
Gebrauchsverhalten von Heiß- asphalt mit Asphaltgranulat unterschiedlicher Art und Menge sowie Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 223

Gebrauchsverhalten von Heiß- asphalt mit Asphaltgranulat unterschiedlicher Art und Menge sowie Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums

von

Martin Radenberg, Daniela Breddemann, Sören Holzwarth
Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften,
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Hans Schmidt, Elena Rudi, Frank Stephan
Basalt-Actien-Gesellschaft, Linz am Rhein

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. 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 BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 07.0299

Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat unterschiedlicher Art und Menge sowie Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums

Fachbetreuung:

Franz Bommert

Referat:

Asphaltbauweisen

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen

Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach

Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:

MedienMélange: Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG

Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen

Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323 | ISBN 978-3-95606-883-6 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s223>

Bergisch Gladbach, September 2025

Kurzfassung – Abstract

Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat unterschiedlicher Art und Menge sowie Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums

Im Zuge der Kreislaufwirtschaft, der Schonung von natürlichen Ressourcen und im Bestreben zur Minderung der Folgen des Klimawandels ist es notwendig ressourceneffizient zu handeln und Baustoffe zu verwenden, welche eine hohe Wertigkeit hinsichtlich der Langlebigkeit, Reparaturfreundlichkeit und Wiederverwendbarkeit oder Verwertbarkeit aufweisen. Um die Verwendung größerer Mengen an Ausbauasphalten möglich zu machen, ist es von elementarer Bedeutung das Materialverhalten zielsicher ansprechen und beurteilen zu können. Des Weiteren müssen Mittel und Wege aufgezeigt werden wie Asphaltgranulate, welche durch eine Beurteilung des Erweichungspunktes Ring und Kugel als kritisch eingestuft werden, zielsicher über Performance-Kriterien als einsatzfähig oder nicht mehr verwendbar definiert werden können. Dies ist insbesondere unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung bei der mehrfachen Wiederverwendung von Asphalt eine wesentliche Aufgabe.

Mit dem hier vorliegenden Forschungsprojekt sollte ein einfaches Performance-Kriterium zur Beurteilung des Gebrauchsverhaltens von Heißasphalt mit Asphaltgranulat geschaffen werden. In diesem Zusammenhang sollte auch die Möglichkeit des indirekten Nachweises einer Doppelumhüllung betrachtet werden. Unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Asphaltgranulaten, welche sich hinsichtlich der Härte des rückgewonnenen Bindemittels unterschieden, wurde der Einfluss der Art, Menge und Mischdauer auf die Asphaltperformance einer Asphaltbinderschicht AC 16 B und einer Asphalttragschicht AC 22 T untersucht. Die verwendeten Asphalte wurden hinsichtlich der Verdichtbarkeit, des Verformungswiderstands, der Asphaltsteifigkeit sowie des Kälte- und Ermüdungsverhaltens analysiert. Darüber hinaus wurde das rückgewonnene Bindemittel hinsichtlich des Erweichungspunktes Ring und Kugel und der Bindemittelsteifigkeit, bestimmt mittels Dynamischem Scherrheometer, geprüft.

Für die Untersuchungsvarianten dieses Forschungsprojektes wurde festgestellt, dass die Prüfverfahren zur Bestimmung der Verdichtbarkeit und des Verformungswiderstandes keine belastbaren Prüfergebnisse lieferten. Die Ergebnisse der Verdichtbarkeit differenzieren unter Berücksichtigung der Verfahrenspräzision nicht hinreichend. Bei der Bestimmung des Verformungswiderstandes wurde festgestellt, dass das Vorliegen unterschiedlicher Abbruchkriterien (10.000 Lastwechsel oder 40 ‰ Dehnung) in Kombination mit unterschiedlichen Verläufen (mit oder ohne Wendepunkt) eine generelle Beurteilung basierend auf diesem Prüfverfahren unmöglich macht.

Die Betrachtung des Einflusses der Nachmischzeit und der Asphaltgranulatzugabemenge auf die Ergebnisse im Tieftemperaturverhalten, der Asphaltsteifigkeit und der Ermüdung erlaubt keine gesicherte Schlussfolgerung. Es muss festgestellt werden, dass die Prüfergebnisse keine systematischen Verläufe aufweisen.

Ein möglicher Performance-Ansatz dieses Forschungsprojektes war die Analyse und der Vergleich der Steifigkeiten des Asphaltes mit denen des verwendeten Bitumens (Gemisch aus Frischbitumen und Bitumen im Asphaltgranulat). Mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes konnte der Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit bestätigt werden. Deswegen wurde zur Ableitung eines Performance-Kriteriums für das Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat die festgestellte Korrelation verwendet und angestrebt, unter Verwendung der Ergebnisse des Tieftemperaturverhaltens, einen „kritischen“ Bereich für die Performance-Eigenschaften zu definieren.

Dafür wurde der Zusammenhang zwischen der Bruchtemperatur und der Steifigkeit des Asphaltes am kältesten Messpunkt der Steifigkeits-Temperaturfunktion geprüft und eine Korrelation nachgewiesen. Unter Berücksichtigung des Arbeitspapiers Tieftemperaturverhalten von Asphalt, Teil 1, lässt sich in Abhängigkeit von der Frosteinwirkungszone ein kritischer Bereich für die Asphaltsteifigkeit definieren. Bei dem Vergleich zwischen der Bruchtemperatur im Abkühlversuch und der Bindemittelsteifigkeit des rückgewonnenen Bindemittels bei -10 °C und 10 Hz (sowie auch bei 1 Hz) wurde ebenfalls eine Korrelation festgestellt und ein kritischer Bereich definiert.

Basierend auf den beschriebenen Zusammenhängen lässt sich eine Empfehlung für den weiteren Umgang mit Asphaltgranulat definieren. So können Mischguthersteller anhand einer Probemischung mit Asphaltgranulat sowie anschließender Extraktion und DSR-Prüfung des Bindemittels die Performance-Wirkung im Asphaltmischgut prognostizieren. Zur Kontrolle der Asphaltperformance sind für den Auftraggeber Prüfungen von Steifigkeits- und/oder Abkühlversuchen zu empfehlen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Datengrundlage dieses Forschungsprojektes zu schwach für eine finale Aussage (auch bzgl. der Doppelumhüllung) ist und durch weitere Forschung validiert werden sollte. Um in zukünftigen Projekten Inhomogenitäten zu vermeiden wurden darüber hinaus basierend auf den Erkenntnissen dieses Forschungsprojektes Empfehlungen abgeleitet, um Streuungen durch die Probenahme an Asphaltmischwerken zu minimieren.

Performance of hot mix asphalt with different types and quantities of reclaimed asphalt and derivation of a simple performance criterion

In the course of circular economy, conservation of natural resources and in an effort to reduce the consequences of climate change, it is necessary to act in a resource-efficient manner and to use building materials that have a high value in terms of durability, ease of repair and reusability or recyclability. To allow the use of larger quantities of reclaimed asphalt, it is of fundamental importance to be able to accurately address and assess the material behaviour. Furthermore, ways and means must be shown how asphalt granulates, which are classified as critical by an assessment of the softening point ring and ball, can be precisely defined as suitable or no longer suitable via performance criteria. This is an essential task, especially considering the future development of multiple reuse of asphalt.

The aim of this research project was to create a simple performance criterion for assessing the performance of hot asphalt with Reclaimed asphalt pavement (RAP). In this context, the possibility of indirect proof of double coating should also be considered. Using two different asphalt granulates, which differ in terms of the hardness of the recovered binder, the influence of the type, quantity and mixing time on the asphalt performance of an AC 16 B asphalt binder course and an AC 22 T asphalt base course has been investigated.

The asphalts used have been analysed in terms of compactability, deformation resistance, asphalt stiffness and cold temperature and fatigue behaviour. Furthermore, the reclaimed binder was tested with regard to the softening point ring and ball and the binder stiffness, determined by means of a dynamic shear rheometer.

For the investigation variants of this research project, it was found that the test methods for determining compactability and resistance to permanent deformation did not provide robust test results. The results of the compactability do not differentiate sufficiently, taking into account the method's precision. When determining the resistance to permanent deformation, it was found that the presence of different abort criteria (10,000 load cycles or 40 % strain) in combination with different curve progressions (with or without inflection point) makes a general assessment based on this test method impossible. The consideration of the influence of blending time and the amount of asphalt granulate added on the results of low temperature behaviour, asphalt stiffness and fatigue do not allow a reliable conclusion. It must be stated that the test results do not show any systematic patterns.

One possible performance approach of this research project was to analyse and compare the asphalt stiffnesses with those of the resulting bitumen used (mixture of fresh bitumen and bitumen in the asphalt granulate). The results of this research project confirmed the correlation between binder and asphalt stiffness. Therefore, in order to derive a performance related criterion for the performance of hot mix asphalt with asphalt granulate, the established relationship was used and the aim was to define a "critical" range for the performance properties using the results of the low-temperature behaviour.

For this purpose, the correlation between fracture temperature and stiffness of the asphalt at the coldest measuring point of the stiffness-temperature function was tested. A correlation could be proven. Considering the FGSV working paper for Low Temperature Behaviour of Asphalt, Part 1 [AP TTV, Part 1], a critical range for the asphalt stiffness can be defined depending on the frost exposure zone (here exemplarily for zone II). When comparing the fracture temperature in the cooling test with the binder stiffness of the reclaimed binder at -10 °C and 10 Hz (as well as at 1 Hz), a correlation could also be found and a critical range defined.

Based on the described correlations, a recommendation for the further handling of asphalt granulate can be defined. Thus, asphalt producers can predict the performance effect on the asphalt mix on the basis of a trial mixture with asphalt granulate and a subsequent extraction and DSR test of the binder. Stiffness and/or cooling tests are recommended for the client to check the asphalt performance. It should be noted that the data basis of this research project is too weak for a final statement (also with regard to the double coating) and should be validated by further research. In order to avoid inhomogeneities in future projects, recommendations were also derived based on the findings from this research project to minimise scattering due to sampling at asphalt mixing plants.

Summary

Performance of hot mix asphalt with different types and quantities of reclaimed asphalt and derivation of a simple performance criterion

1 Introduction and problem

In addition to their significant contribution to infrastructure, asphalt roads fulfil another important role. Due to their composition of aggregate and petroleum-based binders, they represent a "stockpile" of future resources (urban mining). The temperature-dependant viscoelastic properties of asphalt make it a building material that can be used numerous times with a high reuse rate.

Within the scope of a circular economy, the conservation of natural resources and in an effort to reduce the consequences of climate change, it is necessary to act in a resource-efficient manner and to use building materials that have a high value in terms of durability, ease of repair and reusability or recyclability. Asphalt can be recycled and reused. Reuse is the optimal use and is defined as the reutilisation of a material/product for the same purpose - in terms of asphalt, this means the use of asphalt granulate in the production of asphalt mix.

In Germany, increasing investments in road infrastructure, especially in road maintenance, and the associated increase in construction activities have resulted in more reclaimed asphalt incurring than could be reused. Accordingly, there is a regional oversupply, for which suitable strategies are being sought after to increase quantities for reuse and to raise the level of added value. [Deutscher Asphaltverband, 2018]

In order to make the use of larger quantities of reclaimed asphalt possible, it is of elementary importance to be able to address and assess the material behaviour accurately. In many research projects, numerous construction and material-technical findings have been gained with the use of asphalt granulate. Ways and means must be shown how asphalt granulates, which are classified as critical by an assessment of the softening point ring and ball according to [DIN EN 1427], can be defined unerringly via performance criteria as usable or no longer usable. This is an essential task, especially considering the future development in the multiple reuse of asphalt. In this context, special attention should also be paid to the properties of the bitumen in the asphalt granulate.

2 Objective

The aim of this research project was to create a simple performance criterion for assessing the performance of hot mix asphalt with granulated asphalt from reclaimed asphalt pavement (RAP). In this context, the possibility of indirect proof of double coating should also be considered. Using two different asphalt granulates, which differ in terms of the hardness of the recovered binder, the influence of the type, quantity and mixing time on the asphalt performance of an AC 16 B asphalt binder course and an AC 22 T asphalt base course was investigated.

The aim was to achieve the simplest possible performance approach, with which the performance could be evaluated in sufficient depth and, in addition, the homogenisation of the binder mixture could be estimated.

3 Investigation programme

The research project was divided into four project phases.

In the first project phase, a selection of materials was made as a basis for deeper investigations. In addition, a national and international literature review was carried out on factors influencing asphalt performance with asphalt granulate. A preliminary investigation was performed using an asphalt granulate in an AC T asphalt base course mix with five different blending times. Herewith an approach for assessing the homogenisation of rejuvenators from the research project FE 07.0250/2011/LRB by [RADENBERG et al., 2016] was analysed. By comparing the asphalt stiffness according to [TP Asphalt-StB, Teil 26] with the binder stiffness at identical frequencies and temperatures, an influence of homogenisation with increasing blend-

ing time should be investigated. In the project FE 07.0250/2011/LRB, it was possible to analyse clear dependencies between the material parameters. A mixture that has deliberately not been homogenised sufficiently in the laboratory should then, as expected, lead to deviating results.

In the second project phase, the asphalt granulates selected in consultation with the customer were analysed with regard to their characteristic granulate properties and the binder properties of the reclaimed binder.

Using the two asphalt granulates, initial type testings (ITT) were prepared for an AC 22 T asphalt base course mix and an AC 16 B asphalt binder mix. Table 1 gives an overview of the 38 asphalt variants that were investigated in this research project. In addition to the two asphalt granulates, two mix types and the three different RAP-contents, three different blending times (NMZ) were implemented at the mixing plant. In several research projects, the blending time has proven to be a significant factor influencing the mechanical properties of the asphalt. The wide range of variants should enable a clear analysis of the individual influencing factors, especially with regard to the pulping of the asphalt granulate.

AC T	Reference variant without AG		
	AG 1	20 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		40 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		60 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
AG 2	20 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃	
	40 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃	
	60 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃	
AC B	Reference variant without AG		
	AG 1	20 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		40 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		60 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
	AG 2	20 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		40 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		60 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃

Table 1: Mix variants for laboratory testing

At a suitable mixing plant at Groß Bülten (DEUTAG Nord, a branch of BAG) the asphalt mixes were produced in large scale following the mix designs and the requirements of the research program. The decisive factors for the choice of this site were the storage location of the asphalt granulate, the existing parallel drum as well as the personnel at this mixing plant with a lot of experience with the addition of high amounts of RAP.

The asphalt mix produced on a large scale was to be examined in the third project phase with regard to asphalt performance. For this purpose, the following investigations were carried out:

- Test with indirect cyclic tensile loading to determine the fatigue function according to [TP Asphalt-StB, Teil 24]
- Test with indirect cyclic tensile loading for the determination of the stiffness-temperature function in the multistage method according to [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Testing of low-temperature behaviour (cooling test and monoaxial tension test at four temperatures) according to [TP Asphalt-StB, Teil 46 A]
- Investigations into the resistance to deformation with the monoaxial cyclic compression test according to [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1]
- Compactability of asphalt using the Marshall method according to [TP Asphalt-StB, Teil 10 B]

The asphalt mix was also investigated in terms of composition and binder properties, assessed using the softening point ring and ball according to [DIN EN 1427] and the complex shear moduli and phase angles following [DIN EN 14779].

In the last phase of the work, trial fields were produced for the variants without and with maximum asphalt granulate addition (60 M.-%). Cores were drilled from the test fields, with which the laboratory tests to determine the asphalt performance (determination of the fatigue function, the stiffness-temperature function and the low-temperature behaviour) analogous to the tests in project phase 3.

4 Results, conclusion and outlook

In a first step, results of the asphalt performance tests were evaluated in isolation with regard to test accuracy and plausibility. It was found that the test methods for determining compactability and deformation resistance did not provide robust test results. The results of the compactability cannot sufficiently differentiate considering the process precision. When determining the deformation resistance, it was found that the presence of different termination criteria (10,000 load cycles or 40 ‰ strain) in combination with different curve progressions (with or without inflection point) makes a general assessment based on this test method impossible.

A holistic view of the test results (table 2) should make it possible to derive systematic dependencies on the blending time or the amount added. For this step, the measurement results were standardised for each test method, isolated according to asphalt base course and asphalt binder course. The standardisation provides for a scale of values from 0 ("worst" variant) to 10 ("best" variant). Thus, for each test method, the variant with the lowest compaction resistance, highest deformation resistance, best low-temperature flexibility, lowest elastic strain at 10,000 load cycles and the lowest scatter of the elastic modulus, when considering the temperature-invariant master curves, is assigned the value 10.

	Blending time [s]	compactability	Resistance to deformation	Low-temperature (ZFR)	fatigue ϵ_4	stiffness modulus
TS Ref	25	4,4	5,4	10,0	10,0	0,0
1 TS 20	5	2,8	6,0	5,9	7,4	8,6
	25	8,4	10,0	4,1	6,3	9,4
	45	9,1	7,6	6,2	6,6	8,7
1 TS 40	5	8,5	8,9	7,4	6,8	7,9
	25	4,8	7,1	6,5	4,6	7,5
	45	0,5	7,3	6,3	5,2	7,9
1 TS 60	5	7,7	0,7	2,9	1,0	8,4
	25	7,7	3,1	2,1	0,2	7,0
	45	6,6	3,9	2,1	2,3	9,3
2 TS 20	5	0,0	7,8	5,4	8,3	6,6
	25	4,1	7,7	5,1	5,6	10,0
	45	5,4	9,5	5,7	7,8	8,0
2 TS 40	5	4,7	8,2	5,5	1,3	9,4
	25	10,0	2,6	6,1	2,1	6,6
	45	8,3	0,0	5,4	3,1	8,6
2 TS 60	5	7,1	7,8	0,0	0,0	7,0
	25	8,9	4,4	2,6	0,8	7,8
	45	7,7	1,2	4,7	3,8	9,2
BS Ref	25	2,0	1,8	5,2	9,7	4,3
1 BS 20	5	0,0	2,8	4,8	7,2	7,2
	25	1,5	4,4	7,4	8,4	8,6
	45	3,6	5,7	10,0	10,0	5,2
1 BS 40	5	4,5	5,9	9,4	6,2	6,3
	25	5,4	5,0	4,3	7,5	10,0
	45	6,7	9,4	3,5	4,6	8,5
1 BS 60	5	3,1	4,7	1,4	4,9	8,5
	25	6,2	10,0	2,3	3,0	7,0
	45	7,7	4,3	2,6	3,2	7,9
2 BS 20	5	1,7	4,4	3,5	4,8	5,5
	25	4,3	5,8	3,9	1,7	4,0
	45	3,1	5,0	7,5	7,4	6,7
2 BS 40	5	5,4	0,0	7,6	1,4	0,0
	25	6,4	1,1	7,9	1,7	4,6
	45	9,6	2,6	5,7	2,0	8,7
2 BS 60	5	10,0	4,7	1,2	0,9	6,0
	25	9,3	5,9	0,0	0,0	0,6
	45	8,7	5,6	1,4	0,4	6,3

Table 2: Standardisation for the holistic assessment of test results

The consideration of the influence of the blending time on low-temperature behaviour, asphalt stiffness and fatigue does not allow a reliable conclusion. It was found that the test results show different progressions within each variant. The scatter of test results generally depends on the precision of the respective test method, the careful collection of the measurement sample from the laboratory sample and the collection of mix samples on the construction site or at an asphalt mixing plant. The deviation of the mix composition between ITT and industrially produced asphalt mix might be an explanation for the deviations of the test results.

When evaluating the RAP content (comparison at 25 s blending time), only for the variants of the asphalt binder course with asphalt granulate 1 an expected systematic can be recognised. These variants also showed the highest uniformity in the mix composition. Furthermore, it can be stated that the fatigue test according to [TP Asphalt, Teil 24] shows a consistent systematic across all variants and must be emphasised. In this context, however, it should be pointed out that the asphalt fatigue test is not a standard test for asphalt binder courses.

One possible performance approach of this research project was the analysis and comparison of the asphalt stiffness with those corresponding bitumen stiffness (mixture of fresh bitumen and bitumen in the asphalt granulate). This approach was investigated for the 38 data sets available and is shown in figure 1 for the variants with asphalt granulate 1.

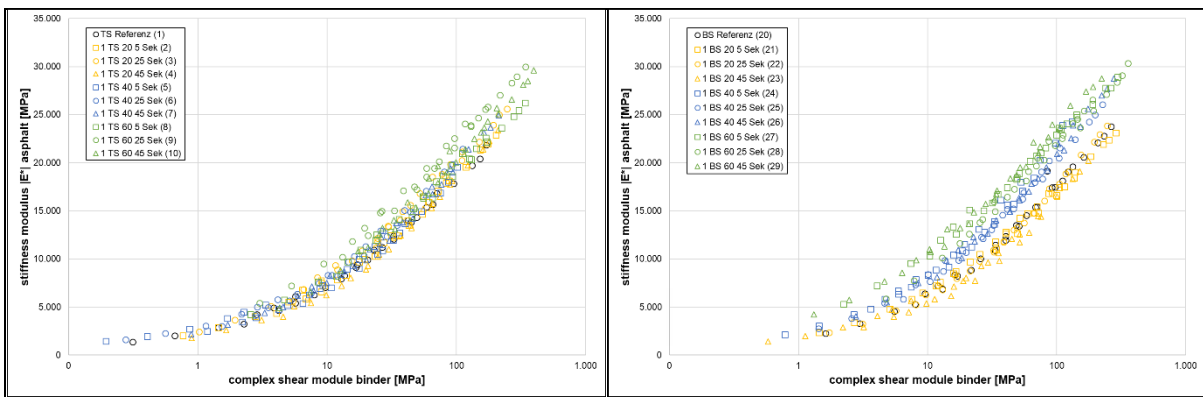


Figure 1: Relationship between binder and asphalt stiffness of asphalt binder courses (right) and asphalt base courses (left) using asphalt granulate 1

The results of this research project confirmed the correlation between binder and asphalt stiffness. The results do not differentiate sufficiently, which is why a conclusion on the homogenisation process and the double coating cannot be drawn without doubt.

The relationship between binder and asphalt stiffness was used to derive a performance criterion for the performance of hot asphalt with granulated asphalt. One possible approach was to define "critical" areas in the correlations shown, based on the results of the low-temperature behaviour according to [TP Asphalt, Part 46 A]. For this purpose, the correlation between fracture temperature and the stiffness of the asphalt at the coldest measuring point of the stiffness-temperature function (for 10 Hz with reference to the frequency generally used for the German Standards for the dimensioning of asphalt surfaces [RDO Asphalt 09] and for 1 Hz to take account of test engineering elements) was tested. Considering the Working Paper Low Temperature Behaviour of Asphalt, Part 1 [AP TTV, Teil 1], a critical range for the failure temperature can be defined as a function of the frost exposure zone (here exemplarily for zone II). This is highlighted in the following using the example of the asphalt binder course in figure 2 (left). The comparison between the fracture temperature in the cooling test and the binder stiffness of the reclaimed binder at -10 °C and 10 Hz results in the critical range for the asphalt binder course defined in figure 2 (right) according to [AP TTV, Teil 1]. The correlations at a test frequency of 1 Hz confirmed the established correlations with similar coefficients of determination.

Based on Figure 4-2, the critical stiffness for the asphalt binder course can be derived as a stiffness modulus of 28,325 MPa and a critical binder stiffness of 292.765 kPa. When considering the reclaimed binder, the correlation with the loss modulus was also considered to account for the phase angle, but this did not result in higher precision and was therefore not considered further.

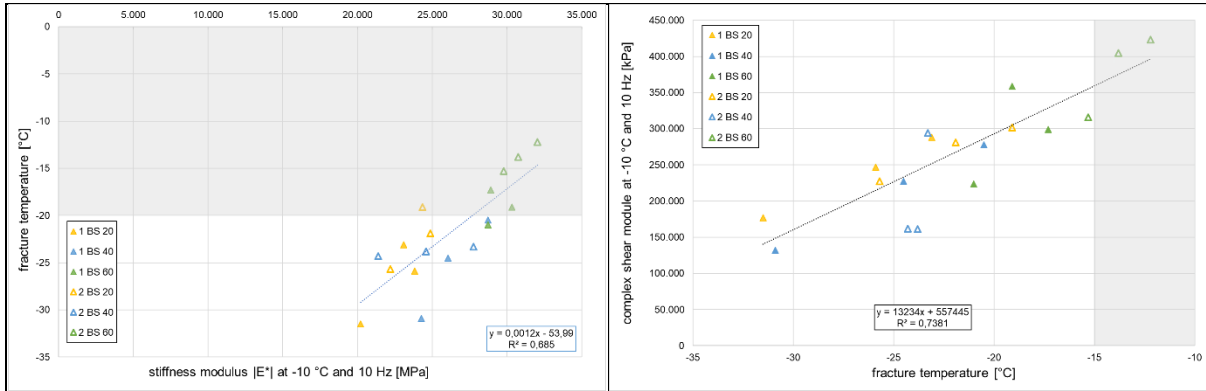


Figure 2: Comparison of the fracture temperature from the cooling test with the stiffness at -10 °C and 10 Hz (left) and with the binder stiffness of the reclaimed binder at -10 °C and 10 Hz (right) - asphalt binder courses

The determined critical ranges can be transferred to the correlations shown in figure 1 and would define a critical range of stiffness considering the low-temperature properties. This is shown below as an example for the variants of the asphalt binder course with asphalt granulate 2 in figure 3. The critical range is highlighted in colour and can be defined for measured values at 10 Hz and -10 °C.

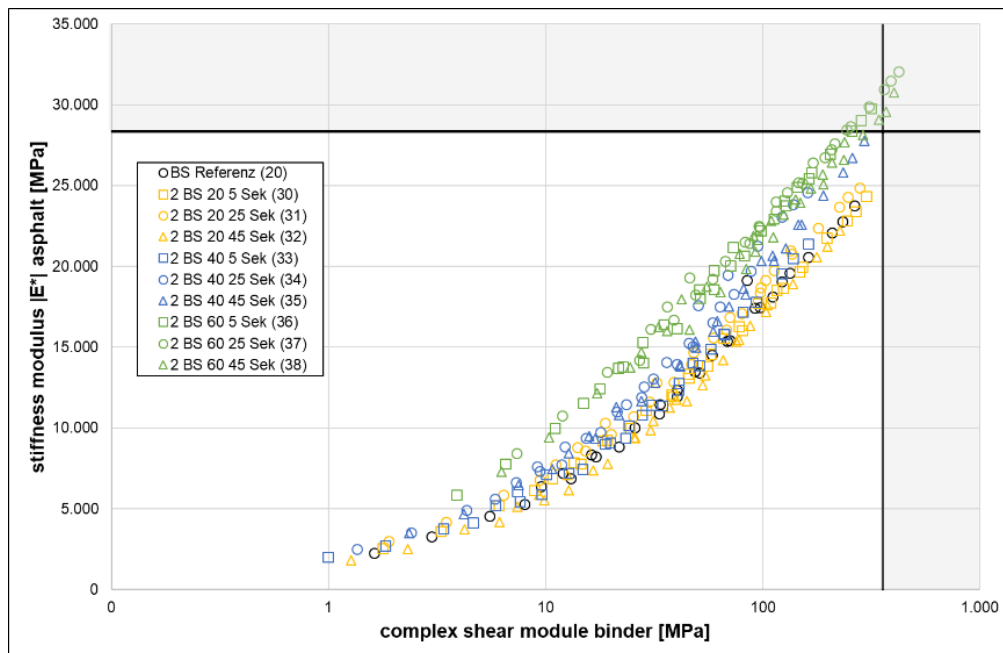


Figure 3: Definition of critical ranges for the asphalt and binder stiffness of asphalt binder courses with asphalt granulate 2, considering the low-temperature performance

Based on the relationships described, a recommendation for further handling of asphalt granulate can be defined. In this way, asphalt producers are able to predict the performance effect in the asphalt mix on the basis of a test mix with asphalt granulate and subsequent extraction and DSR testing of the binder. Stiffness and/or cooling tests are recommended for the customer to check the asphalt performance. It is recommended that the data basis of this research project is too weak for a final statement, among other things due to deliberately chosen inhomogeneity at 5 s blending time, and should be validated by further research.

