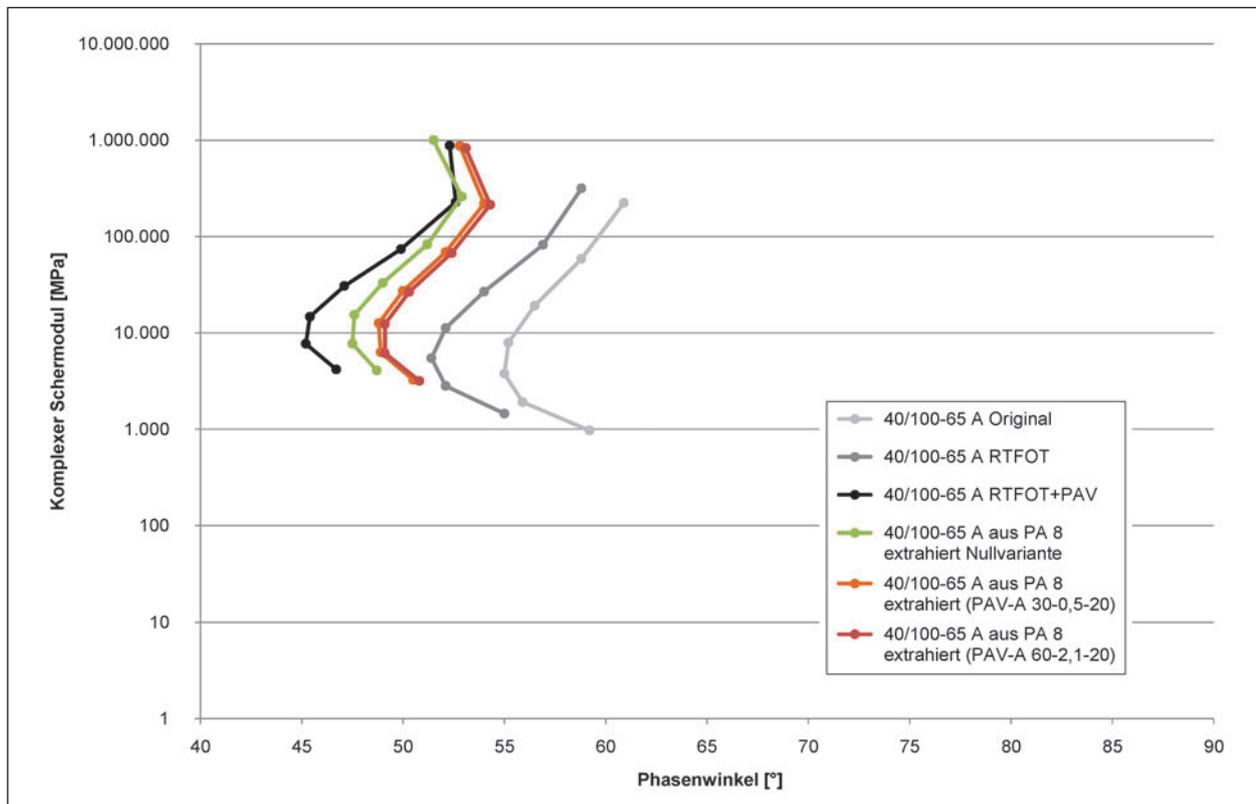


Bild 36: Black-Diagramm DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

Bindemittelsorte: 40/100-65 A	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	224.958	58.778	19.202	7.913	3.777	1.916	970
nach RTFOT-Alterung	316.912	82.136	26.852	11.227	5.467	2.812	1.455
nach RTFOT- + PAV-Alterung	879.910	228.054	74.270	30.690	14.706	7.719	4.178
extrahiert aus PA 8 Nullvariante	1.004.920	260.139	83.194	33.022	15.391	7.735	4.085
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	873.208	219.300	68.959	27.309	12.621	6.297	3.258
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	827.150	214.228	67.503	26.648	12.341	6.159	3.176

Tab. 25: Komplexer Schermodul DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

Bindemittelsorte: 40/100-65 A	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	60,9	58,8	56,5	55,2	55,0	55,9	59,2
nach RTFOT-Alterung	58,8	56,9	54,0	52,1	51,4	52,1	55,0
nach RTFOT- + PAV-Alterung	52,3	52,6	49,9	47,1	45,4	45,2	46,7
extrahiert aus PA 8 Nullvariante	51,5	52,9	51,2	49,0	47,6	47,5	48,7
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	52,8	54,0	52,1	50,0	48,8	48,9	50,5
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	53,1	54,3	52,4	50,3	49,1	49,1	50,8

Tab. 26: Phasenwinkel DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

Bindemittelsorte: 40/100-65 A	Kriecherholung [%] bei			nicht rückverformbarer Anteil [1/kPa] bei		
	100 Pa	1.600 Pa	3.200 Pa	100 Pa	1.600 Pa	3.200 Pa
Original	89,8	91,7	92,4	0,053	0,044	0,029
nach RTFOT-Alterung	91,8	91,7	93,3	0,030	0,030	0,025
nach RTFOT- + PAV-Alterung	94,2	94,7	96,1	0,007	0,006	0,004
extrahiert aus PA 8 Nullvariante	93,5	93,5	95,3	0,008	0,008	0,006
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (30 °C, 0,5 MPa, 20 h)	92,9	93,2	94,6	0,010	0,009	0,008
extrahiert aus PA 8 nach PAV-A (60 °C, 2,1 MPa, 20 h)	92,2	93,1	94,5	0,012	0,011	0,009

Tab. 27: Ergebnisse des MSCR-Test bei 60 °C – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

3.2.4 Zwischenfazit Projektphase 2

Die an extrahierten Bindemittelproben ermittelten Bindemittelkennwerte weisen darauf hin, dass mit den in der zweiten Projektphase beim PAV-A-Verfahren gewählten Konditionierungsbedingungen nur eine geringfügige Alterung des Bindemittels erfolgt. Die durch die Konditionierung erwirkte Bindemittelalterung wird überlagert von der Alterung, die während der Mischgutherstellung, Plattenherstellung und/oder der Rückgewinnung stattfindet. Beim dichten Asphaltbeton sowie bei dem offenporigen Asphalt kann anhand der ermittelten Bindemittelkenndaten nicht unterschieden werden zwischen konditionierten Varianten und Nullvarianten. Weiter kann auch kein Unterschied in der Schärfe der Konditionierung (Variation der Konditionierungsbedingungen) erkannt werden.

Vielmehr wird bei der Konditionierung das Gefüge der Asphaltprobekörper verändert bzw. geschädigt und es kann eine Zunahme der Hohlraumgehalte der Probekörper durch die Konditionierung konstatiert werden.

Die Gefügeschädigung macht sich bei den Abkühlversuchen an den konditionierten Varianten dadurch bemerkbar, dass weniger Spannungen aufgebaut werden können und nicht, wie bei einem gealterten, verhärteten Bindemittel eine vergleichsweise schnellere Zunahme der kryogenen Spannungen mit abnehmender Temperatur aufgrund eines schlechteren Relaxationsvermögens beobachtet werden kann.

3.3 Projektphase 3: Untersuchungen am praktisch hohlraumfreien Asphalt (Glasperlen-Asphalt)

Um Hinweise zu bekommen, ob die in den Projektphasen 1 und 2 erkannten Gefügeveränderungen der Asphaltprobekörper auch bei praktisch hohlraumfreien Asphalten eintreten können und ggf. auch in kleinste Hohlräume der Gesteinskörner unter Druckbeanspruchung Luft gepresst und eine mechanische Beanspruchung der Gesteine resultieren kann, wurden für die Projektphase 3 praktisch hohlraumfreie Probekörper, in Anlehnung an einen Gussasphalt, hergestellt und konditioniert.

3.3.1 Untersuchte Varianten

Die Gesteinskörnung eines Asphaltes wurde durch Glasperlen aus Kalknatronglas, die eine dichte Struktur aufweisen, ersetzt. Aus Glasperlen und Straßenbaubitumen wurde in Anlehnung an einen Gussasphalt der praktisch hohlraumfreie Glasperlen-Asphalt konzipiert. Dafür wurden polierte Glaskugeln aus Kalknatronglas mit einer Korngröße von 1,55 bis 1,85 mm mit einem Straßenbaubitumen der Sorte 30/45 in einem Verhältnis von 3:1 vermengt. Aus diesem Gemisch wurden prismatische Probekörper hergestellt und mittels PAV-A-Verfahren konditioniert. Die Temperatur lag dabei bei 30 °C und die Versuchsdauer bei 20 Stunden.

Zur Untersuchung eines möglichen Einflusses der Größe der Druckbeanspruchung auf die ggf. vorhandene Gefügeveränderung wurde der Druck bei der Konditionierung mit dem PAV-A-Verfahren mit 0,1 MPa, 0,5 MPa, 1,0 MPa bzw. 2,1 MPa variiert.

3.3.2 Eigenschaften Glasperlenasphalt

Sowohl vor als auch nach der Druckbeanspruchung wurden die Abmessungen der Probekörper durch Ausmessen sowie die Raumdichte nach TP Asphalt-StB, Teil 6, Verfahren A ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 dargestellt. Bild 37 bis Bild 39 zeigen Aufnahmen der Probekörper vor bzw. nach der Konditionierung. Zudem zeigt Bild 40 die Schnittfläche eines bei 2,1 MPa konditionierten Probekörpers.



Bild 37: Probekörperoberfläche vor Beanspruchung durch PAV-A-Konditionierung

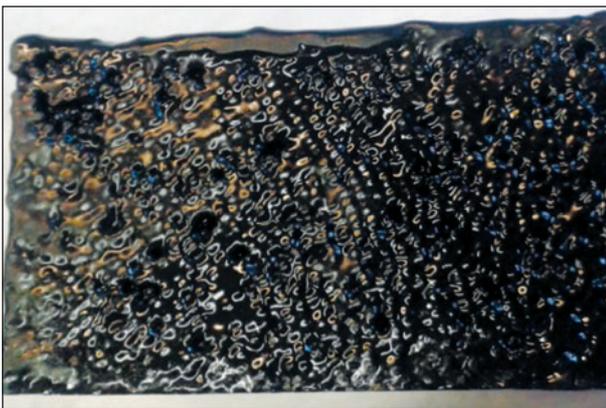


Bild 38: Probekörperoberfläche nach 20-stündiger Beanspruchung bei 0,1 MPa und 30 °C

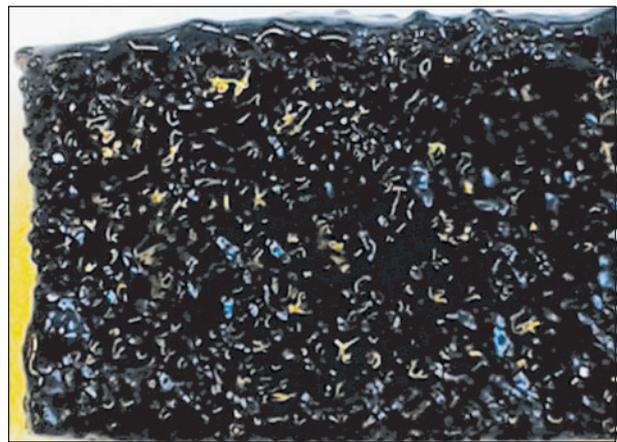


Bild 39: Probekörperoberfläche nach 20-stündiger Beanspruchung bei 2,1 MPa und 30 °C

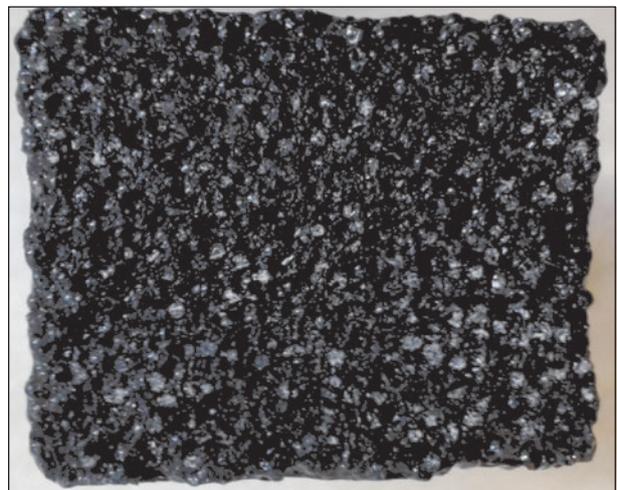


Bild 40: Schnittfläche eines Probekörpers nach 20-stündiger Beanspruchung bei 2,1 MPa und 30 °C

Druck [MPa]	Änderung Breite [%]	Änderung Höhe [%]	Änderung Länge [%]	Änderung Raumdichte [%]
0,1	1,70	-1,71	0,75	0,53
0,5	2,25	-3,19	0,75	0,54
1,0	3,30	-0,51	1,17	-2,44
2,1	3,20	-0,32	0,80	-3,50

Tab. 28: Prozentuale Änderung der Abmessungen und Raumdichte durch PAV-A-Konditionierung (30 °C; 20 Stunden, Druck variierend)

Auch bei diesem praktisch hohlraumfreien Asphalt (Glasperlen-Asphalt) kann eine Zunahme des Hohlraumgehaltes festgestellt werden (Abnahme der Raumdichte, siehe hierzu auch Bild 41). Somit dringt Luft während der Konditionierung mittels PAV-A auch noch in die kleinsten Hohlräume ein und bewirkt eine Gefügestörung.

Aus Tabelle 28 geht hervor, dass die Raumdichte des Glasperlen-Asphaltes mit zunehmend, höherer

rem Druck bei der Konditionierung zu einer zunehmend, größeren Abnahme der Raumdichte führt.

3.3.3 Bindemittleigenschaften Glasperlen-Asphalt

Die Bindemittleigenschaften Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie das Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer werden am extrahierten Bindemittel ermittelt und den verschiedenen Alterungsstufen des Bindemittels (Straßenbaubitumen 30/45) gegenübergestellt (Tabelle 29).

Es wurden die beiden Varianten mit den hier vergleichsweise extremsten (schwächsten bzw. schärfsten) Konditionierungsbedingungen (30 °C,

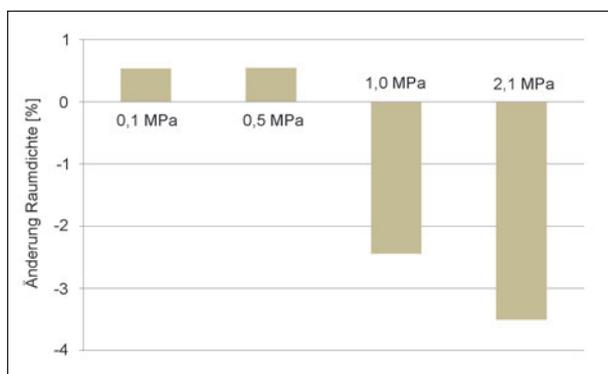


Bild 41: Änderung der Raumdichte des Glasperlen-Asphaltes nach Konditionierung mittels PAV-A; 30 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck

0,1 MPa, 20 h und 30 °C, 2,1 MPa, 20 h) ausgewählt. Um abschätzen zu können, wie weit die Alterung in den Probekörper bei einem praktisch hohlraumfreien Probekörper (Glasperlen-Asphalt) eindringt, wurden zunächst jeweils 0,5 mm jeder Seite der Prismen abgetrennt. Dieser äußere Bereich wurde getrennt von dem inneren, übrigen Bereich des Prismas extrahiert und analysiert.

Im Bild 42 ist der Einfluss des Druckes auf die Bindemittelalterung des Glasperlen-Asphaltes zu erkennen. So kann bei einem Druck von 2,1 MPa ein

Bindemittelsorte: 30/45	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
Original	53,6
nach RTFOT-Alterung	60,6
nach RTFOT- + PAV-Alterung	71,8
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C, 0,1 MPa, 20 h) – innen	55,0
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C, 0,1 MPa, 20 h) – außen	57,0
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C, 2,1 MPa, 20 h) – innen	60,2
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C, 2,1 MPa, 20 h) – außen	63,0

Tab. 29: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – Straßenbaubitumen 30/45

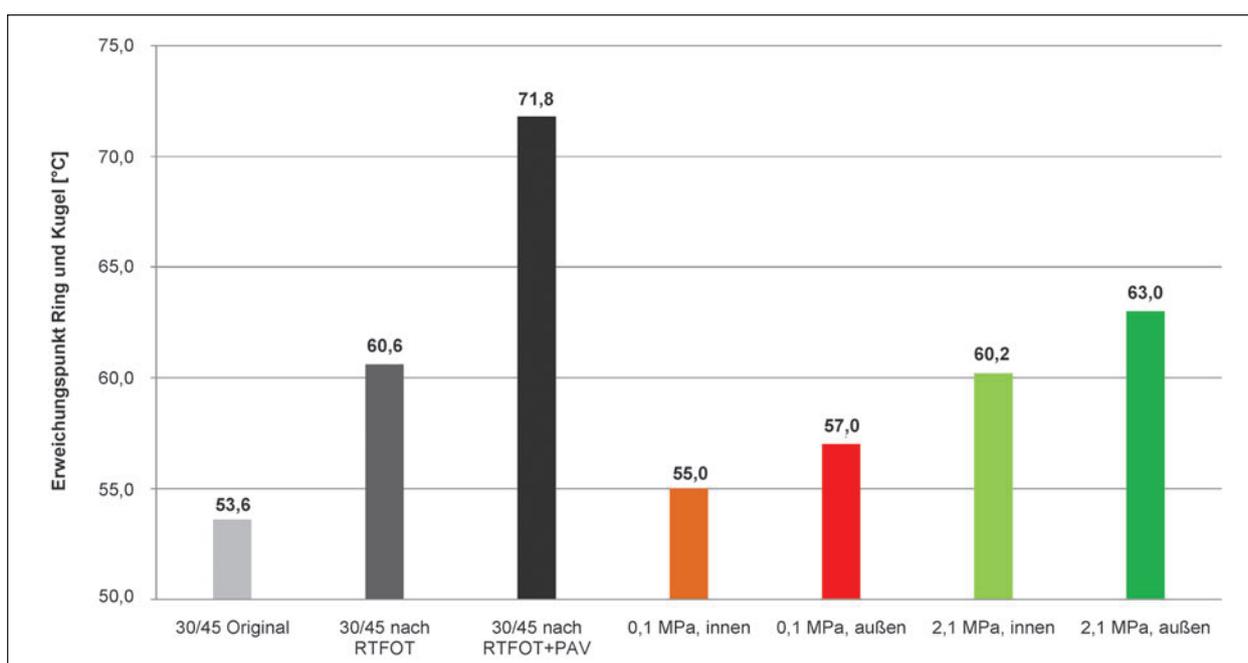


Bild 42: Erweichungspunkte Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem Glasperlen-Asphalt; Konditionierungsbedingungen: 30 °C, 20 h, variierender Druck

höherer Wert für den Erweichungspunkt Ring und Kugel (innen und außen) konstatiert werden als bei einem Druck von 0,1 MPa, bei ansonsten identischen Konditionierungsbedingungen. Zudem wird deutlich, dass bei diesem praktisch hohlraumfreien Glasperlen-Asphaltes das Bindemittel in den äußeren Probekörperbereichen tendenziell mehr gealtert ist als in den inneren Bereichen. Insgesamt lie-

gen die Werte des Erweichungspunktes Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus den prismatischen Probekörpern tendenziell auf dem Niveau des kurzzeitgealterten Frischbindemittels (nach RTFOT-Alterung).

Anhand der Ergebnisse des T-Sweeps im DSR (siehe Bild 43, Tabelle 30 und Tabelle 31) kann für die

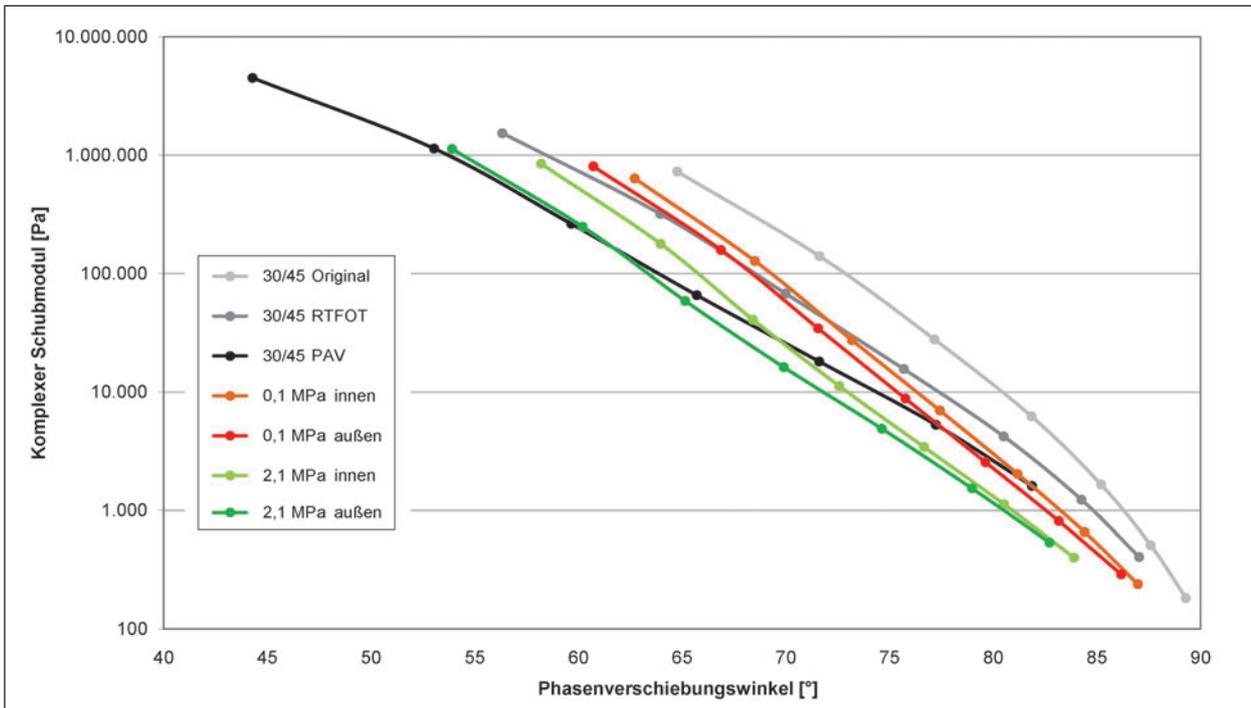


Bild 43: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel des Glasperlen-Asphalt; Konditionierungsbedingungen: 30 °C, 20 h, variierender Druck

Prüftemperatur	Komplexer Schermodul [Pa]						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	726.960	140.176	27.705	6.209	1.649	510	183
nach RTFOT-Alterung	1.535.253	318.771	67.702	15.585	4.213	1.227	405
nach RTFOT- + PAV-Alterung	4.496.051	1.138.097	262.902	65.602	18.054	5.277	1.603
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C; 0,1 MPa, 20 h) – innen	636.454	127.492	27.292	6.970	2.026	658	239
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C; 0,1 MPa, 20 h) – außen	802.909	158.625	34.470	8.773	2.547	812	289
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C; 2,1 MPa, 20 h) – innen	845.083	178.417	40.820	11.208	3.426	1.125	401
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C; 2,1 MPa, 20 h) – außen	1.129.400	248.449	58.794	16.176	4.889	1.529	536

Tab. 30: Komplexer Schermodul DSR – Bindemittel nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C (Glasperlen-Asphalt)

Prüftemperatur	Phasenwinkel [°]						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
Original	64,8	71,6	77,2	81,9	85,2	87,6	89,3
nach RTFOT-Alterung	56,3	64,0	70,0	75,7	80,5	84,3	87,0
nach RTFOT- + PAV-Alterung	44,3	53,0	59,7	65,7	71,6	77,2	81,9
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C; 0,1 MPa, 20 h) – innen	62,7	68,5	73,2	77,4	81,2	84,4	87,0
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C; 0,1 MPa, 20 h) – außen	60,7	66,9	71,6	75,8	79,6	83,2	86,2
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C; 2,1 MPa, 20 h) – innen	58,2	64,0	68,4	72,6	76,7	80,5	83,9
extrahiert aus Glasperlen-Gussasphalt (30 °C; 2,1 MPa, 20 h) – außen	53,9	60,2	65,1	69,9	74,6	79,0	82,7

Tab. 31: Phasenwinkel DSR – Bindemittel nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C (Glasperlen-Asphalt)

untersuchten, konditionierten Varianten eine tendenziell gleiche Reihung wie für die Werte des Erweichungspunktes Ring und Kugel festgestellt werden.