In summary, however, it can be stated that based on the results of this research project, no final evaluation of the service behaviour of hot asphalt with asphalt granulate is possible. The many influencing parameters, such as large-scale production, variation of the post-mixing time, selection of asphalt granulate with a very hard binder as well as the variation of the asphalt granulate addition quantity resulted in partly highly inhomogeneous samples, which made a systematic analysis difficult. In further research, it is recommended to systematically analyse the individual influencing factors on a laboratory scale in order to identify undesirable effects on asphalt performance and to allow to exclude them for further testing. Based on the findings of this research project, recommendations for future projects were derived in order to minimise scatter due to sampling at asphalt mixing plants.

Inhalt

1	Stand der Wissenschaft und Ziel der Forschung	13
1.1	Problemstellung	13
1.2	Stand der Wissenschaft und Technik	14
1.3	Ziel des Forschungsprojektes	20
2	Untersuchungsmethodik	21
2.1	Voruntersuchungen zum Aufschluss des Asphaltgranulates	21
2.2	Laboruntersuchungen	22
2.2.1	Konzeption und Mischgutherstellung	22
2.2.2	Untersuchung der Asphalt-Performance von großtechnisch hergestelltem Asphaltmischgut	23
2.2.3	Praxisanbindung	23
3	Untersuchungsmaterialien	24
3.1	Auswahl des Asphaltgranulates und der Mischanlage	24
3.2	Auswahl der Gesteinskörnung und der Zugabebindemittel	25
4	Ergebnisse und Auswertung der Laboruntersuchungen	26
4.1	Voruntersuchungen	26
4.1.1	Gesteinsuntersuchungen	26
4.1.2	Untersuchungen am Asphaltgranulat	27
4.1.3	Labortechnische Variation der Nachmischzeit	28
4.1.4	Aufschluss des Asphaltgranulates in Abhängigkeit von der Nachmischzeit	29
4.2	Erstprüfungen	33
4.3	Großtechnische Herstellung	35
4.3.1	Voruntersuchungen zur Festlegung der Nachmischzeiten am Mischwerk	35
4.3.2	Herstellung der Asphaltmischgutvarianten	37
4.4	Performance-Prüfungen am großtechnisch hergestelltem Asphaltmischgut	38
4.4.1	Mischgutzusammensetzung und Bindemittleigenschaften nach Extraktion	38
4.4.2	Verdichtbarkeit	43
4.4.3	Verformungswiderstand	44
4.4.4	Prüfung des Tieftemperaturverhaltens	45
4.4.5	Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion	52

4.4.6	Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Asphaltsteifigkeit	58
4.4.7	Untersuchung einer Bitumen-Strukturänderung von Laborproben	76
4.5	Ansätze zur Definition eines Performance-Kriteriums für Heißasphalt mit Asphaltgranulat	77
4.5.1	Normierung der Prüfergebnisse zur Identifikation von geeigneten Performance-Kriterien	77
4.5.2	Analyse des Zusammenhangs zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit	79
4.5.3	Ansatz zur Ableitung eines Performance-Kriteriums für das Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat	81
4.5.4	Prognose der Asphaltsteifigkeiten anhand rheologischer Modelle	84
5	Validierung der Forschungsergebnisse anhand der Untersuchung von Praxisproben	88
6	Zusammenfassung und Ausblick	92
	Literatur	95
	Bilder	101
	Tabellen	103
	Anhang A – Bindemittelkenngößen	105
	Anhang B – Kenngößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion	119
	Anhang C – Prüfergebnisse der Praxisvarianten	133

1 Stand der Wissenschaft und Ziel der Forschung

1.1 Problemstellung

Asphaltstraßen erfüllen neben ihrem maßgebenden Beitrag zur Infrastruktur eine weitere wichtige Rolle. Sie stellen durch ihre Zusammensetzung aus Gesteinskörnung und auf Erdöl basierenden Bindemitteln ein „Lager“ für zukünftige Ressourcen dar (urban mining). Durch die temperaturabhängigen viskoelastischen Eigenschaften des Asphaltes ist dieser ein Baustoff, welcher mit einer hohen Wiederverwendungsrate auch mehrfach eingesetzt werden kann.

Im Zuge der Kreislaufwirtschaft, der Schonung von natürlichen Ressourcen und im Bestreben zur Minderung der Folgen des Klimawandels ist es notwendig ressourceneffizient zu handeln und Baustoffe zu verwenden, welche eine hohe Wertigkeit hinsichtlich der Langlebigkeit, Reparaturfreundlichkeit und Wiederverwendbarkeit oder Verwertbarkeit aufweisen. Asphalt kann sowohl der Verwertung aber auch der Wiederverwendung zugeführt werden. Die Wiederverwendung ist in der Rangfolge der Abfallbewirtschaftung (gemäß § 6 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG)) dabei die optimale Verwendung hinter der Vermeidung von Abfällen und bedeutet per Definition die erneute Benutzung eines Stoffes/Produktes für den gleichen oder durch Upcycling für einen höchstmöglichen Verwendungszweck. Bezogen auf den Asphalt bedeutet dies den Einsatz von Asphaltgranulat bei der Produktion von Asphaltmischgut (wenn möglich mindestens in der gleichen Asphaltmischgutart ggf. sogar höherwertiger).

Seit 1982 hat sich die Wiederverwendung von Asphalt in Deutschland durch eine zunehmende Wiederverwendungsrate gut entwickelt. So kann festgestellt werden, dass die Wiederverwendungsrate seit Jahrzehnten in einem Bereich zwischen 80 und 90 % liegt. Regelwerke zur Sicherung homogener Eigenschaften von Asphaltgranulat existieren und sollen vergleichbare Eigenschaften zu Asphaltmischgut aus Primärbaustoffen gewährleisten. [Deutscher Asphaltverband, 2020]

Seit mehr als 20 Jahren wird Asphaltgranulat in allen Asphaltsschichten mit unterschiedlichsten Anforderungen erfolgreich eingesetzt. Nur so wurden die Anforderungen des KrWG nach höchstwertiger Wiederverwendung erreicht. Die Maßnahmen zur geforderten Qualitätssicherung dienen dem sicheren Umgang mit Asphaltgranulat, fördern die zielsichere Produktion und werden in den Regelwerken [M WA 09/13] und [TL AG-StB 09] definiert. Die [TL AG-StB 09] enthalten materialspezifische Kenndaten; die [ZTV Asphalt-StB 07/13] bauvertragliche Regelungen zur Mitverwendung von Asphaltgranulat. Die maximale Zugabemenge ergibt sich dabei gemäß den [TL Asphalt-StB 07/13] in Abhängigkeit von der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulats oder gemäß dem Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt [M WA 09/13] durch das Kriterium der maschinentechnischen Zugabemöglichkeit. An Chargenmischanlagen mit Paralleltrommel sind dabei Zugabemengen bis 100 M.-% theoretisch realisierbar.

In Deutschland wurde durch die steigenden Investitionen in die Straßeninfrastruktur, insbesondere in die Straßenerhaltung, in den letzten Jahren und dem damit verbundenen Anstieg an Bautätigkeiten mehr Ausbauasphalt erzeugt, als der Wiederverwendung zugeführt werden konnte. Dementsprechend ergeben sich regional Überangebote, für die geeignete Strategien zur Steigerung der Wiederverwendungsmengen und zur Erhöhung des Wertschöpfungsniveaus gesucht werden. [Deutscher Asphaltverband, 2020]

Um die Verwendung größerer Mengen an Ausbauasphalten möglich zu machen, ist es von elementarer Bedeutung das Materialverhalten zielsicher ansprechen und beurteilen zu können. In vielen zurückliegenden Forschungsprojekten wurden zahlreiche bau- und materialtechnische Erkenntnisse mit dem Einsatz von Asphaltgranulat gewonnen. Des Weiteren müssen Mittel und Wege aufgezeigt werden, wie Asphaltgranulate, welche durch eine Beurteilung des Erweichungspunktes Ring und Kugel nach [DIN EN 1427] als kritisch eingestuft werden, zielsicher über Performance-Kriterien als einsatzfähig oder nicht mehr verwendbar definiert werden können. Dies ist insbesondere unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung bei der mehrfachen Wiederverwendung von Asphalt eine wesentliche Aufgabe. Ein besonderes Augenmerk sollte in diesem Zusammenhang auch auf den Eigenschaften des Bitumens im Asphaltgranulat liegen.

1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

In [ARAND; RENKEN, 1994] wurde die Verwendung größtmöglicher Ausbauasphaltanteile im Straßenbau untersucht. Im Zuge der Laboruntersuchungen wurde dazu u.a. der Prozess der Doppelumhüllung analysiert. Es wurde geprüft, ob bei der Doppelumhüllung von altem und frischem Bitumen ein Viskositätsausgleich festzustellen ist. Diese These konnte im Rahmen der Untersuchungen jedoch nicht aufrechterhalten werden. Es konnte festgestellt werden, dass das Kälte- und Verformungsverhalten durch die Härte des Zugabebindemittels beeinflusst werden. Die Untersuchung der Nachmischzeit ergab keinen signifikanten Einfluss auf die Verdichtbarkeit, das Kälte- und Haftverhalten sowie den Verformungswiderstand. Jedoch wirkte sich eine zunehmende Mischzeit positiv auf den Ermüdungswiderstand aus.

[KIUNTKE, 1996] berichtete über die Bewährung von Asphaltbefestigungen mit hohen Anteilen von Ausbauasphalt. Diese Forschungsarbeit sollte labortechnische Untersuchungen über die Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt auf das Langzeitverhalten von Asphalttragschichten [HIERSCHKE et al., 1988] und die Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt auf das Langzeitverhalten von Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten [HIERSCHKE et al., 1991] in der Praxis untersuchen. In diesen beiden Arbeiten wurde durch Untersuchungen an labortechnisch hergestelltem Asphaltmischgut festgestellt, dass Schichten mit Ausbauasphalt einen vergleichbar langen prognostizierten Nutzungszeitraum gewährleisten wie Schichten mit frischen Baustoffen. In [KIUNTKE, 1996] wurde an unter Verkehr liegenden Praxisstrecken die Zugabe von Asphaltgranulat mit Anteilen von 25 bis 80 M.-% in Asphaltbinder- und Asphalttragschichten untersucht. Es wurde bestätigt, dass Strecken mit wiederverwertetem Asphalt den Strecken aus frischen Baustoffen gleichwertig sein können.

[LEUTNER; DRÖGE, 2000] bestätigten im Zuge ihrer Forschung zur Ermittlung von Einsatzgrenzen für die Zugabe von Ausbauasphalt in Asphaltdecken anhand von Erprobungsstrecken, dass das Zugabebindemittel der maßgebliche Einflussfaktor auf die mechanischen Eigenschaften des resultierenden Asphaltmischgutes ist. Ebenfalls wurde auf eine ausreichend lange Nachmischzeit zum Aufschluss der pelletierten, stabilisierenden Zusätze im Splittmastix-Mischgut verwiesen.

Hinsichtlich der technischen Ausführung der Mischanlage wurde bereits in einem Baubericht von der Berliner Erprobungsstrecke Heerstraße (B2/B5) von [LEHNÉ, 2003] darauf hingewiesen, dass der Einsatz einer Paralleltrommel benötigt werde. Darüber hinaus konnte in diesem Bericht eine positive Praxiserfahrung über eine Asphaltbinderschicht mit 50 M.-% Ausbauasphalt dokumentiert werden. Als Voraussetzung für die erfolgreiche Verwendung von Asphaltgranulat werden sorgfältige Voruntersuchungen, Klassifizierung sowie ggf. getrennte Lagerung angegeben.

Im Jahr 2005 wurde ein Forschungsprojekt zur Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten durchgeführt [LEUTNER et al., 2005]. Es wurde festgestellt, dass bis zu 40 M.-% Asphaltgranulatzugabe in ein Asphaltbetonmischgut möglich ist, wenn eine ausreichend lange Nachmischzeit eingehalten wird. Es wurden Zugabemengen von 20 und 40 M.-% Asphaltgranulat mit Nachmischzeiten von 30, 90 und 180 s realisiert. Dabei kamen sowohl ein hartes, als auch ein weiches Asphaltgranulat zum Einsatz. Die Nachmischzeit wurde als dominante Einflussgröße auf die mechanischen Eigenschaften von Asphalt festgestellt. Dies wurde anhand der Asphalteeigenschaften geschlussfolgert, denn eine visuelle Ansprache einer möglichen Doppelumhüllung konnte aufgrund des fehlenden Farb- und Asphaltstrukturunterschiedes nicht zufriedenstellend durchgeführt werden. Durch die tendenziell zunehmende Härte der Bindemittel in Asphaltgranulat ist die Thematik der Doppelumhüllung und deren indirekten Nachweis weiterhin von hohem Interesse. Ebenfalls wurde in diesem Projekt der Einfluss des Wassergehaltes im Asphaltgranulat untersucht. Bei der Warmverarbeitung wurde kein Einfluss dessen festgestellt.

[DANIEL, LACHANCE, 2005] untersuchten die Auswirkungen der Asphaltgranulatzugabe auf die volumetrischen Eigenschaften von Asphaltmischgut und dessen Steifigkeitsverhalten. Dabei wurde ein Einfluss der Vortemperierung des Asphaltgranulates auf den fiktiven Hohlraumgehalt festgestellt. Aus den Ergebnissen wurde resümiert, dass es eine optimale Vortemperierungszeit für das Asphaltgranulat gibt, nach der sich das Bindemittel der Asphaltgranulatstücke gut auflöst und mit den neuen Mischgutkomponenten verbindet. Um diesen Einfluss nicht durch einen unterschiedlichen Umgang des Asphaltgranulates im Labor und in der Mischanlage zu vergrößern, wird eine möglichst identische Vorgehensweise empfohlen.

In [RENKEN, LOBACH, 2007] wurde der Einfluss der Zugabe von Ausbauasphalten in Asphaltbindermischgut mit PmB 45 untersucht. Dabei wurde der Einfluss der Zugabe von Asphaltgranulat mit und ohne Polymermodifiziertem Bindemittel (PmB) auf die mechanischen Eigenschaften des resultierenden Asphalt

untersucht. Erneut wurde bestätigt, dass die Nachmischzeit der dominante Faktor auf die Asphalteigenschaften ist. So konnte bei nur kurzen Nachmischzeiten festgestellt werden, dass sich Nachteile hinsichtlich des Kältewiderstandes, der Ermüdungsresistenz und des Verformungsverhaltens zeigten. Bei längeren Mischzeiten entwickelten sich alle Eigenschaften in zunehmend positive Merkmale. Der Einsatz von Asphaltgranulat mit PmB wurde als geeignet festgestellt.

Im internationalen Umfeld beschäftigten sich 2007 [AL-QADI et al., 2007] mit einer Literaturrecherche zu Erfahrungen mit der Wiederverwendung von Ausbauasphalt. Auch diese kamen im Zuge der Beurteilung der gesammelten Erfahrungen zur Kernproblematik, dass nicht eindeutig geklärt werden kann, inwiefern die Interaktion zwischen gealtertem und frischem Bindemittel stattfindet. Ebenfalls wird basierend auf den Ergebnissen verschiedener Forschungstätigkeiten infrage gestellt, ob das Bindemittel im Asphaltgranulat vollständig gelöst und mit dem frischen Bindemittel vermischt werden kann. Es wird auf die Notwendigkeit von Laboruntersuchungen zur Prognose der Performance des Heißasphalts mit Asphaltgranulat hingewiesen.

Die Erfassung des Grades der Vermischung von altem und frischem Bindemittel beschäftigte 2011 [SHIRODKAR et al., 2011]. Diese Studie ging der Frage nach, wie stark sich altes und frisches Bindemittel vermischt. Zur Überprüfung des Bindemittelaufschlusses wurde im ersten Schritt nur der feine Anteil ($< 2,36$ mm) des Asphaltgranulates mit neuer, grober Gesteinskörnung ($> 4,75$ mm) ohne Zugabe von frischem Bindemittel vermischt. Durch Wägung der wieder separierten feinen und groben Anteile, konnte nur eine Schätzung des Grades des Bindemittelaufschlusses erzielt werden, da der Gewichtsverlust des Asphaltgranulatanteils auf mehreren Ursachen beruht. Im zweiten Schritt wurde der Mischung frisches Bindemittel hinzugegeben. Das Bindemittel der ebenfalls wieder separierten feinen und groben Anteile wurde rückgewonnen und mittels Dynamischen Scherrheometer (DSR) analysiert. Zur Analyse des Mischungsgrades wurde ein Verhältniswert gebildet, welcher sich aus den DSR-Ergebnissen ($G^*/\sin(\delta)$) der einzelnen untersuchten Bestandteile ergibt. Mit diesem Verhältniswert konnte der Grad der Teilvermischung unabhängig von der Testtemperatur bestimmt werden. Darüber hinaus wurde darauf hingewiesen, dass der Vermischungsgrad der Bindemittel unter anderem von der Gesteinstemperatur beim Mischvorgang, der Bitumensorte, der Eigenschaften des Asphaltgranulates, des frischen Bindemittels und dem Anteil des Asphaltgranulates abhängig ist.

Auch [RINALDINI et al., 2014] untersuchten inwieweit sich das alte und frische Bindemittel in unterschiedlichen Mischgutvarianten vermischt. Dies wurde unter anderem mit dem Dynamischen Scherrheometer analysiert. Die Untersuchung mit dem DSR wird jedoch generell als problematisch eingestuft, da durch die Extraktion der Bindemittel keine Rückschlüsse mehr auf das Maß der Vermischung gezogen werden können. Zur Ermittlung der Vermischung wurden auch in dieser Forschung nur die feinen Anteile des Asphaltgranulates (2/4 mm) und grobe neue Gesteinskörnung (8/11 mm) verwendet, um diese nach dem Mischvorgang zu separieren. Anhand der DSR-Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass sich das alte Bindemittel auf alle Gesteinsoberflächen verteilt hat. Rückschlüsse auf den Grad der Vermischung des alten und des frischen Bindemittels konnten daraus allerdings nicht gezogen werden.

[BRESSI et al., 2015a] und [BRESSI et al., 2015b] beschäftigten sich ebenfalls mit der Interaktion zwischen frischem und gealtertem Bindemittel. Dabei sollte insbesondere die Clusterbildung untersucht werden. Es wurde die These untersucht, dass agglomerierte bindemittelumhüllte Gesteinskörnungen des Asphaltgranulates nicht vollständig gelöst und somit lediglich mit einem Mantel des frischen Bindemittels umhüllt würden. Eine mangelnde Homogenisierung und ein verminderter Bindemittelbedarf wären die Folge. Es wurde eine Sieblinie für einen AC 16 B konzipiert, bei der der Anteil < 2 mm aus den Asphaltgranulatkomponenten bestand. Für die Komponenten > 2 mm wurde frische Gesteinskörnung verwendet. Durch anschließende Siebung und Rückgewinnung der Fraktionen sollte prüfbar gemacht werden, wie viel Bindemittel auf die frischen Gesteinskörnungen übergegangen und wie viel frisches Bindemittel sich auf der feinen Gesteinskörnung abgelagert hat. Anhand von Messungen mit dem Elektronenmikroskop und Untersuchungen des rückgewonnenen Bindemittels im Dynamischen Scherrheometer wurde dieses Phänomen näher untersucht. Zur Beurteilung wurde das Verhältnis des Komplexen Schermoduls am rückgewonnenen Bindemittel mit dem Komplexen Schermodul einer idealen Bindemittelmischung, entsprechend dem Anteil des frischen und gealterten Bindemittels im Asphalt, verglichen. Eine Kernaussage ist, dass die Mischtemperatur einen maßgeblichen Einfluss auf die Auflösung solcher Cluster hat.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die durchgeführten Untersuchungen lediglich laborhergestelltes Asphaltmischgut berücksichtigten.

[RAHBAR-RASTEGAR, DANIEL, 2016] untersuchten den Einfluss der Asphaltmischgutherstellung (Labormischung und Mischanlage) auf die Material- und Performance- Eigenschaften. Hauptsächlich wurden zwei Herstellungsmethoden verglichen:

- im Labor gemischt und verdichtet,
- in der Mischanlage hergestellt und dort direkt ohne Wiedererwärmen im Labor verdichtet

Die Mischgutvarianten wurden anhand ihres Steifigkeitsverhaltens beurteilt, dabei wurde festgestellt, dass die im Labor gemischten Varianten einen höheren dynamischen E-Modul aufwiesen als die an der Mischanlage hergestellten Varianten. Die Bindemitteluntersuchungen ergaben, dass die im Labor gemischten Varianten stärker gealtert waren. Ein Vergleich mit einer zweiten Mischanlage konnte den generell höheren dynamischen E-Modul der Labormischungen allerdings nicht bestätigen. Es wird vermutet, dass die Unterschiede durch die Herkunft und Sorte des frischen Bindemittels und die Gesteinskörnung verursacht werden.

Der Effekt von Mischzeit und -temperatur auf die Homogenität von Asphaltmischgut wurde in einem Forschungsprojekt von [WU et al., 2018] untersucht. Drei Mischtemperaturen und vier verschiedene Mischzeiten wurden berücksichtigt. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen zum Steifigkeitsverhalten konnte die Tendenz abgeleitet werden, dass mit zunehmender Mischdauer und steigender Mischtemperatur die Steifigkeiten des Asphalt zunehmen. Eine weitere Erkenntnis des Forschungsprojektes ist der Einfluss der Clusterbildung auf das Steifigkeitsverhalten und die Homogenität des Asphalt. Bei kurzen Mischzeiten kann es zu einer „momentanen Homogenität“ kommen, wenn die Cluster noch nicht vollständig aufgelöst sind, bevor eine längere Mischdauer zu einer größeren Homogenität der Steifigkeiten führt. Die Mischtemperatur hat weniger Einfluss auf die Homogenität, dafür einen größeren Einfluss auf die Clusterbildung und -auflösung. Die Clusterbildung startet bei höheren Mischtemperaturen und längerer Mischdauer später, wodurch die Clusterauflösung später abgeschlossen ist.

Weitere Potentiale zur Wiederverwendung von Asphalt existieren durch Additivierung von Verjüngungsmitteln (Rejuvenatoren). Durch den Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum (LVW) wurden im Auftrag des Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz (LBM RP) Erst- und Kontrollprüfungen für eine Erprobungsstrecke mit zwei Rejuvenatoren und jeweils drei Asphaltgranulat-Zugabeanteilen in Asphaltdeckschicht- und Asphaltbinderschichtmischgut erstellt (12 Varianten). Die verjüngte Asphaltbinderschicht wies dabei eine abnehmende Steifigkeit mit Zunahme des Anteils an Asphaltgranulat auf. Darüber hinaus zeigten die verjüngten und mit Asphaltgranulat vermischten Varianten ein schlechteres Verformungsverhalten als die Varianten mit frischen Baustoffen auf. Die Kälteeigenschaften wurden dahingegen positiv beeinflusst. [RADENBERG, NYTUS, 2018] [NYTUS et al., 2018a] [NYTUS et al., 2018b]

Die Untersuchungen der Steifigkeit des Asphalt mit Spaltzug-Schwellversuchen nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] wurden vergleichend mit den Ergebnissen aus DSR-Untersuchungen betrachtet. Die Analyse der Daten aus dem Projekt FE 07.0250/2011/LRB [RADENBERG et al., 2016] hat ergeben, dass eine hohe Bestimmtheit zwischen der Steifigkeit und dem Phasenwinkel des Bindemittels mit der Asphaltsteifigkeit und dem Phasenwinkel des Asphalt besteht. Diese Zusammenhänge sind nachfolgend in Bild 1-1 und Bild 1-2 dargestellt.

Nicht bekannt ist hierbei, inwieweit unterschiedliche Homogenisierungsgrade (Nachmischzeiten) die Prüfergebnisse systematisch beeinflussen.

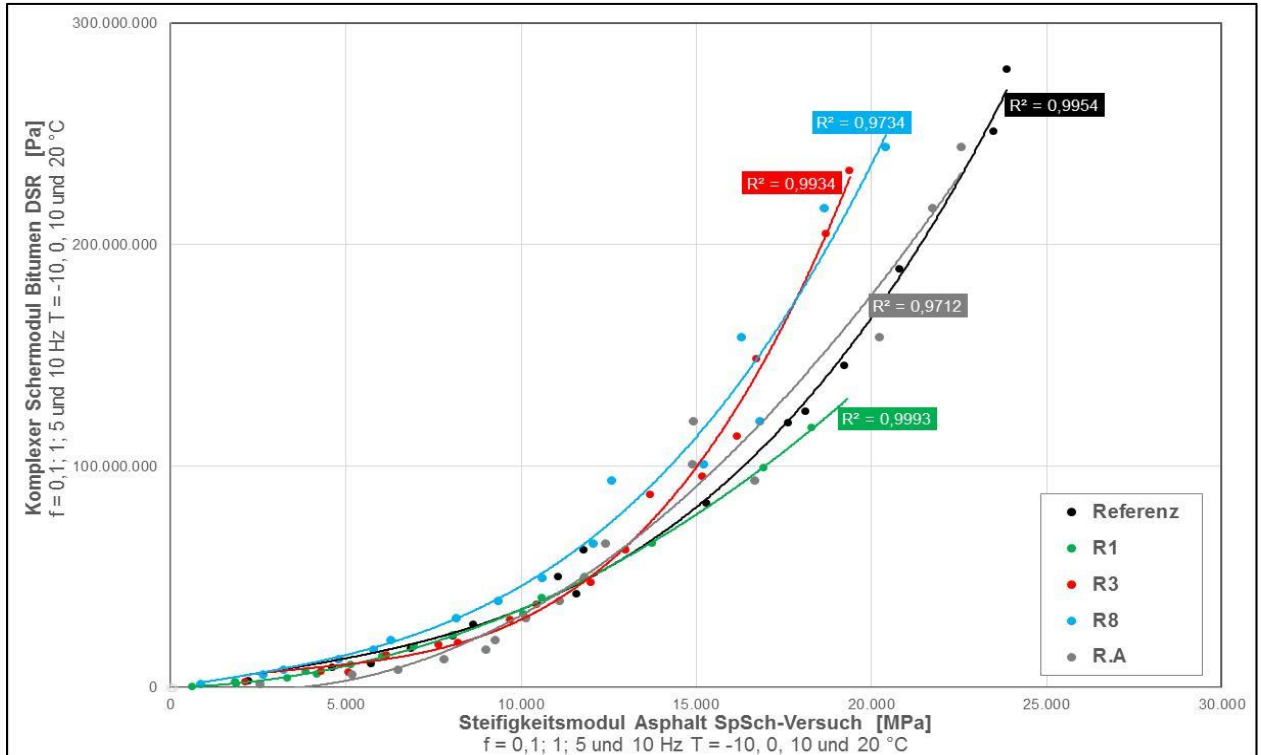


Bild 1-1: Zusammenhang zwischen der Steifigkeit des Bitumens und der Steifigkeit des Asphaltes [RADENBERG et al., 2016]

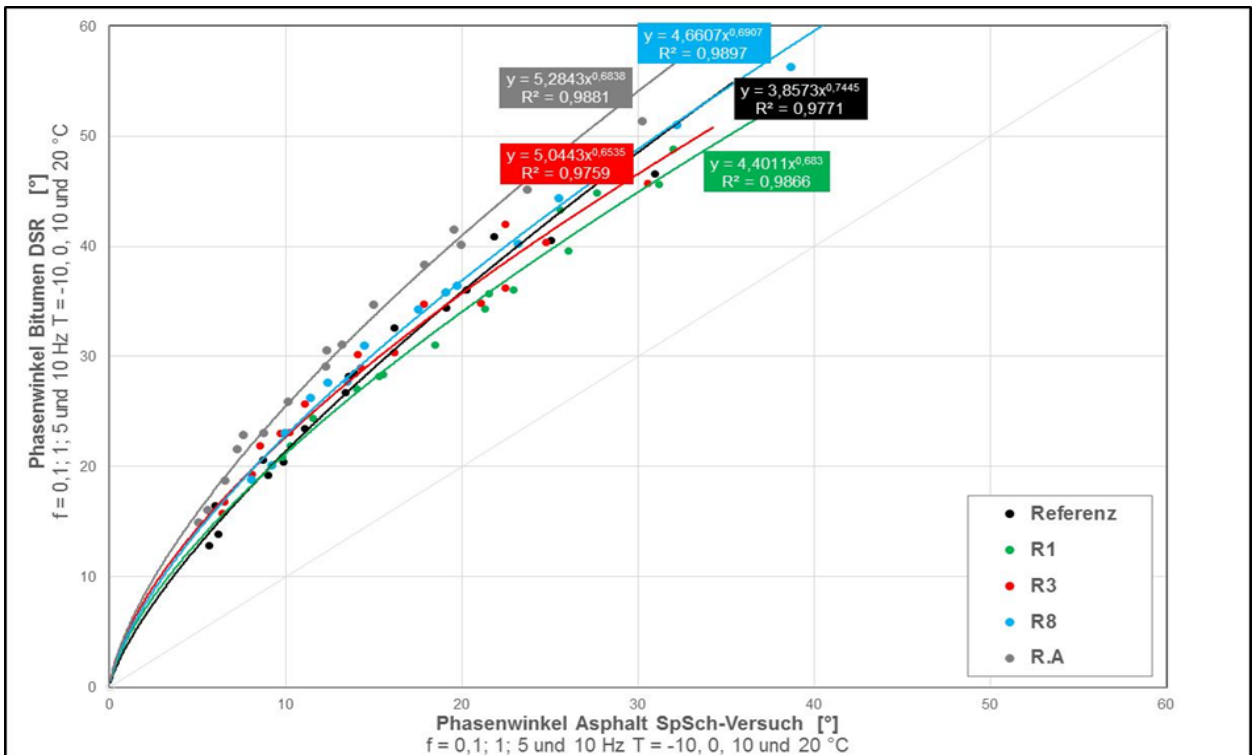


Bild 1-2: Zusammenhang zwischen Phasenwinkel des Bitumens und Phasenwinkel des Asphaltes [RADENBERG et al., 2016]

Zusätzlich zu den in Kapitel 1.1 erwähnten Regelungen zum Umgang mit Asphaltgranulat haben einige Bundesländer Ergänzungen zu den Regelwerken herausgegeben, die vertragsbindend sind und zu weiten Teilen eine noch höhere Wiederverwendungsrate ermöglichen.