3.3.4 Zwischenfazit Projektphase 3

Aus dieser Projektphase 3 lassen sich drei wesentliche Erkenntnisse ableiten.

Zum einen deuten die Änderungen der Raumdichte durch die Konditionierung darauf hin, dass unter Druckbeanspruchung auch bei einem praktisch hohlraumfreien Asphalt (Glasperlen-Asphaltes) Luft auch noch in die kleinsten Hohlräume im Bindemittel gepresst wird, und somit generell eine Gefügeveränderung/-störung durch die Konditionierung im PAV-A-Verfahren stattfindet. Dieses Phänomen ist auch bei der Langzeitalterung (PAV) von reinem Bindemittel im Druckalterungsbehälter zu beobachten. Hier ist eine Blasenbildung am Ende der Konditionierung auf der Oberfläche der Probe zu beobachten.

Des Weiteren lässt sich erkennen, dass der äußere Bereich der Probekörper stärker beansprucht (konditioniert) wird als der innere Bereich.

Generell lässt sich auch eine zu schwache Konditionierung ableiten, da die Ergebnisse des extrahier-

ten Bindemittels aus den Probekörpern eher auf dem Niveau der Ergebnisse am Bindemittel nach der Kurzzeitalterung liegen. Angestrebt wurde aber eine Simulierung der Langzeitalterung der Probekörper.

3.4 Projektphase 4: Ermittlung geeigneter Konditionierung mit geringem Druck – Variation: Konditionierungsdauer

Um die Gefügeveränderung/-störung so gering wie möglich zu halten wurde die Druckbeanspruchung bei der Konditionierung in der vierten Projektphase noch weiter reduziert. Es wurde versucht, eine (Langzeit-)Alterung durch die Anpassung der Konditionierungsdauer hervorzurufen. Parallel zu den Asphalt-Probekörpern wurden auch Bindemittelproben und loses Asphaltmischgut gleichzeitig konditioniert, um weitere Vergleichswerte zu erhalten.

3.4.1 Untersuchte Varianten

Zur Festlegung möglicher Konditionierungsbedingungen wurden in der vierten Projektphase an Asphalt-Probekörpern der Asphaltvariante AC 8 D

S (mit 50/70; 1. Probe) verschiedene Konditionierungen durchgeführt. Die Druckstufe wurde auf 0,1 MPa reduziert und die Prüftemperatur mit 30 °C konstant gehalten. Die Konditionierungszeit wurde mit 20 Stunden, 40 Stunden, 60 Stunden bzw. 80 Stunden schrittweise verlängert. Im Anschluss an die PAV-A-Alterung wurde das Bindemittel aus den prismatischen Probekörpern extrahiert, zurückgewonnen und der Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt sowie der T-Sweep im dynamischen Scherrheometer (DSR) durchgeführt. Neben den prismatischen Asphaltprobekörpern wurde auch loses Asphaltmischgut unter gleichen Bedingungen konditioniert. Danach wurde ebenso eine Kurzprüfung vom Umfang des Erwei-

chungspunktes Ring und Kugel und des T-Sweeps im DSR am extrahierten und zurückgewonnenen Bindemittel durchgeführt. Zudem wurde auch reines Bindemittel der Sorte 50/70 unter den genannten Bedingungen im PAV-A-Verfahren konditioniert. Auch hier wurden der Erweichungspunkt Ring und Kugel ermittelt und der T-Sweep im DSR durchgeführt.

3.4.2 Bindemittleigenschaften

Tabelle 32 und Bild 44 zeigen die nach der Konditionierung ermittelten Ergebnisse für den Erweichungspunkt Ring und Kugel.

Dauer der PAV-A Konditionierung	Bindemittel: konditioniert	Asphaltmischgut: konditioniert, extrahiert und zurückgewonnen	Asphaltprobekörper: konditioniert, extrahiert und zurückgewonnen
ohne PAV-A	50,6	58,4	60,6
20 Stunden	57,0	54,4	57,0
40 Stunden	56,8	54,2	57,8
60 Stunden	57,0	55,0	58,0
80 Stunden	57,4	57,2	58,4

Tab. 32: Erweichungspunkt Ring und Kugel nach unterschiedlicher Alterungsdauer an verschiedenen Ausgangsstoffen

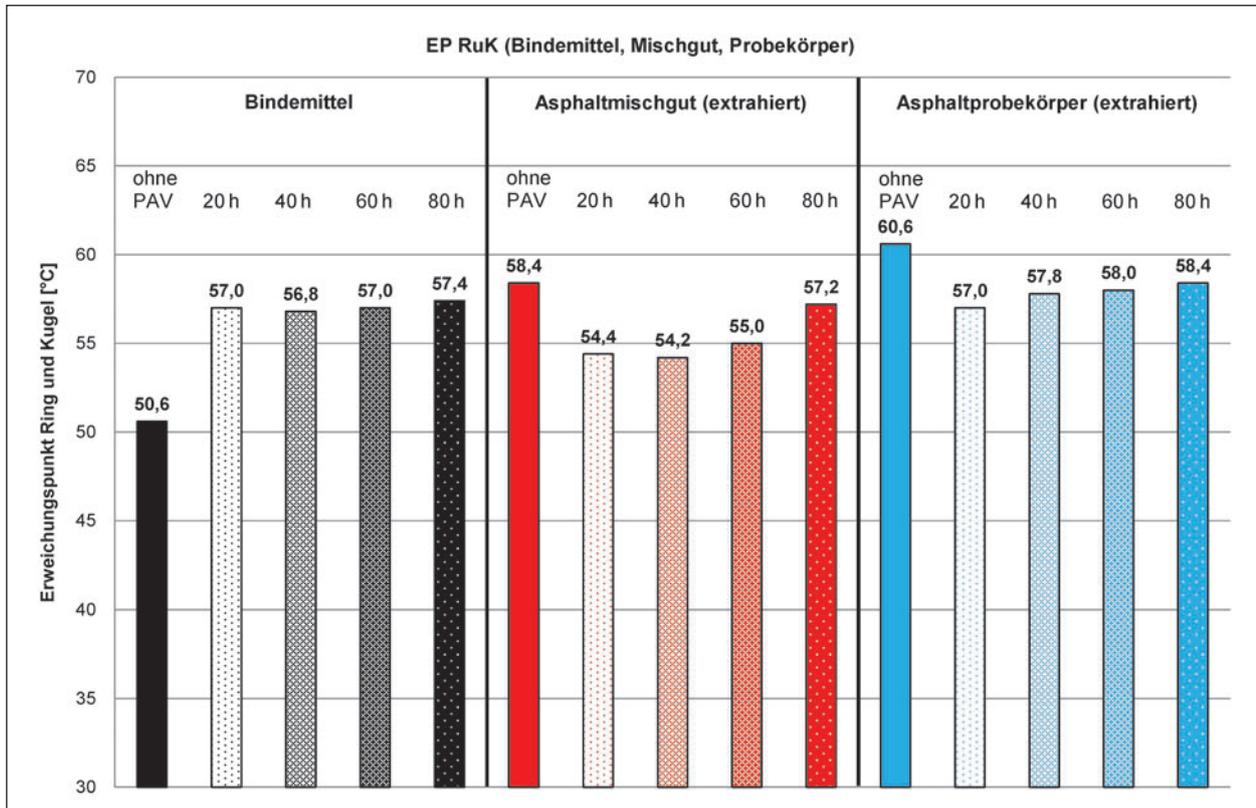


Bild 44: Erweichungspunkt Ring und Kugel nach unterschiedlicher Konditionierungsdauer und an verschiedenen Ausgangsstoffen

In Tabelle 33 und Tabelle 34 sind der komplexe Schermodul und der Phasenwinkel (DSR-Versuch) des konditionierten Bindemittels dargestellt. Bild 45 zeigt grafisch die Ergebnisse des T-Sweeps im dynamischen Scherrheometer für das konditionierte Bindemittel nach den unterschiedlichen Konditionierungsdauern (PAV-A).

Tabelle 35 und Tabelle 36 zeigen den komplexen Schermodul und den Phasenwinkel aus dem Versuch zum Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer am mittels PAV-A-Verfahren beanspruchten Asphaltmischgut. Das Bild 46 zeigt grafisch den komplexen Schermodul und den Phasenwinkel.

PAV-A-Alterung	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
20 Stunden	968.018	197.035	41.078	9.816	2.693	828	287
40 Stunden	983.267	199.248	41.083	9.882	2.702	822	286
60 Stunden	997.140	202.370	41.826	10.043	2.717	825	291
80 Stunden	1.020.826	208.327	43.314	10.391	2.859	868	304

Tab. 33: Komplexer Schermodul DSR – Bindemittel nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa

PAV-A-Alterung	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
20 Stunden	59,4	66,6	72,6	78,0	82,2	85,5	87,8
40 Stunden	59,5	66,6	72,6	78,0	82,2	85,4	87,8
60 Stunden	59,4	66,5	72,5	77,9	82,2	85,4	87,7
80 Stunden	58,9	66,0	72,0	77,4	81,7	85,1	87,5

Tab. 34: Phasenwinkel DSR – Bindemittel nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa

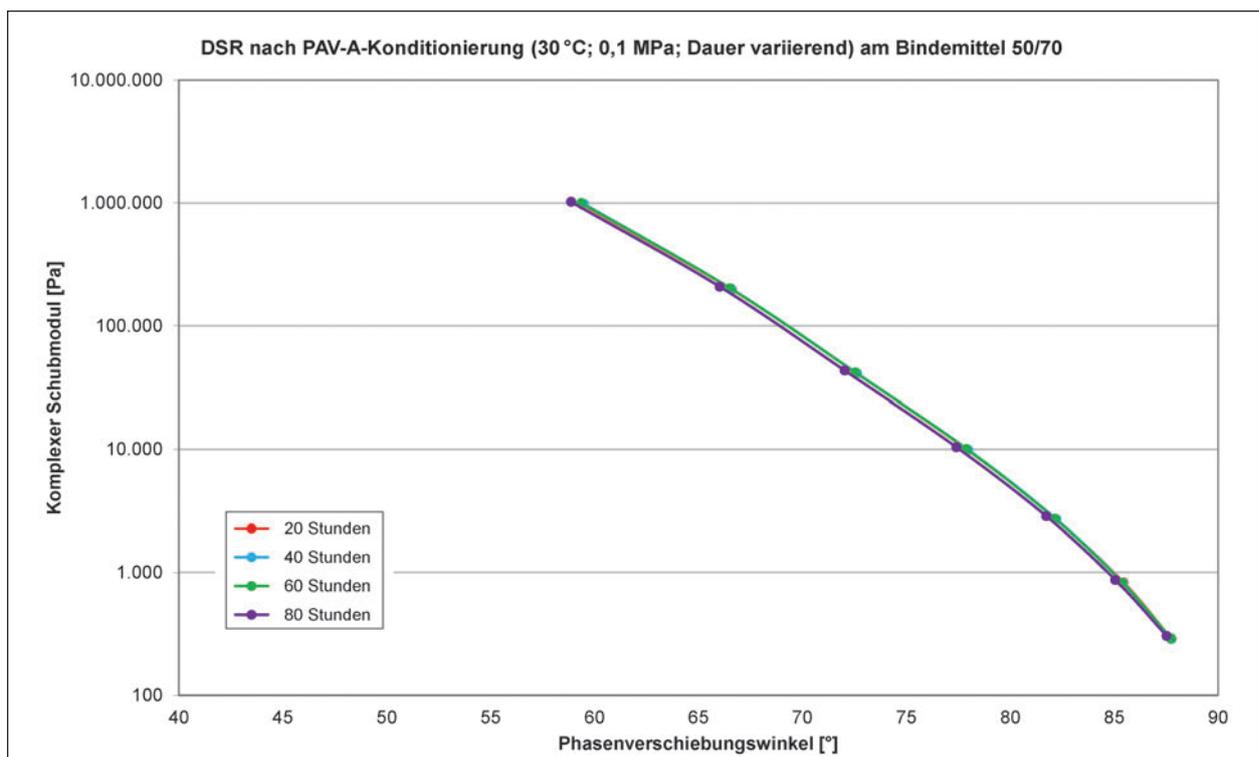


Bild 45: Ergebnisse des T-Sweeps im DSR am Bindemittel nach unterschiedlicher Konditionierungsdauer

PAV-A-Konditionierung	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
20 Stunden	615.662	116.421	23.480	5.666	1.588	507	188
40 Stunden	832.995	156.167	31.033	7.420	2.045	638	229
60 Stunden	902.379	171.872	33.707	7.956	2.141	666	237
80 Stunden	1.037.666	194.230	41.478	10.404	2.908	902	323

Tab. 35: Komplexer Schermodul DSR – extrahiertes Asphaltmischgut nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa

PAV-A-Konditionierung	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
20 Stunden	63,4	70,3	76,0	80,7	84,3	86,9	88,9
40 Stunden	62,1	69,4	75,3	80,2	83,9	86,7	88,6
60 Stunden	61,3	68,8	74,9	79,9	83,7	86,6	88,5
80 Stunden	59,6	66,3	71,3	77,2	82,0	85,4	87,7

Tab. 36: Phasenwinkel DSR – extrahiertes Asphaltmischgut nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa

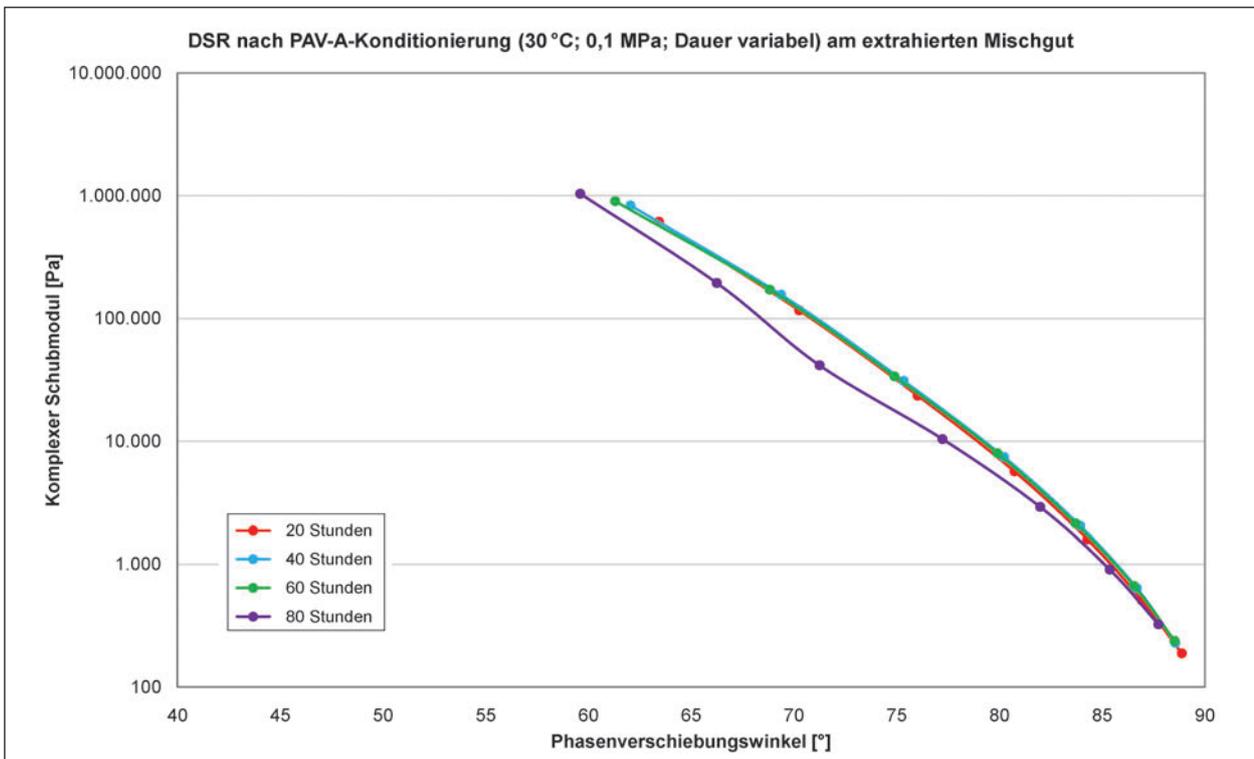


Bild 46: Ergebnisse des T-Sweeps im DSR am extrahierten Asphaltmischgut nach unterschiedlicher Konditionierungsdauer

Für das Bindemittel, das aus konditionierten Asphaltprobekörpern extrahiert und zurückgewonnen wurde, sind der komplexe Schermodul und

der Phasenwinkel in Tabelle 37 und Tabelle 38 angegeben. Bild 47 zeigt dies grafisch.

PAV-A-Konditionierung	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
20 Stunden	942.607	182.910	37.476	9.117	2.524	777	274
40 Stunden	1.243.627	258.771	55.269	13.557	3.728	1.117	380
60 Stunden	1.074.123	217.124	45.539	11.073	3.088	933	326
80 Stunden	1.110.645	224.668	47.090	11.335	3.119	951	330

Tab. 37: Komplexer Schermodul DSR – extrahierte Asphaltprobekörper nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa

PAV-A-Konditionierung	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
20 Stunden	59,4	66,8	73,0	78,3	82,5	85,7	88,0
40 Stunden	56,1	63,6	69,8	75,6	80,4	84,2	86,9
60 Stunden	57,7	65,1	71,2	76,9	81,4	84,9	87,4
80 Stunden	57,8	65,2	71,4	76,9	81,5	84,9	87,5

Tab. 38: Phasenwinkel DSR – extrahierte Asphaltprobekörper nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa

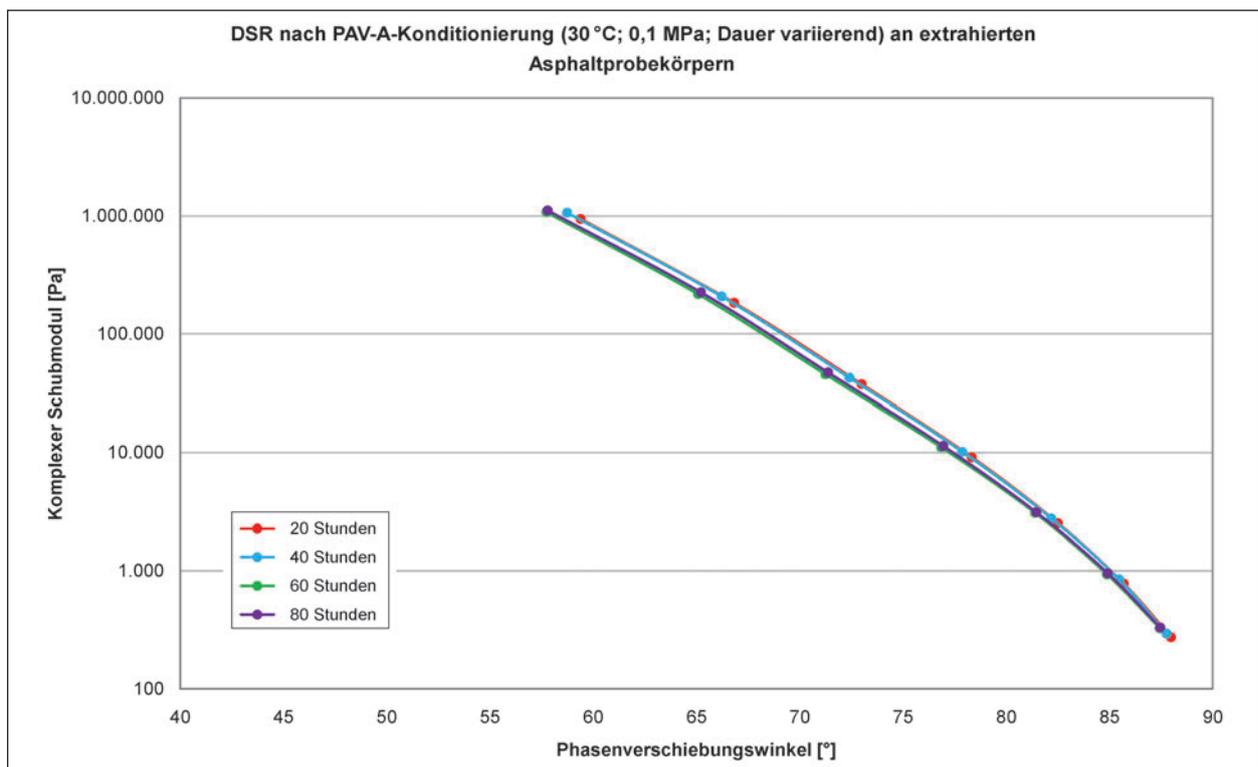


Bild 47: Ergebnisse des T-Sweeps im DSR an extrahierten Asphaltprobekörpern nach unterschiedlicher Konditionierungsdauer

3.4.3 Zwischenfazit Projektphase 4

Mit den in der vierten Projektphase gewählten Konditionierungsbedingungen (Druck: 0,1 MPa, Temperatur: 30 °C) und der Variation der Konditionierungsdauer (20 bis 80 Stunden) kann anhand der er-

mittelten Bindemittelkenndaten konstatiert werden, dass eine Langzeitalterung des Bindemittels, weder an den Asphalt-Probekörpern und auch nicht am losen Asphaltmischgut oder reinen Bindemittel er-wirkt wird.

3.5 Projektphase 5: Ermittlung geeigneter Konditionierung mit hohem Druck – Variation: Konditionierungsdauer sowie Art/Geschwindigkeit des Druckablassens

In der fünften und letzten Projektphase wurde nochmals systematisch Versuche mit verschiedenen Konditionierungsbedingungen durchgeführt, um zu einer geeigneten Konditionierung mit dem Ergebnis einer (Langzeit-)Alterung der Probekörper zu gelangen. Um eine Gefügestörung zu minimieren wurde bei den folgenden Untersuchungen der Druck teilweise langsamer, stufenweise am Ende der Konditionierungsphase abgelassen.

3.5.1 Untersuchte Varianten

Es wurden zwei unterschiedliche Asphaltbetone AC 8 D S (Straßenbaubitumen 50/70, Gesteinskörnung: Basalt) geprüft. Der Unterschied der beiden Asphalte liegt im Hohlraumgehalt. Die erste Variante wurde sehr dicht, mit einem Hohlraumgehalt von 3,1 Vol.-% konzipiert, die zweite Variante mit einem Hohlraumgehalt von 8,3 Vol.-% hergestellt.