In Baden-Württemberg sind nach den [ETV-StB-BW] für Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten maximale Asphaltgranulat-Zugabemengen von 60 bis 80 M.-% möglich. Als Zugabebindemittel können jegliche Arten und Sorten von Bitumen verwendet werden, solange der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel nicht härter als der eines Bitumen der Sorte 20/30 ist. Bei Verwendung von Polymermodifizierten Bindemitteln in Asphaltbinderschichten darf der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel nicht härter sein als der eines Bindemittels der Sorte 10/40-65 und mindestens eine elastische Rückstellung von 30 % aufweisen. Die Tabelle 16 der [ZTV Asphalt-StB 07/13] wurden um die Grenzwerte für den Erweichungspunkt eines 20/30 (71 °C) und eines Polymermodifiziertem Bitumen PmB 45/80-50 (66 °C) erweitert. Für splittreiche Asphaltbetondeckschichten ist eine maximale Asphaltgranulat-Zugabemenge von 30 M.-% möglich.

Die [ZTV Asphalt-StB 07/13 By] empfehlen für Bayern bei der Verwendung von PmB 25/55-55 A RC oder 10/40-65 A RC als Zugabebindemittel als Grenzwerte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels ± 8 °C bezogen auf den Wert des Eignungsnachweises. In den landeseigenen Ergänzungen zu den TL Asphalt-StB 07/13 [E TL Asphalt-StB 07/13, 2020] kann bei der Herstellung von Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat für die Verwendung auf Staatsstraßen zum Erreichen des geforderten Erweichungspunktes Ring und Kugel ein um bis zu zwei Sorten weicherer Bitumen verwendet werden, jedoch nicht weicher als ein Bitumen der Sorte 160/220.

In Berlin schreiben die [AV über TL Asphalt-StB 07/13 (Berlin)] die Verwendung von Asphaltgranulat vor, wobei die Qualität und Herkunft die Wiederverwendung reglementieren. So darf Asphaltgranulat aus Asphalttragschichten nicht in der Asphaltdecke eingesetzt und Asphaltgranulat aus Gussasphaltdeckschichten darf nur in diesen wiederverwendet werden. In Splittmastixasphaltschichten ist die Verwendung von Asphaltgranulat nur in Ausnahmefällen vorgesehen. Der Einsatz von weicheren Straßenbaubitumen als ein 160/220 oder Rejuvenatoren ist nach Genehmigung der Behörde ebenso erlaubt wie die Verwendung eines Bitumens, das bis zu zwei Sorten weicher ist, jedoch muss der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel innerhalb der Sortenspanne des geforderten Bitumens liegen.

Die Asphaltgranulat-Zugabemenge wird für die jeweiligen Asphaltsschichten in Brandenburg nach [BTR RC-StB] gemäß der [TL Asphalt-StB 07/13] anhand der Gleichmäßigkeit ermittelt. Die maximal zulässigen Spannweiten, wie diese im [M WA 09/13] angegeben sind, können ebenfalls zur Ermittlung der Zugabemenge verwendet werden. Sollten die in den [TL AG-StB 09] angegebenen Werte für den Erweichungspunkt Ring und Kugel des Asphaltgranulates überschritten werden, kann die Wirksamkeit des Bindemittels noch anhand des Brechpunktes nach Fraaß überprüft werden. Die Einsatzzwecke des Asphaltgranulates sind entsprechend ihrer Herkunft festgelegt. Asphaltgranulat aus Asphalttragschichten darf nicht in der Asphaltdecke verwendet werden. Aus Gussasphaltschichten gewonnenes Asphaltgranulat darf nur wieder in Gussasphalt verwendet werden. Bei der Herstellung von Splittmastixasphalt ist kein Einsatz von Asphaltgranulat vorgesehen.

In Hamburg darf laut [ZTV/St-Hmb.09] der Erweichungspunkt Ring und Kugel des Asphaltgranulates, welches in Asphalttragschichten verwendet werden soll, den Grenzwert von 79 °C nicht überschreiten. Oberhalb des Grenzwertes ist die Wirksamkeit des Bindemittels zu überprüfen. Als Zugabebindemittel dürfen jegliche Sorten gemäß den [TL Bitumen-StB 07/13] verwendet werden. In Asphaltbinderschichten darf nur Asphaltgranulat aus Walzasphaltdeckschichten und Asphaltbinderschichten Anwendung finden. Die Zugabemenge ist entsprechend der Gleichmäßigkeit des Asphaltgranulates gemäß Anhang D der [TL Asphalt-StB 07/13] zu bestimmen. In Asphaltdeckschichten können je nach Asphaltmischgutsorte Asphaltgranulate verschiedener Herkunft in unterschiedlicher Zugabemenge verwendet werden (s. Tab. 1-1).

Asphaltmischgutsorte	Zugabemenge [M.-%]	Zugabemöglichkeit von Asphaltgranulat aus
Splittmastixasphalt	≤ 30	Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt und Offenporigem Asphalt
Gussasphalt	≤ 30	Asphaltdeck- und Asphaltenschutzschichten aus Gussasphalt
Asphaltbeton	≤ 50	Walzasphaltdeckschichten und Asphaltbinderschichten

Tab. 1-1: Zugabemöglichkeiten von Asphaltgranulat in Hamburg nach [ZTV/St-Hmb.09]

In Hessen geben die [EF Asphalt 2017/HE] die Zugabemöglichkeiten von Asphaltgranulat in Abhängigkeit von der Asphaltmischgutart vor (s. Tab. 1-2).

Asphaltmischgutart	Zugabemöglichkeit von Asphaltgranulat aus
Walzasphaltdeckschicht	Gussasphalt, Walzasphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht nach gesonderter Aufbereitung
Asphaltbinderschicht	Gussasphalt, Walzasphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht

Tab. 1-2: Zugabemöglichkeiten von Asphaltgranulat in Hessen nach [EF Asphalt 2017/HE]

In Gussasphalt- und Splittmastixdeckschichten ist die Anwendung von Asphaltgranulat nicht vorgesehen, ebenso in den Belastungsklassen Bk100 und Bk32. [EF Asphalt 2017/HE]

Die Verwendung von Asphaltgranulat in Deckschichten aus Asphaltbeton ist nach den [ZTV Asphalt-StB/NRW] in Nordrhein-Westfalen auf eine maximale Zugabemenge von 20 M.-% beschränkt. Der Einsatz von Asphaltgranulat in Gussasphaltdeckschichten ist nicht vorgesehen.

In Rheinland-Pfalz sind nach [Ergänzungen TL Asphalt-StB/LMB RP] bei der Verwendung von Asphaltgranulat in Asphaltmischgut mit Polymermodifiziertem Bitumen als Zugabebindemittel höher Polymermodifizierte Bitumen zu verwenden. In Asphalttragschichten darf bei Zugabe von Asphaltgranulat als Zugabebindemittel ein weiches Straßenbaubitumen als 70/100 verwendet werden und dieses darf um bis zu zwei Sorten vom geforderten Bitumen abweichen.

Gemäß den [ZTV-StB LSBB ST 17] ist in Sachsen-Anhalt die Verwendung von Asphaltgranulat bei Straßenbaumaßnahmen vorzusehen. Ab einer Zugabemenge von 15 M.-% Asphaltgranulat in Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten sind höher Polymermodifizierte Bindemittel zu verwenden. Zusätzlich sind in Sachsen-Anhalt die „Ergänzenden Regelungen zur Gewinnung und Verwendung von Asphaltgranulat (Ausbauasphalt) in Asphaltmischgut“ [Erg. Regelungen AG LSBB ST] zu berücksichtigen. Nach diesen ergänzenden Regelungen können Asphaltgranulate, die einen Erweichungspunkt Ring und Kugel > 70 °C (Einzelwert > 77 °C) aufweisen, nach zusätzlicher Prüfung der Wirksamkeit des Bindemittels eingesetzt werden. Asphaltgranulat aus Walzasphaltdeckschichten, Asphaltdeck- und -binderschichten sowie aus Asphalttrag- oder -tragdeckschichten kann zur Herstellung von Asphalttragschichten verwendet werden. In Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten aus Asphaltbeton darf Asphaltgranulat verwendet werden. Asphaltgranulat aus Gussasphaltschichten ist nur in Gussasphalt vorzusehen. Die Zugabemenge des Asphaltgranulates wird anhand seiner Gleichmäßigkeit und in Anlehnung an das [M WA 09/13] anhand der maximal zulässigen Spannweiten ermittelt. Eine auf Daten des Jahres 2010 basierende Auswertung der Zugabemengen von Asphaltgranulat an den Mischanlagen in Sachsen-Anhalt ist in Tab. 1-3 aufgeführt.

Mischanlagentyp	Menge in ST in M.-%	Zugabeart des Asphaltgranulats
Chargenmischanlage	40	heiß
	30	kalt
	60	gesonderte Vorrichtung
Durchlaufmischanlage	30	heiß

Tab. 1-3: Erfahrungswerte der Asphaltgranulatzugabe in Sachsen-Anhalt nach [ZTV-StB LSBB ST 17]

In Schleswig-Holstein darf nach dem [HVA B-StB(SH)-S] zur Herstellung von Asphaltmischgut mit Asphaltgranulat ein Straßenbaubitumen der Sorte 160/220 verwendet werden und der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel darf nicht härter als bei einem Straßenbaubitumen 50/70 sein. Die maximale Zugabemenge von Asphaltgranulat ist in Abhängigkeit von der Zugabeart in Tab. 1-4 aufgeführt.

Zugabeart des Asphaltgranulates	Menge in SH in M.-%	Zugabe in
Paralleltrommel	60	Asphalttragschichtmischgut
	45	Asphaltbinder
	20	Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten
Stirnwand- oder Mittenzugabe	40	Asphalttragschichtmischgut
	40	Asphaltbinder
Kaltzugabe	30	Asphalttragschichtmischgut
	30	Asphaltbinder
	20	Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten

Tab. 1-4: Maximale Zugabemenge von Asphaltgranulat in SH in Abhängigkeit von der Zugabeart nach [HVA B-StB(SH)-S]

1.3 Ziel des Forschungsprojektes

Mit dem hier vorliegenden Forschungsprojekt soll ein einfaches Performance-Kriterium zur Beurteilung des Gebrauchsverhaltens von Heißasphalt mit Asphaltgranulat geschaffen werden. In diesem Zusammenhang soll auch die Möglichkeit des indirekten Nachweises einer Doppelumhüllung betrachtet werden. Unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Asphaltgranulaten, welche sich hinsichtlich der Härte des rückgewonnenen Bindemittels unterscheiden, soll der Einfluss der Art, Menge und Mischdauer auf die Asphalt-Performance einer Asphaltbinderschicht AC 16 B und einer Asphalttragschicht AC 22 T untersucht werden.

Angestrebt wird ein möglichst einfacher Performance-Ansatz, mit dem das Gebrauchsverhalten mit hinreichender Tiefe bewertet und zudem die Homogenisierung des Bindemittelgemisches abgeschätzt werden kann.

2 Untersuchungsmethodik

Das Forschungsprojekt ist in fünf Arbeitspakete unterteilt, welche in Bild 2-1 dargestellt sind. Als Unterauftragnehmer ist die Basalt-Actien-Gesellschaft in das Projekt eingebunden worden und hinsichtlich praktischer Erfahrung, der Herstellung von Asphaltmischgut an einer Asphaltmischanlage und der Herstellung einer Probefläche sowie der Beschaffung von Untersuchungsmaterialien beteiligt.

Arbeitspaket 1 – Literatur und Probenauswahl			
1.1	Literaturrecherche	Arbeitspaket 2 – Konzeption und Mischgutherstellung	
1.2	Auswahl zweier Asphaltgranulate und einer geeigneten Asphaltmischanlage		
1.3	Voruntersuchungen zur Analyse des Aufschlusses des Asphaltgranulates		
		2.1	Erstellung Erstprüfungen
		2.2	Untersuchungen Asphaltgranulat
		2.3	Großtechnische Herstellung der Asphaltmischungen an der Asphaltmischanlage
Arbeitspaket 3 – Laboruntersuchungen			
3.1	Herstellen von Asphaltprobekörpern im Labor		
3.2	Untersuchungen zum Ermüdungs-, Steifigkeits- und Kälteverhalten		
3.3	Untersuchungen zur Verformungsbeständigkeit und zum Verdichtungsverhalten		
3.4	Untersuchung der Asphaltvarianten hinsichtlich Zusammensetzung und Bindemittleigenschaften zur Beurteilung der Intensität des Aufschlusses des Granulats		
Arbeitspaket 4 – Praxisanknüpfung			
4.1	Herstellung von Probefelder ohne und mit maximaler Granulatzugabe / Bohrkernentnahme + Dokumentation der Herstellung		
4.2	Vergleich der Performance-Untersuchungen von Bohrkernen aus den Probefeldern und im Labor hergestellten/verdichteten Probekörpern		
Arbeitspaket 5 – Auswertung und Dokumentation			
Zusammenfassung und Definition eines einfachen Performance-Kriteriums zur Beurteilung des Gebrauchsverhaltens von Heißasphalt mit Asphaltgranulat			

Bild 2-1: Fließdiagramm zum Forschungsprojekt FE 07.0299/2018/LGB

Ausgewählte Schritte dieser Untersuchungsmethodik werden nachfolgend detaillierter erläutert.

2.1 Voruntersuchungen zum Aufschluss des Asphaltgranulates

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde aufbauend auf einem Ansatz zur Beurteilung der Homogenisierung von Rejuvenatoren aus dem Forschungsprojekt FE 07.0250/2011/LRB von [RADENBERG et al., 2016] der Aufschluss des Asphaltgranulats anhand von Untersuchungen der Steifigkeit nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] unter Verwendung eines Asphaltgranulat in einem Asphalttragschichtmischgut AC T mit fünf verschiedenen Mischzeiten analysiert. Zusätzlich erfolgte eine Untersuchung mit dem DSR am rückgewonnenen Bindemittel, wobei identische Frequenzen und Temperaturen wie im Spaltzug-Schwellversuch nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] angewendet wurden. Der Vergleich der temperatur- und frequenzvariierten Steifigkeiten (rückgewonnenes Bindemittel, vollständig homogenisiert ↔ Asphaltgemische, unterschiedlich stark homogenisiert) soll einen Aufschluss über den Effekt der Doppelumhüllung ermöglichen. Mit zunehmender Mischzeit ist eine Verbesserung der Homogenisierung des Materials zu erwarten, welche in den Ergebnissen der Steifigkeitsmessungen am Asphalt erkennbar werden sollte.

Ein bewusst im Labor nicht hinreichend homogenisiertes Mischgut sollte dann erwartungsgemäß zu abweichenden Ergebnissen führen.

2.2 Laboruntersuchungen

2.2.1 Konzeption und Mischgutherstellung

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurden zunächst die Eigenschaften der zwei verwendeten Asphaltgranulate bestimmt. Für diesen Untersuchungsschritt wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Bindemittelgehalt nach [TP Asphalt-StB, Teil 1]
- Korngrößenverteilung nach [TP Asphalt-StB, Teil 2]
- Rohdichte nach [TP Asphalt-StB, Teil 5]

An dem rückgewonnenen Bindemittel wurden darüber hinaus folgende Kennwerte bestimmt:

- Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß [DIN EN 1427]
- Komplexer Schermodul und Phasenwinkel in einem Temperaturbereich von -10 °C bis 150 °C gemäß [DIN EN 14770]

Für die Asphaltuntersuchungen wurde ein Asphalttragschichtmischgut AC 22 T und ein Asphaltbinder-mischgut AC 16 B verwendet, die jeweils mit drei unterschiedlichen Asphaltgranulatanteilen zusammengesetzt wurden. Die Tab. 2-1 gibt einen Überblick über die 38 Asphaltvarianten, welche in diesem Forschungsprojekt untersucht wurden. Neben den zwei Asphaltgranulaten, zwei Mischgutarten und den drei Zugabemengen wurden drei unterschiedliche Nachmischzeiten (NMZ) am Mischwerk umgesetzt. Die Nachmischzeit hat sich, wie in Kapitel 1.2 zusammengefasst, in mehreren Forschungsprojekten als maßgebliche Einflussgröße auf die mechanischen Eigenschaften des Asphaltes herausgestellt. Der große Variantenumfang ermöglicht somit eine eindeutige Analyse der einzelnen Einflussfaktoren insbesondere hinsichtlich des Aufschlusses des Asphaltgranulates.

AC T	Referenzvariante ohne Asphaltgranulat		
	AG 1	20 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		40 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		60 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
AG 2	20 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃	
	40 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃	
	60 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃	
AC B	Referenzvariante ohne Asphaltgranulat		
	AG 1	20 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		40 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		60 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
	AG 2	20 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
		40 M.-%	NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃
60 M.-%		NMZ ₁ , NMZ ₂ , NMZ ₃	

Tab. 2-1: Mischgutvarianten für die labortechnische Untersuchung

Unter Verwendung der zwei Asphaltgranulate mit den drei Zugabemengen wurden im ersten Schritt Erstprüfungen erstellt. Diese wurden auch für die sich anschließenden Arbeitsschritte (Mischgutherstellung an der Asphaltmischanlage) übernommen.

2.2.2 Untersuchung der Asphalt-Performance von großtechnisch hergestelltem Asphaltmischgut

In einem ersten Schritt wurden aus den insgesamt 38 Asphaltmischgutvarianten Asphalt-Probeplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV) gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 33] hergestellt und aus diesen Bohrkerne gebohrt und Prismen gesägt.

Anschließend wurden an allen Varianten folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 24]
- Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Steifigkeits-Temperaturfunktion im Multistageverfahren gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Prüfung des Tieftemperaturverhaltens (Abkühlversuch und einaxialer Zugversuch bei vier Temperaturen) gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 46 A]
- Untersuchungen zur Verformungsbeständigkeit mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1]
- Verdichtbarkeit von Asphalt mit Hilfe des Marshall-Verfahrens gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 10 B]

Das Asphaltmischgut wurde darüber hinaus hinsichtlich der Zusammensetzung und der Bindemittleigenschaften, analog zu Kapitel 2.2.1, mittels der folgenden Untersuchungen analysiert:

- Bindemittelgehalt nach [TP Asphalt-StB, Teil 1]
- Korngrößenverteilung nach [TP Asphalt-StB, Teil 2]
- Rohdichte nach [TP Asphalt-StB, Teil 5]
- Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß [DIN EN 1427] am rückgewonnenen Bindemittel
- Komplexer Schermodul und Phasenwinkel in einem Temperaturbereich von -10 °C bis 150 °C gemäß [DIN EN 14770]

Basierend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen ist die Intensität des Aufschlusses des Asphaltgranulates auch hier durch vergleichende Betrachtung der Bindemittelkennwerte aus den DSR-Untersuchungen zu den Asphaltkennwerten aus dem Spaltzug-Schwellversuch untersucht worden. Wie in Kapitel 1.2 dargestellt, konnten hier eindeutige Abhängigkeiten in vorangegangenen Forschungstätigkeiten festgestellt werden.

2.2.3 Praxisanbindung

Im Anschluss an die Laboruntersuchungen wurden für die Varianten ohne und mit maximaler Asphaltgranulatzugabemenge (60 M.-%) Probefelder hergestellt.

Aus den Probefeldern wurden anschließend Bohrkerne entnommen, mit welchen die Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Asphalt-Performance durchgeführt wurden. Die Untersuchungen beinhalteten dabei:

- Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 24]
- Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Steifigkeits-Temperaturfunktion im Multistageverfahren gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Prüfung des Tieftemperaturverhaltens (Abkühlversuch und einaxialer Zugversuch bei vier Temperaturen) gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 46 A]

Der Einbau der Probefelder wurde umfassend dokumentiert. Neben den baulichen Randbedingungen wurden auch die Einbautemperaturen sowie die Witterungsbedingungen aufgezeichnet. Darüber hinaus wurde Mischgutproben in größerer Menge (Rückstellproben) entnommen.

3 Untersuchungsmaterialien

3.1 Auswahl des Asphaltgranulates und der Mischanlage

Die Auswahl des Asphaltgranulates erfolgte in Abstimmung mit dem Betreuerkreis für dieses Forschungsprojekt. Es wurden zwei Asphaltgranulate mit unterschiedlichen Härtegraden, beurteilt anhand des Erweichungspunkt Ring und Kugel des rückgewonnenen Bindemittels und der rheologischen Kennwerte im DSR, für die Untersuchungen ausgewählt. Eine für das Untersuchungskonzept geeignete Asphaltmischanlage wurde durch die Basalt-Actien-Gesellschaft ausgewählt (DEUTAG Nord, Zweigniederlassung der BAG, in Groß Bülden (siehe Bild 3-1)). Ausschlaggebend für die Wahl dieses Standortes waren der Lagerort des Asphaltgranulates, die vorhandene Paralleltrommel sowie das Personal an dieser Mischanlage, das über große Erfahrungen mit der Zugabe von hohen Asphaltgranulatanteilen verfügt.



Bild 3-1: Asphaltmischanlage der DEUTAG Nord, Zweigniederlassung der BAG, in Groß Bülden

Die Asphaltmischanlage ist von dem Hersteller „Teltomat“ und wurde im Jahr 2002 erbaut. Sie verfügt über eine Paralleltrommel des Herstellers „Ammann“, die das Asphaltgranulat nach dem Gleichstromprinzip direkt erwärmt. Darüber hinaus sind zwei Kombibrenner vorhanden, die mit Braunkohlestaub (BKS) befeuert werden. Je Charge können bis zu 3 t Asphaltmischgut hergestellt werden.

Für die Auswahl der Asphaltgranulate wurde durch die DEUTAG Nord eine Bestandserfassung durchgeführt und diese hinsichtlich des Erweichungspunkt Ring und Kugel sowie weiterer charakteristischer Materialparameter untersucht. In der ersten Sitzung des Betreuerkreises wurden auf Grundlage dieser Bestandserfassung die in Tab. 3-1 beschriebenen Asphaltgranulate ausgewählt.

Bezeichnung	Kornklasse	Maximale Stückgröße	Bindemittelart	Erweichungspunkt Ring und Kugel
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[°C]
AG 1	0/16	22	Straßenbaubitumen	58,7
AG 2	0/16	22	Polymermodifiziertes Bindemittel	74,0

Tab. 3-1: Angaben des Asphaltmischwerks zur Klassifizierung des Asphaltgranulats für die Asphaltgranulatauswahl

3.2 Auswahl der Gesteinskörnung und der Zugabebindemittel

Unter Berücksichtigung der regionalen Erfahrungen der Asphaltmischanlage wurden die in der Tab. 3-2 aufgeführten Gesteinskörnungen als Ergänzungsbaustoffe für die Asphaltmischgutherstellung ausgewählt.

	Gesteinsart	Kornklasse [mm]	Gewinnungsstätte
Füller	Gabbro	<0,063	Bad Harzburg
Feine Gesteinskörnung	Gabbro	0/2	Bad Harzburg
	Natursand (NS)	0/2	Uhry
Grobe Gesteinskörnung	Gabbro	2/5	Bad Harzburg
	Gabbro	5/8	Bad Harzburg
	Gabbro	8/11	Bad Harzburg
	Gabbro	11/16	Bad Harzburg
	Rhyolith	5/22	Flechtingen

Tab. 3-2: Auswahl projektbezogener Gesteinskörnung

Hinsichtlich der Auswahl geeigneter Bindemittel wurde im Betreuerkreis beschlossen, dass in der Asphalttragschicht ein Straßenbaubitumen und in der Asphaltbinderschicht ein Polymermodifiziertes Bitumen verwendet werden soll.

Gemäß [TL Asphalt-StB 07/13] muss der resultierende Erweichungspunkt Ring und Kugel aus dem Asphaltgranulat- und dem Frischbindemittel innerhalb der Sortenspanne des geforderten Bitumens liegen. Als Frischbindemittel darf jenes verwendet werden, welches dem geforderten resultierenden Bindemittel entspricht oder maximal eine Sortenklasse weicher als dieses ist.

Im Positionspapier zur „Wiederverwendung von Asphalt und alternative Verwertungskonzepte für Asphaltgranulat zur weiteren Steigerung der Nachhaltigkeit“ [Deutscher Asphaltverband e. V., 2019] wird angemerkt, dass ein Zwei-Sorten-Sprung zwischen resultierendem und frisch zugegebenem Bindemittel eine Maßnahme für eine Erhöhung der Zugabeanteile von Asphaltgranulat darstellt. Einige Bundesländer wie Hamburg, Berlin und Rheinland-Pfalz haben bereits positive Erfahrungen mit dem Zwei-Sorten-Sprung zur Optimierung des Asphaltgranulatmanagements gemacht. [Deutscher Asphaltverband e. V., 2019]

Im Sinne möglichst hoher Zugabeanteile an Asphaltgranulat wurde beschlossen, dass der Zwei-Sorten-Sprung auch im Zuge dieses Forschungsprojektes umgesetzt werden sollte.

Für die Untersuchungen wurden die in Tab. 3-3 zusammen mit ihren Kennwerten dokumentierten Bindemittel verwendet.

Bezeichnung	Bindemittelart und -sorte	Erweichungspunkt Ring und Kugel	Elastische Rückstellung
[-]	[-]	[°C]	[%]
B1	Straßenbaubitumen 160/220	39,0	-
B2	Polymermodifiziertes Bitumen 45/80-50 RC	57,6	90,0

Tab. 3-3: Auswahl projektbezogener Bindemittel

4 Ergebnisse und Auswertung der Laboruntersuchungen

4.1 Voruntersuchungen

4.1.1 Gesteinsuntersuchungen

Die mittels Pyknometer-Verfahren gemäß [DIN EN 1097-7] ermittelten Rohdichten des Füllers sowie der feinen und groben Gesteinskörnungen sind in Tab. 4-1 tabellarisch zusammengefasst.

Gesteinsart	Kornklasse	Rohdichte
[-]	[mm]	[g/cm ³]
Gabbro	<0,063	2,915
Gabbro (BS)	0/2	2,912
Natursand (NS)	0/2	2,655
Gabbro	2/5	2,912
Gabbro	5/8	2,871
Gabbro	8/11	2,868
Gabbro	11/16	2,900
Rhyolith	5/22	2,915

Tab. 4-1: Rohdichten der verwendeten Gesteinskörnung

Die Korngrößenverteilung des Füllers wurde durch Luftstrahlsiebung gemäß [TP Gestein-StB, Teil 4.1.4] in Verbindung mit [DIN EN 933-10] und die der feinen und groben Gesteinskörnung wurde nach [DIN EN 933-1] bestimmt und in Tab. 4-2 dargestellt.

Kornzusammensetzung der verwendeten Gesteinskörnung								
	Siebrückstand [M.-%]							
	Gabbro	BS	NS	Gabbro	Gabbro	Gabbro	Gabbro	Rhyolith
[mm]	Füller	0/2	0/2	2/5	5/8	8/11	11/16	5/22
22,40								3,5
16,00							7,0	34,7
11,20						11,6	86,0	22,6
8,00					13,4	74,1	7,0	14,6
5,60				5,0	72,6	14,4		6,3
2,00		5,1	4,8	76,9	14,0			15,5
1,00		25,8	25,1	18,1				
0,25		37,2	54,3					
0,125		10,4	11,5					
0,063	12,8	9,6	3,2					
< 0,063	87,2	11,9	1,1					2,8
Überkorn D	12,8	5,1	4,8	5,0	13,4	11,6	7,0	3,5
Sollkorn d/D	87,2	94,9	95,2	76,9	72,6	74,1	86,0	78,2
Unterkorn d				18,1	14,0	14,4	7,0	18,3

Tab. 4-2: Kornzusammensetzung der verwendeten Gesteinskörnung

4.1.2 Untersuchungen am Asphaltgranulat

Die beiden ausgewählten Asphaltgranulate wurden hinsichtlich der Kenngrößen Bindemittelgehalt nach [TP Asphalt-StB, Teil 1], Korngrößenverteilung nach [TP Asphalt-StB, Teil 2] und Rohdichte nach [TP Asphalt-StB, Teil 5] untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tab. 4-3 zusammengetragen.

Zusammensetzung der Asphaltgranulate		
	Siebrückstand [M.-%]	
	AG 1	AG 2
mm	0/16	0/16
16,00	-	8,0
11,20	6,0	10,0
8,00	13,0	10,0
5,60	12,0	10,0
2,00	24,0	18,0
1,00	11,0	9,0
0,25	15,0	18,0
0,125	5,0	5,0
0,063	2,0	2,0
< 0,063	12,0	10,0
Bindemittelgehalt [M.-%]	5,7	4,3
Rohdichte [g/cm ³]	2,566	2,564

Tab. 4-3: Zusammensetzung der verwendeten Asphaltgranulate

An den rückgewonnenen Bindemitteln aus den beiden Asphaltgranulaten wurden die Erweichungspunkte Ring und Kugel gemäß [DIN EN 1427] bestimmt und darüber hinaus wurden rheologische Untersuchungen mittels Dynamischem Scherrheometer in Anlehnung an [DIN EN 14770] durchgeführt. Bild 4-1 stellt den Verlauf des Komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels in einem Temperaturband von -10 °C bis 150 °C dar. Die Tab. 4-4 fasst alle Granulateigenschaften, unter Einbezug der Prüfergebnisse, zusammen.

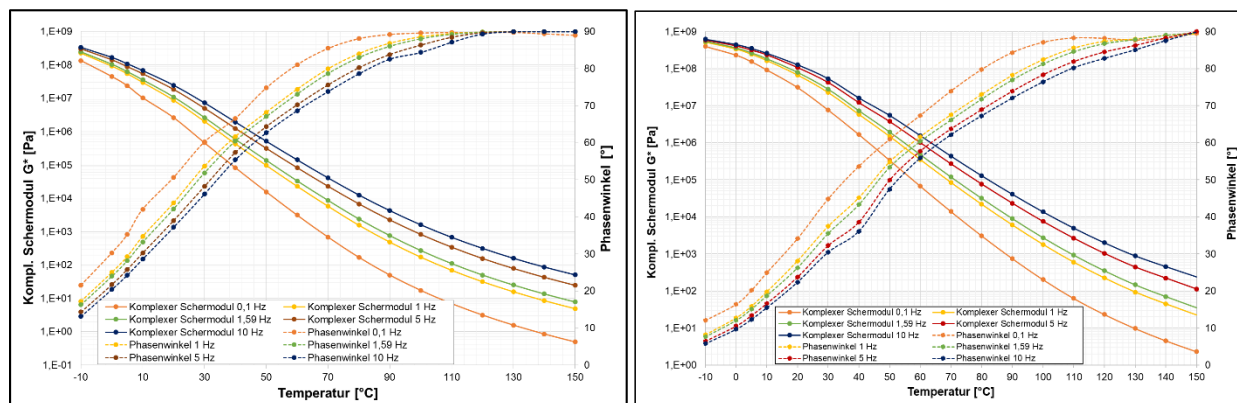


Bild 4-1: Frequenz- und temperaturabhängige Ergebnisse der rückgewonnenen Bindemittel aus Asphaltgranulat 1 (links) und 2 (rechts) im Dynamischen Scherrheometer

Bezeichnung	Kornklasse	Maximale Stückgröße	Bindemittelart	EP RuK	T bei G* = 15 kPa	δ bei G* = 15 kPa
[-]	[mm]	[mm]	[-]	[°C]	[°C]	[°]
AG 1	0/16	22	SBB	65,6	66,0	76,6
AG 2	0/16	22	PMB	90,0	86,8	75,7

Tab. 4-4: Kennwerte der rückgewonnenen Bitumen der ausgewählte Asphaltgranulate

Der Vergleich der Klassifikationsmerkmale des Asphaltmischwerks (Tab. 3-1) mit den nach Probeneingang festgestellten Eigenschaften (Tab. 4-4) zeigt signifikante Abweichungen für das Asphaltgranulat AG 1. Nach Rücksprache mit dem Auftraggeber und dem Betreuerkreis wurde festgelegt, die Asphaltgranulatauswahl trotz der Abweichung beizubehalten. Diese Entscheidung wurde insbesondere vor dem Hintergrund getroffen, dass im Zuge dieses Forschungsprojektes auch kritisch eingestufte Asphaltgranulate charakterisiert und über Performance-Kriterien betrachtet werden sollten.

4.1.3 Labortechnische Variation der Nachmischzeit

Auf Grundlage des Forschungsprojektes FE 07.0245 „Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauphase in Asphalttragschichten auf mechanische Eigenschaften“ [WALTHER, WISTUBA, 2014] und der Ergebnisse aus [LEUTNER et al., 2005], welche den Einfluss der Nachmischzeit auf die Performance-Eigenschaften von Asphalt untersuchten, sollten fünf Mischzeiten für laborhergestelltes Asphaltmischgut definiert werden. Die [TP Asphalt-StB, Teil 35] schreibt eine maximale Nachmischzeit von 180 s vor. Die Ergebnisse der Forschungstätigkeiten kamen zu guten Ergebnissen hinsichtlich der Asphalt-Performance, bei Nachmischzeiten von mindestens 180 s. Für die Untersuchungen im Zuge dieses Forschungsprojektes wurden fünf Nachmischzeiten (30, 90, 180, 270 und 360 s) gewählt. Dies sollte ein möglichst breites Spektrum der Homogenisierungsgrade des Asphaltmischgutes ermöglichen.

Die Homogenisierung des Asphaltmischgutes im Universal-Labormischer wurde visuell beurteilt und ist nachfolgend in Bild 4-2 abgebildet.



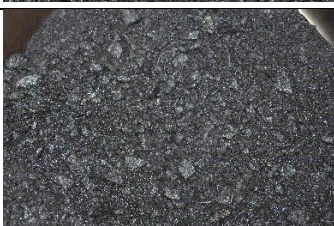

30 Sekunden Nachmischzeit			
90 Sekunden Nachmischzeit			
180 Sekunden Nachmischzeit			
270 Sekunden Nachmischzeit			
360 Sekunden Nachmischzeit			

Bild 4-2: Visuelle Erfassung des Homogenisierungsgrades der Asphaltmischungen im Labor unter Variation der Nachmischzeit

4.1.4 Aufschluss des Asphaltgranulates in Abhängigkeit von der Nachmischzeit

Für die Untersuchungen zum Nachweis der Homogenisierung des Asphaltgranulates wurden mit dem laborhergestellten Asphaltmischgut Asphalt-Probepplatten hergestellt. Die hieraus entnommenen Bohrkern wurden nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] hinsichtlich der Asphaltsteifigkeit geprüft. Zu Herstellung des Asphaltmischgutes wurde das Gesteinskörnungsgemisch der Asphalttragschicht mit 60 M.-% Zugabeanteil des Asphaltgranulates 2 (2 TS 60, siehe Tab. 4-7) und 1,5 M.-% Straßenbaubitumen der Sorte 160/220 verwendet.

Die Ergebnisse der Asphaltuntersuchungen sind nachfolgend in Tab. 4-5 zusammengefasst. Die in [rad] ermittelten Phasenwinkel δ wurden zur besseren Vergleichbarkeit mit den Bindemittelkennwerten in [°] umgerechnet. In Bild 4-3 sind die zugehörigen Hauptkurven dargestellt.

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	Nachmischzeiten der Variante 2 TS 60 mit 1,5 M.-% Frischbindemittel									
		30 s		90 s		180 s		270 s		360 s	
T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]
-10	10	23.256	5,1	24.831	3,8	24.926	3,8	24.984	3,4	27.282	4,7
-10	5	22.969	4,3	24.171	3,5	23.864	4,0	24.042	4,0	25.513	4,8
-10	3	21.943	4,0	23.941	4,0	23.265	4,4	23.758	4,7	24.516	5,0
-10	1	21.044	4,6	22.914	4,2	22.453	5,5	22.551	5,0	23.051	5,3
-10	0,3	19.703	5,3	21.426	5,1	21.068	5,4	21.369	5,6	21.359	6,6
-10	0,1	18.598	5,7	19.974	5,8	19.784	6,0	19.912	6,6	19.893	7,7
0	10	21.750	5,1	22.095	4,7	23.350	4,8	24.242	5,3	26.235	4,9
0	5	21.057	5,3	21.039	5,5	22.765	5,7	23.088	5,4	25.693	5,2
0	3	19.952	5,6	20.347	5,7	21.857	6,1	22.282	5,3	24.525	5,1
0	1	18.804	6,5	19.204	7,0	20.120	6,3	20.752	6,4	23.035	5,8
0	0,3	17.199	7,4	17.697	7,7	18.304	7,7	19.360	7,2	21.295	7,1
0	0,1	15.948	7,7	15.916	9,4	16.743	9,3	17.690	8,6	19.485	8,5
5	10	19.332	7,0	20.152	7,1	20.733	7,3	23.623	6,0	24.719	5,8
5	5	18.255	7,0	17.646	7,8	19.684	8,0	22.343	5,8	23.588	7,1
5	3	17.463	7,6	18.225	7,6	18.774	7,3	21.323	7,0	22.486	7,4
5	1	15.732	9,9	16.662	9,4	16.782	9,1	19.482	7,9	20.516	8,6
5	0,3	13.926	9,7	14.733	11,1	15.155	11,2	17.351	9,2	18.490	10,0
5	0,1	12.501	12,0	12.964	12,6	13.262	13,1	15.604	10,7	16.287	11,4
10	10	17.911	7,9	18.314	9,2	19.426	8,3	20.052	8,4	22.556	8,7
10	5	16.740	8,9	17.412	9,6	18.182	9,4	18.908	8,8	21.261	8,2
10	3	16.119	9,7	16.244	10,1	17.004	10,4	17.989	9,7	19.899	10,1
10	1	14.235	11,5	14.610	11,8	15.056	11,6	16.032	11,5	17.695	11,3
10	0,3	12.443	12,6	12.702	13,6	12.714	13,9	13.834	13,1	15.201	13,1
10	0,1	10.607	14,6	10.724	16,1	10.642	16,6	11.760	15,7	12.864	15,8
20	10	13.500	13,3	13.817	14,0	14.491	14,1	15.525	13,4	17.572	13,3
20	5	11.970	15,2	12.698	15,8	12.779	16,0	13.726	14,9	15.587	14,8
20	3	10.831	15,9	11.501	16,7	11.749	16,7	12.546	16,2	14.226	16,1
20	1	9.008	18,1	9.428	19,2	9.423	20,0	10.373	18,6	11.500	18,9
20	0,3	7.140	21,1	7.313	23,0	7.396	23,5	8.145	21,8	8.921	22,6
20	0,1	5.698	23,6	5.541	25,6	5.610	26,9	6.341	25,5	6.820	26,3

Tab. 4-5: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] an den Varianten der Voruntersuchungen

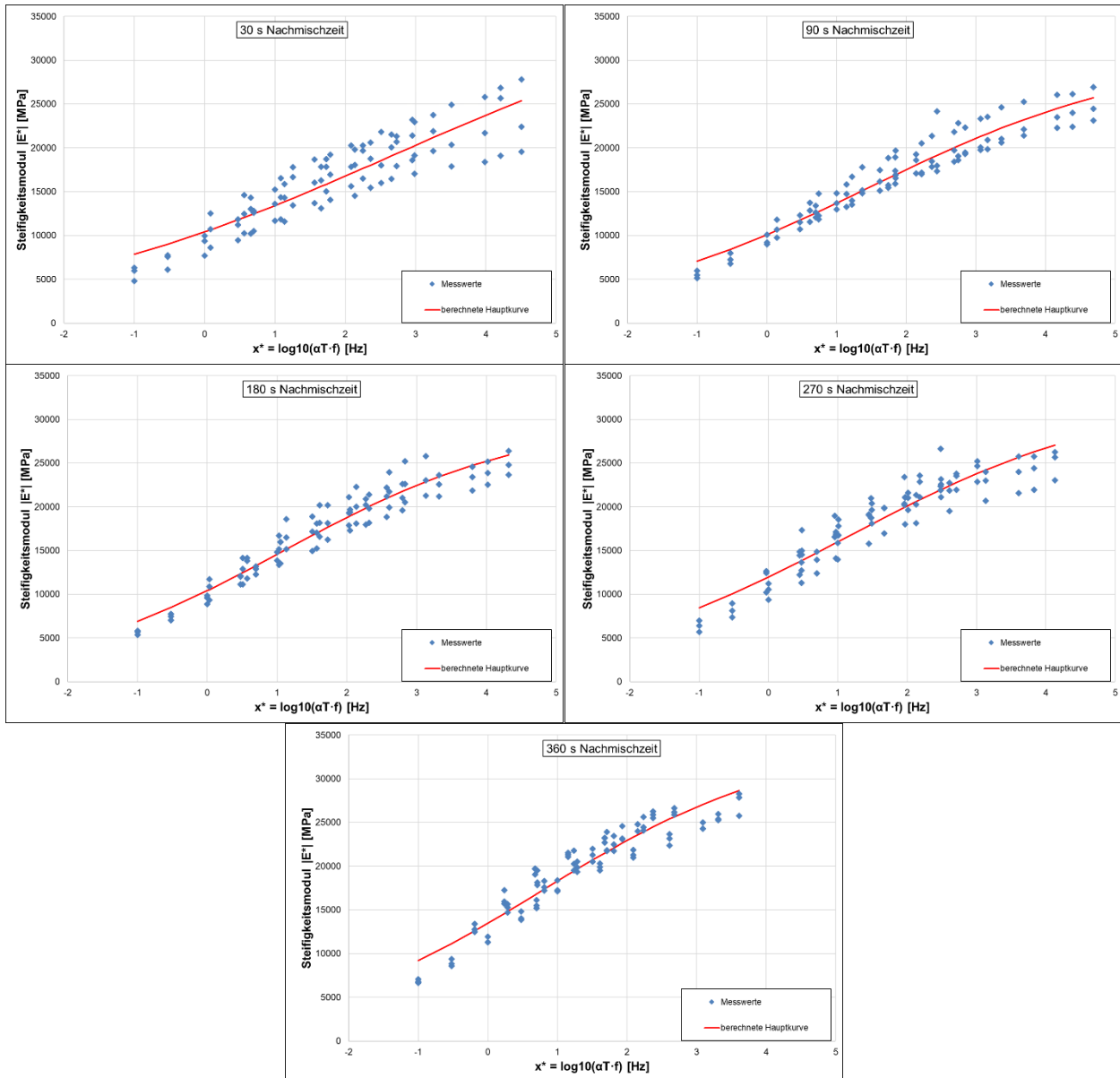


Bild 4-3: Hauptkurven der Steifigkeitsuntersuchungen nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] an den Varianten der Voruntersuchungen

Auffällige Ergebnisse bei den Phasenwinkeln konnten nicht auf prüftechnische Ausreißer zurückgeführt werden. Aufgrund der geringen Unterschiede und der nicht logischen Reihenfolge der Phasenwinkels, scheinen generell die Ergebnisse des Phasenwinkels aus den Asphaltsteifigkeitsuntersuchungen kein sinnvolles Performance-Kriterium zu sein.

Bei der Auswertung der Asphaltsteifigkeiten wurde geprüft, ob eine Frequenz und/oder eine Temperatur maßgeblich zu den teils großen Abweichungen zur mathematisch bestimmten Hauptkurve führen. Eine eindeutige Abhängigkeit konnte hierbei nicht ermittelt werden. Die Analyse der Verfahrenspräzision ergab, dass die kritische Spannweite der drei Einzelwerte nicht immer eingehalten werden konnte. Es zeigte sich jedoch eine Abhängigkeit zur Nachmischzeit: Je länger diese war, desto weniger Ausreißer wurden identifiziert.

Ebenfalls wurde aus jeder Charge eine Teilmenge extrahiert und am rückgewonnenen Bindemittel Untersuchungen im DSR mit einer 8 mm-Prüfgeometrie (PP08) durchgeführt. Die Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen sind in Tab. 4-6 zusammengefasst.

Prüf-Temperatur	Prüf-frequenz	Nachmischzeiten der Variante 2 TS 60 mit 1,5 M.-% Frischbindemittel									
		30 s		90 s		180 s		270 s		360 s	
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
-10	10	410.761	10,0	417.419	10,9	400.380	12,1	395.320	11,0	345.000	11,5
-10	5	388.966	10,2	403.134	10,9	379.958	11,9	385.694	10,7	326.853	11,7
-10	3	366.476	10,9	373.054	11,7	354.791	12,8	360.682	11,5	304.675	12,5
-10	1	317.387	12,5	317.745	13,5	299.365	14,7	307.466	13,2	259.586	14,4
-10	0,3	265.355	14,3	263.322	15,4	243.758	16,8	255.651	15,0	211.690	16,4
-10	0,1	219.493	16,0	215.348	17,4	196.198	18,8	210.191	16,9	170.428	18,5
0	10	241.821	15,3	233.407	17,7	217.608	18,4	230.306	16,5	188.060	18,1
0	5	220.152	15,6	219.573	17,0	199.348	18,4	214.113	16,4	175.475	18,0
0	3	203.354	16,4	198.372	17,9	179.290	19,3	194.857	17,3	157.516	19,0
0	1	164.103	18,1	156.664	19,8	139.902	21,5	156.114	19,1	123.122	21,0
0	0,3	127.098	20,0	118.742	22,0	103.542	23,8	119.472	21,2	91.610	23,3
0	0,1	98.118	21,9	89.386	24,2	76.284	26,2	90.834	23,3	67.718	25,6
5	10	180.126	17,7	174.526	19,2	158.076	20,8	174.081	18,6	138.809	20,4
5	5	156.303	18,8	149.639	20,5	133.819	22,2	150.053	19,8	117.918	21,7
5	3	140.344	19,7	132.904	21,5	117.808	23,3	133.259	20,8	103.636	22,8
5	1	107.132	21,9	98.843	24,1	85.806	26,1	99.757	23,3	75.844	25,5
5	0,3	76.953	24,8	64.115	29,9	58.217	29,6	68.913	27,3	51.879	28,9
5	0,1	57.777	26,5	46.639	32,0	41.157	31,8	51.870	28,5	37.113	30,9
10	10	124.869	20,8	117.922	22,7	103.850	24,6	119.229	21,9	92.560	24,1
10	5	105.774	21,9	98.307	24,1	85.310	26,1	100.036	23,2	76.349	25,5
10	3	93.250	22,9	85.742	25,2	73.419	27,3	87.128	24,3	65.655	26,6
10	1	68.225	25,3	60.676	28,0	50.613	30,3	62.454	27,0	45.692	29,5
10	0,3	46.745	28,4	39.652	32,0	32.412	34,1	41.777	30,5	29.538	33,2
10	0,1	33.423	30,3	27.575	33,9	21.543	36,7	29.197	32,7	19.836	35,6
20	10	54.269	27,8	47.603	30,8	38.656	33,4	49.774	29,7	35.950	32,5
20	5	43.956	29,0	37.704	32,3	29.928	35,1	39.757	31,1	28.067	34,0
20	3	37.470	29,8	31.571	33,4	24.607	36,2	33.513	32,1	23.237	35,1
20	1	24.690	33,2	19.894	37,2	15.003	40,2	21.456	35,8	14.379	38,8
20	0,3	16.084	35,5	12.270	39,9	8.846	43,2	13.507	38,4	8.643	41,6
20	0,1	10.502	37,8	7.565	42,7	5.204	46,1	8.508	41,1	5.192	44,4

Tab. 4-6: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an den Varianten der Voruntersuchungen

In Bild 4-4 und Bild 4-5 sind die Korrelationen zwischen den Bindemittel- und Asphaltsteifigkeiten sowie dem Phasenwinkel am Bindemittel und Asphalt dargestellt. Mit zunehmender Nachmischzeit konnte eine systematische Veränderung der Steifigkeiten festgestellt werden. Die Aussagekraft der Korrelation der Phasenwinkel kann anhand der Untersuchungsergebnisse nicht hinreichend genau beurteilt werden.

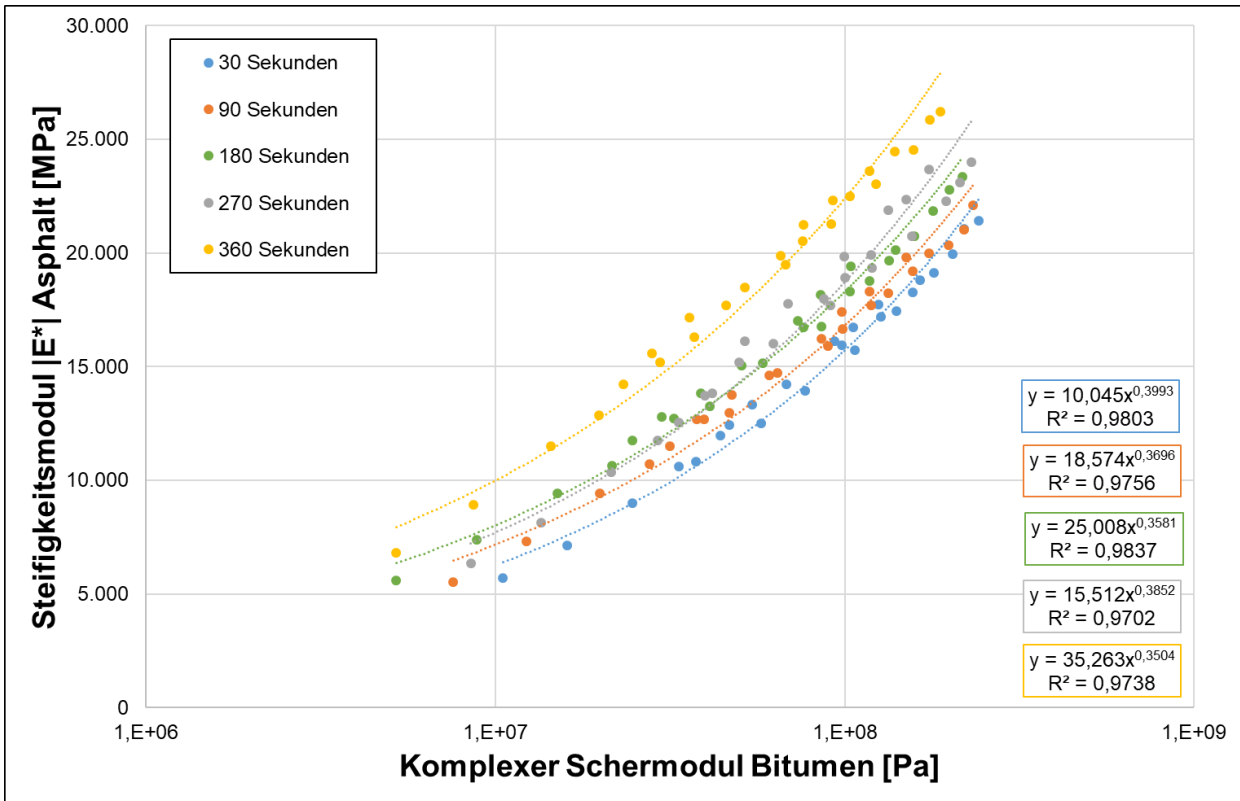


Bild 4-4: Zusammenhang zwischen der Steifigkeit des Bitumens und der des Asphaltes in Abhängigkeit von der Nachmischzeit

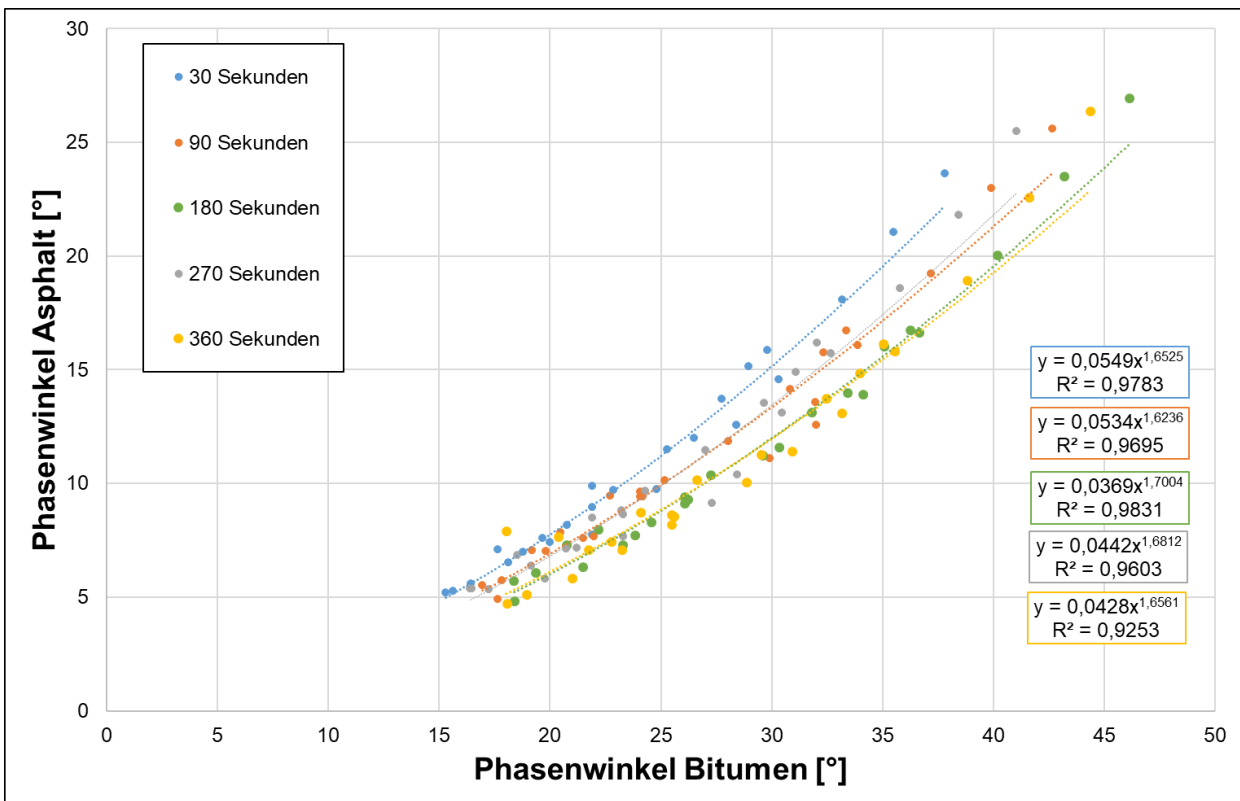


Bild 4-5: Zusammenhang zwischen dem Phasenwinkel des Bitumens und dem des Asphaltes in Abhängigkeit von der Nachmischzeit

4.2 Erstprüfungen

Für die Erstellung der Erstprüfungen wurden Untersuchungen an der Gesteinskörnung, dem Zugabebindemittel, dem Asphaltgranulat und dem resultierenden Asphaltmischgut durchgeführt. Die Ergebnisse der Gesteinsuntersuchungen sind in Kapitel 4.1.1, die des Asphaltgranulates in Kapitel 4.1.2 und die des Zugabebindemittels in Tab. 3-3 zusammengefasst.