Im Rahmen der fünften Projektphase wurden zunächst bei einer Konditionierungsdauer von 20 Stunden und einem Druck von 2,1 MPa jeweils bei 30 und 60 °C Probekörper der Variante AC 8 D S (dicht) konditioniert, um den Einfluss der Druckablass-Methode (langsam, stufenweises Druckablassen) bei unterschiedlichen Temperaturen zu ermitteln.

Beim dem langsamen, stufenweisen Ablassen des Druckes wurde der Druck in einer Geschwindigkeit mit 0,1 MPa/h abgelassen. Hierbei wurde die Konditionierungstemperatur konstant gehalten. Bei dieser Druckablass-Methode langsam, stufenweise verlängerte sich die Konditionierungsdauer um 21 Stunden. Die normale Regelung des Ablassens des Druckes gemäß DIN EN 14769 wird mit einer Geschwindigkeit von 0,2 MPa/min durchgeführt. Die Konditionierungstemperatur wird während dieses Vorganges nicht aufrechterhalten.

Weiter wurde bei einer Temperatur von 60 °C und einem Druck von 2,1 MPa die Konditionierungsdauer noch einmal deutlich erhöht. Es wurden neben den Versuchen mit Konditionierungsdauern von 20 Stunden noch Versuche mit Konditionierungsdauern von 80 Stunden und 160 Stunden durchgeführt,

wobei jeweils noch variiert wurde zwischen der langsamen, stufenweisen Methode den Druck abzulassen und dem normalen Vorgehen zum Druckablassen (0,2 MPa/min).

An den konditionierten Asphalten wurden vorrangig Bindemittelkennwerte am rückgewonnenen, extrahierten Bindemittel, wie der Erweichungspunkt Ring und Kugel und das Verformungsverhalten im dynamischen Scherrheometer bestimmt.

Es wurde, wie auch schon in der Projektphase 3 bei dem Glasperlenasphalt, unterschieden zwischen innerem und äußerem Bereich der konditionierten Probekörper.

Nach Konditionierung von jeweils acht Probekörpern wurden an drei Probekörpern die äußeren 0,5 cm (ohne Unterseite) abgetrennt und zu einer Mischprobe vermengt und extrahiert, um ausreichend Material für die Bindemittelprüfungen zu erhalten. Die inneren Bereiche, die von den drei Probekörpern verblieben, wurden ebenfalls zu einer Mischprobe vermengt und extrahiert. Ein vierter Probekörper wurde im Ganzen extrahiert und das rückgewonnene Bindemittel untersucht.

Zudem wurde an den Probekörpern vor und nach Konditionierung die Raumdichte bestimmt, um mögliche Gefügeveränderung zu erfassen.

Ergänzend wurden Abkühlversuche an den jeweiligen Varianten durchgeführt, wobei basierend auf den bisherigen Ergebnissen aus den Projektphasen 1 und 2, wo Gefügestörungen im Asphalt durch die Konditionierung festgestellt wurden und der Einfluss der Gefügestörungen maßgeblich den Verlauf der Abkühlkurven beeinflusst und nicht die Bindemittelalterung, sollen diese Ergebnisse an dieser Stelle überwiegend informativen Charakter haben.

3.5.2 Asphalteigenschaften

In Bild 48 ist der Zusammenhang zwischen der Änderung der Raumdichte (= Gefügestörung) und der Konditionierungstemperatur sowie der Geschwindigkeit des Druckablassens dargestellt. Umso höher die Konditionierungstemperatur, desto größer ist die Gefügestörung, gemessen an der Raumdichteabnahme. Ebenso lässt sich eine stärkere Gefügestörung bei der normalen Methode den Druck abzulassen (schnell) gegenüber der langsamen, schrittweisen Methode konstatieren.

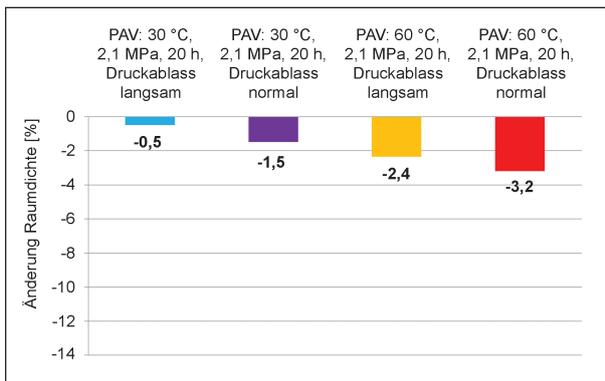


Bild 48: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper bei einer Konditionierung von 2,1 MPa und 20 Stunden unter Variation der Temperatur und der Art des Druckablassens

Variante	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
ohne PAV	-26,0	4,511
nach PAV-A:		
30 °C, Druckablass langsam	-25,0	4,068
30 °C, Druckablass normal	-24,1	3,830
60 °C, Druckablass langsam	-24,5	3,797
60 °C, Druckablass normal	-24,9	3,507

Tab. 39: PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und Art des Druckablassens – Variante AC 8 D S (dicht)

In Tabelle 39 und dem Bild 49 sind die Ergebnisse der Abkühlversuche an den Probekörpern der Varianten AC 8 D S (dicht), welche mit einem Druck von 2,1 MPa über 20 Stunden unter Variation der Prüftemperatur konditioniert wurden dargestellt.

Aus Bild 49 kann entnommen werden dass der Verlauf der Abkühlkurven einhergehend mit zunehmender Gefügestörung (Abnahme der Raumdichte, vgl. Bild 48) tendenziell flacher ist, was zunächst bedeutet, dass weniger kryogene Zugspannungen aufgebaut werden. Eine mit abnehmender Temperatur eher langsame Zunahme der kryogenen Zugspannungen weist in der Regel auf ein gutes, hohes Relaxationsvermögens des Bindemittels und damit auf eine tendenziell bessere (Kälte-)Flexibilität des Asphalttes hin. In diesem Fall lässt sich das beobachtete Verhalten aber eher auf Gefügestörungen im Asphaltte zurückführen, da die Ergebnisse zeigen, dass je größer die Änderung der Raumdichte ist, desto weniger kryogene Zugspannungen aufgebaut wurden.

In Tabelle 40 sowie Bild 50, sind die Ergebnisse der Abkühlversuche der Asphaltvariante AC 8 D S (dicht) bei einer Konditionierungstemperatur von 60 °C, einem Konditionierungsdruck von 2,1 MPa, verschiedenen Konditionierungsdauern (20 h, 80 h, 160 h) sowie jeweils mit langsamen, stufenweisem Druckablass und der normalen Geschwindigkeit des Druckablassens dargestellt.

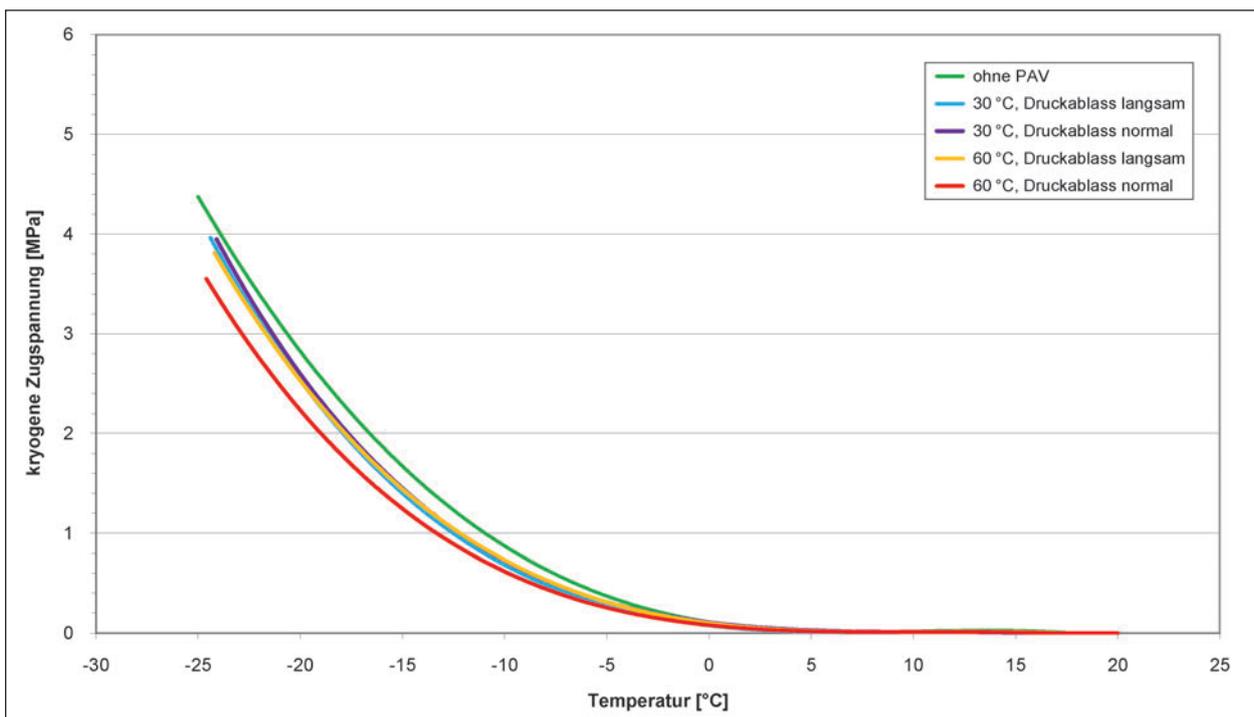


Bild 49: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht), 2,1 MPa, 20 h, Variation: Temperatur, Art des Druckablassens

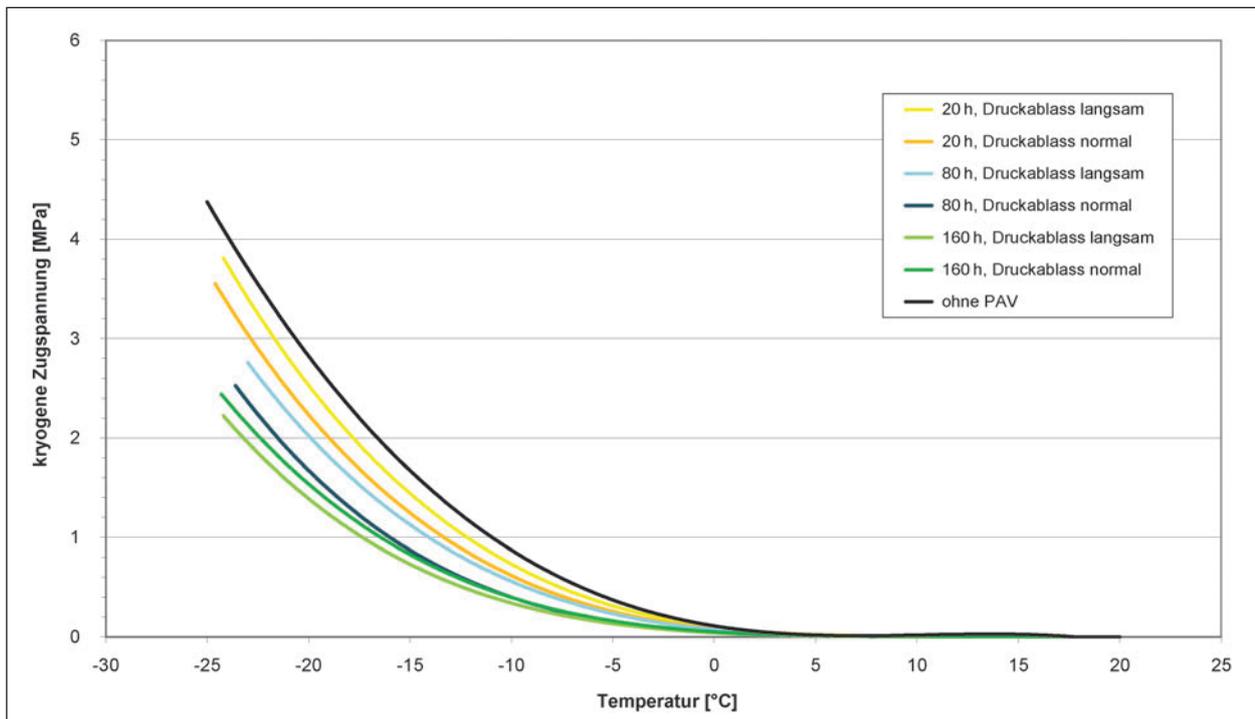


Bild 50: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht), 2,1 MPa, 60 °C; Variation: Konditionierungsdauer, Art des Druckablassens

Variante	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
ohne PAV	-26,0	4,511
nach PAV-A:		
20 h, Druckablass langsam	-24,5	3,797
20 h, Druckablass normal	-24,9	3,507
80 h, Druckablass langsam	-23,4	2,724
80 h, Druckablass normal	-24,3	2,615
160 h, Druckablass langsam	-24,7	2,246
160 h, Druckablass normal	-24,7	2,408

Tab. 40: PAV-A – Variation von Konditionierungsdauer und Art des Druckablassens – Variante AC 8 D S (dicht)

Auch bei dieser Variation der Konditionierungsbedingungen kann ein Zusammenhang zwischen Konditionierungsdauer und dem Verlauf der Abkühlkurven (kryogenen Zugspannungen) konstatiert werden. Je länger die Konditionierungsdauer der untersuchten Probekörper war, desto langsamer werden kryogene Zugspannungen im Abkühlversuch aufgebaut. Zudem kann erkannt werden, dass bei den Varianten, bei denen nach Abschluss der Konditionierungsdauer der Druck langsam, stufenweise abgebaut wurde, bei gleicher Konditionierungsdauer tendenziell höhere kryogene Zugspannungen aufgebaut werden als bei den Varianten mit der Methode des normalen Druckablassens.

Variante	Bruchtemperatur [°C]	Bruchspannung [MPa]
ohne PAV	-25,0	3,533
nach PAV-A:		
20 h, Druckablass langsam	-25,6	3,080
20 h, Druckablass normal	-28,6	1,940
80 h, Druckablass langsam	-25,1	2,714
80 h, Druckablass normal	-24,9	2,073
160 h, Druckablass langsam	-22,7	2,867
160 h, Druckablass normal	-24,2	1,734

Tab. 41: PAV-A – Variation von Konditionierungsdauer und Geschwindigkeit des Druckablassens – Variante AC 8 D S (hohlraumreich)

Ein Einfluss auf die Bruchtemperatur, der auf Unterschiede der Konditionierungsbedingungen zurückgeht, kann nicht erkannt werden.

In Tabelle 41 und dem Bild 51 sind die Ergebnisse der Abkühlversuche der Asphaltvariante AC 8 D S (hohlraumreich) bei einer Konditionierungstemperatur von 60 °C, einem Konditionierungsdruck von 2,1 MPa, verschiedenen Konditionierungsdauern (20 h, 80 h, 160 h) sowie jeweils mit langsamen, stufenweisem Druckablass und der normalen Geschwindigkeit des Druckablassens dargestellt.

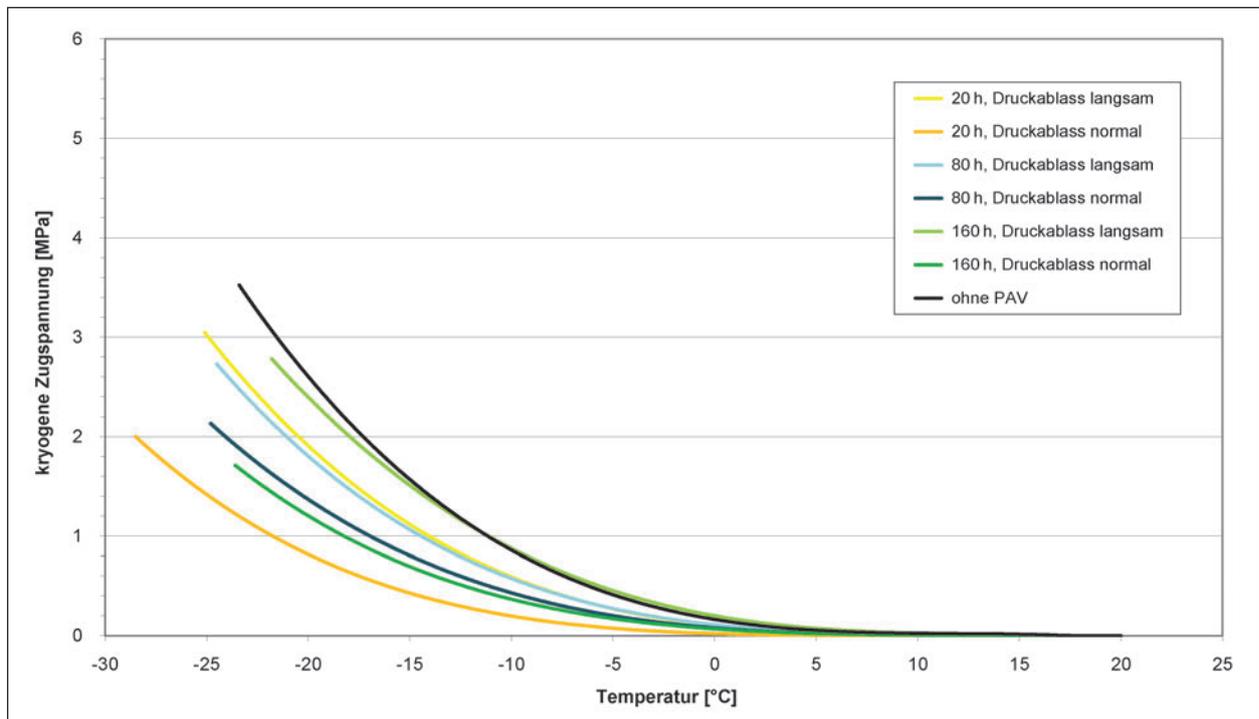


Bild 51: Abkühlversuch AC 8 D S (hohlraumreich), 2,1 MPa, 60 °C; Variation: Konditionierungsdauer, Art des Druckablassens

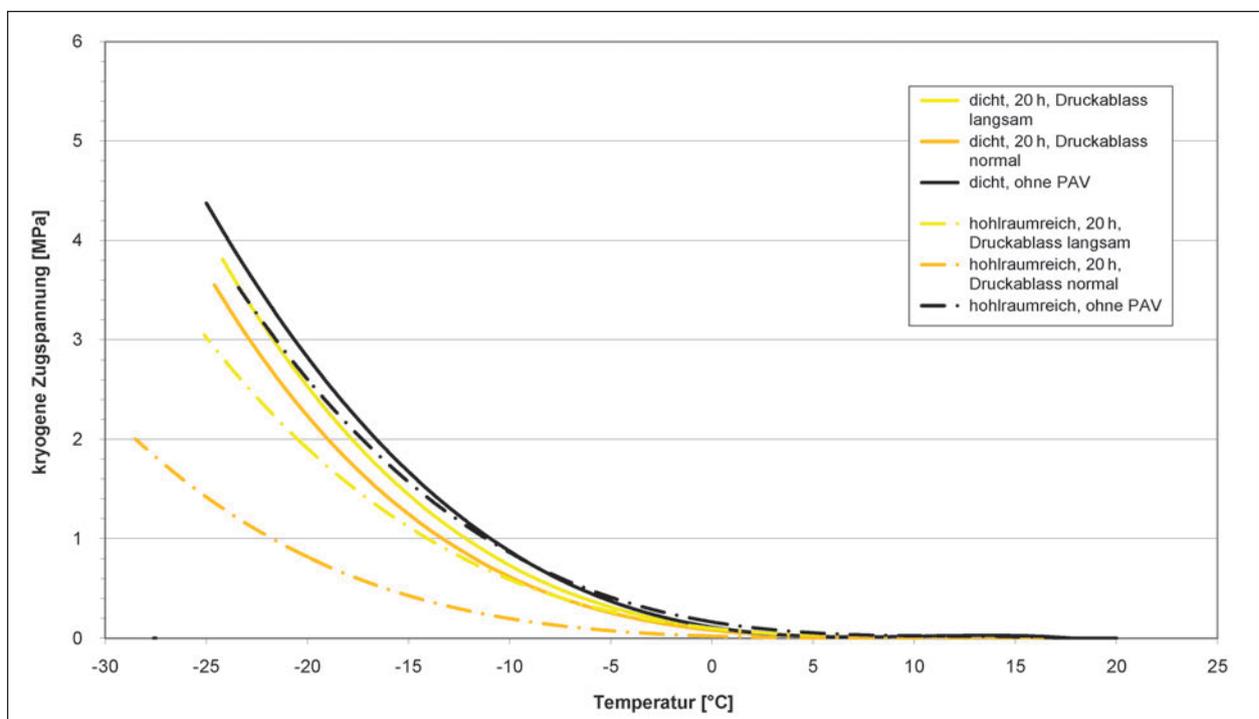


Bild 52: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht und hohlraumreich), 2,1 MPa, 60 °C, 20 Stunden; Variation: Art des Druckablassens

Bei der hohlraumreichen Variante des AC 8 D S ist keine Systematik in den Ergebnissen der Abkühlversuche zu erkennen.

Beim Vergleich der dichten und der hohlraumreichen Asphaltbetonvariante (Bild 52 bis Bild 54) zeigt

sich, dass bei den hohlraumreichen Varianten immer geringere kryogene Zugspannungen ermittelt wurden als bei der dichten Asphaltbetonvariante. Eine Ausnahme stellt die hohlraumreiche Variante nach 160 Stunden Konditionierungsdauer und langsamen Druckablassen dar, hier können höhere

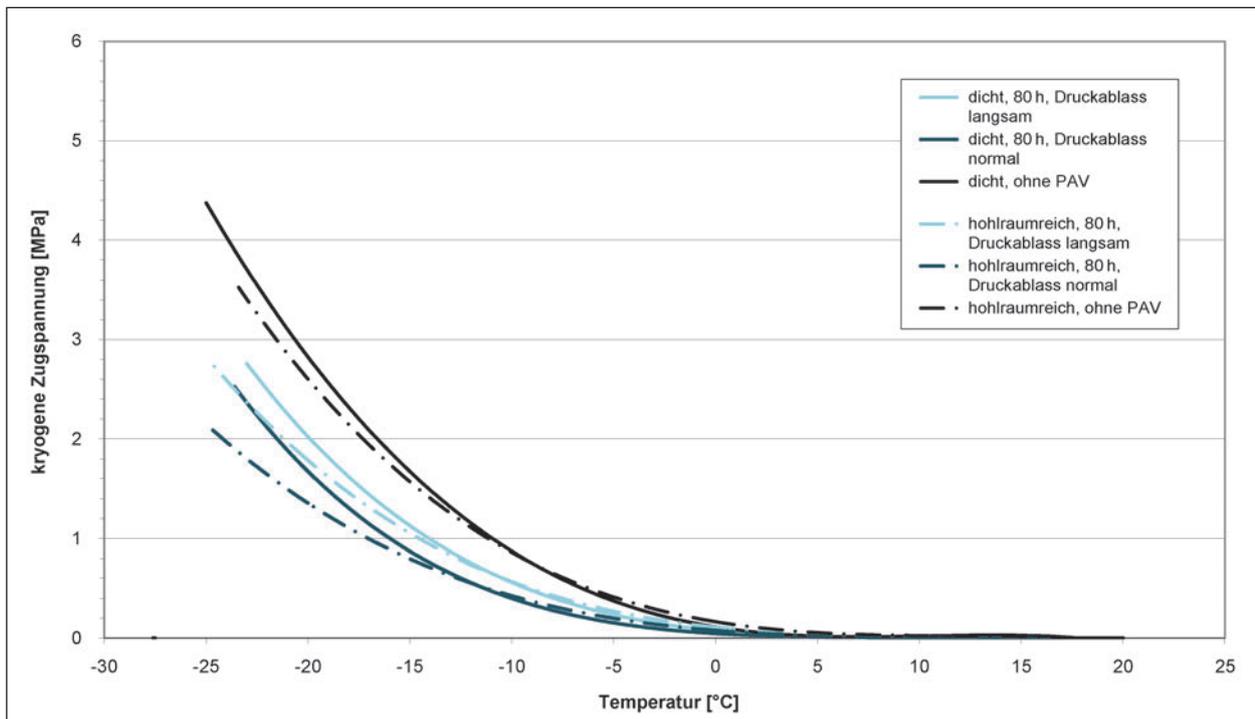


Bild 53: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht und hohlraumreich), 2,1 MPa, 60 °C, 80 Stunden; Variation: Art des Druckablassens

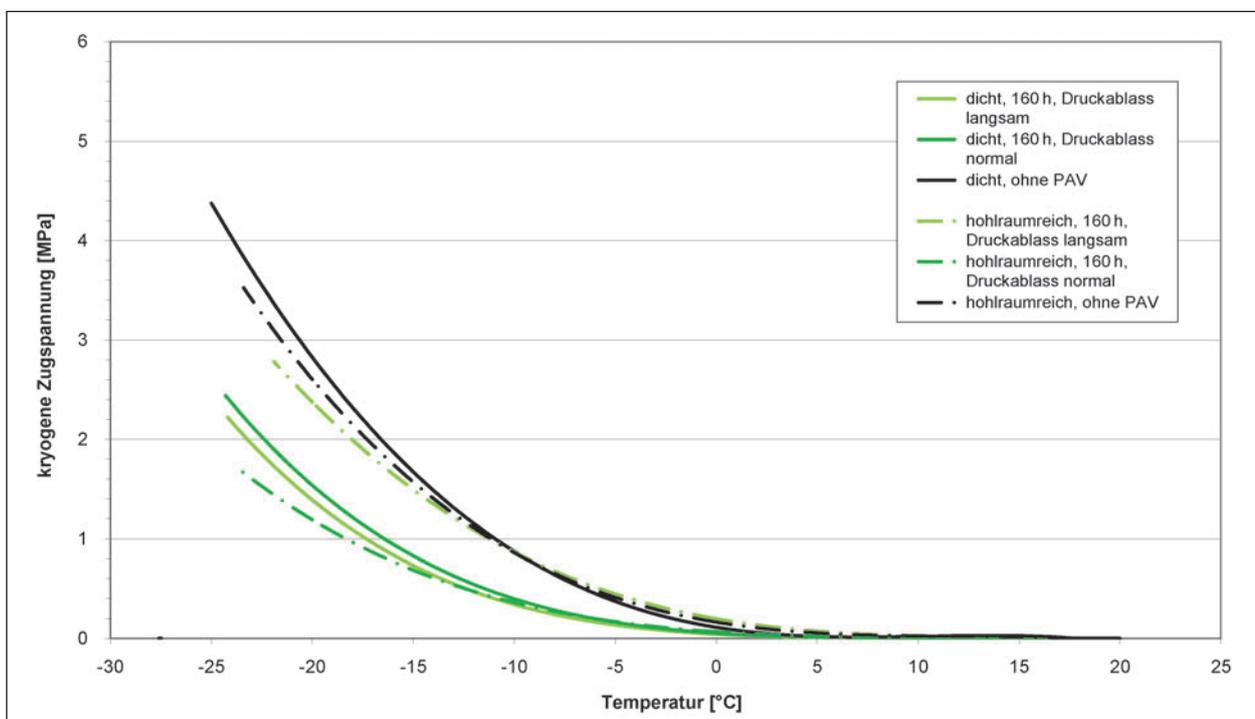


Bild 54: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht und hohlraumreich), 2,1 MPa, 60 °C, 160 Stunden; Variation: Art des Druckablassens

Werte für die kryogenen Zugspannungen konstantiert werden. Die im Folgenden dargestellten mittleren Raumdichten für unterschiedlich konditionierten Varianten (Probekörper) basieren jeweils auf acht Einzelwerten.

Anhand der Grafiken (Bild 55 bis Bild 59) lässt sich ein Zusammenhang zwischen Konditionierungsdauer und der Gefügestörung/-veränderung (Raumdichteabnahme) ablesen. Mit zunehmender Konditionierungsdauer nimmt die Raumdichte am Probekörper (Gefügestörung) weiter ab.

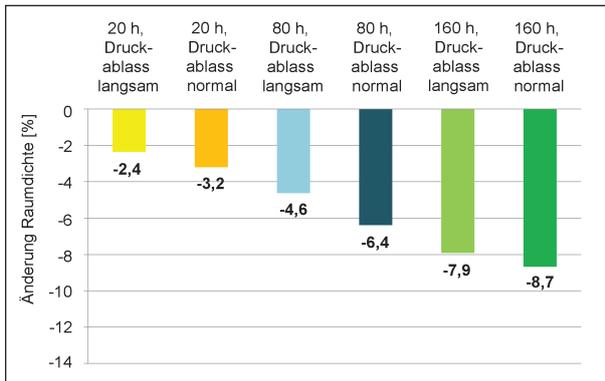


Bild 55: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (dicht) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa und 60 °C unter Variation der Konditionierungsdauer und der Art des Druckablassens

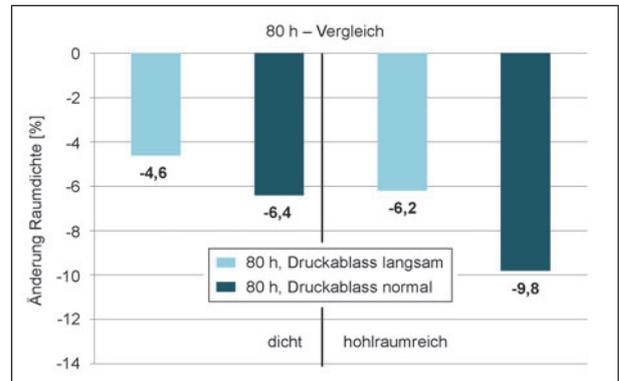


Bild 58: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (dicht; hohlraumreich) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa, 60 °C und 80 Stunden unter Variation der Art des Druckablassens

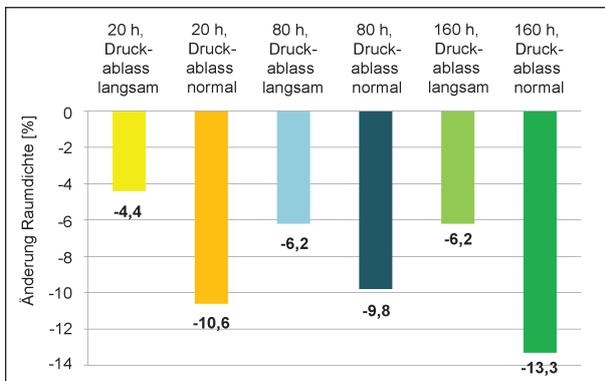


Bild 56: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (hohlraumreich) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa und 60 °C unter Variation der Konditionierungsdauer und der Art des Druckablassens

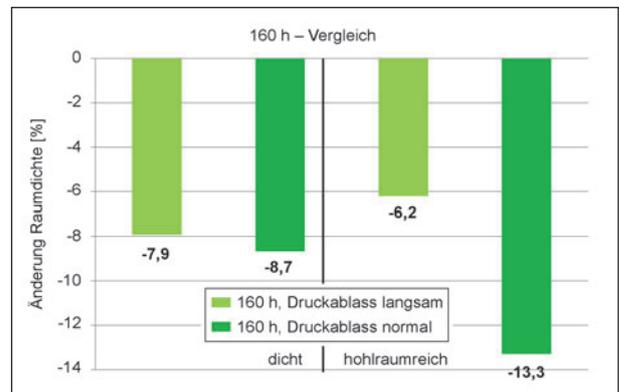


Bild 59: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (dicht; hohlraumreich) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa, 60 °C und 160 Stunden unter Variation der Art des Druckablassens

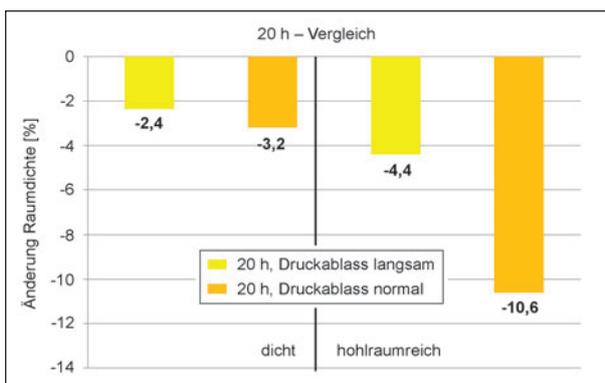


Bild 57: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (dicht; hohlraumreich) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa, 60 °C und 20 Stunden unter Variation der Art des Druckablassens

Der Einfluss der Geschwindigkeit des Druckablassens ist größer bei der hohlraumreichen Asphaltbetonvariante als bei der dichten Variante, was an der Differenz der Raumdichten zwischen den bei-

den Methoden des Druckablassens bei gleicher Konditionierungsdauer erkennbar ist.

Zudem ist die Abnahme der Raumdichte an den Probekörpern bei der hohlraumreichen Asphaltbetonvariante grundsätzlich höher als bei der dichten Variante, was auf eine höhere Empfindlichkeit auf die Druckbeanspruchung hindeutet. Eine Ausnahme zeigt auch hier die hohlraumreiche Asphaltbetonvariante, konditioniert bei 2,1 MPa, 60 °C und 160 Stunden, mit langsamer, stufenweiser Methode des Druckablassens.

3.5.3 Bindemittleigenschaften

Zur Ermittlung des Einflusses der Konditionierungstemperatur sowie der Art und Geschwindigkeit des Druckablassens auf die Bindemittelalterung wurde für den Asphaltbeton AC 8 D S (dicht) mit Straßenbaubitumen der Sorte 50/70 getrennt nach

Bindemittelsorte: 50/70 (1. Probe)	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
50/70 (aus AC 8 D S (dicht) extrahiert)	58,6
50/70 (RTFOT)	59,0
50/70 (RTFOT + PAV)	72,6

Tab. 42: Erweichungspunkt Ring und Kugel –
Straßenbaubitumen 50/70

Bindemittelsorte: 50/70 (1. Probe)	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]		
	innen	außen	gesamt
Variable Konditionierungs- bedingungen			
PAV-A: 30 °C, Druckablass langsam	56,8	60,4	61,8
PAV-A: 30 °C, Druckablass normal	57,0	61,4	59,6
PAV-A: 60 °C, Druckablass langsam	57,8	65,0	63,0
PAV-A: 60 °C, Druckablass normal	57,8	63,4	61,2

Tab. 43: Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten
Bindemittel aus dem Asphaltbeton AC 8 D S (dicht) –
Konditioniert für 20 h bei 2,1 MPa

innerem und äußerem Bereich der konditionierten prismatischen Probekörpern bei gleichbleibender Konditionierungsdauer von 20 h und einem Konditionierungsdruck von 2,1 MPa am rückgewonnenen Bindemittel der Erweichungspunkt Ring und Kugel ermittelt (siehe Tabelle 42 sowie Bild 60).

Die Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem inneren Bereich der konditionierten Probekörper erreichen unabhängig von Konditionierungstemperatur und Art/Geschwindigkeit des Druckablassens zwischen 56,8 °C und 57,8 °C, womit die Streuung der Werte innerhalb der Prüftoleranz liegt. Der Wert für den Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel des Probekörpers ohne Konditionierung mittels PAV-A liegt bei 58,6 °C. Die Werte liegen auf einem ähnlichen Niveau wie auch das reine 50/70 nach Kurzzeitalterung (RTFOT), siehe auch Tabelle 43. Es lässt sich erkennen, dass im inneren Bereich der Probekörper keine Alterung des Bindemittels stattfindet.

Die Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem äußeren Bereich hingegen erreichen 60,4 °C bis 65,0 °C. Tendenziell liegen die Werte für den Erweichungs-

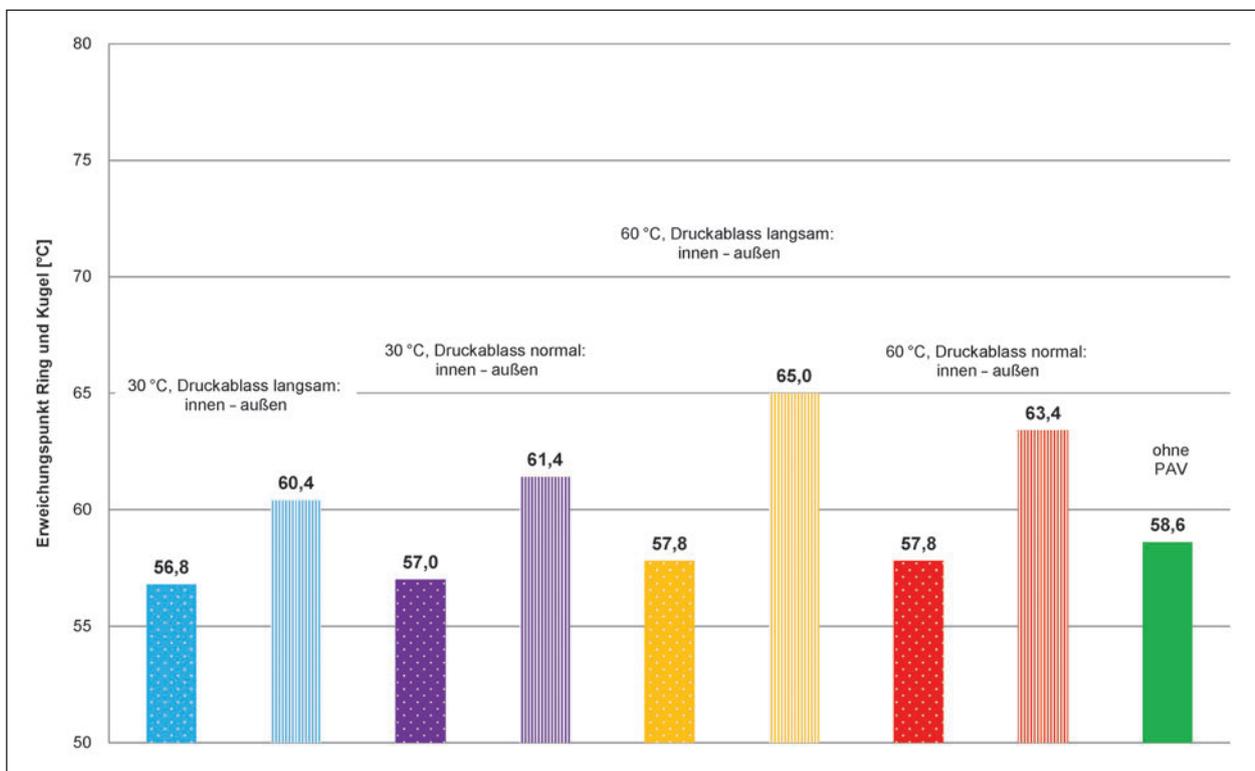


Bild 60: Erweichungspunkt Ring und Kugel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (dicht) bei Konditionierungsbedingungen von 30 °C bzw. 60 °C, 2,1 MPa, 20 h und Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

punkt Ring und Kugel bei einer Konditionierungstemperatur von 60 °C höher als bei einer Konditionierungstemperatur von 30 °C. Ebenso lassen sich bei den Varianten mit einer langsameren Geschwindigkeit des Druckablassens höhere Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel konstatieren als bei den Varianten mit normaler Geschwindigkeit des Druckablassens.

In Bild 61 sind die Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel eines gesamten Asphaltprismas dargestellt. Anhand dieser Ergebnisse wird deutlich, dass hier durch die Konditionierung keine Langzeitalterung des Bindemittels erwirkt wird.

In Tabelle 44 sowie Bild 62 und Bild 63 sind die Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel des Asphaltbetons AC 8 D S (dicht) bei einer Konditionierungstemperatur von 60 °C, einem Konditionierungsdruck von 2,1 MPa sowie bei verschiedenen Konditionierungsdauern (20 h, 80 h, 160 h) und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen dargestellt.

Eine Alterung des Bindemittels im inneren Bereich der Probekörper ist durch die Konditionierung, unabhängig von Konditionierungsdauer und der Art/Geschwindigkeit des Druckablassens nicht zu er-

kennen. Die Ergebnisse der konditionierten Varianten liegen alle auf dem Niveau des Wertes für den Erweichungspunkt Ring und Kugel des extrahierten Bindemittels aus dem nicht konditionierten Probekörper (ohne PAV-A).

Für die äußeren Bereiche der Probekörper wurde eine tendenzielle Erhöhung der Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel festgestellt. Zu-

Bindemittelsorte: 50/70 (1. Probe)	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]		
	innen	außen	gesamt
20 Stunden, Druckablass langsam	57,8	65,0	63,0
20 Stunden, Druckablass normal	57,8	63,4	61,2
80 Stunden, Druckablass langsam	58,0	63,2	58,8
80 Stunden, Druckablass normal	56,2	60,4	56,6
160 Stunden, Druckablass langsam	58,4	70,2	63,2
160 Stunden, Druckablass normal	57,4	66,2	62,8

Tab. 44: Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem Asphaltbeton AC 8 D S (dicht) – Konditioniert bei 60 °C und 2,1 MPa

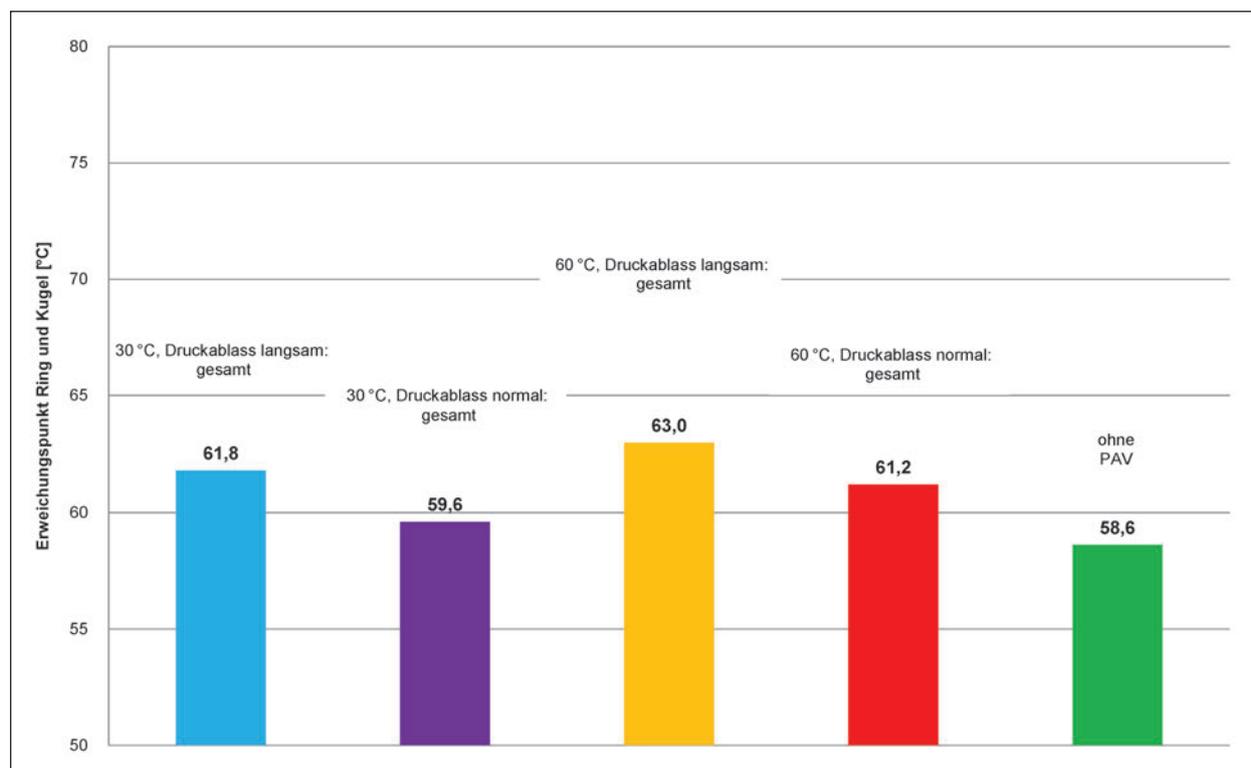


Bild 61: Erweichungspunkt Ring und Kugel (gesamt) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (dicht) bei Konditionierungsbedingungen von 30 °C bzw. 60 °C, 2,1 MPa, 20 h und Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

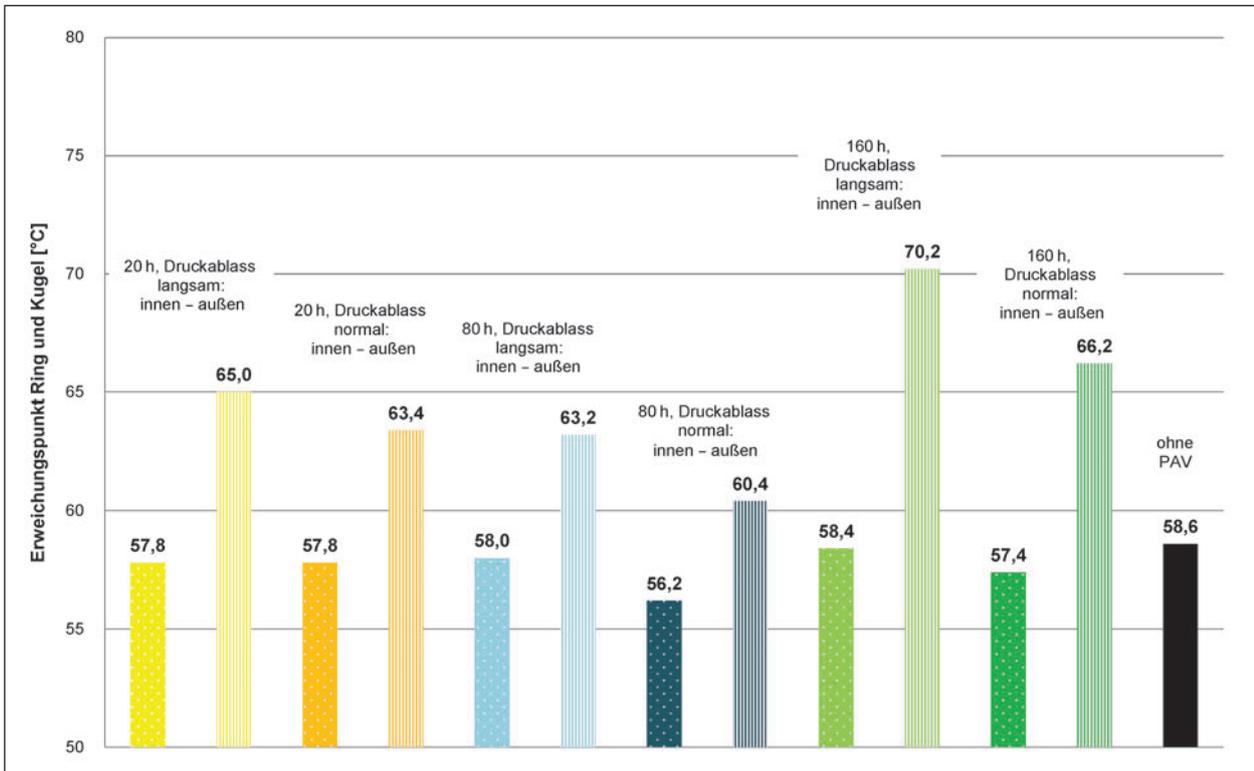


Bild 62: Erweichungspunkt Ring und Kugel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (dicht) bei 60 °C, 2,1 MPa und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens sowie der Konditionierungsdauer