Für die Asphaltmischgutherstellung wurde eine rechnerische Korngrößenverteilung erstellt und drei Bindemittelgehalte gewählt, welche anschließend anhand der Ergebnisse von Raumdichte und Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper beurteilt wurden. In Tab. 4-7 sind die Zugabeanteile und Rohdichten der Gesteinskörnungsgemische für die Asphalttragschichtvarianten (AC 22 T), in Tab. 4-8 diese für die Asphaltbinderschichtvarianten (AC 16 B) mit Asphaltgranulat 1 und Asphaltgranulat 2 zusammengefasst.

Zur Vereinfachung der Probenbezeichnungen wurde eine Abkürzung eingeführt. Diese setzt sich zusammen aus Asphaltgranulat (1, 2 oder Referenzvariante (Ref) ohne Asphaltgranulat) / Binder- (BS) oder Trag-schichtmischgut (TS) / Asphaltgranulatanteil (20, 40 oder 60 M.-%).

Zusammensetzung	TS Ref	2 TS 60	2 TS 40	2 TS 20	1 TS 60	1 TS 40	1 TS 20
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
Gabbro Füller	4,8	1,1	2,3	3,6	0,0	1,6	3,2
NS Uhry	15,6	4,1	7,9	11,7	4,8	8,3	11,9
BS Gabbro	16,0	3,8	8,0	12,0	3,8	8,0	12,0
Rhyolith 5/22	63,6	31,0	41,8	52,7	31,4	42,1	52,9
AG 2	-	60,0	40,0	20,0	-	-	-
AG 1	-	-	-	-	60,0	40,0	20,0
Rohdichte Gesteinskörnungsgemisch [g/cm³]	2,705	2,611	2,642	2,674	2,610	2,642	2,673

Tab. 4-7: Gesteinszusammensetzung der Asphalttragschichtvarianten

Zusammensetzung	BS Ref.	2 BS 60	2 BS 40	2 BS 20	1 BS 60	1 BS 40	1 BS 20
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
Gabbro Füller	3,4	1,1	1,8	2,6	-	0,9	2,1
BS Gabbro 0/2 entfüllert		-	-	-	1,4	-	-
BS Gabbro 0/2	24,9	0,2	8,5	16,7	-	9,4	17,3
Gabbro 2/5	17,7	8,7	12,0	15,0	4,6	9,0	13,0
Gabbro 5/8	11,0	5,0	6,7	9,0	4,0	7,0	9,6
Gabbro 8/11	14,0	8,0	10,0	11,7	5,0	7,7	11,0
Gabbro 11/16	29,0	17,0	21,0	25,0	25,0	26,0	27,0
AG 2	-	60,0	40,0	20,0	-	-	-
AG 1	-	-	-	-	60,0	40,0	20,0
Rohdichte Gesteinskörnungsgemisch [g/cm³]	2,899	2,687	2,754	2,825	2,691	2,757	2,826

Tab. 4-8: Gesteinszusammensetzung der Asphaltbinderschichtvarianten

Die Ergebnisse der Bestimmung der Asphaltrohddichte, der Raumdichte und des Hohlraumgehaltes am Marshall-Probekörper unter Variation des Bindemittelgehaltes sind in Tab. 4-9 zusammengefasst.

Als Zielgröße wurde definiert, dass der Hohlraumgehalt für alle Asphaltbinderschichten auf dem gleichen Niveau sein sollte. Die gleiche Vorgehensweise wurde auch für die Asphalttragschichten angewandt. Für die Erstprüfungen wurden im ersten Schritt zwei Bindemittelgehalte für das Frischbindemittel gewählt und

in Abhängigkeit von den Ergebnissen ggf. ein dritter Bindemittelgehalt ergänzend geprüft. Für die Bestimmung der rechnerisch resultierenden Erweichungspunkte Ring und Kugel wurden die Messergebnisse der Prüfungen an den rückgewonnenen Bitumen aus dem Asphaltgranulat verwendet. Die detaillierten Ergebnisse der Erstprüfungen sind dem digitalen Anhang dieses Forschungsberichtes angefügt.

Zusammensetzung	Bindemittelgehalt				Rechn. EP RuK	Rohdichte	Raumdichte	Hohlraumgehalt	Ausfüllungsgrad	gewählt	
		frisch	Granulat	B _{res}							B _{min, abg.}
	[M.-%]										[°C]
TS Ref	B1	3,8	-	3,8	3,7	39,0	2,528	2,380	5,8	60,3	<input checked="" type="checkbox"/>
	B2	4,1		4,1		39,0	2,519	2,395	4,9	66,2	
	B3	4,4		4,4		39,0	2,504	2,407	3,9	72,6	
1 TS 20	B1	2,7	1,1	3,8	3,8	45,5	2,551	2,390	6,3	58,4	<input checked="" type="checkbox"/>
	B2	3,0		4,1		46,1	2,536	2,412	4,9	66,3	
	B3	3,4		4,5		46,7	2,521	2,410	4,4	70,6	
1 TS 40	B1	1,5	2,3	3,8	3,8	52,9	2,573	2,386	7,2	55,1	
	B2	1,7		4,0		54,2	2,560	2,406	6,0	61,0	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	2,1		4,4		55,0	2,539	2,434	4,7	69,0	
1 TS 60	B1	0,5	3,4	3,9	3,9	59,5	2,597	2,408	7,3	55,7	
	B2	0,8		4,2		60,5	2,577	2,417	6,2	61,5	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	1,0		4,4		62,1	2,565	2,436	5,0	67,7	
2 TS 20	B1	2,9	0,9	3,8	3,8	49,4	2,544	2,393	5,9	60,1	<input checked="" type="checkbox"/>
	B2	3,2		4,1		50,1	2,533	2,412	4,8	66,8	
	B3	3,5		4,4		51,0	2,522	2,400	4,8	68,2	
2 TS 40	B1	2,1	1,7	3,8	3,8	60,0	2,578	2,386	7,5	54,1	
	B2	2,2		3,9		61,1	2,542	2,398	5,7	61,5	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	2,4		4,1		61,7	2,539	2,432	4,2	69,8	
2 TS 60	B1	1,2	2,6	3,8	3,8	69,0	2,565	2,390	6,8	56,6	
	B2	1,4		4,0		72,0	2,560	2,412	5,8	61,9	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	1,8		4,4		73,7	2,547	2,425	4,8	68,4	
BS Ref	B1	4,0	-	4,0	4,0	57,5	2,677	2,535	5,5	64,3	
	B2	4,3		4,3		57,5	2,673	2,534	5,3	66,7	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	4,6		4,6		57,5	2,650	2,561	3,4	77,2	
1 BS 20	B1	3,1	1,1	4,2	4,1	59,4	2,666	2,529	5,1	67,0	<input checked="" type="checkbox"/>
	B2	3,3		4,4		59,5	2,643	2,525	4,5	70,7	
	B3	3,5		4,6		59,6	2,645	2,546	3,8	75,0	
1 BS 40	B1	2,0	2,3	4,3	4,2	61,3	2,649	2,523	4,8	68,8	<input checked="" type="checkbox"/>
	B2	2,3		4,6		61,5	2,639	2,520	4,5	71,5	
	B3	2,6		4,9		61,8	2,629	2,518	4,2	74,1	
1 BS 60	B1	0,9	3,4	4,3	4,3	63,4	2,650	2,507	5,4	66,1	
	B2	1,1		4,5		63,5	2,640	2,510	4,9	69,2	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	1,2		4,6		63,8	2,635	2,510	4,7	70,6	
2 BS 20	B1	3,2	0,9	4,1	4,1	63,8	2,655	2,497	6,0	62,5	
	B2	3,4		4,3		64,2	2,653	2,514	5,2	67,0	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	3,7		4,6		64,6	2,637	2,534	3,9	74,5	
2 BS 40	B1	2,5	1,7	4,2	4,2	69,4	2,622	2,482	5,3	65,7	
	B2	2,7		4,4		69,9	2,635	2,501	5,1	67,8	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	2,9		4,6		70,5	2,612	2,513	3,8	74,8	
2 BS 60	B1	1,7	2,6	4,3	4,3	75,7	2,651	2,457	7,3	58,5	
	B2	1,9		4,5		76,1	2,622	2,460	6,2	63,5	<input checked="" type="checkbox"/>
	B3	2,0		4,6		77,0	2,614	2,477	5,2	68,1	

Tab. 4-9: Asphaltrohdichte, Raumdichte und Hohlraumgehalt der Marshall-Probekörper zur Auswahl der Bindemittelgehalte

4.3 Großtechnische Herstellung

4.3.1 Voruntersuchungen zur Festlegung der Nachmischzeiten am Mischwerk

An der Asphaltmischanlage in Groß Bülten wurden zunächst Trockenmischungen mit feinkörnigem Asphaltgranulat und grober „frischer“ Gesteinskörnung mit sechs Nachmischzeiten durchgeführt. Dafür wurde Asphaltmischgut mit einem Asphaltgranulat 0/16, mit einem Bindemittelgehalt von 5,3 M.-% und einem Erweichungspunkt Ring und Kugel von 62,7 °C, mit einem Gesteinskörnungsgemisch 0/32 aus Natursand, Gabbro und Rhyolit - ohne zusätzliche Zugabe von Füller oder frischem Bindemittel - verwendet. Diese Untersuchungen dienten zur Beobachtung, ab welcher Nachmischzeit das Bindemittel vom feinkörnigen Asphaltgranulat auf die grobe Gesteinskörnung übergeht bzw. keine weitere Verlagerung des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat zu den frischen Gesteinskörnungen mehr festzustellen ist.

Dabei wurden Nachmischzeiten von 2 bis 27 Sekunden in 5 Sekunden Intervallen realisiert. Das Material wurde jeweils nach der angestrebten Nachmischzeit mittels Radlader aus dem Silo abgezogen und auf einer freien Fläche ausgebreitet. [STEPHAN, 2019]

Eine visuelle Bewertung konnte anhand des Umhüllungsgrades vorgenommen werden. Die DEUTAG Nord erstellte einen Untersuchungsbericht mit Fotodokumentation. Diese Fotodokumentation ist nachfolgend in Bild 4-6 und Bild 4-7 dargestellt. [STEPHAN, 2019]



Bild 4-6: Visuelle Erfassung des Homogenisierungsgrades für Mischungen am Asphaltmischwerk unter Variation der Nachmischzeit, Teil 1 [STEPHAN, 2019]

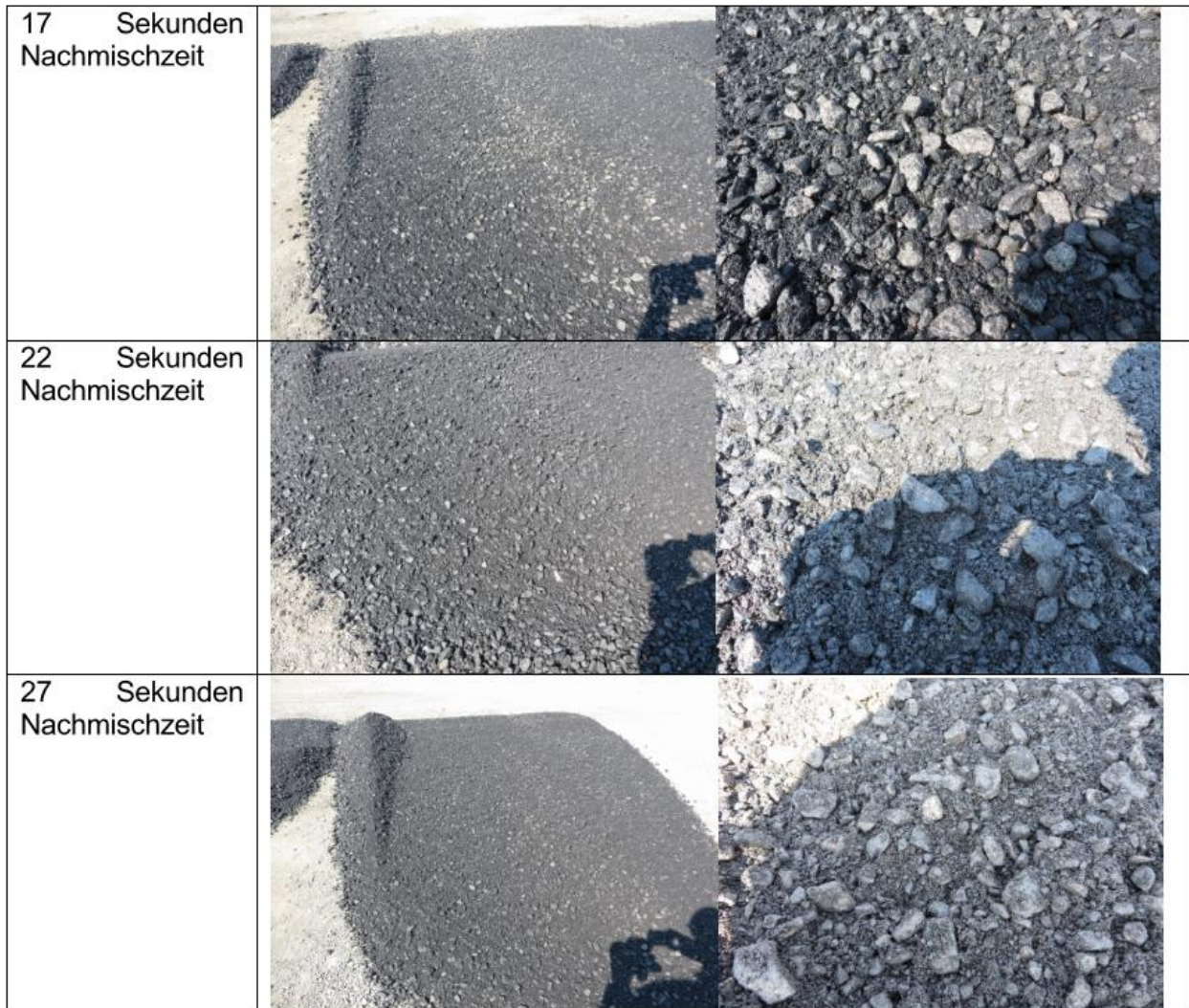


Bild 4-7: Visuelle Erfassung des Homogenisierungsgrades für Mischungen am Asphaltmischwerk unter Variation der Nachmischzeit, Teil 2 [STEPHAN, 2019]

Zu dieser Untersuchungsreihe ist anzumerken, dass aufgrund des vergleichsweise geringen Bindemittelgehaltes (Bindemittel kommt ausschließlich aus dem feinkörnigen Asphaltgranulat) eine vollständige Umhüllung aller Gesteinskörner nicht zu erwarten war.

Ziel der Voruntersuchungen am Asphaltmischwerk war die Festlegung von drei Nachmischzeiten für die weiteren Untersuchungen in diesem Forschungsprojekt. Bei längeren Nachmischzeiten konnte erwartungsgemäß zunehmend ein Übergang des Bindemittels aus dem Asphaltgranulat auf die frische Gesteinskörnung beobachtet werden. [STEPHAN, 2019]

Für das Projekt wurden basierend auf den Untersuchungen folgende Nachmischzeiten vorgesehen:

- Geringe Nachmischzeit 5 Sekunden
- Ausreichende Nachmischzeit 25 Sekunden (am Mischwerk üblicherweise praktiziert)
- Erhöhte Nachmischzeit 45 Sekunden

4.3.2 Herstellung der Asphaltmischgutvarianten

Die großtechnische Herstellung erfolgte am 16.09.2019. Zunächst wurden die Asphaltbinderschichtvarianten hergestellt. Hier wurde mit dem Asphaltmischgut ohne Asphaltgranulat begonnen und anschließend der AG-Anteil stufenweise von 20 M.-% auf 60 M.-% gesteigert. Dabei wurden die beiden Asphaltgranulate abwechselnd verwendet, d.h. zuerst wurden die Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulat 1 und den verschiedenen Nachmischzeit hergestellt und danach die drei Varianten mit 20 M.-% des Asphaltgranulats 2. Im Anschluss wurden die Varianten mit 40 M.-% sowie 60 M.-% Asphaltgranulat nach dem gleichen Schema gemischt. Bei der Herstellung der Asphalttragschichtvarianten wurde analog vorgegangen.

Die Asphaltgranulate wurden in einer Paralleltrommel auf eine vom Mischanlagenbetreiber angestrebte Zieltemperatur zwischen 115 und 130 °C erhitzt. Im Mischzyklus des Mischwerks Groß Bülden war dabei vorgesehen, dass im ersten Schritt das Mineralstoffgemisch und das Asphaltgranulat zugegeben werden. Nach 5 Sekunden Mischzeit wurde der Füller und nach insgesamt 13 Sekunden das Frischbindemittel hinzu dosiert. Nach 18 Sekunden begann die Nachmischzeit, welche in diesem Forschungsprojekt variierte.

Aufgrund schlechter Witterungsbedingungen musste von der geplanten Probenahme abgewichen und das Asphaltmischgut aus dem Mischer in eine Radladerschaufel geladen und von dort direkt in Metalleimer gefüllt werden. Insgesamt wurden 16 Eimer je Variante abgefüllt (Bild 4-8).



Bild 4-8: Beladung der Radladerschaufel mit Asphaltmischgut (links) sowie Entnahme der Asphaltmischgutproben durch vier Probennehmer

4.4 Performance-Prüfungen am großtechnisch hergestellten Asphaltmischgut

4.4.1 Mischgutzusammensetzung und Bindemittelleigenschaften nach Extraktion

Die Asphaltmischgutzusammensetzung der 38 Varianten nach den Extraktionen ist in Tab. 4-10 zusammengefasst. Ergänzend wurden der Hohlraumgehalt und Bindemittelanteil der Erstprüfung aufgeführt. Ein Ansatz dieses Forschungsprojektes war der Vergleich zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit. Um direkte Zusammenhänge analysieren zu können, wurden aus den gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 33] hergestellten Asphalt-Probepplatten die Bohrkern gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 27] ausgebohrt, nach der Prüfung extrahiert und die rückgewonnenen Mischgutkomponenten analysiert.

Zusammensetzung	Nachmischzeit	Hohlraumgehalt		Bindemittelanteil		Füller	fGk	gGk
	[s]	[Vol.-%]		[M.-%]		[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
		Ist	Soll	Ist	Soll			
TS Referenz	25	5,0	5,8	4,1	3,8	10,1	22,4	67,5
1 TS 20	5	5,0	6,3	4,1	3,8	9,2	26,9	63,9
	25	4,0		3,9		7,9	26,5	65,6
	45	4,2		4,3		7,8	28,2	64,0
1 TS 40	5	3,6	6,0	4,2	4,0	7,4	27,3	65,3
	25	1,9		4,3		7,5	26,8	65,7
	45	3,7		4,0		7,3	27,5	65,2
1 TS 60	5	3,5	6,2	5,1	4,2	10,8	39,8	49,4
	25	2,6		4,4		10,0	31,3	58,7
	45	2,7		4,0		10,0	27,2	62,8
2 TS 20	5	6,0	5,9	4,0	3,8	7,2	26,1	66,7
	25	4,6		3,9		7,6	25,6	66,8
	45	2,9		4,1		8,3	24,2	67,5
2 TS 40	5	3,0	5,7	4,5	3,9	8,9	29,2	61,9
	25	1,5		4,4		7,9	27,8	64,3
	45	1,7		4,3		8,8	27,3	63,9
2 TS 60	5	3,2	5,8	4,5	4,0	9,7	32,0	58,3
	25	3,0		4,7		9,6	31,7	58,7
	45	1,9		4,7		8,9	29,5	61,6
BS Referenz	25	5,2	5,3	4,0	4,0	7,5	18,5	74,0
1 BS 20	5	6,1	5,1	4,2	4,2	7,4	19,6	73,0
	25	6,1		4,2		6,8	18,7	74,5
	45	3,9		4,9		8,0	23,8	68,2
1 BS 40	5	1,8	4,8	4,6	4,3	8,6	22,0	69,4
	25	3,2		4,4		8,2	20,8	71,0
	45	2,9		4,3		8,2	23,5	68,3
1 BS 60	5	2,7	4,9	4,3	4,5	8,8	21,9	69,3
	25	1,5		4,5		9,8	23,1	67,1
	45	1,3		4,6		9,6	23,0	67,4
2 BS 20	5	5,7	5,2	4,5	4,3	6,3	21,3	72,4
	25	3,5		4,7		6,6	22,8	70,6
	45	5,6		4,4		6,3	17,8	75,9
2 BS 40	5	1,5	5,1	4,9	4,4	7,7	22,4	69,9
	25	0,5		5,0		7,9	23,4	68,7
	45	0,7		4,9		8,6	23,7	67,7
2 BS 60	5	1,2	5,2	4,9	4,6	9,3	24,3	66,4
	25	0,8		4,8		10,1	23,2	66,7
	45	0,5		4,8		9,2	21,7	69,1

Tab. 4-10: Asphaltmischgutzusammensetzung und Hohlraumgehalt der Asphalttragschicht- und Asphaltbinderschichtvarianten sowie Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen am rückgewonnenen Bindemittel

Durch den Einfluss der Bohrkernentnahme und einer damit einhergehenden Kornverfeinerung an der Mantelfläche, konnte kein fundierter Nachweis über eine Nachverfeinerung des Mischguts in Abhängigkeit von der Mischzeit analysiert werden.

Der Vergleich der in der Tab. 4-9 zusammengefassten Werte mit den Ergebnissen der Erstprüfung in Tab. 4-8 zeigt, dass die großtechnisch hergestellten Asphaltmischgüter teils deutlich geringere Hohlraumgehalte aufweisen. Zur Analyse wurden die Extraktionsergebnisse mit den in der Erstprüfung festgelegten Mischgutmerkmalen unter Verwendung der in den [ZTV Asphalt-StB 07/13] definierten Toleranzen verglichen.

Ein Vergleich der Korngrößenverteilung zeigt, dass generell feinere Sieblinien festgestellt wurden. Die Toleranzen für den Kornanteil < 0,063 mm wurden dabei jedoch sowohl für die Asphalttrag- wie auch für die Asphaltbinderschicht eingehalten. Die Toleranz von $\pm 0,5$ M.-% für den Bindemittelgehalt in der Tragschicht wurde von 6 der 18 Varianten überschritten und bei der Binderschicht lagen vier Varianten über der Toleranz von $\pm 0,4$ M.-%.

Der höhere Anteil der Mörtelphase resultiert in dichteren Asphaltmischungen.

Nachfolgend sind in Bild 4-9 die Korngrößenverteilungen der extrahierten Varianten mit den zugehörigen zulässigen Sieblinienbereichen, differenziert nach Asphalttragschicht- und Asphaltbinderschichtmaterial mit Asphaltgranulat 1 und 2, dargestellt.

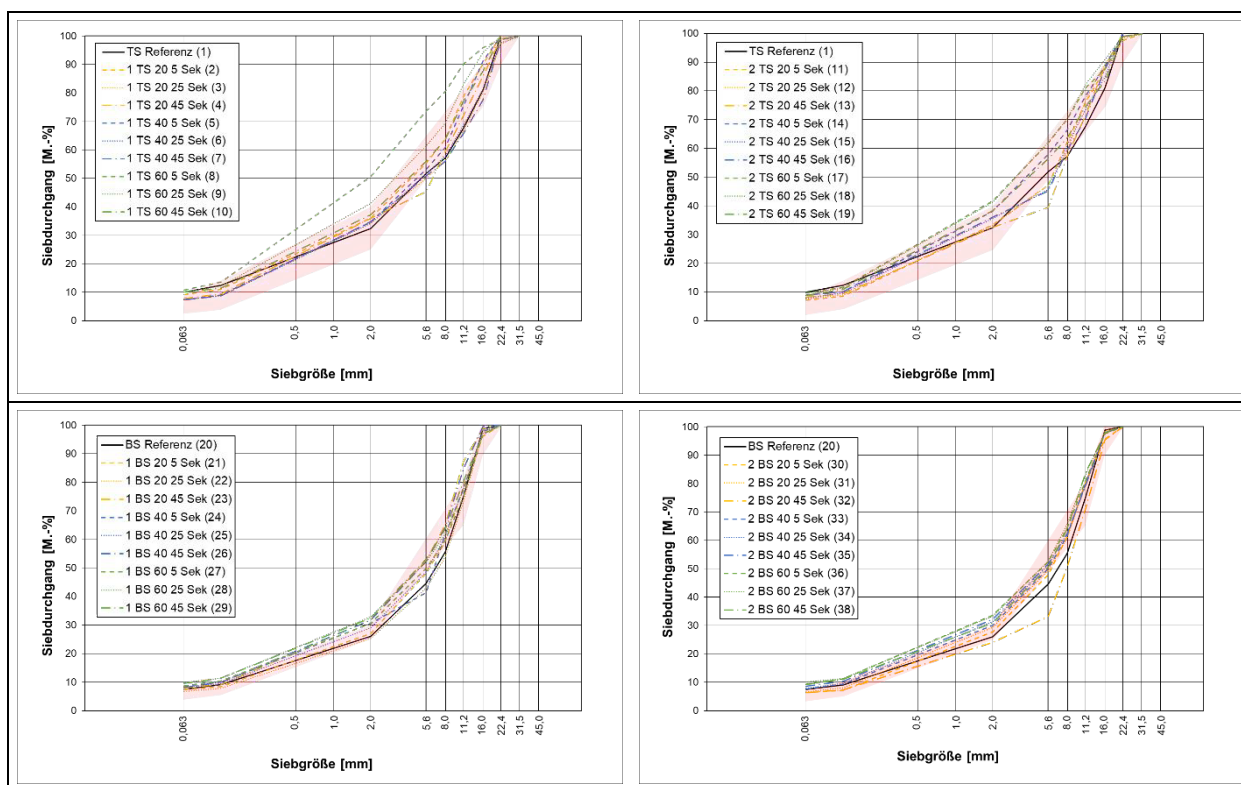


Bild 4-9: Korngrößenverteilung der großtechnisch hergestellten Asphaltmischgutvarianten nach Extraktion

Die rückgewonnenen Bindemittel wurden darüber hinaus hinsichtlich der Kenngrößen Erweichungspunkt Ring und Kugel nach [DIN EN 1427] und der Äquisteifigkeitstemperatur $T(G^*=15\text{kPa})$ sowie dem zugehörigen Phasenwinkel, bestimmt aus dem T-Sweep nach [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)], analysiert und in der Tab. 4-11 dokumentiert. Die detaillierten Ergebnisse des Temperatursweeps sind im Anhang A beigefügt.

Zusammensetzung	Nachmischzeit [s]	EP RuK	$T(G^*=15\text{kPa})$	$\delta(G^*=15\text{kPa})$
		[°C]	[°C]	[°]
TS Referenz	25	50,6	48,8	76,5
1 TS 20	5	59,8	58,2	71,7
	25	58,8	58,3	74,0
	45	52,0	59,2	72,5
1 TS 40	5	49,6	49,1	74,0
	25	52,6	51,0	72,6
	45	60,8	59,5	73,8
1 TS 60	5	66,6	66,5	75,2
	25	69,8	68,2	73,5
	45	67,0	67,6	74,7
2 TS 20	5	65,4	62,4	72,7
	25	63,2	62,7	74,0
	45	56,6	55,6	75,0
2 TS 40	5	67,6	66,8	71,0
	25	63,6	62,1	70,1
	45	60,8	60,3	72,8
2 TS 60	5	74,6	76,7	69,6
	25	76,4	75,7	71,9
	45	71,0	70,1	70,5
BS Referenz	25	69,0	64,4	66,4
1 BS 20	5	65,0	61,7	69,7
	25	66,8	64,7	68,5
	45	60,2	58,2	68,1
1 BS 40	5	62,2	58,8	68,4
	25	65,6	63,7	69,6
	45	68,8	68,5	71,0
1 BS 60	5	66,2	66,4	72,1
	25	75,8	74,9	70,5
	45	62,6	63,4	71,9
2 BS 20	5	67,0	64,9	69,3
	25	68,2	64,8	67,7
	45	65,6	63,4	67,6
2 BS 40	5	65,0	62,4	67,6
	25	67,0	65,9	66,9
	45	67,6	66,8	71,1
2 BS 60	5	76,6	74,5	67,7
	25	77,8	76,6	70,6
	45	75,0	74,8	70,6

Tab. 4-11: Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen an den rückgewonnenen Bindemitteln

Da bei einigen Messungen der komplexe Schermodul den kritischen Messbereich der PP08 von 10 MPa erreicht oder überschritten wurde, wurden ergänzend an ausgewählten Varianten DSR-Prüfungen mit einer 4 mm-Prüfgeometrie (PP04) durchgeführt. Die Gegenüberstellung der komplexen Schermoduln in Bild 4-10 zeigt, dass mit der PP04 etwas höhere Steifigkeiten und etwas niedrigere Phasenwinkel ermittelt wurden. Auffällig ist die parallele Verschiebung der Messwerte zur Winkelhalbierenden. Es sollte jedoch berücksichtigt werden, dass die Bindemittelproben, die für die PP04-Messreihe verwendet wurden, häufiger erwärmt wurden als die der PP08-Messreihe. Eine systematische Erhöhung der Steifigkeiten aufgrund der thermischen Alterungsprozesse ist daher nicht auszuschließen.

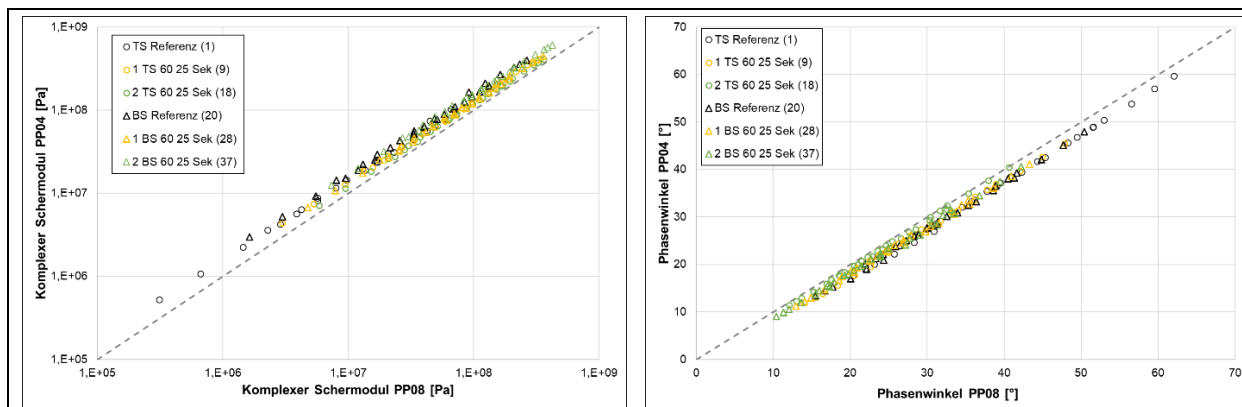


Bild 4-10: Vergleich der komplexen Schermoduln und Phasenwinkel ermittelt mit der PP04- und der PP08-Prüfgeometrie im Frequenzbereich von 0,1 bis 10 Hz und im Temperaturbereich von -10 bis 20 °C

In Anlehnung an die in der [DIN EN 14770] beschriebene Überlappungstemperatur wurden die Prüfgenaugigkeiten zwischen den Prüfgeometrien über den gesamten Temperaturbereich analysiert (s. Bild 4-11). Die Analyse ergab, dass die Prüfgenaugigkeit der Phasenwinkel von 3° zuverlässig eingehalten wurde. Die Werte des komplexen Schermoduls überschritten bei einigen Varianten die geforderte Prüfgenaugigkeit von 15 % zum Mittelwert. Jedoch zeigten sich bei den Abweichungen keine Abhängigkeit zur Prüftemperatur oder zur Prüffrequenz.

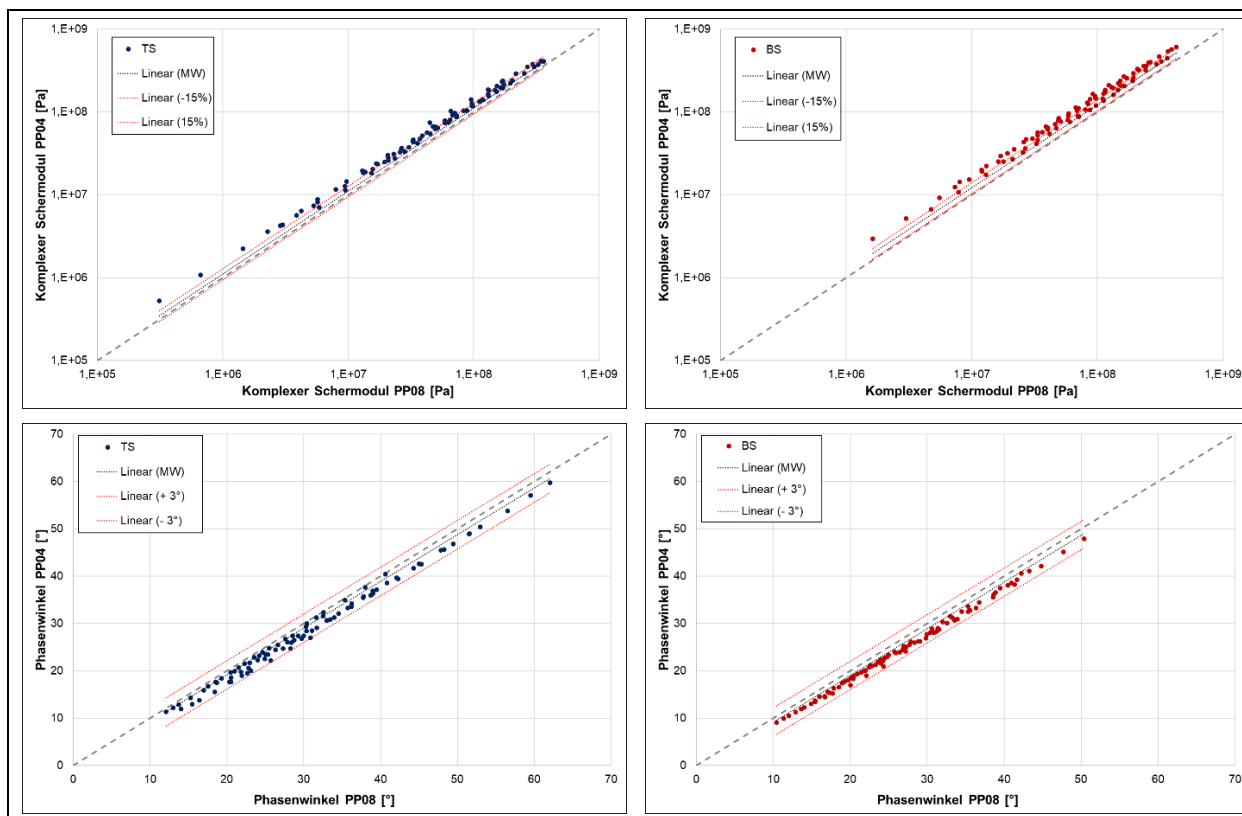


Bild 4-11: Prüfgenaugigkeit von komplexen Schermodul und Phasenwinkel ausgewählter Asphaltmischgutvarianten über den gesamten Temperaturbereich

Darüber hinaus wurden die extrahierten Bindemittel im Temperaturband von -10 °C bis +20 °C bei den Frequenzen 0,1; 0,3; 1; 3; 5 und 10 Hz geprüft. Die vollständigen Ergebnisse sind ebenfalls im Anhang Teil A dokumentiert. Für eine kompakte Darstellung wurde das *time temperature superposition pinciple* genutzt. Basierend auf [YUSOFF et. al., 2011] wurde für die Berechnung der horizontalen Verschiebungsfaktoren der Ansatz nach Williams-Landel-Ferry (WLF) [WILLIAMS et. al, 1955] verwendet. Der Verlauf des komplexen Schermoduls kann über sigmoidale Modelle modelliert werden. Im Zuge dieser Forschungstätigkeit wurde das gleiche sigmoidale Modell verwendet, welches nach der [TP Asphalt-StB, Teil 26] für Asphalt herangezogen wird.

Die Masterkurven der extrahierten Bindemittel sind nachfolgend, getrennt für Asphalttrag- (Bild 4-12) und Asphaltbinderschicht (Bild 4-13) und zusätzlicher Differenzierung zwischen Asphaltgranulat 1 (links) und Asphaltgranulat 2 (rechts), dargestellt.

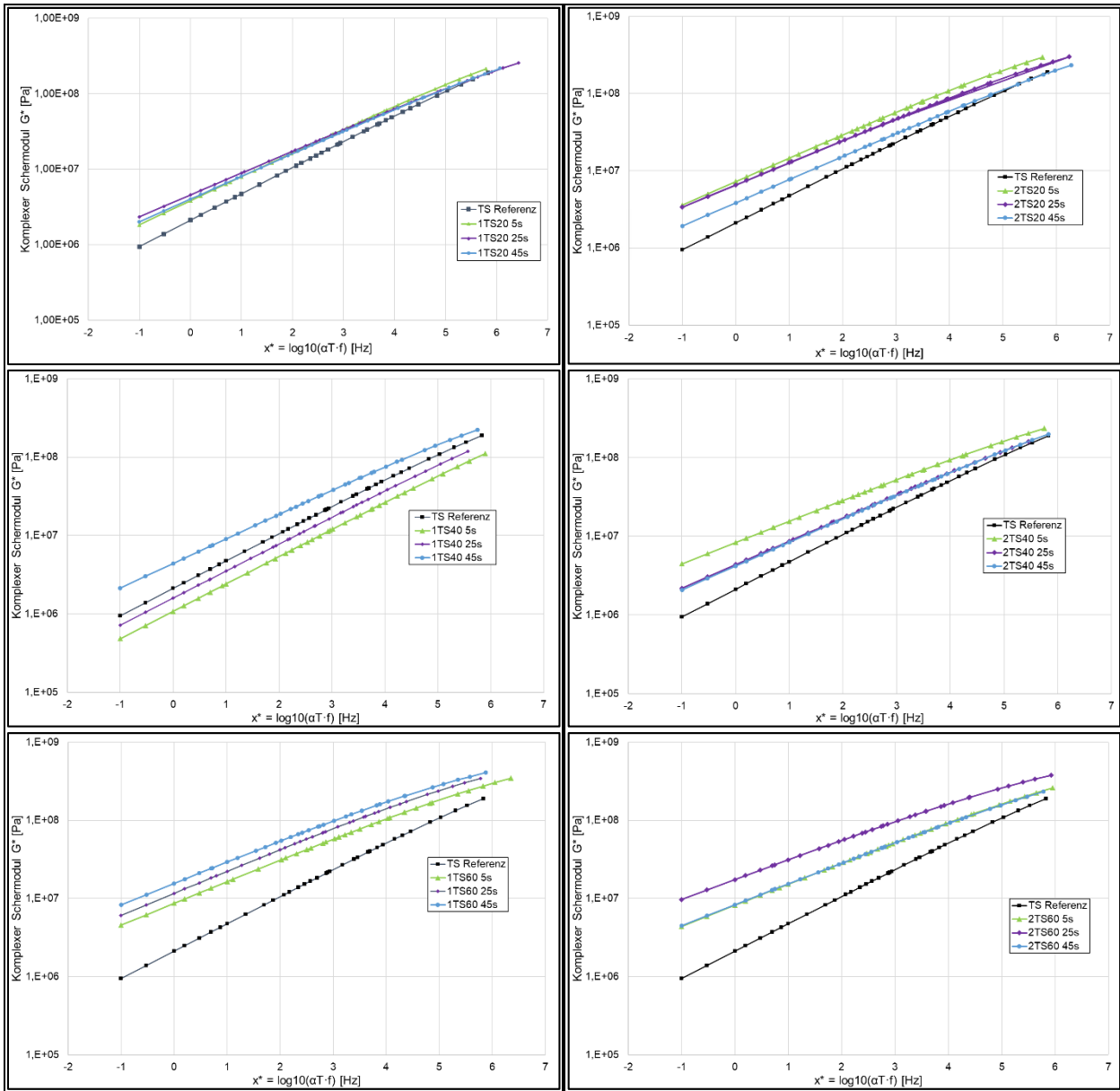


Bild 4-12: Masterkurven der extrahierten Bindemittel aus den Mischgutvarianten der Asphalttragschichten

Die in Bild 4-12 dargestellten Masterkurven zeigen, dass mit der Zugabe von Asphaltgranulat die Härte des resultierenden Bindemittels steigt. Eine Ausnahme in diesem Zusammenhang stellen die Varianten der 1 TS 40 mit 5 und 25 Sekunden Nachmischzeit dar, welche im resultierenden Bindemittel eine geringere Härte als das Frischbindemittel aufweisen, was als ungewöhnlich und nicht plausibel einzustufen ist.

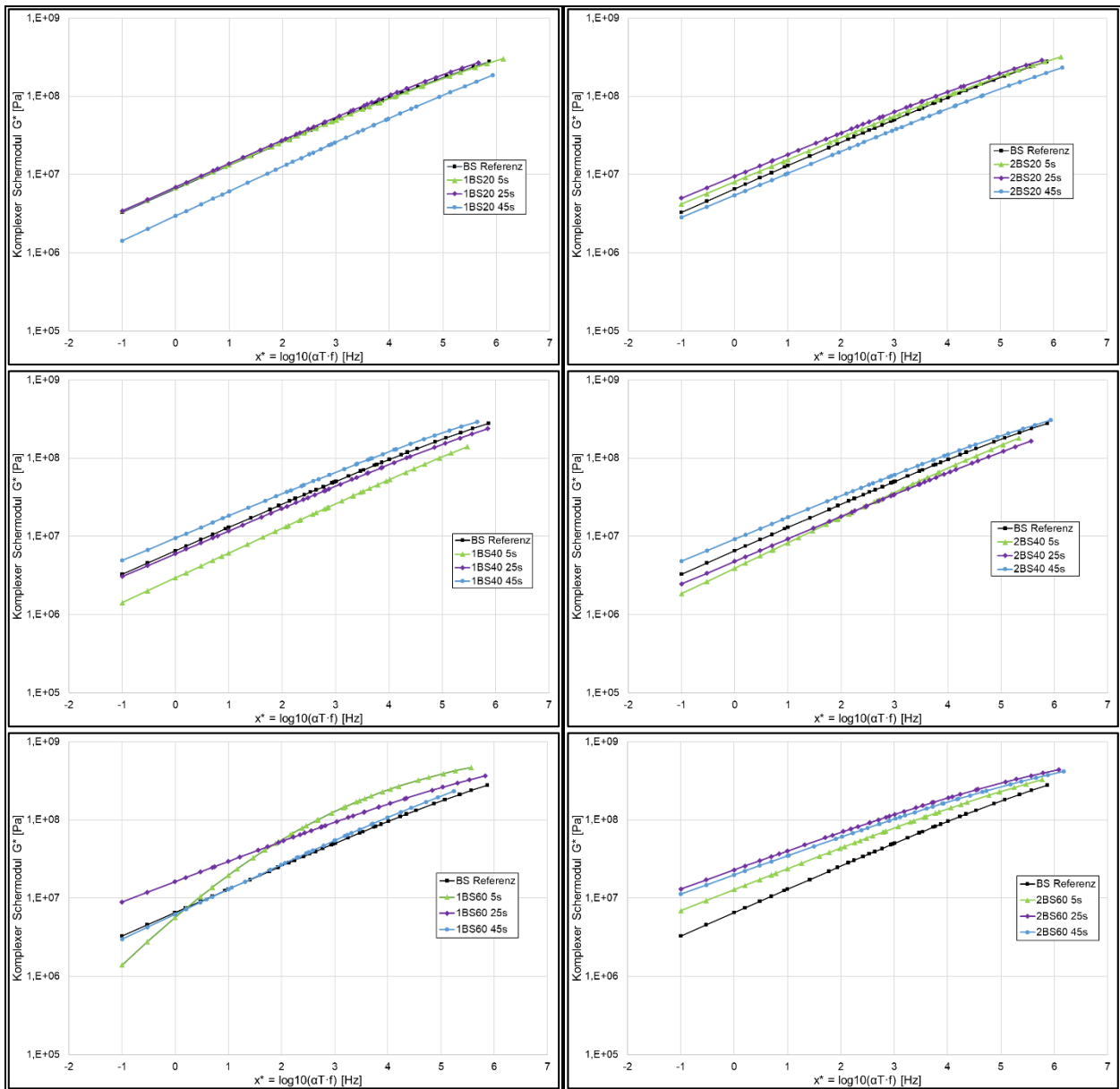


Bild 4-13: Masterkurven der extrahierten Bindemittel aus den Mischgutvarianten der Asphaltbinderschichten

Die Masterkurven der aus den Mischgutvarianten der Asphaltbinderschichten extrahierten Bindemittel zeigen häufigere nicht plausible Ergebnisse. Hier liegen die Kurven diverser Varianten, in denen Asphaltgranulat zugegeben wurde, unter der Referenzvariante mit Frischbindemittel. Zudem hat die Variante 1 BS 60 5 s einen ungewöhnlichen Kurvenverlauf.

4.4.2 Verdichtbarkeit

Die Verdichtbarkeit der Asphaltgemische wurde mit Hilfe des Marshall-Verfahrens gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 10 B] untersucht. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-12 unter Angabe der materialspezifischen Kennwerte als Mittelwerte einer Dreifachbestimmung zusammengefasst.

Es kann festgestellt werden, dass die Verdichtbarkeit bei allen Varianten erwartungsgemäß auf einem ähnlichen Niveau liegt. Wenn die Verfahrenspräzision nach [TP Asphalt-StB, Teil 10 B] mit einer kritischen Spannweite von 20 % für drei Einzelwerte auf den Vergleich der Mittelwerte übertragen wird, kann festgestellt werden, dass eine Analyse des Einflusses der Nachmischzeit (grüne Pfeile) fehlerbehaftet ist, weil der Großteil der Varianten zwischen 5 bis 45 s innerhalb dieser Messpräzision liegen.

Zusammen- setzung	Nach- mischzeit	Binde- mittel- gehalt	Füller- gehalt	Kennwerte der Verdichtbarkeit				
				Verdichtungswider- stand T			a	b
	[s]	[M.-%]	[M.-%]					
TS Ref	25	3,8	5,8	28,4			0,01585	0,00421
1 TS 20	5	3,8	7,0	30,2	↑	●	0,01537	0,00374
	25			24,0			0,01557	0,00389
	45			23,2			0,01557	0,00397
1 TS 40	5	4,0	7,4	23,9	↓	●	0,01565	0,00378
	25			28,0			0,01546	0,00358
	45			32,7			0,01510	0,00362
1 TS 60	5	4,2	7,8	24,8	←	●	0,01597	0,00415
	25			24,7			0,01576	0,00411
	45			26,0			0,01552	0,00402
2 TS 20	5	3,8	6,9	33,3	↑	●	0,01517	0,00362
	25			28,8			0,01541	0,00371
	45			27,3			0,01555	0,00400
2 TS 40	5	3,9	7,2	28,1	←	●	0,01510	0,00347
	25			22,2			0,01611	0,00411
	45			24,1			0,01545	0,00375
2 TS 60	5	4,0	7,6	25,4	←	●	0,01588	0,00380
	25			23,4			0,01551	0,00384
	45			24,7			0,01560	0,00387
BS Ref	25	4,3	6,1	36,0			0,01452	0,00359
1 BS 20	5	4,2	6,4	39,3	↑	●	0,01462	0,00354
	25			36,8			0,01460	0,00343
	45			33,2			0,01525	0,00362
1 BS 40	5	4,3	6,8	31,7	↑	●	0,01518	0,00388
	25			30,2			0,01552	0,00414
	45			27,9			0,01549	0,00408
1 BS 60	5	4,5	7,3	34,1	↑	●	0,01487	0,00374
	25			28,8			0,01517	0,00418
	45			26,3			0,01558	0,00420
2 BS 20	5	4,3	6,4	36,5	←	●	0,01560	0,00392
	25			32,0			0,01519	0,00375
	45			34,1			0,01520	0,00362
2 BS 40	5	4,4	6,7	30,2	↑	●	0,01578	0,00399
	25			28,5			0,01548	0,00391
	45			23,1			0,01557	0,00409
2 BS 60	5	4,5	7,1	22,4	↓	●	0,01546	0,00402
	25			23,5			0,01560	0,00414
	45			24,6			0,01553	0,00422

Tab. 4-12: Ergebnisse der Untersuchungen der Verdichtbarkeit am Asphaltmischgut aus der großtechnischen Herstellung

Zur Analyse des Einflusses der Zugabemenge des Asphaltgranulates wurden die Werte nach 25 s vergleichend betrachtet (blaue Pfeile). Bei der Asphalttragschicht ist dabei festzustellen, dass die Werte in der Verfahrenspräzision liegen. Die Asphaltbinderschicht differenziert etwas stärker und würde die Schlussfolgerung zulassen, dass der Verdichtungswiderstand mit zunehmendem Asphaltgranulatanteil abnimmt, was durchaus plausibel wäre.

4.4.3 Verformungswiderstand

Die Verformungsbeständigkeit der Mischgutvarianten wurde durch einaxiale Druck-Schwellversuche gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1] bestimmt. Die Ergebnisse wurden an der Stelle des Abbruchkriteriums (Abbruchkriterium 1 = 10.000 Lastwechsel; Abbruchkriterium 2 = 40 ‰ Dehnung) ausgewertet. Die Tab. 4-13 fasst die Untersuchungsergebnisse als Mittelwerte einer Dreifachbestimmung zusammen.

Zusammensetzung	Nachmischzeit	Dehnung ε bei Versuchsende / im Wendepunkt	Dehnungsrate ε^* bei Versuchsende / im Wendepunkt	Anzahl an Belastungszyklen bei Versuchsende	Abbruchkriterium
	[s]	[‰]	[‰ $\cdot 10^{-4}/n$]	[-]	[-]
TS Ref	25	27,1	341,8	842	2
1 TS 20	5	25,5	324,8	892	2
	25	15,9	162,4	1.641	2
	45	21,6	388,2	771	2
1 TS 40	5	18,6	374,1	712	2
	25	22,9	296,6	1.099	2
	45	22,5	321,5	910	2
1 TS 60	5	38,4	21,0	10.000	1
	25	32,6	14,0	10.000	1
	45	30,7	11,4	10.000	1
2 TS 20	5	21,2	498,6	616	2
	25	21,5	188,1	1.551	2
	45	17,0	39,5	2.366	2
2 TS 40	5	20,2	90,7	2.670	2
	25	33,8	114,1	1.861	2
	45	40,0	44,4	4.314	2
2 TS 60	5	21,2	5,6	10.000	1
	25	29,4	11,2	10.000	1
	45	37,0	24,7	10.000	1
BS Ref	25	35,8	87,5	2.993	2
1 BS 20	5	33,5	158,2	1.777	2
	25	29,7	91,3	3.239	2
	45	26,7	138,3	1.894	2
1 BS 40	5	26,4	16,8	10.000	1
	25	28,5	45,9	6.126	2
	45	18,3	4,2	10.000	1
1 BS 60	5	29,1	12,4	10.000	1
	25	16,8	2,9	10.000	1
	45	30,0	5,3	10.000	1
2 BS 20	5	29,9	58,0	4.968	2
	25	26,6	67,4	1.981	2
	45	28,5	141,3	1.885	2
2 BS 40	5	40,0	21,6	7.159	2
	25	37,5	7,5	10.000	1
	45	33,9	5,0	10.000	1
2 BS 60	5	29,1	4,8	10.000	1
	25	26,4	5,2	10.000	1
	45	27,0	4,4	10.000	1

Tab. 4-13: Ergebnisse der einaxialen Druck-Schwellversuche zur Bestimmung der Verformungsbeständigkeit der Asphalttrag- sowie Asphaltbinderschichtvarianten unter Variation der Nachmischzeit

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die nach [TP Asphalt, Teil 25 B1] definierte Präzision bei einigen Varianten nicht eingehalten werden konnte. Dies kann auf die Inhomogenität der Proben, insbesondere bei einer Nachmischzeit von 5 s, zurückgeführt werden. Es ist zu vermuten, dass die Probengeometrie mit einem Durchmesser von 100 mm für die Asphalttragschicht mit einem Größtkorn von 22 mm die Präzision des Verfahrens deutlich verschlechtert.

Das Vorliegen unterschiedlicher Abbruchkriterien (10.000 Lastwechsel oder 40 ‰ Dehnung) in Kombination mit unterschiedlichen Verläufen (mit oder ohne Wendepunkt) macht eine generelle Beurteilung der Nachmischzeit sowie der Zugabemenge des Asphaltgranulates basierend auf diesem Prüfverfahren unmöglich. Lediglich die Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat können in diesem Zusammenhang hervorgehoben werden, weil diese zielsicher 10.000 Belastungszyklen standhielten, was mit großer Wahrscheinlichkeit auf die hohe Steifigkeit des resultierenden Bindemittels zurückzuführen ist.

4.4.4 Prüfung des Tieftemperaturverhaltens

Die Ergebnisse der einaxialen Zugversuche nach [DIN EN 12697-46] sind in Tab. 4-14 unter Angabe der Zugfestigkeit β_t und der Ausfalldehnung $\epsilon_{\text{Ausfall}}$ ausgewertet.