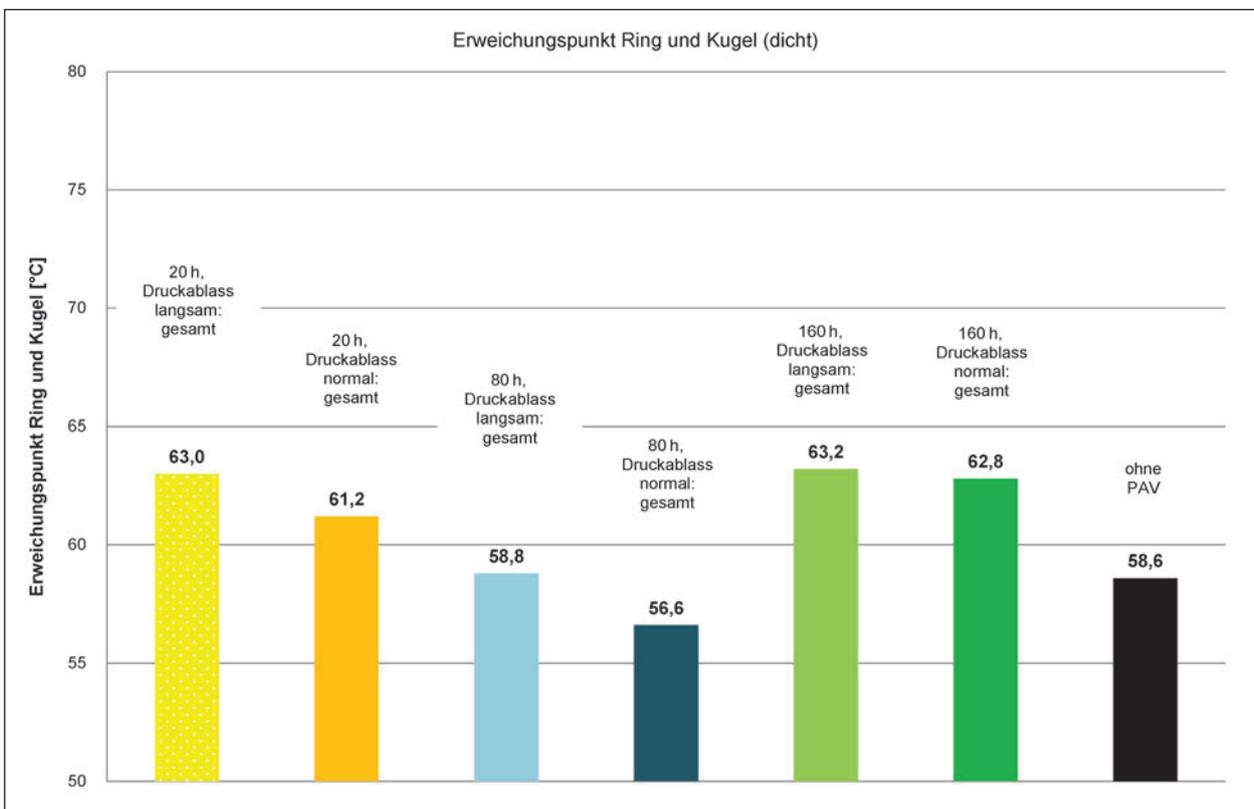


Bild 63: Erweichungspunkt Ring und Kugel (gesamt) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (dicht) bei 60 °C, 2,1 MPa und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens sowie der Konditionierungsdauer

dem kann konstatiert werden, dass bei den Varianten mit der langsameren Methode des Druckablassens eine stärkerer Alterung des Bindemittels eintritt, was sich durch die Verlängerung der Konditionierung um 21 h erklären lässt. Die Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel für die Konditionierungsdauer von 20 und 80 h liegen auf einem Niveau, wobei die Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel nach einer Konditionierungsdauer von 160 h nochmals ansteigen.

In dem Bild 63 sind ergänzend die Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel eines gesamten Asphaltprismas dargestellt.

Die Ergebnisse des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels aus den Untersuchungen im dynamischen Scherrheometer sind in der folgenden Tabelle 45 und Tabelle 46 sowie in dem Bild 64 und Bild 65 für das extrahierten Bindemittel des Asphaltbetons AC 8 D S (dicht) bei einer Konditionierungstemperatur von 60 °C, einem Konditionierungsdruck von 2,1 MPa sowie bei verschiedenen

Konditionierungsdauern (20 h, 80 h, 160 h) und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen dargestellt.

Auch anhand der Ergebnisse des T-Sweeps im DSR zeigt sich eine stärkere Beanspruchung des Bindemittels in den äußeren Bereichen der Probekörper als in den inneren Bereichen.

Ergänzend sind für das extrahierte Bindemittel eines gesamten Asphaltprismas die Ergebnisse aus dem T-Sweep im dynamischen Scherrheometer in Tabelle 47 und Tabelle 48 sowie in Bild 65 dargestellt.

Tabelle 49 und Tabelle 50 sowie dem Bild 66 und Bild 67 sind die Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel, ermittelt am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (hohlraumreich), zu entnehmen. Zur Einordnung der Größenordnung der Werte sind in Tabelle 49 für die Nullvariante (extrahiertes Bindemittel aus AC 8 D S (hohlraumreich)) für das reine Bindemittel nach RTFOT-sowie nach RTFOT- + PAV-Alterung die

PAV-A-Konditionierung	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
ohne PAV	1.084.091	212.371	42.116	9.755	2.640	797	272
20 Stunden, langsam, innen	1.102.633	198.026	40.276	9.381	2.511	770	269
20 Stunden, langsam, außen	2.224.628	473.685	104.017	24.754	6.746	1.896	603
20 Stunden, normal, innen	1.049.931	202.208	39.995	9.096	2.455	742	259
20 Stunden, normal, außen	2.050.849	422.820	90.589	21.112	5.583	1.597	519
80 Stunden, langsam, innen	1.101.051	215.208	42.782	9.935	2.727	823	287
80 Stunden, langsam, außen	2.130.463	446.675	92.095	21.144	5.743	1.652	526
80 Stunden, normal, innen	992.642	189.086	36.373	8.516	2.335	715	253
80 Stunden, normal, außen	1.541.410	308.202	61.273	14.284	3.787	1.111	371
160 Stunden, langsam, innen	1.250.115	245.830	50.225	11.826	3.238	971	329
160 Stunden, langsam, außen	3.724.590	885.605	212.732	55.508	15.579	4.739	1.472
160 Stunden, normal, innen	1.084.245	211.229	42.209	9.923	2.719	820	284
160 Stunden, normal, außen	2.772.883	603.023	130.092	31.793	8.680	2.470	763

Tab. 45: Komplexer Schermodul – AC 8 D S (dicht) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils innen und außen)

PAV-A-Konditionierung	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
ohne PAV	57,5	65,2	71,5	77,1	81,6	85,0	87,5
20 Stunden, langsam, innen	58,6	66,5	72,8	78,3	82,5	85,6	87,8
20 Stunden, langsam, außen	50,1	58,8	65,3	71,5	77,1	81,6	85,0
20 Stunden, normal, innen	58,2	65,9	72,1	77,7	82,0	85,3	87,6
20 Stunden, normal, außen	51,3	60,1	66,8	73,0	78,3	82,5	85,7
80 Stunden, langsam, innen	57,9	65,8	72,2	77,8	82,1	85,2	87,4
80 Stunden, langsam, außen	51,5	60,5	67,4	73,6	78,8	82,9	85,9
80 Stunden, normal, innen	59,4	67,2	73,5	78,8	82,8	85,6	87,2
80 Stunden, normal, außen	55,1	63,6	70,3	76,2	81,0	84,6	87,1
160 Stunden, langsam, innen	56,3	64,2	70,5	76,2	80,9	84,3	86,8
160 Stunden, langsam, außen	43,8	52,7	59,2	65,1	71,0	76,5	80,9
160 Stunden, normal, innen	58,3	66,1	72,3	77,9	82,2	85,4	87,7
160 Stunden, normal, außen	48,5	57,8	64,7	70,9	76,5	81,1	84,6

Tab. 46: Phasenwinkel – AC 8 D S (dicht) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils innen und außen)

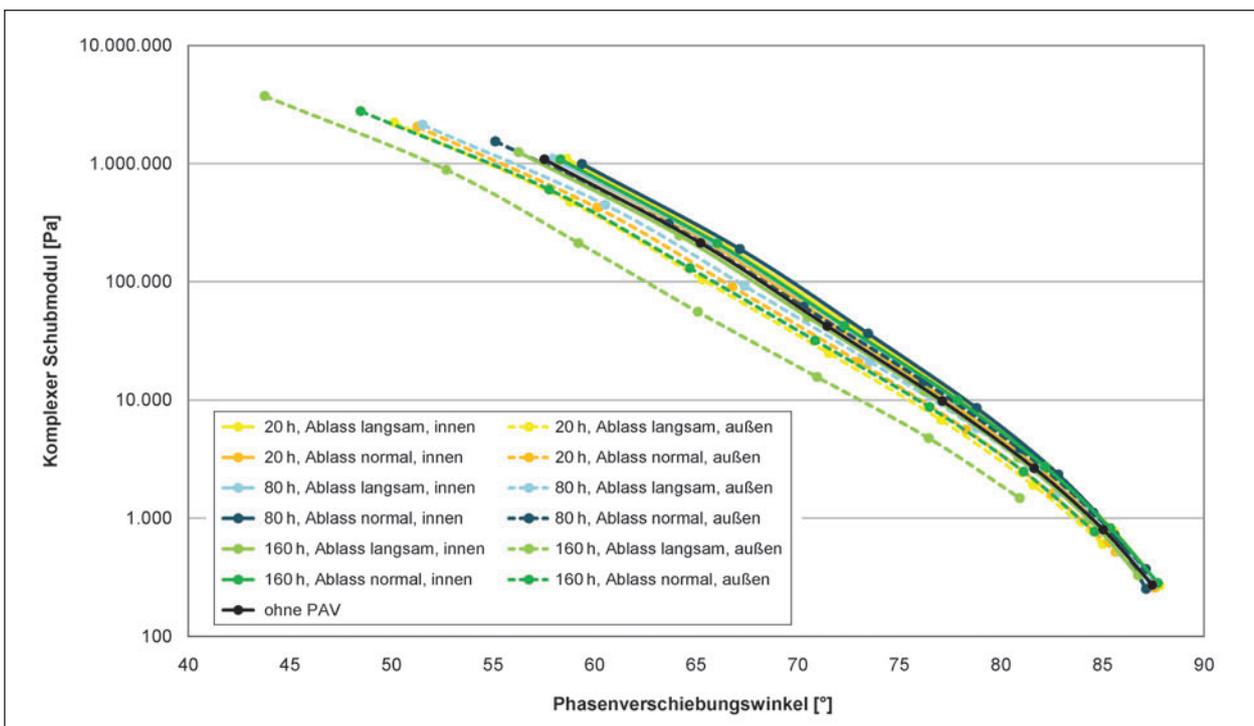


Bild 64: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) des AC 8 D S (dicht); Konditionierungsbedingungen: 60 °C, 2,1 MPa, variierender Konditionierungsdauer und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen

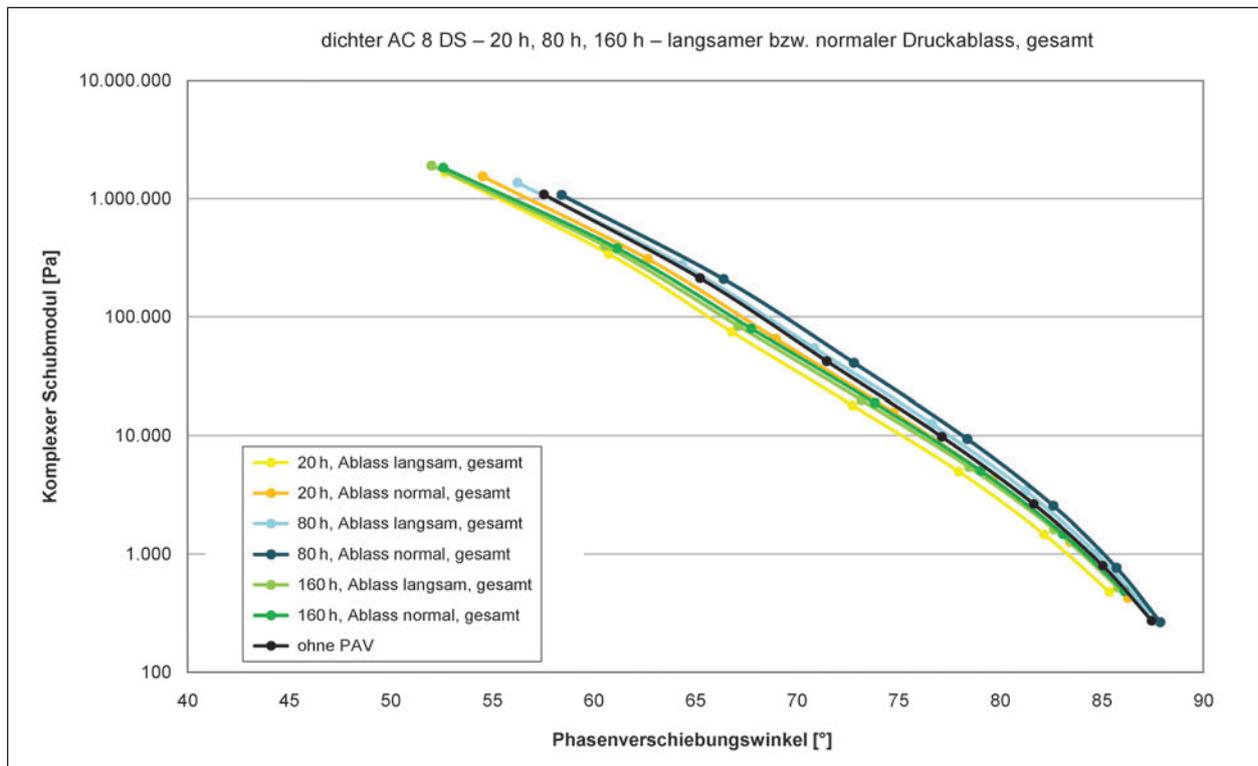


Bild 65: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (gesamt) des AC 8 D S (dicht); Konditionierungsbedingungen: 60 °C, 2,1 MPa, variierender Konditionierungsdauer und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen

PAV-A-Konditionierung	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
ohne PAV	1.084.091	212.371	42.116	9.755	2.640	797	272
20 Stunden, langsam	1.666.554	340.617	74.423	17.891	4.949	1.462	478
20 Stunden, normal	1.544.039	309.218	65.026	15.595	4.240	1.262	424
80 Stunden, langsam	1.365.963	274.771	54.408	12.557	3.397	1.008	339
80 Stunden, normal	1.074.566	208.346	40.831	9.339	2.545	765	264
160 Stunden, langsam	1.907.069	399.389	83.760	19.845	5.408	1.612	522
160 Stunden, normal	1.831.312	380.482	79.550	18.744	5.033	1.472	484

Tab. 47: Komplexer Schermodul – AC 8 D S (dicht) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils gesamt)

PAV-A-Konditionierung	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
ohne PAV	57,5	65,2	71,5	77,1	81,6	85,0	87,5
20 Stunden, langsam	52,7	60,7	66,8	72,7	78,0	82,2	85,4
20 Stunden, normal	54,5	62,6	69,0	74,8	79,6	83,4	86,3
80 Stunden, langsam	56,2	64,4	70,9	76,6	81,3	84,7	87,2
80 Stunden, normal	58,4	66,4	72,8	78,4	82,6	85,7	87,9
160 Stunden, langsam	52,0	60,5	67,1	73,2	78,5	82,7	85,8
160 Stunden, normal	52,6	61,2	67,8	73,8	79,0	83,1	86,1

Tab. 48: Phasenwinkel – AC 8 D S (dicht) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils gesamt)

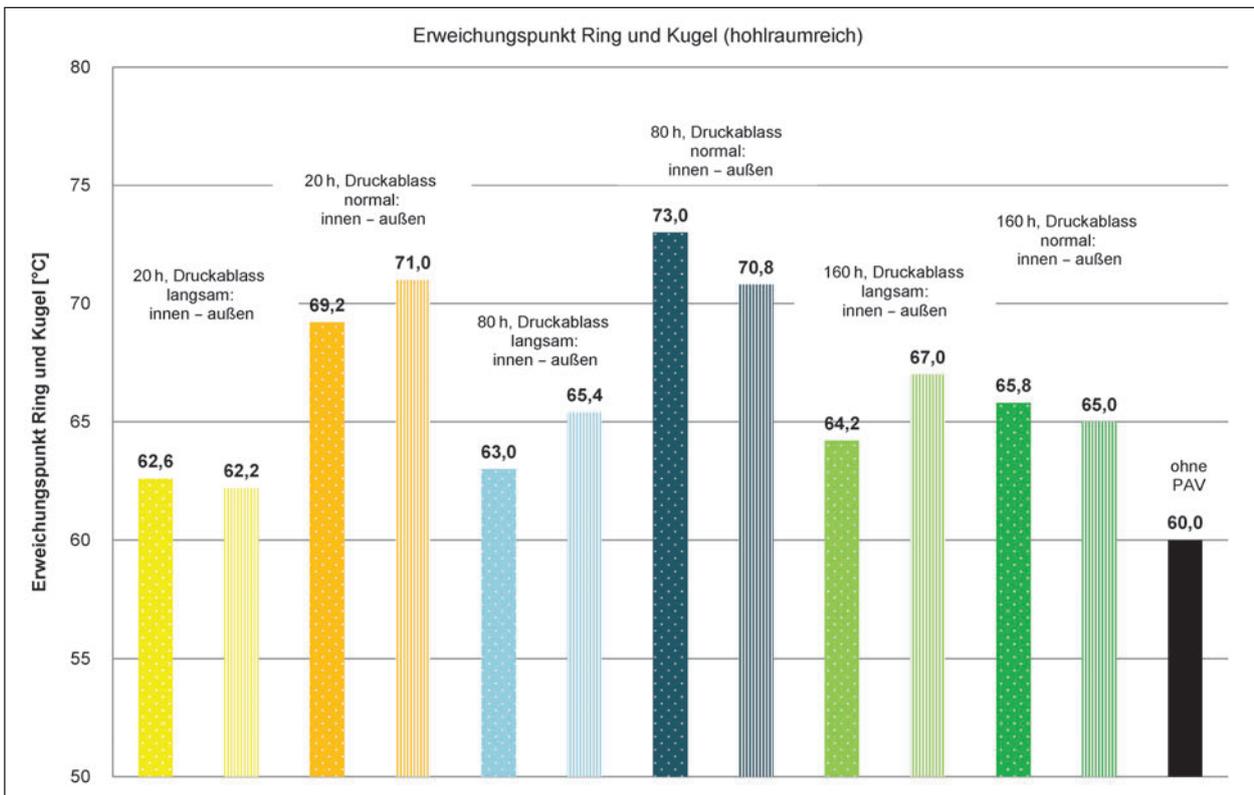


Bild 66: Erweichungspunkt Ring und Kugel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens sowie der Konditionierungsdauer

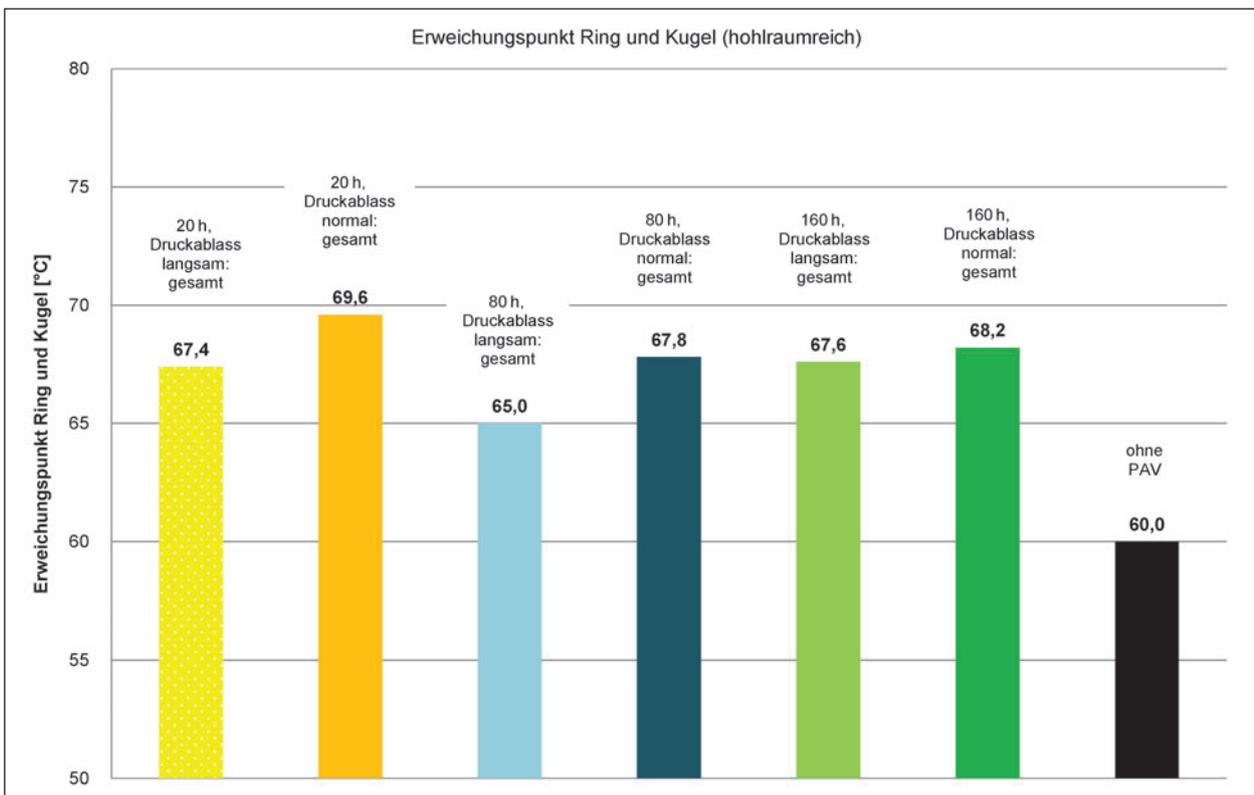


Bild 67: Erweichungspunkt Ring und Kugel (gesamt) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens sowie der Konditionierungsdauer

Bindemittelsorte: 50/70 (2. Probe)	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]
50/70 (aus AC 8 D S (hohlraumreich) extrahiert)	60,0
50/70 (RTFOT)	58,2
50/70 (RTFOT + PAV)	69,2

Tab. 49: Erweichungspunkt Ring und Kugel – Straßenbaubitumen 50/70 – 2. Probe

Bindemittelsorte: 50/70 (2. Probe)	Erweichungspunkt Ring und Kugel [°C]		
	innen	außen	gesamt
Variable Konditionierungsbedingungen			
20 Stunden, Druckablass langsam	62,6	62,2	67,4
20 Stunden, Druckablass normal	69,2	71,0	69,6
80 Stunden, Druckablass langsam	63,0	65,4	65,0
80 Stunden, Druckablass normal	73,0	70,8	67,8
160 Stunden, Druckablass langsam	64,2	67,0	67,6
160 Stunden, Druckablass normal	65,8	65,0	68,2

Tab. 50: Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem Asphaltbeton AC 8 D S (hohlraumreich) – Konditioniert bei 60 °C und 2,1 MPa

Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel angegeben.

Anhand der Ergebnisse für den Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel der hohlraumreichen Asphaltbetone kann kein eindeutiger Einfluss auf das Alterungsverhalten in Abhängigkeit vom untersuchten Bereich der Prismen (innen, außen), der Art und Geschwindigkeit des Druckablasses noch Konditionierungsdauer abgeleitet werden.

Auch aus den Ergebnissen für den Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus einem gesamten Prisma (Bild 67) kann auch kein Einfluss der Konditionierungsdauer erkannt werden. Im Vergleich zur Nullvariante (extrahiertes Bindemittel aus Prismen ohne PAV-A-Konditionierung) ist für alle konditionierten Varianten eine Erhöhung der Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel zwischen 5,0 °C und 9,6 °C zu konstatieren.

Aus den Untersuchungen im dynamischen Scherreometer sind die Ergebnisse für den komplexen Schermodul sowie der Phasenwinkel für die Untersuchungen an Prismen getrennt nach innerem und äußerem Bereich in Tabelle 51 und Tabelle 52 sowie Bild 68 und für Untersuchungen an gesamten

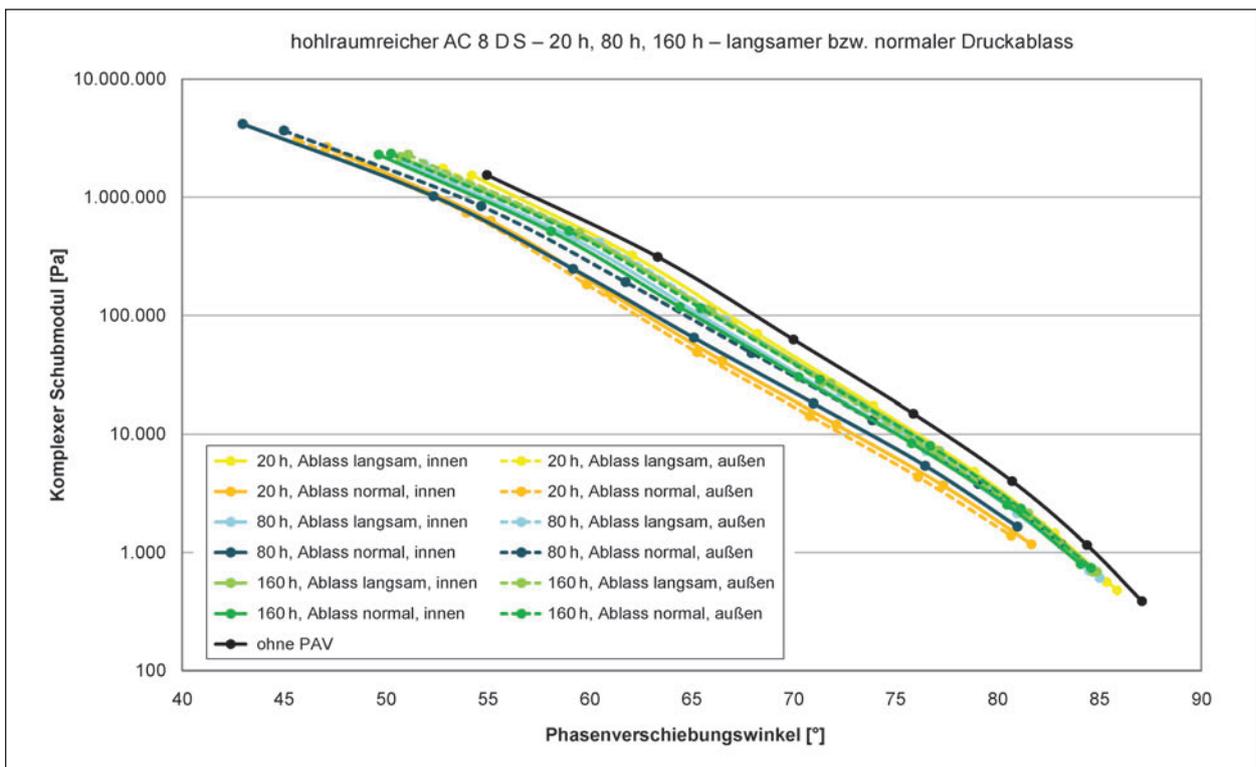


Bild 68: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) des AC 8 D S (hohlraumreich); Konditionierungsbedingungen: 60 °C, 2,1 MPa, variierender Konditionierungsdauer und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen

PAV-A-Konditionierung	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
ohne PAV	1.542.124	311.955	62.375	14.819	3.979	1.153	386
20 Stunden, langsam, innen	1.536.254	320.573	69.639	17.146	4.796	1.446	478
20 Stunden, langsam, außen	1.754.257	375.725	83.014	20.485	5.644	1.677	561
20 Stunden, normal, innen	2.649.471	629.331	153.541	41.108	11.975	3.665	1.173
20 Stunden, normal, außen	3.052.744	738.312	182.721	48.635	14.169	4.321	1.381
80 Stunden, langsam, innen	2.020.153	445.089	100.042	25.317	7.163	2.119	700
80 Stunden, langsam, außen	1.912.310	412.581	90.209	22.230	6.128	1.868	607
80 Stunden, normal, innen	4.165.146	1.018.977	246.701	64.587	18.069	5.382	1.644
80 Stunden, normal, außen	3.656.504	839.922	191.054	47.974	13.039	3.777	1.170
160 Stunden, langsam, innen	2.195.152	483.847	107.082	26.404	7.207	2.127	684
160 Stunden, langsam, außen	2.286.992	497.930	111.984	27.094	7.306	2.153	686
160 Stunden, normal, innen	2.289.670	512.649	117.395	30.074	8.359	2.512	798
160 Stunden, normal, außen	2.333.431	516.833	114.872	28.630	7.934	2.337	740

Tab. 51: Komplexer Schermodul DSR – hohlraumreicher AC 8 D S (20 h, 80 h, 160 h, jeweils innen und außen)

PAV-A-Konditionierung	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
ohne PAV	55,0	63,3	70,0	75,9	80,7	84,4	87,1
20 Stunden, langsam, innen	54,2	62,1	68,2	73,9	78,9	82,8	85,9
20 Stunden, langsam, außen	52,8	60,8	67,0	72,8	78,0	82,2	85,4
20 Stunden, normal, innen	47,1	55,1	61,0	66,5	72,1	77,3	81,7
20 Stunden, normal, außen	45,7	53,9	59,8	65,3	70,8	76,1	80,7
80 Stunden, langsam, innen	50,7	59,2	65,4	71,2	76,5	81,0	84,5
80 Stunden, langsam, außen	51,9	60,5	66,7	72,3	77,4	81,7	85,0
80 Stunden, normal, innen	43,0	52,3	59,2	65,1	71,0	76,5	81,0
80 Stunden, normal, außen	45,0	54,7	61,8	67,9	73,9	79,1	83,1
160 Stunden, langsam, innen	50,7	59,5	66,0	71,8	77,1	81,5	84,9
160 Stunden, langsam, außen	51,1	59,5	65,7	71,4	76,7	81,2	84,7
160 Stunden, normal, innen	49,6	58,1	64,4	70,2	75,8	80,5	84,1
160 Stunden, normal, außen	50,2	59,0	65,4	71,3	76,7	81,2	84,6

Tab. 52: Phasenwinkel DSR – hohlraumreicher AC 8 D S (20 h, 80 h, 160 h, jeweils innen und außen)

Prismen in Tabelle 53 und Tabelle 54 sowie Bild 69 zu entnehmen.

In Analogie zu den Werten Erweichungspunkt Ring und Kugel kann auch anhand der Ergebnisse des

T-Sweeps keine eindeutige Reihung der Prüfergebnisse in Abhängigkeit von den variierten Konditionierungsbedingungen (Konditionierungsdauer, Art/ Geschwindigkeit des Druckablasses) erkannt werden.

PAV-A-Konditionierung	Komplexer Schermodul [Pa] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
ohne PAV	1.542.124	311.955	62.375	14.819	3.979	1.153	386
20 Stunden, langsam	2.614.319	583.322	129.172	31.653	8.658	2.519	786
20 Stunden, normal	2.771.001	661.521	160.580	42.246	12.266	3.788	1.205
80 Stunden, langsam	2.003.701	432.539	95.509	23.355	6.402	1.884	610
80 Stunden, normal	2.816.342	628.049	140.529	35.162	9.698	2.917	904
160 Stunden, langsam	2.762.636	651.239	152.793	38.560	10.794	3.238	1.033
160 Stunden, normal	3.379.288	769.312	170.497	41.222	10.979	3.155	969

Tab. 53: Komplexer Schermodul – AC 8 D S (hohlraumreich) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils gesamt)

PAV-A-Konditionierung	Phasenwinkel [°] bei						
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
ohne PAV	55,0	63,3	70,0	75,9	80,7	84,4	87,1
20 Stunden, langsam	48,6	57,6	64,3	70,5	76,2	80,9	84,4
20 Stunden, normal	46,4	54,9	60,9	66,3	71,8	77,1	81,5
80 Stunden, langsam	51,4	59,9	66,1	71,9	77,1	81,4	84,8
80 Stunden, normal	47,6	56,8	63,4	69,3	74,8	79,7	83,4
160 Stunden, langsam	48,3	56,5	62,6	68,3	73,8	78,8	82,7
160 Stunden, normal	46,4	56,1	63,3	69,6	75,5	80,3	83,9

Tab. 54: Phasenwinkel – AC 8 D S (hohlraumreich) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils gesamt)

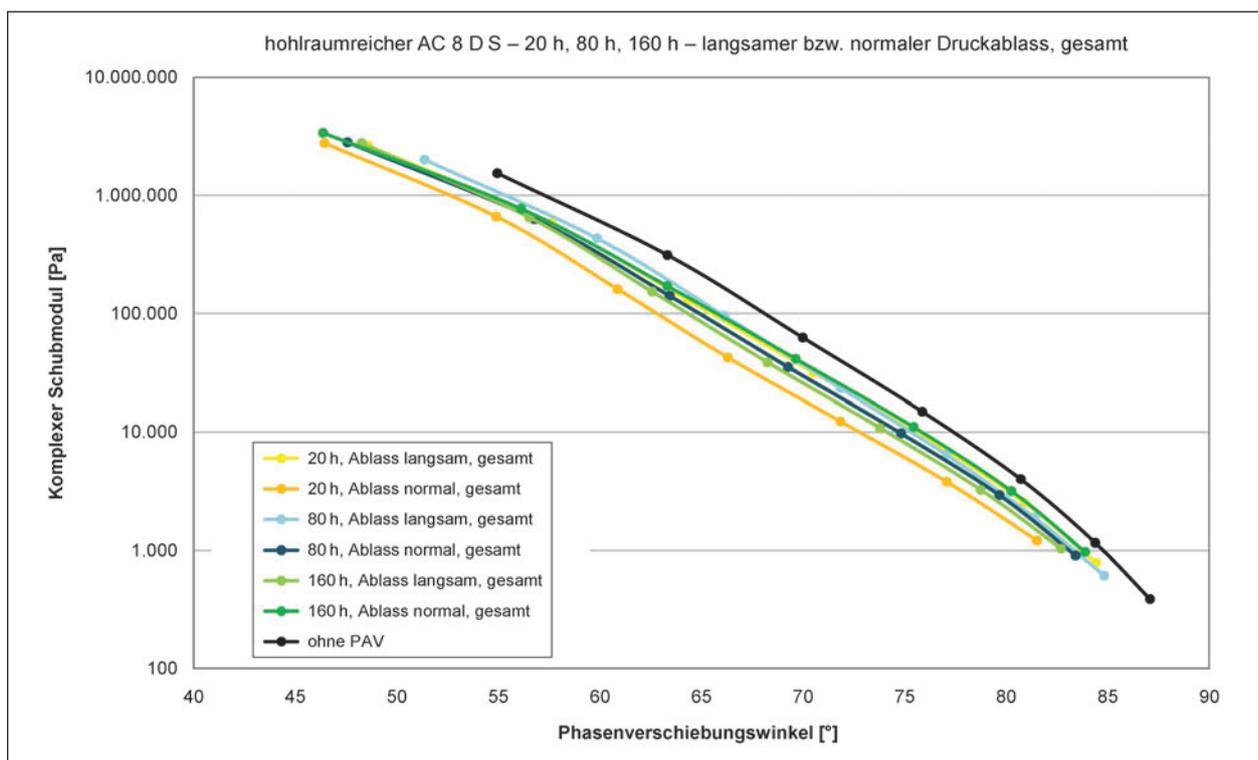


Bild 69: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (gesamt) des AC 8 D S (hohlraumreich); Konditionierungsbedingungen: 60 °C, 2,1 MPa, variierender Konditionierungsdauer und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen

In Bild 70 bis Bild 72 sind die Ergebnisse für den Erweichungspunkt Ring und Kugel, getrennt für die Konditionierungsdauern (20 h, 80 h, 160 h), von dichter und hohlraumreicher Asphaltbetonvariante und Variation der Art/Geschwindigkeit bei der Konditionierung gegenübergestellt.

Insbesondere aus den Gegenüberstellungen der Kennwerte für die Asphaltbetonvarianten (dicht, hohlraumreich) bei den Konditionierungsdauern von 20 und 80 Stunden ist deutlich zu erkennen, dass das Bindemittel im hohlraumreicheren Asphalt stärker altert. Nach einer Konditionierungsdauer von 160 Stunden wird außen beim dichten Asphaltbeton eine ähnliche Alterung (vgl. Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel) wie hier beim hohlraumreichen Asphaltbeton erreicht.

In Bild 73 bis Bild 75 sind die BLACK-Diagramme, getrennt für die Konditionierungsdauern (20 h, 80 h, 160 h), von dichter und hohlraumreicher Asphaltbetonvariante und Variation der Art/Geschwindigkeit bei der Konditionierung gegenübergestellt.

In Analogie zum Vergleich der dichten und hohlraumreichen Asphaltbetonvariante (vgl. Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel), ist anhand

der BLACK-Diagramme zu erkennen, dass die Spreizung der Ergebnisse (insbesondere der Phasenwinkel) bei der Konditionierungsdauer von 160 Stunden tendenziell geringer ist als bei den vergleichsweise kürzeren Konditionierungsdauern (20 und 80 Stunden).

3.5.4 Zwischenfazit Projektphase 5

Aus den in der fünften Projektphase durchgeführten Untersuchungen werden folgende, wesentliche Erkenntnisse gewonnen:

Durch ein langsames, stufenweises Druckablassen am Ende der Konditionierung kann die festgestellte Gefügestörung (Abnahme der Raumdichte) des Asphalttes verringert, aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

An der hohlraumreicheren Asphaltbetonvariante werden im Vergleich zur dichten Variante größere Gefügeveränderungen bei beiden Methoden zum Druckablassen beobachtet.

Die erkannten Gefügeschädigungen spiegeln sich bei dichter und hohlraumreicher Asphaltbetonvarianten in den flachen Verläufen der Abkühlversuche

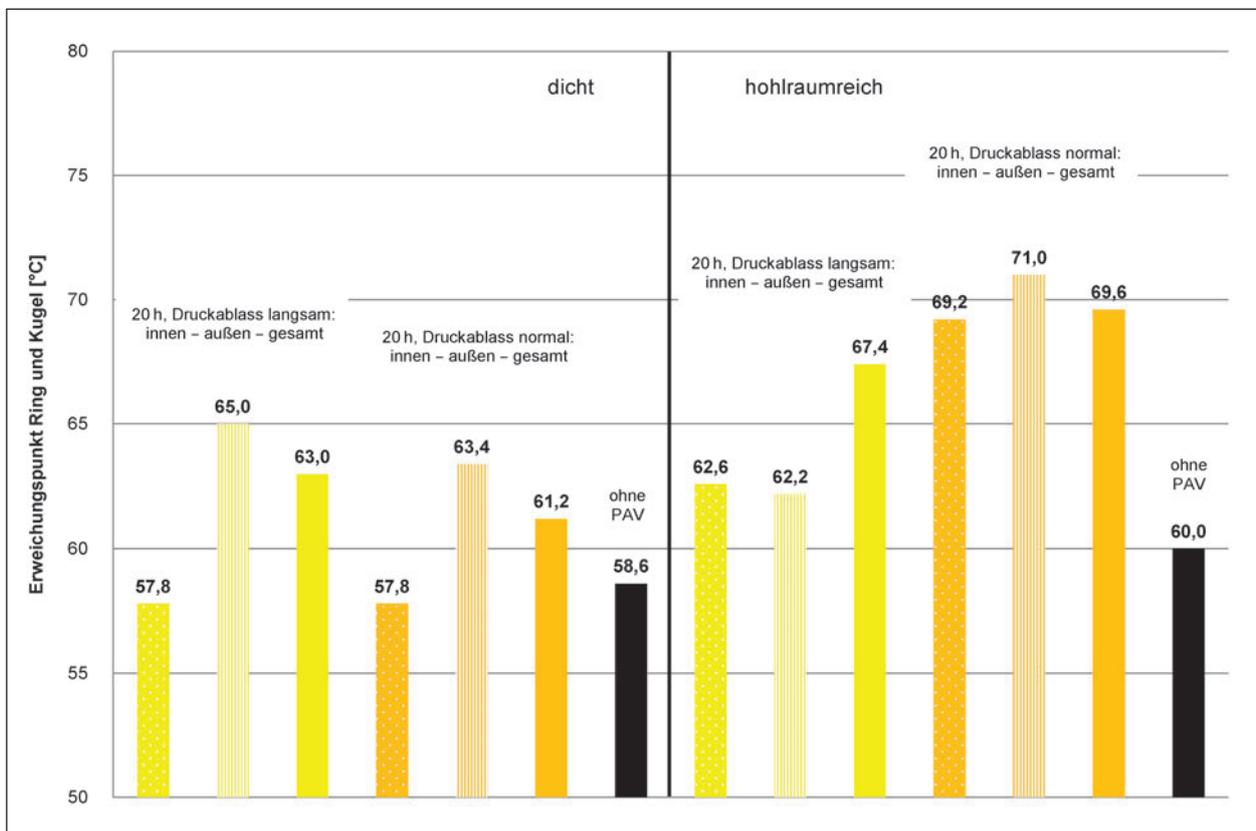


Bild 70: Vergleich Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 20 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

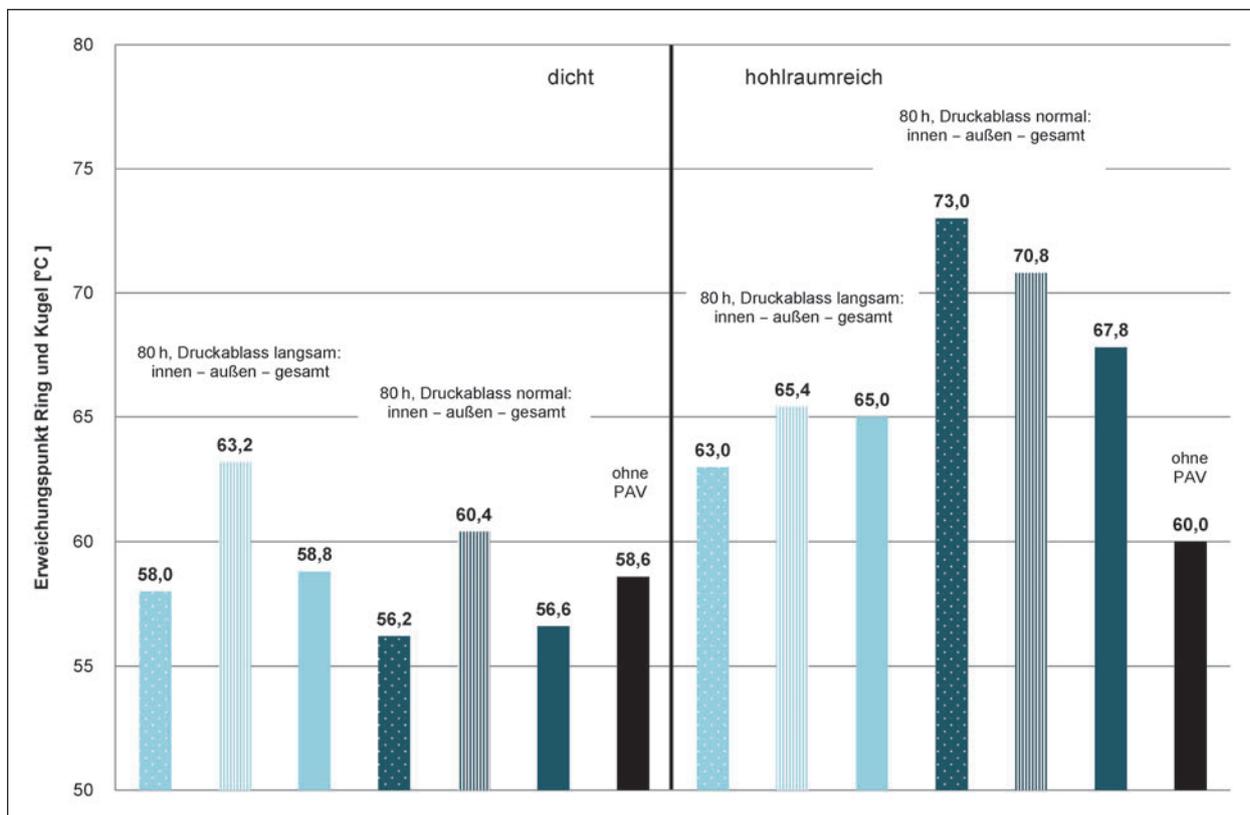


Bild 71: Vergleich Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 80 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

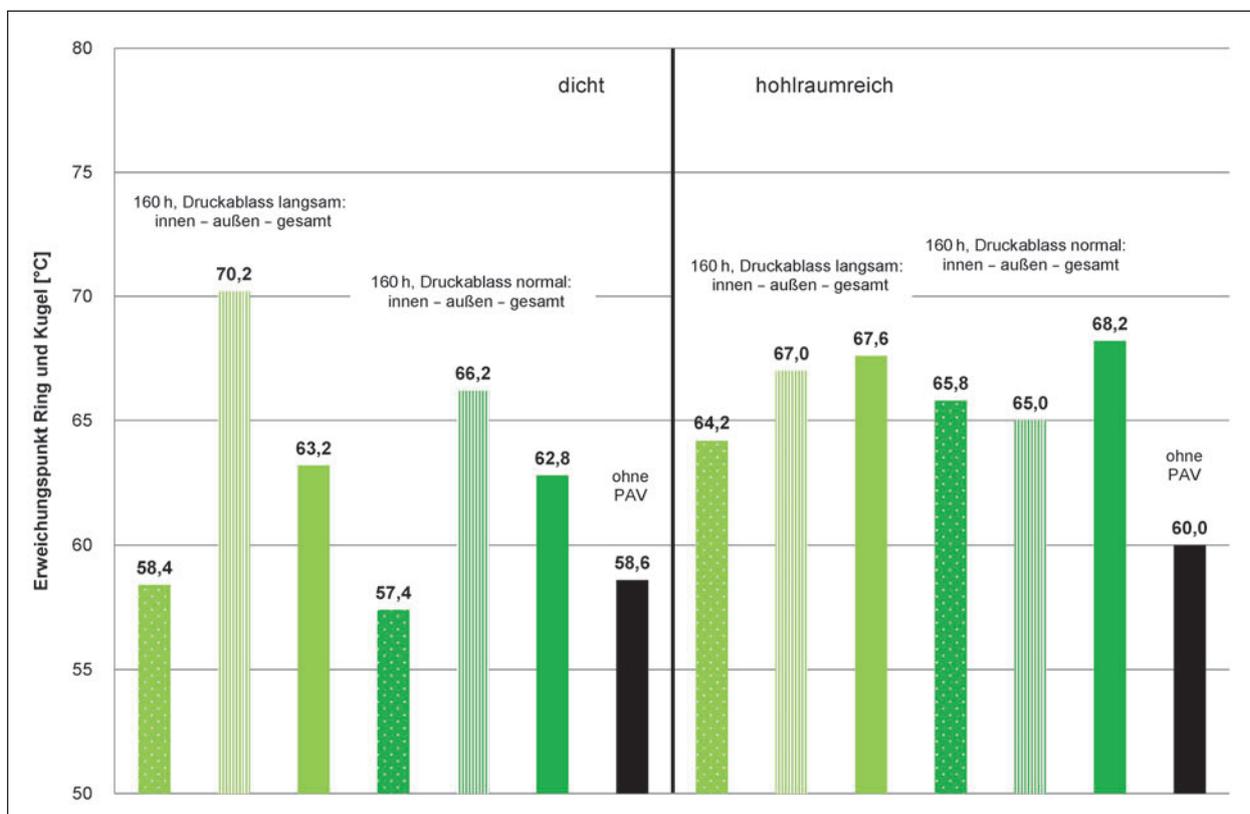


Bild 72: Vergleich Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 160 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

wieder, wobei vom Asphalt nur geringe Zugspannungen aufgebaut werden und woraus am Versuch-

sende vergleichsweise geringere Werte für die Bruchspannung resultieren.