Zusammensetzung	Nachmischzeit	Einaxiale Zugversuche bei:							
		20 °C		5 °C		-10 °C		-25 °C	
		β_t	$\epsilon_{\text{Ausfall}}$	β_t	$\epsilon_{\text{Ausfall}}$	β_t	$\epsilon_{\text{Ausfall}}$	β_t	$\epsilon_{\text{Ausfall}}$
[s]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	[MPa]	[%]	
TS Ref	25	0,174	0,42	1,395	0,23	2,475	0,11	4,988	0,03
1 TS 20	5	0,417	0,44	1,424	0,21	4,223	0,06	2,909	0,02
	25	0,554	0,60	2,182	0,31	3,206	0,05	3,830	0,03
	45	0,333	0,54	1,757	0,32	4,775	0,09	4,187	0,03
1 TS 40	5	0,219	0,82	1,141	0,46	4,011	0,14	3,804	0,03
	25	0,428	0,72	1,878	0,38	5,509	0,20	4,320	0,04
	45	0,641	0,53	2,188	0,26	3,610	0,05	4,257	0,03
1 TS 60	5	1,697	0,34	3,642	0,13	4,618	0,05	4,265	0,02
	25	1,787	0,40	4,600	0,16	5,166	0,05	4,186	0,03
	45	1,932	0,35	4,817	0,15	5,293	0,05	3,506	0,02
2 TS 20	5	0,425	0,50	1,828	0,22	3,093	0,05	3,693	0,03
	25	0,647	0,46	2,218	0,20	3,777	0,05	3,654	0,02
	45	0,720	0,56	2,836	0,25	5,260	0,08	4,078	0,03
2 TS 40	5	0,726	0,40	2,588	0,23	5,160	0,09	3,337	0,03
	25	0,757	0,58	2,631	0,31	5,484	0,12	5,151	0,04
	45	1,116	0,62	3,361	0,25	5,991	0,09	5,145	0,04
2 TS 60	5	1,803	0,19	4,481	0,10	3,621	0,03	3,003	0,02
	25	1,682	0,30	3,576	0,14	4,342	0,05	3,449	0,03
	45	1,235	0,43	3,093	0,18	5,297	0,07	4,404	0,03
BS Ref	25	1,056	0,422	3,327	0,22	4,517	0,05	3,749	0,03
1 BS 20	5	0,943	0,54	2,832	0,18	3,575	0,05	3,301	0,03
	25	0,871	0,50	2,434	0,25	4,221	0,06	3,656	0,03
	45	0,489	0,74	1,818	0,4	4,756	0,12	4,471	0,04
1 BS 40	5	0,760	0,60	2,643	0,32	6,094	0,13	5,672	0,04
	25	1,250	0,57	4,146	0,28	5,080	0,06	4,641	0,03
	45	1,863	0,42	4,751	0,23	6,156	0,06	4,734	0,04
1 BS 60	5	1,821	0,33	4,305	0,14	4,650	0,04	3,366	0,02
	25	2,646	0,37	5,856	0,17	6,385	0,04	4,696	0,02
	45	1,777	0,46	4,892	0,25	5,380	0,04	4,482	0,01
2 BS 20	5	1,264	0,50	3,607	0,26	4,243	0,05	3,463	0,02
	25	1,222	0,61	3,844	0,30	4,773	0,06	4,106	0,03
	45	0,866	0,63	2,786	0,33	4,663	0,05	4,033	0,03
2 BS 40	5	0,939	0,53	3,146	0,29	5,409	0,08	4,939	0,04
	25	1,253	0,57	3,677	0,31	7,435	0,12	4,972	0,04
	45	1,826	0,51	4,868	0,29	7,006	0,08	4,927	0,03
2 BS 60	5	2,557	0,35	5,452	0,14	5,433	0,04	4,199	0,02
	25	3,616	0,32	5,780	0,09	6,265	0,05	4,310	0,03
	45	3,241	0,37	5,944	0,11	6,364	0,05	3,323	0,02

Tab. 4-14: Ergebnisse der einaxialen Zugversuche an den Asphalttrag- sowie Asphaltbinderschichtvarianten unter Variation der Nachmischzeit

An den 38 Varianten wurden ebenfalls Abkühlversuche durchgeführt. Diese wurden hinsichtlich der Ausfallspannung $\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$ und der Ausfalltemperatur T_{Ausfall} analysiert und die Ergebnisse in Tab. 4-15 zusammengefasst. Nach [DIN EN 12697-46] ist bei Kombination von Abkühlversuchen und einaxialen Zugversuchen darüber hinaus die Zugfestigkeitsreserve zu bestimmen. Die Temperatur bei der maximalen Zugfestigkeitsreserve $T_{\Delta\beta,\text{max}}$ ist zusammen mit dem Höchstwert der Zugfestigkeitsreserve $\Delta\beta_{t,\text{max}}$ ebenfalls in Tab. 4-15 dokumentiert. In Bild 4-14 bis Bild 4-18 sind die Messergebnisse jeder Prüfvariante dargestellt.

Zusammen- setzung	Nachmisch- zeit [s]	Abkühlversuch		Zugfestigkeitsreserve	
		$\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$ [MPa]	T_{Ausfall} [°C]	$T_{\Delta\beta,\text{max}}$ [°C]	$\Delta\beta_{t,\text{max}}$ [MPa]
TS Ref	25	3,377	-26,6	-19,8	2,393
1 TS 20	5	3,269	-25,0	-8,9	3,440
	25	3,692	-24,6	-4,0	2,494
	45	4,725	-28,3	-9,6	4,009
1 TS 40	5	3,424	-31,9	-11,6	3,638
	25	3,106	-26,5	-10,5	4,934
	45	2,017	-23,8	-10,5	3,035
1 TS 60	5	4,105	-20,4	±0,0	3,454
	25	3,396	-16,0	+1,3	4,403
	45	4,070	-17,2	+1,4	4,514
2 TS 20	5	2,861	-23,2	-7,4	2,364
	25	3,785	-25,9	-6,7	2,985
	45	3,473	-31,2	-8,2	4,356
2 TS 40	5	2,740	-22,2	-8,0	4,343
	25	4,606	-29,1	-8,9	4,464
	45	5,063	-26,5	-7,4	4,753
2 TS 60	5	3,183	-12,4	+5,0	3,849
	25	2,404	-13,9	+0,9	3,302
	45	3,784	-21,9	-5,7	3,760
BS Ref	25	3,949	-24,3	-3,0	3,613
1 BS 20	5	3,049	-23,1	-2,3	3,031
	25	3,814	-25,9	-6,8	3,257
	45	4,330	-31,5	-11,3	4,200
1 BS 40	5	4,497	-30,9	-10,2	5,231
	25	4,637	-24,5	-1,5	4,345
	45	4,890	-20,5	±0,0	4,770
1 BS 60	5	3,900	-17,3	+2,7	3,858
	25	5,357	-19,1	+2,3	5,319
	45	4,859	-21,0	+1,5	4,692
2 BS 20	5	3,874	-19,1	+0,6	3,418
	25	4,247	-21,9	-0,8	3,993
	45	3,982	-25,7	-6,9	3,690
2 BS 40	5	4,069	-24,3	-7,1	4,094
	25	4,501	-23,8	-7,6	5,887
	45	5,249	-23,3	-3,8	5,417
2 BS 60	5	4,077	-15,3	+3,9	4,746
	25	4,649	-12,2	+7,0	4,641
	45	4,837	-13,8	+3,6	5,063

Tab. 4-15: Ergebnisse des Abkühlversuchs und der Zugfestigkeitsreserve der 38 Varianten unter Variation der Nachmischzeit

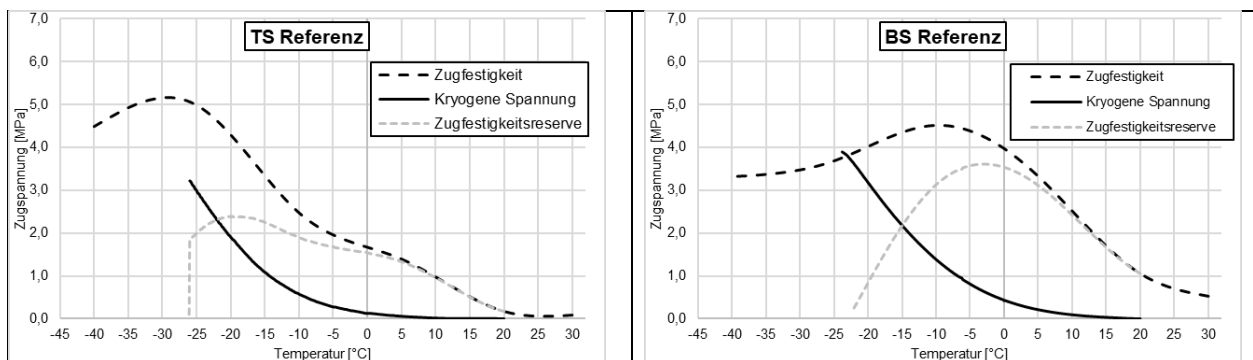


Bild 4-14: Tieftemperaturverhalten der Referenzvarianten

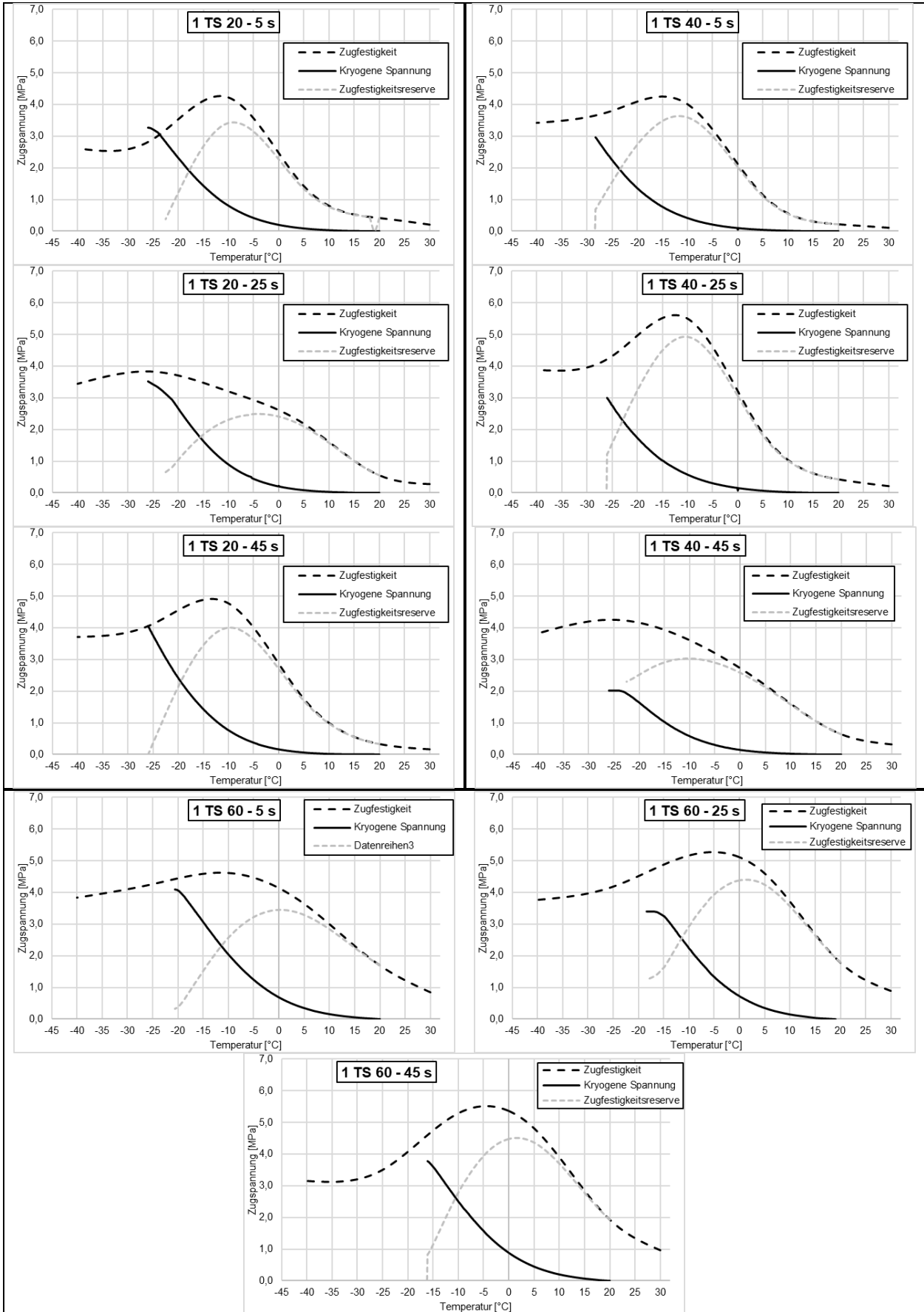


Bild 4-15: Tieftemperaturverhalten der Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

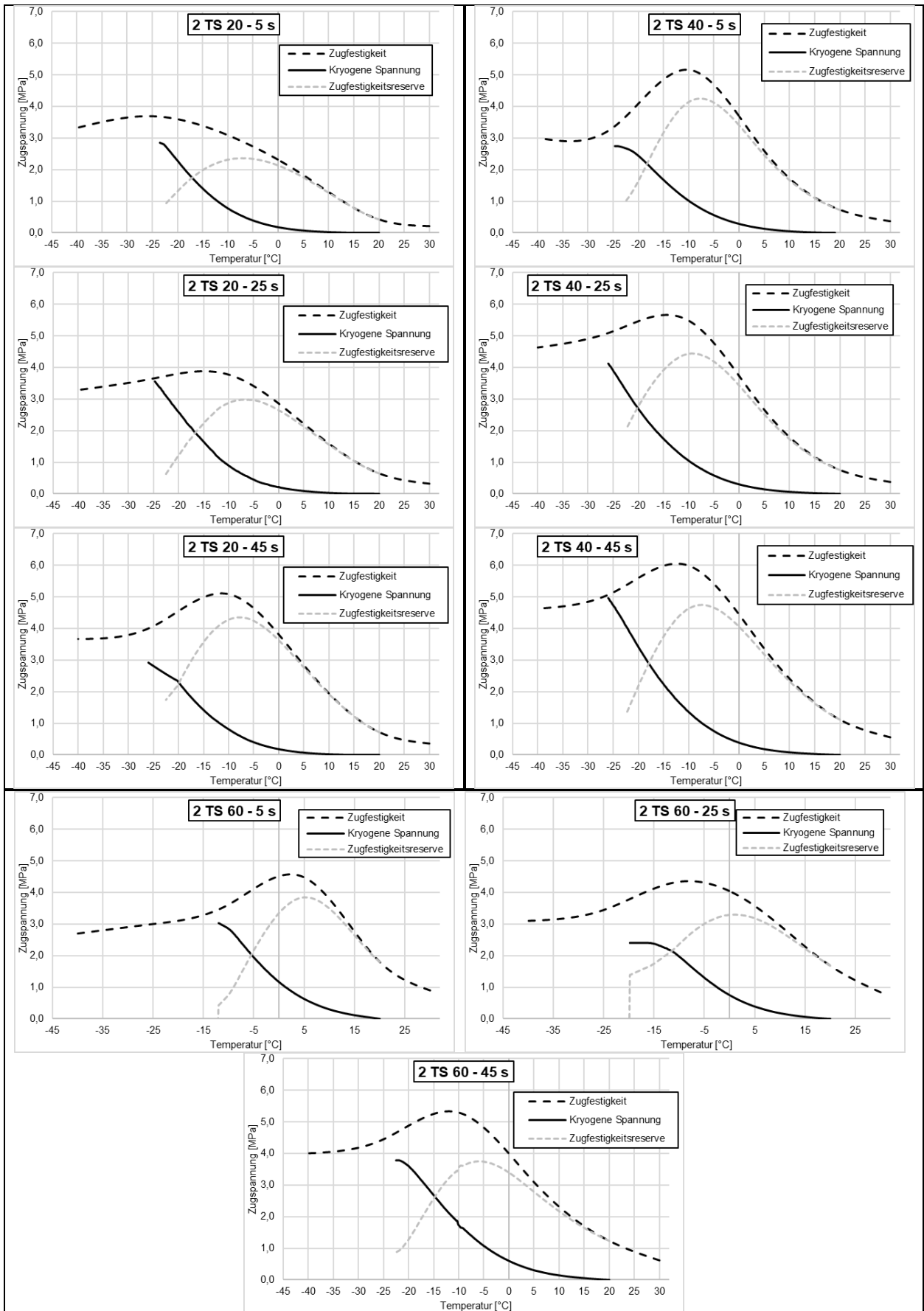


Bild 4-16: Tieftemperaturverhalten der Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

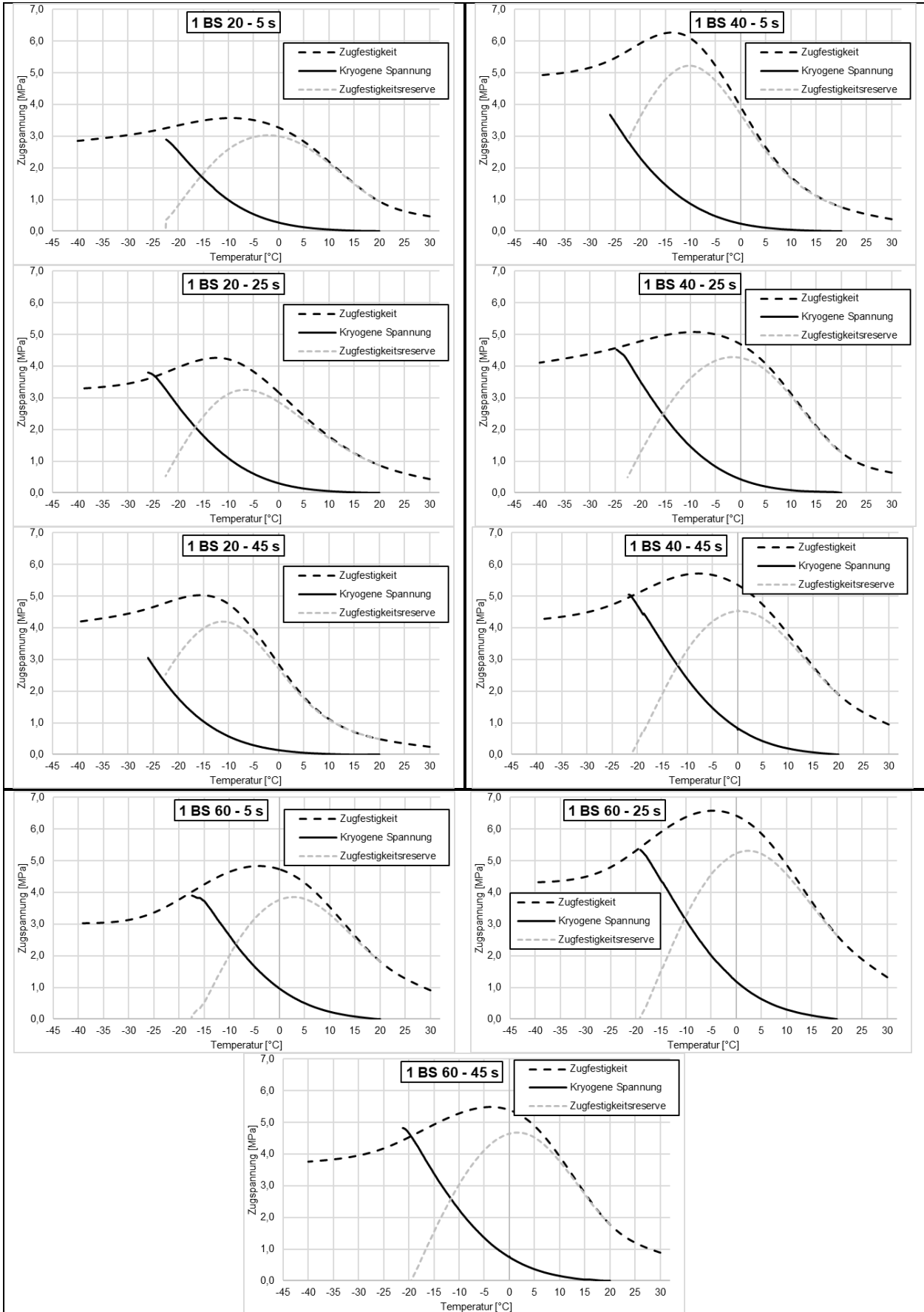


Bild 4-17: Tieftemperaturverhalten der Asphaltbinderschichtvarianten mit Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

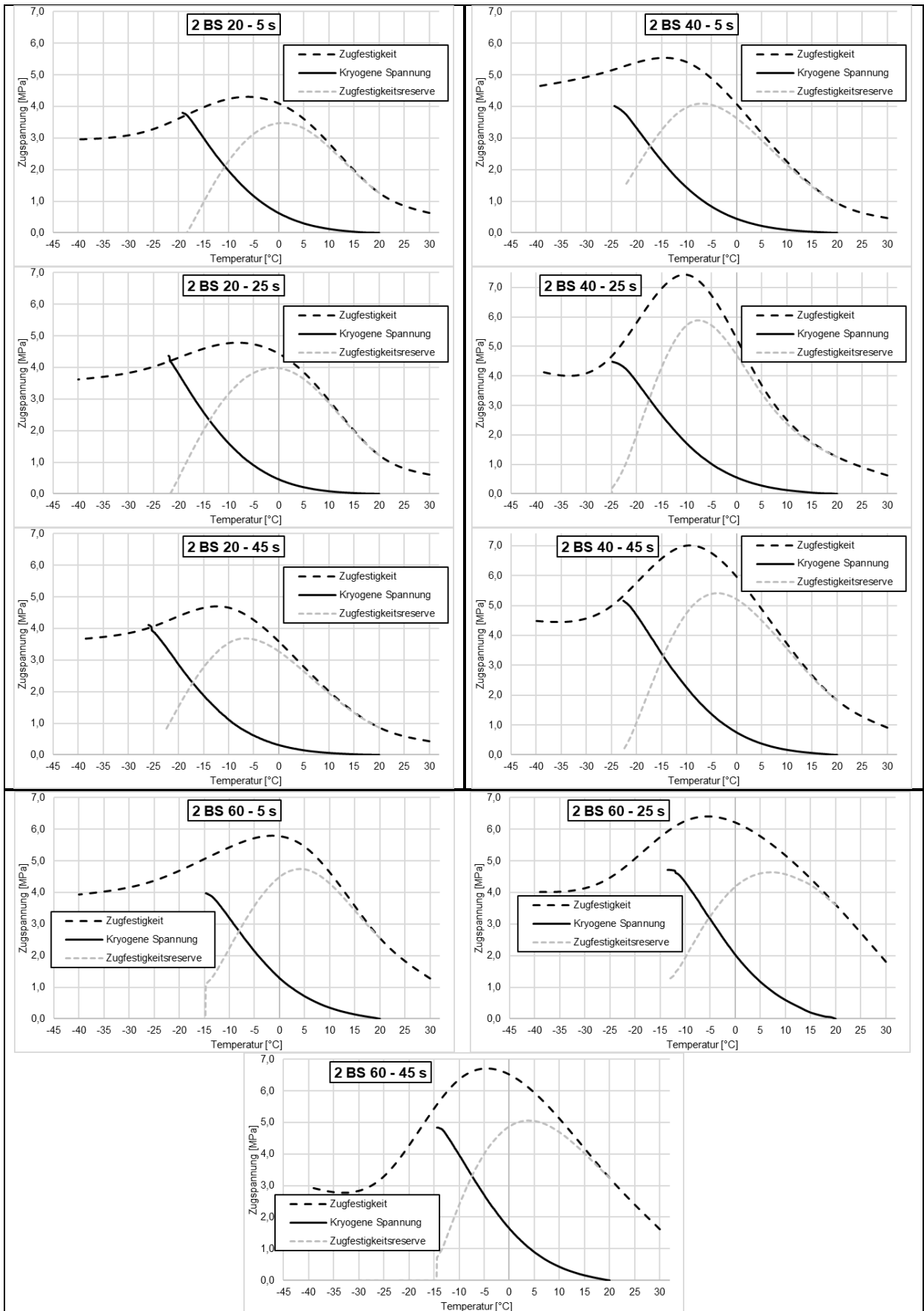


Bild 4-18: Tieftemperaturverhalten der Asphaltbinderschichtvarianten mit Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

In einem ersten Schritt der Auswertung wurde die Präzision des Messverfahrens nach [TP Asphalt, Teil 46 A] geprüft. Demnach ist eine Zugfestigkeit, welche in einer Dreifachbestimmung ermittelt wurde, als kritisch anzusehen, wenn die Spannweite bei -25 °C und -10 °C mehr als 0,7 MPa, bei +5 °C mehr als 0,3 MPa und bei +20 °C mehr als 0,1 MPa beträgt. Beim Abkühlversuch sind die Werte „als verdächtig anzusehen, wenn die Bruchtemperatur um mehr als 2 °C voneinander abweichen“ [TP Asphalt, Teil 46 A]. Es muss, bezogen auf die in den Tab. 4-13 und Tab 4-14 dargestellten Ergebnisse, darauf hingewiesen werden, dass die Präzision des Verfahrens oft nicht eingehalten werden konnte. Trotz Prüfung von teilweise mehr als drei Probekörpern schwankten die Werte oft stark und viele Prüfungen wurden als nicht plausibel bewertet und mussten von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Demzufolge beziehen sich manche Ergebnisse nur auf eine Doppelbestimmung.

Generell muss also geschlussfolgert werden, dass die Prüfung des Tieftemperaturverhaltens, insbesondere die Prüfung der einaxialen Zugfestigkeiten, sehr große Ergebnisspannen der Einzelwerte aufwies und für die hier vorliegende Untersuchungsreihe als kritisch betrachtet werden muss. Ursachen für die festgestellte Problematik könnten in der Inhomogenität der Proben bei 5 s Nachmischzeit, der sehr hohen Binde-mittelhärte, der Probekörpergeometrie in Bezug auf das Größtkorn und potentiellen Fehlstellen aufgrund des Sägens im Zuge der Probekörpervorbereitung gesucht werden.

4.4.5 Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion

Die Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 24] sind in den Bildern Bild 4-19 bis Bild 4-23 graphisch ausgewertet. Die detaillierten Prüfergebnisse können dem Anhang B entnommen werden.

Analog zu den Auswertungen des Tieftemperaturverhaltens wurden die Bilder für eine bessere Vergleichbarkeit differenziert in die Zugabe des verwendeten Asphaltgranulates in Asphaltbinder- oder Asphalttragschicht unterteilt.