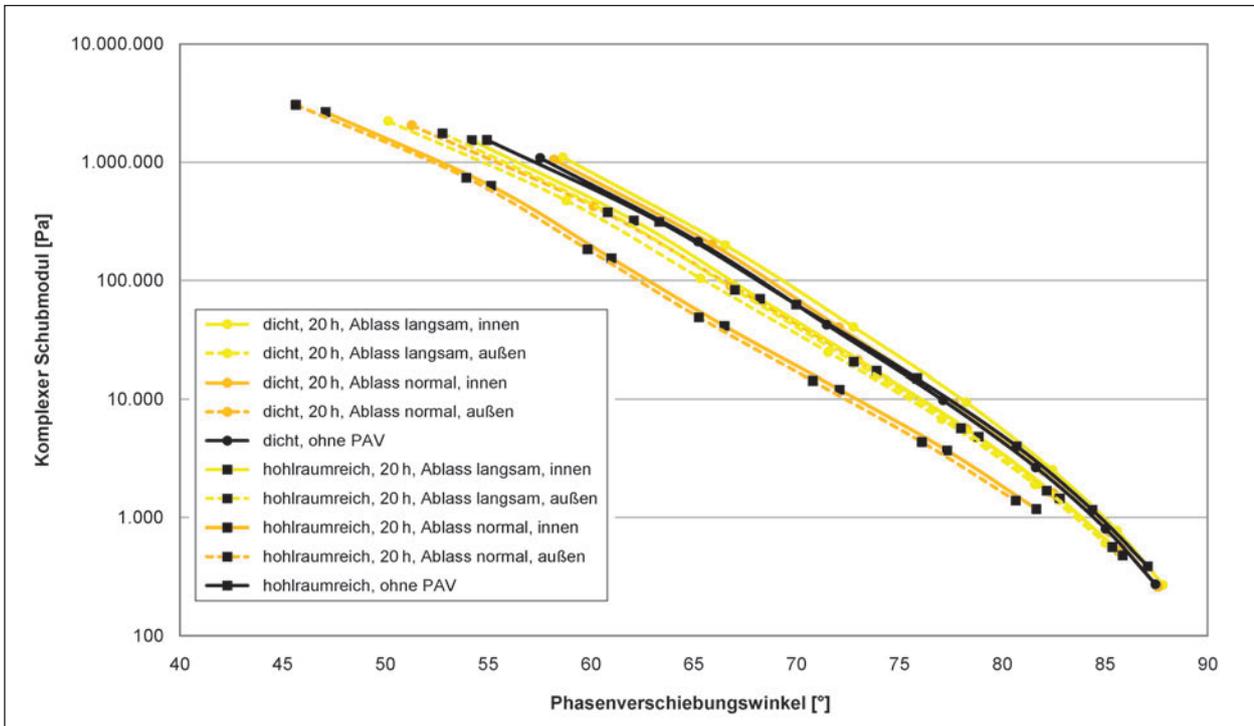


Bild 73: Vergleich BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 20 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

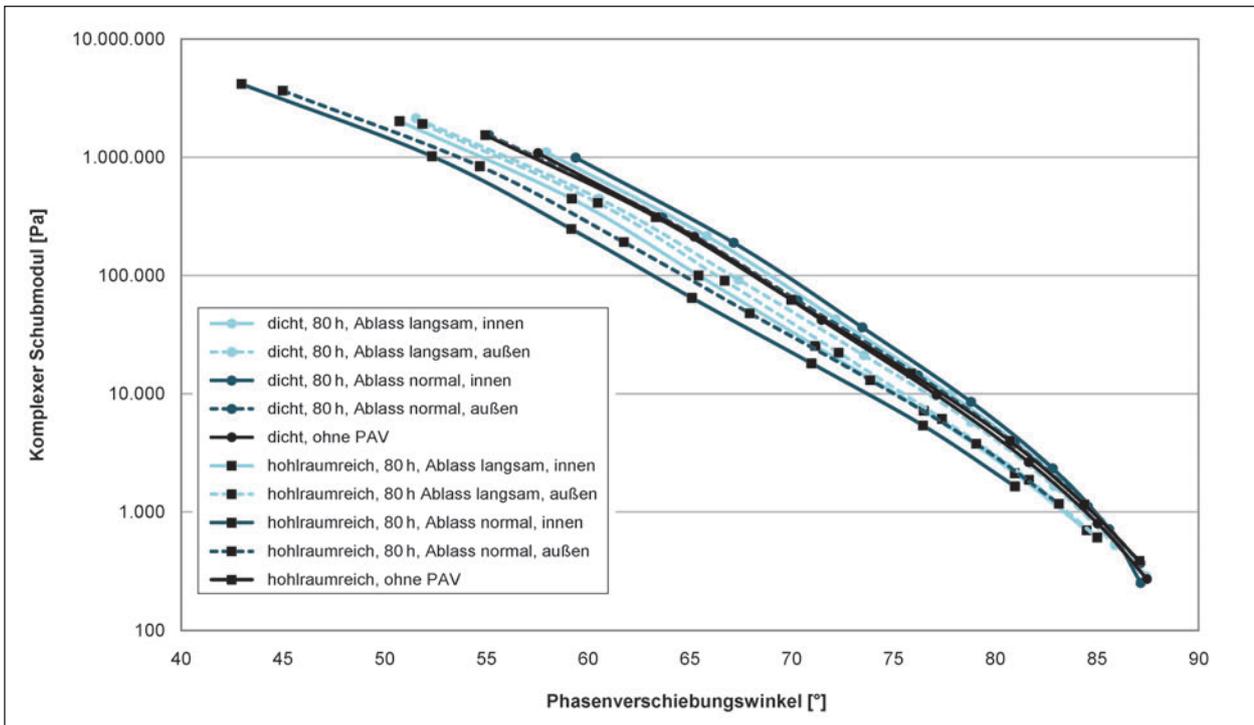


Bild 74: Vergleich BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 80 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

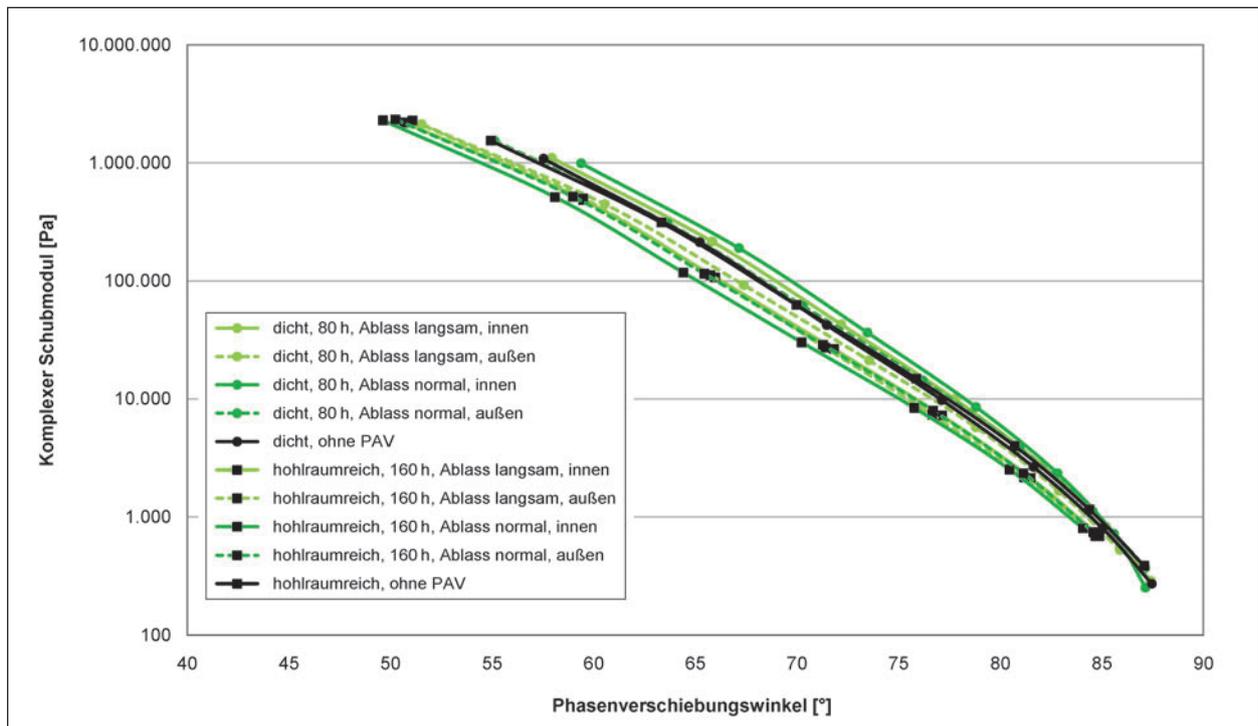


Bild 75: Vergleich BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 160 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

Anhand der Bindemittelkenndaten konnten bei der dichten Asphaltbetonvariante in Abhängigkeit von den gewählten Konditionierungsbedingungen eine Spreizung/Unterschiede im Alterungsfortschritt erkannt werden.

Bei der insgesamt stärker gealterten hohlraumreicheren Asphaltbetonvariante konnte jedoch kein systematischer Zusammenhang/Einfluss der variierten Konditionierungsbedingungen (Konditionierungsdauer, Art und Geschwindigkeit des Druckablassens) erkannt werden

Die anhand der Bindemitteluntersuchungen erkannte Alterung des Bindemittels, die mit zunehmender Alterung und Versprödung zu einer Reduzierung des Relaxationsvermögens führt und einen steileren Anstieg der Abkühlkurven vermuten lässt, wird durch das Phänomen der Gefügestörung so stark überlagert, dass hier tendenziell gegenteilige (flachere) Verläufe mit zunehmender Alterung zu konstatieren sind.

4 Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse aus den fünf Projektphasen

Ziel des Forschungsvorhabens war es ein Verfahren zu entwickeln und/oder zu optimieren, mit dem im Laboratorium praxisadäquat Asphalt-Probekörper gealtert werden können und an konditionierten Probekörpern mittels gängiger Performance-Prüfungen die Asphaltalterung, die nach aktuellen Kenntnisstand überwiegend auf die Alterung des Bindemittels zurückzuführen ist, angesprochen werden kann. Mit dem entwickelten Alterungsverfahren sollten systematisch verschiedene Asphaltmischgutarten mit unterschiedlichen Gesteinsarten und Bindemittelsorten untersucht werden.

Während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens stellte sich jedoch heraus, dass das formulierte Ziel des Forschungsvorhabens aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse geändert werden musste und schwerpunktmäßig die Entwicklung und Optimierung eines Alterungsverfahrens Gegenstand des Forschungsvorhabens wurde.

Der Untersuchungsumfang der insgesamt fünf Projektphasen wurde in enger, einvernehmlicher Ab-

stimmung mit dem Betreuungsausschuss festgelegt und angepasst.

Für die Untersuchungen/Konditionierungen wurde überwiegend ein Asphaltbeton AC 8 D S (Gesteinsart Basalt, Straßenbaubitumen 50/70) eingesetzt.

In der Projektphase 1 wurde weiterhin ein Asphaltbeton untersucht, bei dem der Basalt durch Basanit (Basaltlava) ersetzt wurde. Die Asphaltbetone bei Variation der Gesteinsart wurden so konzipiert, dass der Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper ähnlich war, um vergleichbare Konditionen für die Alterungsversuche zu schaffen. Insgesamt wurde dieser Asphaltbeton sehr dicht konzipiert.

In der Projektphase 5 wurde ergänzend ein deutlich offener, hohlraumreicherer Asphaltbeton AC 8 D S (Gesteinsart Basalt, Straßenbaubitumen 50/70) berücksichtigt.

Untersuchungsgegenstand der Projektphase 2 war noch ein offenporiger Asphalt PA 8 mit polymermodifiziertem Bindemittel der Sorte 40/100-65 A.

Folgende wesentliche Ergebnisse/Erkenntnisse können aus den Projektphasen 1 bis 5 abgeleitet werden:

In der Projektphase 1 wurden zwei unterschiedliche Konditionierungsverfahren zur Alterung von Asphalt-Probekörpern angewendet. Einerseits wurde ein in der Kunststoffindustrie gängiges Verfahren zur künstlichen Bewitterung (BSS-Verfahren) eingesetzt und weiterhin ein Verfahren in Anlehnung an bestehende Prüfverfahren (SATS-Prüfung, PAV-Verfahren) entwickelt bzw. die Konditionierungsbedingungen angepasst (PAV-A-Verfahren).

Bei dem BSS-Verfahren wird eine zeitraffende künstliche Bewitterung (Sonnenstrahlung, Wärme und Feuchtigkeit) simuliert. Nachteil dieses Verfahrens ist die lange Versuchsdauer (mehrere Monate). Mit dem Ziel noch möglichst laborökonomische Prüfbedingungen zu schaffen, wurde für die Versuchsreihe eine Konditionierungsdauer von vier Wochen gewählt. Während der Konditionierung wurde eine Schwarzstandard-Temperatur von 48 °C vorgegeben, woraus an der Oberfläche der Asphaltprobekörper eine maximale Temperatur von 44 °C resultiert.

Im Rahmen der ersten Projektphase wurde bei dem PAV-A-Verfahren eine Konditionierungsdauer von 20 Stunden und ein Konditionierungsdruck von

2,1 MPa gewählt, und die Temperatur zwischen 30 und 60 °C variiert.

An den konditionierten Probekörpern sowie an den Nullvarianten wurden einaxiale Zug- und Abkühlversuche durchgeführt.

Die Abkühlkurven der untersuchten Varianten nach PAV-A-Konditionierung weisen mit zunehmender Konditionierungstemperatur einen flacheren Verlauf auf, d. h. kryogene Zugspannungen werden nicht bzw. nicht so schnell aufgebaut. Bei den hier untersuchten Varianten liegen die Bruchspannungen am Versuchsende bei den konditionierten Varianten alle unter dem Wert für die Nullvariante. Für die BSS-konditionierte Variante wurde ein tendenziell steilerer Verlauf der Abkühlkurve ermittelt.

Zugversuche an der bei 60 °C PAV-A-konditionierten Variante ergaben eine deutliche Abnahme der Zugfestigkeiten gegenüber der Nullvariante.

Weiterhin wurde in der ersten Projektphase festgestellt, dass das Gefüge der Asphaltprobekörper nach PAV-A-Konditionierung (zunehmend mit der Konditionierungstemperatur) gestört bzw. verändert wird. Diese Gefügeveränderung ist Ursache für das reduzierte Vermögen der konditionierten Asphalte kryogene Spannungen, aufgrund fehlender Bindemittelverklebung, aufbauen zu können.

Im Hinblick auf das Bestreben ein ökonomisches Konditionierungsverfahren zu entwickeln wurde ab der Projektphase 2 ausschließlich das PAV-A-Verfahren berücksichtigt, wobei der Konditionierungsdruck in zwei Stufen (1,0 und 0,5 MPa) reduziert wurde.

Neben dem dichten Asphaltbeton wurde ein offenporiger Asphalt konditioniert und untersucht. Ergänzend zu einaxialen Zug- und Abkühlversuchen am Asphalt wurden am extrahierten, rückgewonnenen Bindemittel konventionelle Bindemittelkennwerte sowie Performanceeigenschaften des Bindemittels ermittelt.

Die Ergebnisse der Bindemittelkennwerte (50/70 aus Asphaltbeton, 40/100-65 A aus offenporigem Asphalt) weisen darauf hin, dass mit den gewählten Konditionierungsbedingungen (Konditionierungsdauer: 20 Stunden, Konditionierungstemperatur: 30 und 60 °C, Konditionierungsdruck: 0,5, 1,0, 2,1 MPa) praktisch keine Bindemittelalterung erwirkt wird, die auf die Konditionierung zurückgeführt werden kann, da gegenüber den Nullvarianten (extra-

hiertes, rückgewonnenes Bindemittel) keine wesentlichen Unterschiede zu konstatieren sind.

In Analogie zu den Ergebnissen der ersten Projektphase konnte auch in dieser Projektphase 2 für die Varianten mit stärkeren Konditionierungsbedingungen (Zunahme der Konditionierungstemperatur bzw. Zunahme des Konditionierungsdruckes) ein zunehmend flacherer Verlauf der Abkühlkurven verzeichnet werden. Bei dem offenporigen Asphalt konnte bei den mit 60 °C konditionierten Varianten praktisch keine Spannung aufgebaut werden.

Mit höherer Druckbeaufschlagung bei der Konditionierung sowie höherer Konditionierungstemperatur konnte weiterhin eine Zunahme der Gefügeveränderung/Gefügezerstörung dokumentiert werden.

Die Projektphase 3 wurde durchgeführt, um Hinweise zu bekommen, ob die in den Projektphasen 1 und 2 erkannten Gefügeveränderungen/Gefügezerstörungen auch bei einem praktisch hohlraumfreien Asphalt zu verzeichnen sind oder ggf. auch auf in kleinsten Hohlräumen/Poren der Gesteinskörner eingeschlossene und gepresste Luft durch die Druckbeanspruchung während der Konditionierung zurückzuführen ist.

Aus diesem Grund wurde der praktisch hohlraumfreie Glasperlen-Asphalt, bestehend aus polierten Glaskugeln aus Kalknatronglas (Korngröße von 1,55 bis 1,85 mm) und Straßenbaubitumen 30/45 konzipiert. Prismatische Probekörper wurden mittels PAV-A für 20 Stunden und bei 30 °C sowie variiertem Druck (0,1, 0,5, 1,0 und 2,1 MPa) konditioniert. Eine Abnahme der Raumdichte konnte ab einem Druck von 1,0 MPa festgestellt werden.

In der Projektphase 4 wurde zu Festlegung der erforderlichen Schärfe der Konditionierungsbedingungen, mit dem Ziel die Langzeitalterung des Bindemittels zu erreichen, neben Asphalt-Probekörpern (Prismen), loses Asphaltmischgut sowie reines Bindemittel konditioniert. Es wurden vergleichsweise schwache Konditionierungsparameter für den Druck (0,1 MPa) und die Temperatur (30 °C) gewählt. Die Konditionierungsdauer wurde in vier Stufen von 20 auf 80 Stunden erhöht. Eine Langzeitalterung des Bindemittels konnte weder an den Asphaltprobekörpern und auch nicht am Asphaltmischgut oder reinen Bindemittel erwirkt werden.

In der Projektphase 5 wurde die Art und Geschwindigkeit des Druckablassens als weitere mögliche Einflussgröße auf die Gefügeveränderungen/Gefüge-

zerstörungen der Asphalt-Probekörper untersucht. Beim Ablassen des Drucks am Ende der Konditionierung wurde unterschieden zwischen der normalen Methode (nach DIN EN 14769), wo der Druck mit einer Geschwindigkeit von 0,2 MPa/min abgelassen wird und einem langsamen, stufenweisen Druckablassen mit einer Reduzierung des Drucks von nur 0,1 MPa/h.

Da mit den schwachen Konditionierungsbedingungen aus Projektphase 4 keine Langzeitalterung des Bindemittels bewirkt werden konnte, wurde erneut mit hohem Druck (2,1 MPa) und bei 60 °C konditioniert. Weiterhin wurden in der fünften Projektphase drei Konditionierungsdauern (20, 80 und 160 Stunden) berücksichtigt.

Durch ein langsames, stufenweises Ablassen des Druckes konnte zwar die Gefügestörung des Asphaltbetons verringert werden, aber insgesamt nicht auf ein unschädliches Maß reduziert werden. Der Einfluss der Gefügeänderung macht sich weiterhin bei den Ergebnissen der Abkühlkurven bemerkbar, die für die konditionierten Varianten (tendenziell mit zunehmender Schärfe der Konditionierungsbedingungen) flacher im Vergleich zur Abkühlkurve der Nullvariante verlaufen.

Neben dem bisher untersuchten dichten Asphaltbeton, wurde in der fünften Projektphase noch eine weitere hohlraumreichere Asphaltbetonvariante untersucht.

Anhand der bestimmten Bindemittelkennwerte kann konstatiert werden, dass die hohlraumreiche Asphaltbetonvariante insgesamt schneller und stärker altert. Weiter kann an den Bindemittelkennwerten der dichten Asphaltbetonvariante in Abhängigkeit von den gewählten Konditionierungsbedingungen eine Spreizung/Unterschiede im Alterungsfortschritt erkannt werden. Bei der insgesamt stärker gealterten hohlraumreicheren Asphaltbetonvariante konnte jedoch anhand der Bindemittelkennwerte kein systematischer Zusammenhang/Einfluss der variierten Konditionierungsbedingungen (Konditionierungsdauer, Art und Geschwindigkeit des Druckablassens) erfasst werden.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen der fünf Projektphasen festgehalten werden, dass die zur Asphaltalterung erforderlichen Konditionierungsbedingungen mit dem PAV-A-Verfahren zu Gefügeveränderungen bzw. Gefügezerstörungen der Asphalt-Probekörper führen. Bedingt durch die Gefügeveränderung/Gefügezerstörung wird, wie

am Beispiel der hier durchgeführten Abkühlversuche erkannt, dass nicht der Einfluss auf die Kälteflexibilität durch das gealterte und versprödete Bindemittel angesprochen wird, was sich durch ein geringeres Relaxationsvermögen und damit verbundenem schlechterem Abbau von Zugspannungen (Relaxieren) im Abkühlversuch zeigen müsste. Vielmehr hat der Asphalt bedingt durch die Gefügestörungen/Gefügezerstörungen nicht mehr die Fähigkeit Spannungen aufzubauen.

Die in der letzten Projektphase 5 gewonnenen Ergebnisse weisen außerdem darauf hin, dass mit zunehmendem Hohlraumgehalt der konditionierten Asphalte der Einfluss der einzelnen Konditionierungsparameter, durch Anordnung und Verteilung zugänglicher Hohlräume mit beeinflusst und überlagert wird.

5 Handlungsempfehlung

Anhand der im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse mit dem PAV-A-Verfahren zur Konditionierung/Alterung von Asphalt-Probekörper ist festzuhalten, dass mit den Konditionierungsbedingungen, die erforderlich sind um eine (Langzeit-)Alterung (des Bindemittels) zu erwirken, eine Gefügeveränderung/Gefügezerstörung einhergeht. Die Gefügeveränderung/Gefügezerstörung der Asphalt-Probekörper hat zur Folge, dass die Performance-Kennwerte, wie am Beispiel der Abkühlkurven erkannt, untypisch sind, was zu Fehlinterpretationen führen kann. Eine weitere Anpassung des PAV-A-Verfahrens bzw. der Konditionierungsbedingungen zur Erwirkung einer beschleunigten Alterung unter Druckbeaufschlagung wird daher als nicht zielführend erachtet.

Zur Simulation der Asphaltalterung an Probekörpern wird empfohlen das in der Projektphase 1 angewandte Konditionierungsverfahren mit einem Bewitterungsschranksystem (BSS-Verfahren) weiter zu verfolgen. Anhand erster Tastversuche (einaxiale Zug- und Abkühlversuche) konnte tendenziell eine Alterung (des Bindemittels) erkannt und angesprochen werden. Ziel weiterer Untersuchungen mit dem BSS-Verfahren muss sein, die Konditionierungsbedingungen so anzupassen bzw. ggf. zu ergänzen, dass die Konditionierungsdauer noch (labor-)ökonomisch ist. Abschließend sei noch zu erwähnen, dass derzeit in Asphalt-Laboratorien kein vergleichbares Prüfgerät zur künstlichen Bewitterung vorhanden ist.

Regelwerke

- DIN EN ISO 4892-1 Kunststoffe – Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten – Teil 1: Allgemeine Anleitung, 2001
- DIN EN ISO 4892-2 Kunststoffe – Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten Teil 2: Xenonbogenlampen, 2013
- DIN EN 513 Profile aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) zur Herstellung von Fenstern und Türen – Bestimmung der Wetterechtheit und Wetterbeständigkeit durch künstliche Bewitterung, 1999
- DIN EN 12607-1 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft – Teil 1: RTFOT-Verfahren, 2015
- DIN EN 12697-45 Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 45: Alterungsprüfung an gesättigten Asphalt-Probekörpern (SATS-Prüfung), 2012
- DIN EN 12697-46 Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen, 2012
- DIN EN 13043 Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen, 2013
- DIN EN 14769 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV), 2012
- DIN EN 1426 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Nadelpenetration, 2015
- DIN EN 1427 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, 2015
- DIN EN 14771 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der Biegekekriecheifigkeit – Biegebalkenrheometer (BBR), 2012
- TL Bitumen-StB 07/13 Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen, Ausgabe 2007/ Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

- TL Gestein-StB 04 Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau Ausgabe 2004/Fassung 2007, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- TP Asphalt-StB, Teil 46 A Technische Prüfvorschriften für Asphalt – Kälteeigenschaften: einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch, Ausgabe 2013
- AL DSR-Prüfung (T-Sweep) – Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung im Temperatursweep, Ausgabe 2014, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
- AL MSCR-Prüfung (DSR) – Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung der MSCR-Prüfung (Multiple Stress Creep and Recovery Test)
- Forschung Straßenbau und Verkehr, Heft 512, 1987
- [6] WARMBOLD, R.: Technische und wirtschaftliche Aspekte bei der Wiederverwendung von Asphaltdecken. Dissertation, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 1996
- [7] WELLNER, F.; ASCHER, D.; RADENBERG, M.; CETINKAYA, R.: Bestimmung des Alterungsverhaltens von Asphaltgemischen als Grundlage für die Dimensionierung und Prognose der Lebensdauer/Schadensentstehung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1091, 2013
- [8] CHULK, J.: Aging of Bituminous Materials and its Effects on the Stiffness Properties. Diplomarbeit, TU Wien, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung

Literatur

- [1] ARBIT (Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e. V.): Alterung von Bitumen – Laborverfahren zur Simulation von Kurzzeit- und Langzeit-Alterung. Magazin der Arbeitsgemeinschaft der Bitumen-Industrie e. V., Mai 2014, Hamburg
- [2] BALD, S.; BÖHM, S.; BEARA, L.: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt. FE 07. 0229/2008/ERB, Februar 2013, Darmstadt
- [3] BÜCHLER, S.; WISTUBA, M.: Das Braunschweiger Verfahren zur Alterung von Asphaltmischgut und deren Einfluss auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften. Straße und Autobahn, Heft 1, 2010
- [4] DO, M.-T.; KANE, M.; CERZO, V.: Laboratory test methods for polishing asphalt surfaces and predicting their skid resistance. Conference Paper, 92nd Annual Meeting Transport Research Board (TRB) at Washington, 2014
- [5] POTSCHKA, V.; TABERT, A.: Veränderung der Bindemittleigenschaften während Herstellung, Verarbeitung und Liegezeit von Asphalt.
- Bild 1: Basanit/Basaltlava (links) und Basalt (rechts) der Korngruppe 8/11 (ungewaschen)
- Bild 2: Erweichungspunkt Ring und Kugel – Straßenbaubitumen 50/70 (1. und 2. Probe)
- Bild 3: Nadelpenetration – Straßenbaubitumen 50/70 (1. und 2. Probe)
- Bild 4: Verbleibende Penetration – Straßenbaubitumen 50/70 (1. und 2. Probe)
- Bild 5: BLACK-Diagramm – Straßenbaubitumen 50/70 (1. Probe)
- Bild 6: BLACK-Diagramm – Straßenbaubitumen 50/70 (2. Probe)
- Bild 7: Erweichungspunkt Ring und Kugel – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Bild 8: Nadelpenetration – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Bild 9: Verbleibende Penetration – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Bild 10: BLACK-Diagramm – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

- Bild 11: Prüfvorrichtung mit eingebauten Probekörpern für Zug- bzw. Abkühlversuche
- Bild 12: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse von Zug- und Abkühlversuchen
- Bild 13: Prinzip Bending-Beam-Rheometer
- Bild 14: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung von $T_{y=300}$ und $T_{m\text{-Wert}=0,3}$
- Bild 15: Schematische Darstellung Bewitterungsgerät [Q-Sun]
- Bild 16: Probenträger mit prismatischen Asphaltprobekörpern [KIWA]
- Bild 17: Probenträger mit prismatischen Asphaltprobekörpern Variante A und B [KIWA]
- Bild 18: Druckalterungsbehälter mit Gestell für die Konditionierung von Asphalt-Probekörpern
- Bild 19: Gestell mit Asphalt-Probekörpern für die Konditionierung im Druckalterungsbehälter
- Bild 20: Ergebnisse von Abkühlversuchen – BSS-Alterung – Variante A und B (AC 8 D S mit Basalt bzw. Basanit)
- Bild 21: Zunahme des Hohlraumgehaltes nach Konditionierung PAV-A bei 2,1 MPa und 20 h; Variation: Konditionierungstemperatur
- Bild 22: Ergebnisse von Abkühlversuchen – Tastversuche PAV-A-Alterung – Variante A (AC 8 D S)
- Bild 23: Gegenüberstellung Ergebnisse einaxialer Zug- und Abkühlversuche – BSS- und PAV-A – Variante A (AC 8 D S)
- Bild 24: Variante A – AC 8 D S mit 50/70, Basalt Nullvariante (ohne Konditionierung)
- Bild 25: Variante A – AC 8 D S mit 50/70, Basalt nach PAV-A-Konditionierung (50 °C, 2,1 MPa, 20 h)
- Bild 26: Oberfläche eines Probekörpers der Variante A nach PAV-A (40 °C, 2,1 MPa, 20 h)
- Bild 27: Gegenüberstellung Ergebnisse einaxialer Zug- und Abkühlversuche – PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – Variante A (AC 8 D S)
- Bild 28: Gegenüberstellung Ergebnisse einaxialer Zug- und Abkühlversuche – PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – PA 8
- Bild 29: Zunahme des Hohlraumgehaltes (absolut) an der Asphaltvariante AC 8 D S nach PAV-A; 30 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck
- Bild 30: Zunahme des Hohlraumgehaltes (absolut) an der Asphaltvariante AC 8 D S nach PAV-A; 60 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck
- Bild 31: Änderung des Hohlraumgehaltes (absolut) nach PAV-A an der Asphaltvariante PA 8; 30 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck
- Bild 32: Änderung des Hohlraumgehaltes (absolut) nach PAV-A an der Asphaltvariante PA 8; 60 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck
- Bild 33: Biegekiechsteifigkeit – Straßenbaubitumen 50/70
- Bild 34: BLACK-Diagramm DSR – Straßenbaubitumen 50/70
- Bild 35: Biegekiechsteifigkeit – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Bild 36: Black-Diagramm DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Bild 37: Probekörperoberfläche vor Beanspruchung durch PAV-A-Konditionierung
- Bild 38: Probekörperoberfläche nach 20-stündiger Beanspruchung bei 0,1 MPa und 30 °C
- Bild 39: Probekörperoberfläche nach 20-stündiger Beanspruchung bei 2,1 MPa und 30 °C
- Bild 40: Schnittfläche eines Probekörpers nach 20-stündiger Beanspruchung bei 2,1 MPa und 30 °C
- Bild 41: Änderung der Raumdichte des Glasperlen-Asphaltes nach Konditionierung mittels PAV-A; 30 °C, 20 h, variierender Konditionierungsdruck
- Bild 42: Erweichungspunkte Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem Glasperlen-Asphalt; Konditionierungsbedingungen: 30 °C, 20 h, variierender Druck

- Bild 43: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel des Glasperlen-Asphalt; Konditionierungsbedingungen: 30 °C, 20 h, variierender Druck
- Bild 44: Erweichungspunkt Ring und Kugel nach unterschiedlicher Konditionierungsdauer und an verschiedenen Ausgangsstoffe
- Bild 45: Ergebnisse des T-Sweeps im DSR am Bindemittel nach unterschiedlicher Konditionierungsdauer
- Bild 46: Ergebnisse des T-Sweeps im DSR am extrahierten Asphaltmischgut nach unterschiedlicher Konditionierungsdauer
- Bild 47: Ergebnisse des T-Sweeps im DSR an extrahierten Asphaltprobekörpern nach unterschiedlicher Konditionierungsdauer
- Bild 48: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper bei einer Konditionierung von 2,1 MPa und 20 Stunden unter Variation der Temperatur und der Art des Druckablassens
- Bild 49: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht), 2,1 MPa, 20 h, Variation: Temperatur, Art des Druckablassens
- Bild 50: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht), 2,1 MPa, 60 °C; Variation: Konditionierungsdauer, Art des Druckablassens
- Bild 51: Abkühlversuch AC 8 D S (hohlraumreich), 2,1 MPa, 60 °C; Variation: Konditionierungsdauer, Art des Druckablassens
- Bild 52: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht und hohlraumreich), 2,1 MPa, 60 °C, 20 Stunden; Variation: Art des Druckablassens
- Bild 53: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht und hohlraumreich), 2,1 MPa, 60 °C, 80 Stunden; Variation: Art des Druckablassens
- Bild 54: Abkühlversuch AC 8 D S (dicht und hohlraumreich), 2,1 MPa, 60 °C, 160 Stunden; Variation: Art des Druckablassens
- Bild 55: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (dicht) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa und 60 °C unter Variation der Konditionierungsdauer und der Art des Druckablassens
- Bild 56: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (hohlraumreich) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa und 60 °C unter Variation der Konditionierungsdauer und der Art des Druckablassens
- Bild 57: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (dicht; hohlraumreich) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa, 60 °C und 20 Stunden unter Variation der Art des Druckablassens
- Bild 58: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (dicht; hohlraumreich) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa, 60 °C und 80 Stunden unter Variation der Art des Druckablassens
- Bild 59: Ermittelte Änderung der Raumdichte am prismatischen Probekörper AC 8 D S (dicht; hohlraumreich) bei einer Konditionierung von 2,1 MPa, 60 °C und 160 Stunden unter Variation der Art des Druckablassens
- Bild 60: Erweichungspunkt Ring und Kugel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (dicht) bei Konditionierungsbedingungen von 30 °C bzw. 60 °C, 2,1 MPa, 20 h und Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens
- Bild 61: Erweichungspunkt Ring und Kugel (gesamt) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (dicht) bei Konditionierungsbedingungen von 30 °C bzw. 60 °C, 2,1 MPa, 20 h und Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens
- Bild 62: Erweichungspunkt Ring und Kugel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (dicht) bei 60 °C, 2,1 MPa und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens sowie der Konditionierungsdauer
- Bild 63: Erweichungspunkt Ring und Kugel (gesamt) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (dicht) bei 60 °C, 2,1 MPa und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens sowie der Konditionierungsdauer

- Bild 64: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) des AC 8 D S (dicht); Konditionierungsbedingungen: 60 °C, 2,1MPa, variierender Konditionierungsdauer und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen
- Bild 65: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (gesamt) des AC 8 D S (dicht); Konditionierungsbedingungen: 60 °C, 2,1MPa, variierender Konditionierungsdauer und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen
- Bild 66: Erweichungspunkt Ring und Kugel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens sowie der Konditionierungsdauer
- Bild 67: Erweichungspunkt Ring und Kugel (gesamt) am extrahierten Bindemittel aus der Asphaltbetonvariante AC 8 D S (hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens sowie der Konditionierungsdauer
- Bild 68: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) des AC 8 D S (hohlraumreich); Konditionierungsbedingungen: 60 °C, 2,1MPa, variierender Konditionierungsdauer und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen
- Bild 69: BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (gesamt) des AC 8 D S (hohlraumreich); Konditionierungsbedingungen: 60 °C, 2,1MPa, variierender Konditionierungsdauer und jeweils mit langsamen und normalen Druckablassen
- Bild 70: Vergleich Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 20 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens
- Bild 71: Vergleich Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 80 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens
- Bild 72: Vergleich Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 160 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens
- Bild 73: Vergleich BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 20 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens
- Bild 74: Vergleich BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 80 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens
- Bild 75: Vergleich BLACK-Diagramm DSR – extrahiertes Bindemittel (innen, außen) am extrahierten Bindemittel aus den Asphaltbetonvarianten AC 8 D S (dicht und hohlraumreich) bei 60 °C, 2,1 MPa, 160 Stunden und unter Variation der Geschwindigkeit des Druckablassens

Tabellen

- Tab. 1: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – Straßenbaubitumen 50/70 (1. Probe)
- Tab. 2: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – Straßenbaubitumen 50/70 (2. Probe)
- Tab. 3: Komplexer Schermodul DSR – Straßenbaubitumen 50/70 (1. Probe)
- Tab. 4: Phasenwinkel DSR – Straßenbaubitumen 50/70 (1. Probe)
- Tab. 5: Komplexer Schermodul DSR – Straßenbaubitumen 50/70 (2. Probe)
- Tab. 6: Phasenwinkel DSR – Straßenbaubitumen 50/70 (2. Probe)
- Tab. 7: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A

- Tab. 8: Komplexer Schermodul DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Tab. 9: Phasenwinkel DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Tab. 10: Prüfbedingungen gemäß DIN EN ISO 4892-2, DIN EN 513 und BSS-Verfahren
- Tab. 11: Bruchtemperatur und -spannung – BSS-Verfahren
- Tab. 12: Bruchtemperatur und -spannung Tastversuche PAV-A-Konditionierung mit 2,1 MPa und 20 h – Variante A (AC 8 D S)
- Tab.13: Zugfestigkeit und Bruchdehnung – BSS- und PAV-A-Verfahren – Variante A (AC 8 D S)
- Tab.14: Bruchtemperatur und -spannung PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – Variante A (AC 8 D S)
- Tab.15: Zugfestigkeit und Bruchdehnung Tastversuche PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – Variante A (AC 8 D S)
- Tab.16: Bruchtemperatur und -spannung PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – Variante PA 8
- Tab.17: Zugfestigkeit und Bruchdehnung PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und -druck – PA 8
- Tab.18: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – Straßenbaubitumen 50/70
- Tab.19: Ergebnisse BBR (Biegekriechsteifigkeit und m-Wert) – Straßenbaubitumen 50/70
- Tab.20: Komplexer Schermodul DSR – Straßenbaubitumen 50/70
- Tab.21: Phasenwinkel DSR – Straßenbaubitumen 50/70
- Tab.22: Ergebnisse der MSCR-Prüfung bei 60 °C – Straßenbaubitumen 50/70
- Tab.23: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Tab.24: Ergebnisse BBR (Biegekriechsteifigkeit und m-Wert) – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Tab.25: Komplexer Schermodul DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Tab.26: Phasenwinkel DSR – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Tab.27: Ergebnisse des MSCR-Test bei 60 °C – polymermodifiziertes Bindemittel 40/100-65 A
- Tab. 28: Prozentuale Änderung der Abmessungen und Raumdichte durch PAV-A-Konditionierung (30 °C; 20 Stunden, Druck variierend)
- Tab. 29: Bindemittelwerte nach DIN EN 1426 bzw. 1427 – Straßenbaubitumen 30/45
- Tab.30: Komplexer Schermodul DSR – Bindemittel nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C (Glasperlen-Asphalt)
- Tab. 31: Phasenwinkel DSR – Bindemittel nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C (Glasperlen-Asphalt)
- Tab. 32: Erweichungspunkt Ring und Kugel nach unterschiedlicher Alterungsdauer an verschiedenen Ausgangsstoffen
- Tab. 33: Komplexer Schermodul DSR – Bindemittel nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa
- Tab.34: Phasenwinkel DSR – Bindemittel nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa
- Tab.35: Komplexer Schermodul DSR – extrahiertes Asphaltmischgut nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa
- Tab.36: Phasenwinkel DSR – extrahiertes Asphaltmischgut nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa
- Tab.37: Komplexer Schermodul DSR – extrahierte Asphaltprobekörper nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa
- Tab.38: Phasenwinkel DSR – extrahierte Asphaltprobekörper nach PAV-A-Konditionierung bei 30 °C und 0,1 MPa
- Tab.39: PAV-A – Variation von Konditionierungstemperatur und Art des Druckablassens – Variante AC 8 D S (dicht)

- Tab.40: PAV-A – Variation von Konditionierungsdauer und Art des Druckablassens – Variante AC 8 D S (dicht)
- Tab.41: PAV-A – Variation von Konditionierungsdauer und Geschwindigkeit des Druckablassens – Variante AC 8 D S (hohlraumreich)
- Tab. 42: Erweichungspunkt Ring und Kugel – Straßenbaubitumen 50/70
- Tab. 43: Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem Asphaltbeton AC 8 D S (dicht) – Konditioniert für 20 h bei 2,1 MPa
- Tab. 44: Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem Asphaltbeton AC 8 D S (dicht) – Konditioniert bei 60 °C und 2,1 MPa
- Tab. 45: Komplexer Schermodul – AC 8 D S (dicht) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils innen und außen)
- Tab. 46: Phasenwinkel – AC 8 D S (dicht) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils innen und außen)
- Tab. 47: Komplexer Schermodul – AC 8 D S (dicht) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils gesamt)
- Tab. 48: Phasenwinkel – AC 8 D S (dicht) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils gesamt)
- Tab. 49: Erweichungspunkt Ring und Kugel – Straßenbaubitumen 50/70 – 2. Probe
- Tab. 50: Erweichungspunkt Ring und Kugel am extrahierten Bindemittel aus dem Asphaltbeton AC 8 D S (hohlraumreich) – Konditioniert bei 60 °C und 2,1 MPa
- Tab. 51: Komplexer Schermodul DSR – hohlraumreicher AC 8 D S (20 h, 80 h, 160 h, jeweils innen und außen)
- Tab. 52: Phasenwinkel DSR – hohlraumreicher AC 8 D S (20 h, 80 h, 160 h, jeweils innen und außen)
- Tab. 53: Komplexer Schermodul – AC 8 D S (hohlraumreich) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils gesamt)
- Tab. 54: Phasenwinkel – AC 8 D S (hohlraumreich) (20 h, 80 h, 160 h, jeweils gesamt)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2014

S 84: Anforderungen an die Erhaltung von Radwegen
Maerschalk, Oertelt € 19,00

S 85: Kornformbeurteilung mit dem optischen Partikelmessgerät Camsizer®
Kunz
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

S 86: Einfluss des Asphaltgranulates auf die bemessungs- und ermüdungsrelevanten Materialeigenschaften einer zwangsgemischten, kaltgebundenen und bitumendominanten Tragschicht
Radenberg, Miljković, Schäfer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 87: Untersuchungen zur Ermittlung von Präzisionswerten für zwei AKR-Schnelltests Durchführung und Auswertung
Müller, Seidel, Böhm
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 88: Verwendung von AKR-geschädigtem Betonaufbruch für hydraulisch gebundene Tragschichten
Hüniger, Börner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 89: Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
Villaret, Frohböse, Jähmig, Karcher, Niessen, Buch, Zander
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 90: AKR-Untersuchungen für Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberfläche
Müller, Seidel, Böhm, Stark, Ludwig, Seyfarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 91: Straßen im Gesamtsystem der Verkehrsträger
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 92: Längsebenheitsmesssysteme – Überprüfung der Signalverarbeitungsverfahren nach dem Prinzip der Mehrfachabtastung (HRM)
Neubeck, Wiesebrock
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

S 93: Bewertung und Optimierung der Hydrophobierung zur Verminderung des AKR-Schädigungsfortschrittes in Fahrbahndeckenbetonen
Weise, Schrang € 19,50

S 94: Beanspruchung und Entfernbarekeit temporärer Fahrbahnmarkierung
Kemper, Schacht, Klaproth, Oeser, Beyer € 16,50

S 95: Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel
Bialucha, Merkel, Motz, Demond, Schmidt, Ritter, Haas € 14,50

S 96: Bewertungshintergrund für den Widerstand gegen Polieren von Gesteinskörnungen nach dem PWS-Verfahren
Dudenhöfer, Rückert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 97: Einheitliche Bewertungs- kriterien 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 praxisgerechten 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, Miehl

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, Tielmann, 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, Scherkenbach, Jansen in Vorbereitung

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 in Vorbereitung

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.

2019

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.

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.

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.