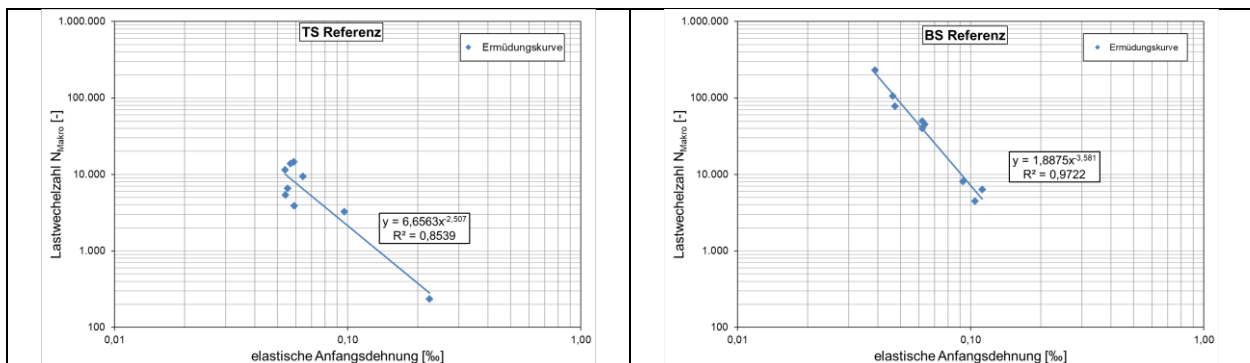


Bild 4-19: Ermüdungsfunktion der Referenzvarianten

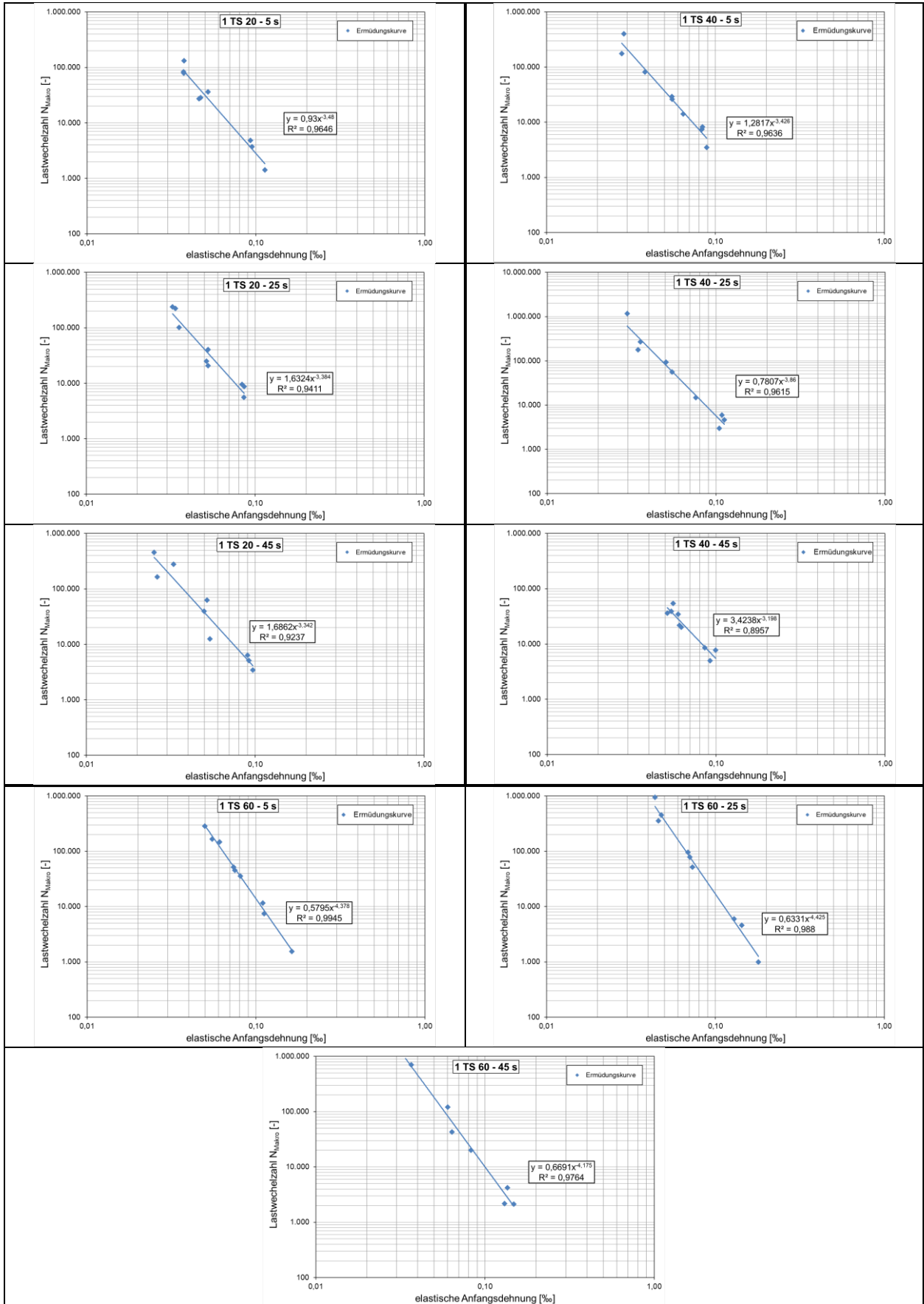


Bild 4-20: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

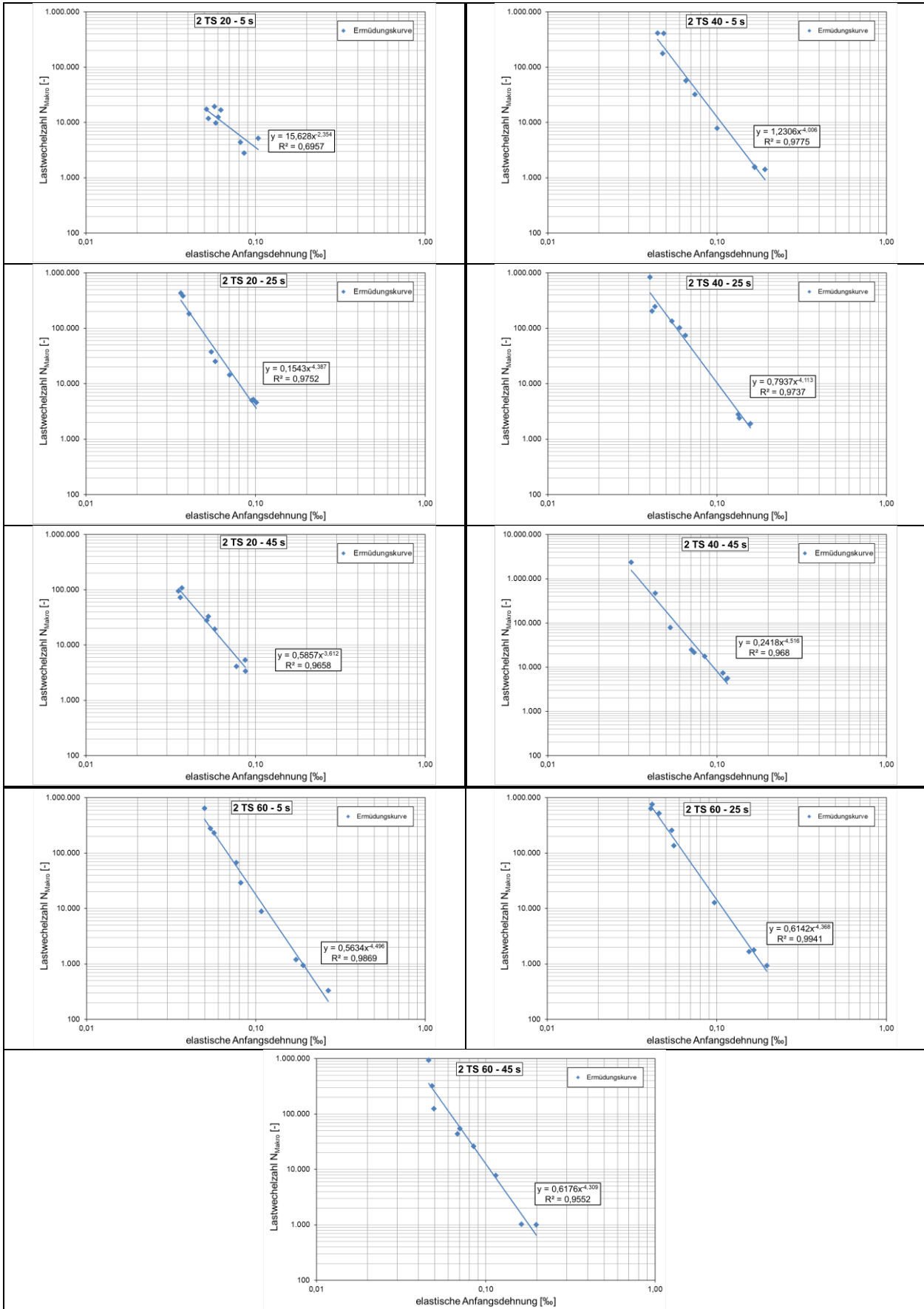


Bild 4-21: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

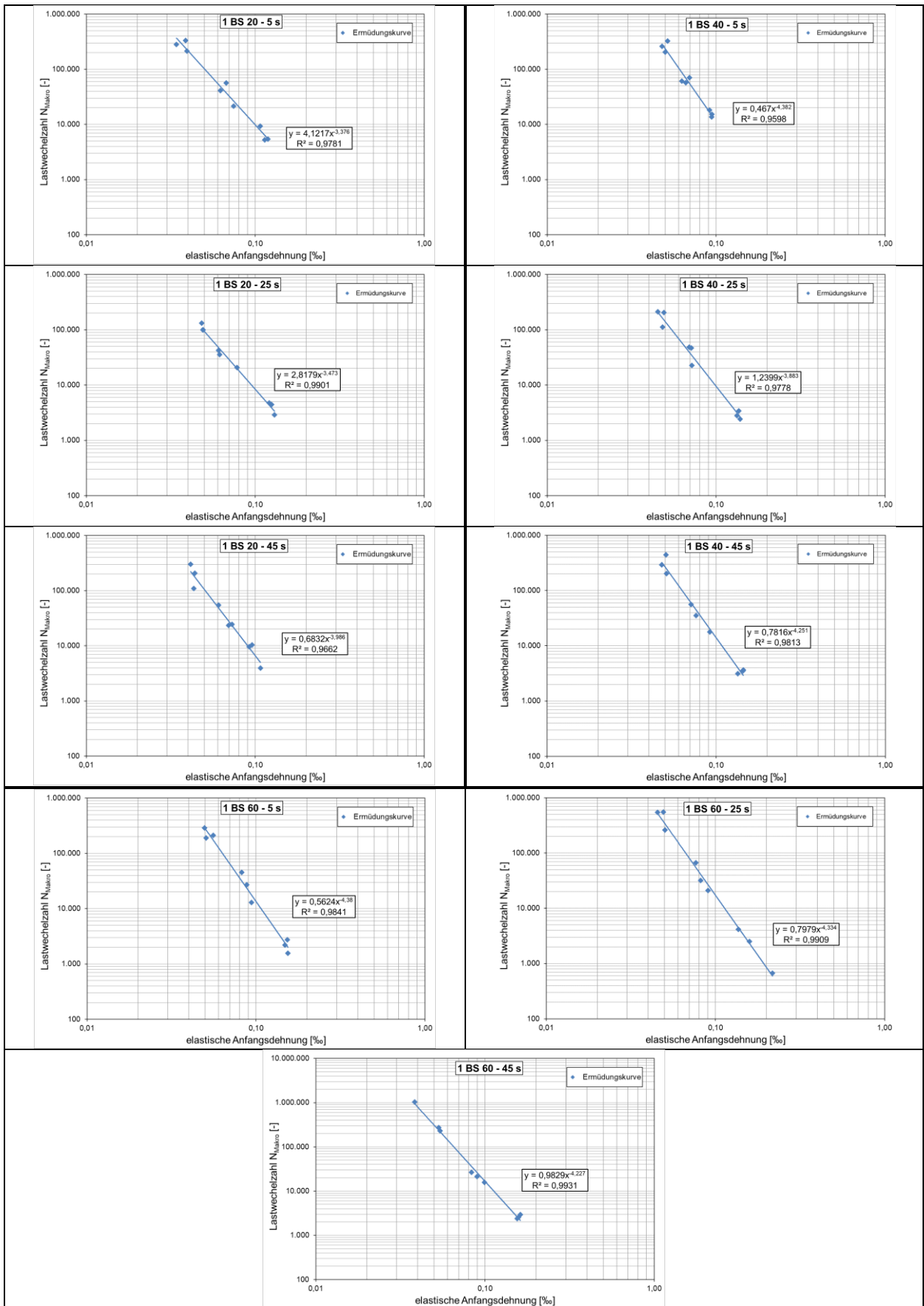


Bild 4-22: Ermüdungsfunktion der Asphaltbinderschichtvarianten mit Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

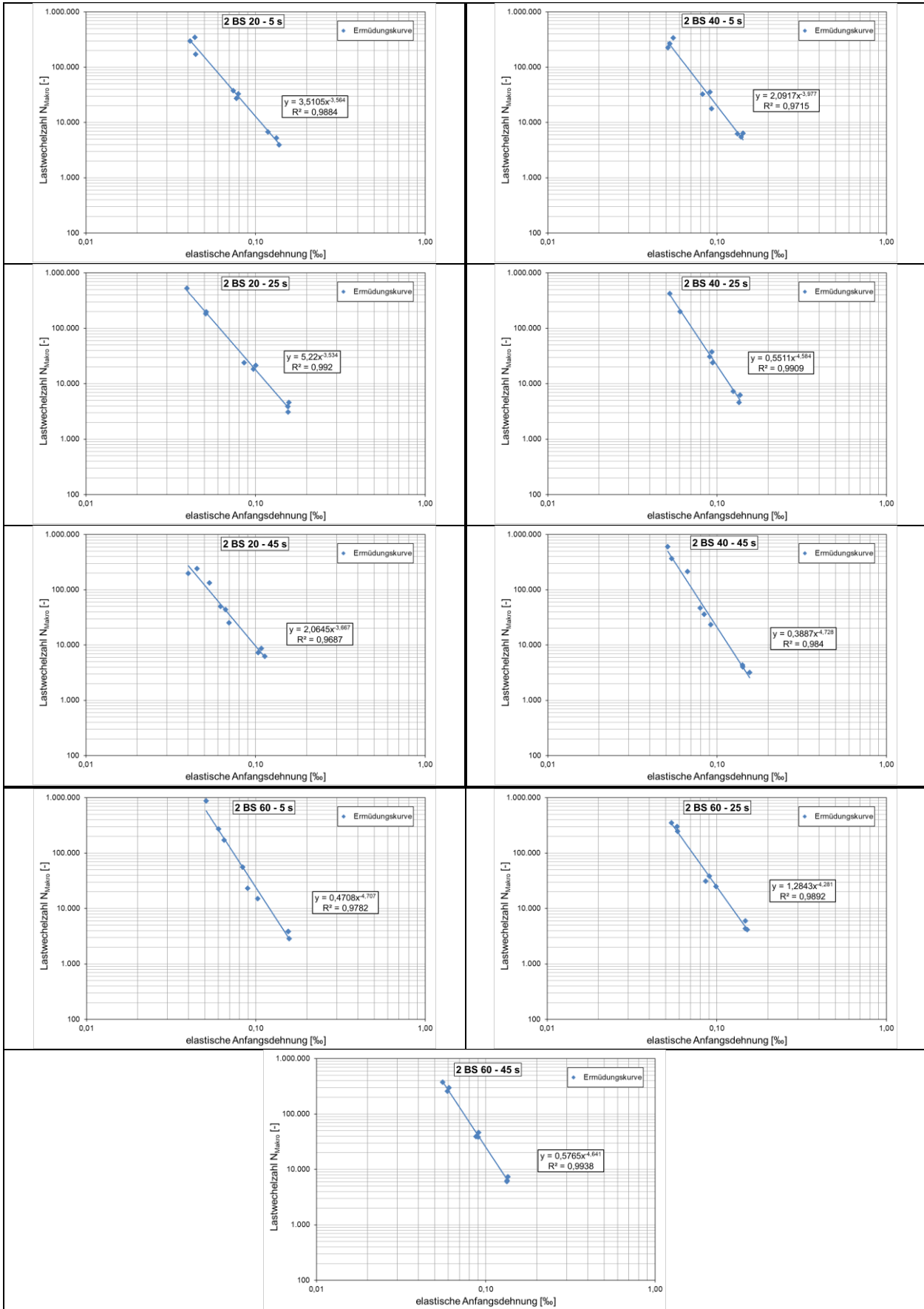


Bild 4-23: Ermüdungsfunktion der Asphaltbinderschichtvarianten mit Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

Eine Präzision für die Prüfmethode ist in der [TP Asphalt-StB, Teil 24] nicht angegeben. Als Anmerkung für die Dimensionierungsberechnung wird jedoch definiert, dass „die Bestimmtheitsmaße R^2 der Ermüdungsfunktion für Asphaltbinderschichten über 0,90 und für Asphalttragschichten über 0,80 liegen“ sollten. Diese Vorgabe wird, mit Ausnahme der Variante 2 TS 20 5s, eingehalten.

Zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens wurden in Anlehnung an die [DIN EN 12697-24] die Dehnungen bei 10^4 und 10^6 Lastwechseln berechnet. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-16 zusammengefasst.

Zusammensetzung	Nachmischzeit [s]	ϵ_4	ϵ_6
		[‰]	[‰]
TS Referenz	25	0,0541	0,0086
1 TS 20	5	0,0694	0,0185
	25	0,0760	0,0195
	45	0,0743	0,0187
1 TS 40	5	0,0731	0,0191
	25	0,0863	0,0262
	45	0,0825	0,0195
1 TS 60	5	0,1077	0,0376
	25	0,1125	0,0397
	45	0,1000	0,0332
2 TS 20	5	0,0643	0,0091
	25	0,0800	0,0280
	45	0,0673	0,0188
2 TS 40	5	0,1057	0,0335
	25	0,1007	0,0329
	45	0,0950	0,0343
2 TS 60	5	0,1135	0,0407
	25	0,1086	0,0378
	45	0,1055	0,0362
BS Referenz	25	0,0912	0,0252
1 BS 20	5	0,0994	0,0254
	25	0,0950	0,0252
	45	0,0902	0,0284
1 BS 40	5	0,1027	0,0359
	25	0,0986	0,0301
	45	0,1081	0,0366
1 BS 60	5	0,1071	0,0374
	25	0,1134	0,0392
	45	0,1127	0,0379
2 BS 20	5	0,1073	0,0295
	25	0,1178	0,0320
	45	0,0989	0,0282
2 BS 40	5	0,1188	0,0373
	25	0,1177	0,0431
	45	0,1167	0,0441
2 BS 60	5	0,1204	0,0453
	25	0,1233	0,0421
	45	0,1221	0,0453

Tab. 4-16: Dehnung bei 10^4 bzw. 10^6 Zyklen in Anlehnung an die [DIN EN 12697-24]

Es ist anzumerken, dass zur Differenzierung in drei Spannungsbereiche auch Varianten mit einer anfänglichen elastischen Dehnung $< 0,05$ ‰ berücksichtigt wurden, was die Schlussfolgerung erlaubt, dass diese Varianten ein eher schlechtes Ermüdungsverhalten aufwiesen. Es wurde darüber hinaus eine deutliche Abweichung der Varianten mit 5 s Nachmischzeit von den Varianten mit 25 s und 45 s Nachmischzeit erwartet, diese These konnte basierend auf den ermittelten Messergebnissen jedoch nicht bestätigt werden.

4.4.6 Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Asphaltsteifigkeit

Die Steifigkeit des Asphaltes wurde mit dem Spaltzug-Schwellversuch nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] bestimmt. Dafür wurden aus dem großtechnisch hergestellten Asphaltmischgut Asphalt-Probepplatten gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 33] hergestellt und aus diesen gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 27] Bohrkerne ausgebohrt.

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	TS Referenz		BS Referenz	
		25 s	25 s	25 s	25 s
T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]
-10	10	21.856	6,1	23.745	4,6
-10	5	20.413	7,2	22.775	5,6
-10	3	19.700	7,5	22.101	5,9
-10	1	17.824	8,8	20.559	6,3
-10	0,3	15.657	10,7	19.075	7,0
-10	0,1	13.836	12,8	17.424	8,3
-10	10	20.665	6,6	23.608	5,7
0	10	16.835	11,0	19.609	8,0
0	5	15.376	12,3	18.134	8,6
0	3	14.320	13,7	17.453	9,5
0	1	12.073	15,3	15.423	10,6
0	0,3	9.897	19,0	13.504	12,7
0	0,1	7.961	21,9	11.476	14,9
0	10	16.623	11,5	19.157	8,5
5	10	13.995	15,3	16.813	10,8
5	5	12.410	16,4	15.397	11,3
5	3	11.228	17,9	14.527	12,8
5	1	9.124	20,8	12.349	14,7
5	0,3	7.046	24,6	10.048	17,4
5	0,1	5.392	27,7	8.229	19,9
5	10	13.553	14,9	16.630	11,1
10	10	10.939	18,8	13.437	14,7
10	5	9.395	20,5	11.948	16,1
10	3	8.272	22,6	10.877	16,9
10	1	6.260	26,0	8.861	20,1
10	0,3	4.618	29,6	6.898	23,0
10	0,1	3.221	34,0	5.285	26,5
10	10	10.498	18,9	13.393	14,7
20	10	6.111	27,4	8.339	22,3
20	5	4.904	28,4	7.194	23,9
20	3	4.225	29,5	6.376	25,5
20	1	2.889	32,8	4.557	28,5
20	0,3	2.002	34,0	3.264	31,8
20	0,1	1.376	36,5	2.257	35,2
20	10	5.731	27,3	8.354	22,2

Tab. 4-17: Ergebnisse der Steifigkeit und des Phasenwinkels aus Messungen der Referenzvarianten von Asphaltbinder- und Asphalttragschicht nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Der Mittelwert aus der Dreifachbestimmung der Steifigkeitsmoduln und Phasenwinkel ist je nach Belastungszustand in den Tab. 4-17 bis Tab. 4-25 dokumentiert. Dabei erfolgt für eine bessere Vergleichbarkeit eine Trennung zwischen Asphalttrag- und Asphaltbinderschichten und dem verwendeten Asphaltgranulat. Darüber hinaus wird für eine bessere Übersicht je eine Tabelle für die Asphaltsteifigkeit und eine für den Phasenwinkel präsentiert. Die resultierenden Hauptkurven der Referenzvarianten sind in Bild 4-24, die der Asphalttragschichtvarianten in Bild 4-25 und Bild 4-26 und die der Asphaltbinderschichtvarianten in Bild 4-29 und Bild 4-30 dargestellt.

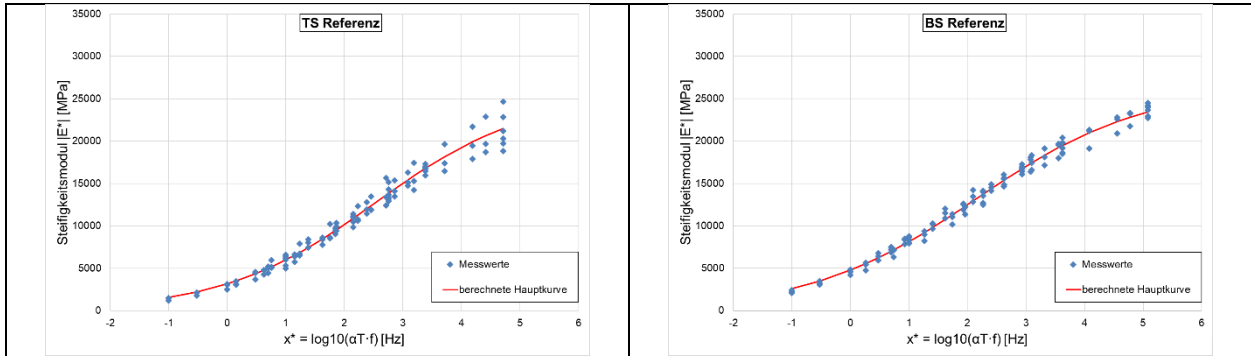


Bild 4-24: Hauptkurve der Referenzvarianten

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	1 TS 20			1 TS 40			1 TS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]
-10	10	22.876	25.616	23.364	19.555	21.427	24.918	26.205	29.998	29.631
-10	5	21.954	24.986	22.252	18.017	19.842	23.696	25.431	28.970	28.500
-10	3	21.345	23.940	21.378	16.839	19.043	23.142	24.846	28.318	28.104
-10	1	19.566	22.190	19.729	14.925	17.066	21.379	23.609	27.034	26.570
-10	0,3	17.877	20.259	17.722	12.710	15.049	19.374	22.156	25.563	25.069
-10	0,1	15.928	18.604	15.746	10.535	12.950	17.529	20.341	23.868	23.633
-10	10	22.789	25.760	23.253	18.612	21.090	24.711	26.257	29.976	29.334
0	10	18.111	21.159	18.131	13.655	14.884	19.020	22.591	25.820	25.679
0	5	17.067	19.856	16.450	11.948	13.499	17.750	21.478	24.670	24.299
0	3	15.914	18.800	15.308	10.905	12.378	16.743	20.393	23.752	23.170
0	1	14.000	16.535	13.216	9.020	10.297	14.209	18.564	21.569	21.368
0	0,3	11.704	14.049	10.990	6.994	8.239	11.904	16.375	19.451	19.024
0	0,1	9.704	11.792	8.871	5.352	6.449	9.858	14.379	17.508	16.831
0	10	18.069	21.035	17.603	13.175	14.580	18.712	22.252	25.440	25.223
5	10	14.652	18.544	15.210	11.277	12.913	16.622	20.980	24.035	22.493
5	5	13.490	16.813	13.516	9.934	11.308	14.885	19.736	22.519	20.918
5	3	12.416	15.604	12.448	8.933	10.258	13.832	18.641	21.769	20.033
5	1	10.264	13.346	10.251	6.940	8.304	11.560	16.504	19.417	17.858
5	0,3	8.315	10.841	8.034	5.179	6.336	9.294	14.133	17.108	15.329
5	0,1	6.588	8.877	6.230	3.895	4.938	7.482	11.937	14.974	13.087
5	10	14.417	18.240	14.672	11.068	12.431	15.944	20.765	23.692	22.335
10	10	12.455	14.953	12.143	8.396	9.706	13.753	18.025	20.131	21.224
10	5	11.056	13.404	10.420	7.246	8.327	12.229	16.320	18.524	19.632
10	3	9.997	12.162	9.286	6.279	7.496	10.966	15.232	17.214	18.370
10	1	7.827	9.829	7.209	4.736	5.640	8.700	12.828	15.014	15.893
10	0,3	5.855	7.536	5.410	3.455	4.144	6.724	10.337	12.437	13.220
10	0,1	4.361	5.627	3.976	2.473	3.009	4.993	8.206	10.195	10.801
10	10	12.129	14.337	11.746	8.301	9.631	13.684	16.880	19.783	20.878
20	10	7.740	9.316	7.163	5.212	5.789	8.232	12.538	14.811	14.044
20	5	6.757	8.075	6.020	4.447	4.980	7.129	10.937	13.215	12.543
20	3	5.533	6.850	5.066	3.817	4.279	6.145	9.721	11.846	11.163
20	1	4.027	5.070	3.657	2.711	3.038	4.398	7.623	9.478	8.811
20	0,3	2.871	3.637	2.607	1.915	2.243	3.173	5.726	7.219	6.605
20	0,1	2.002	2.432	1.758	1.438	1.609	2.180	4.208	5.396	4.901
20	10	7.363	9.335	6.956	5.097	5.931	8.386	12.346	14.639	13.802

Tab. 4-18: Ergebnisse der Steifigkeit aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

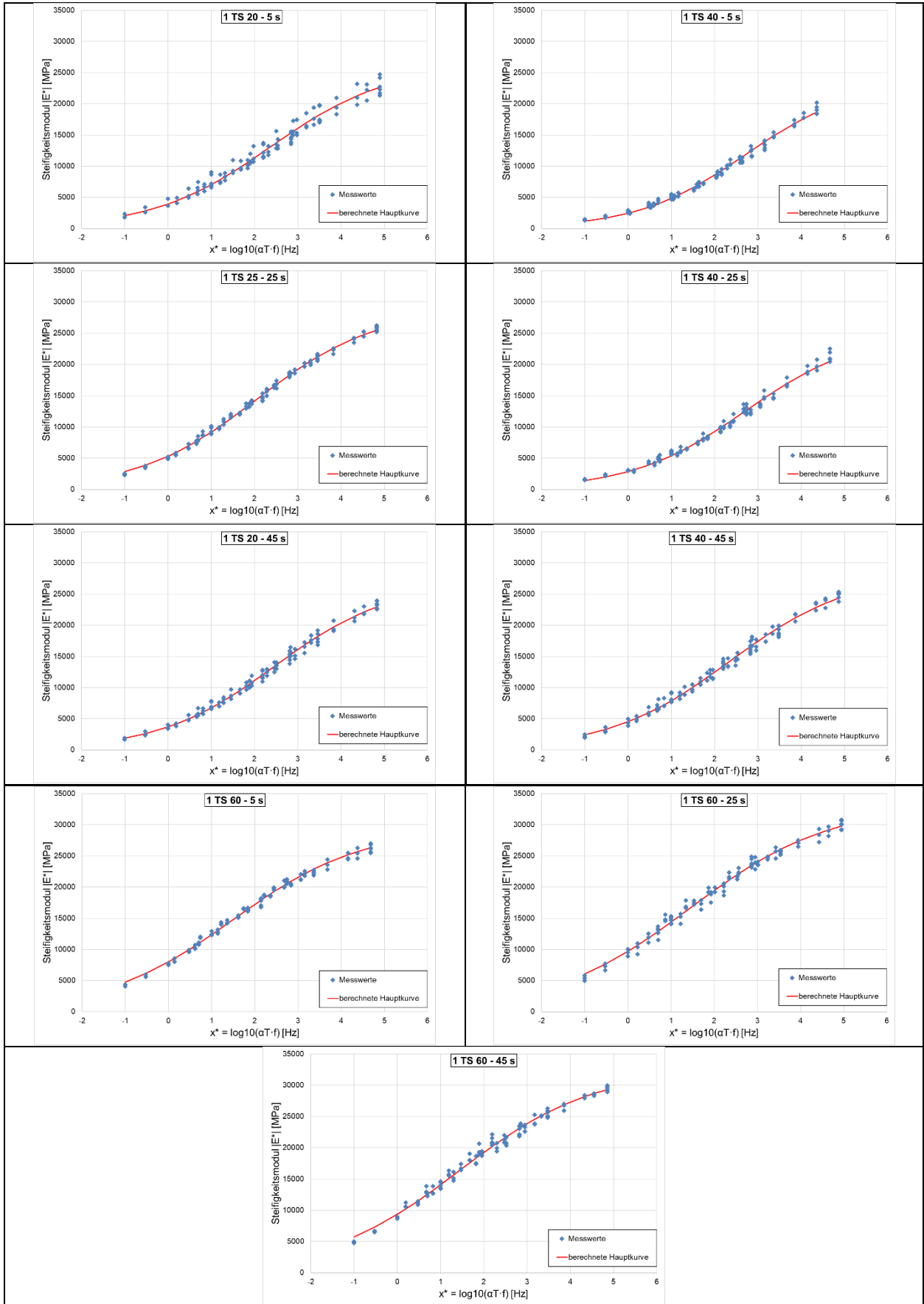


Bild 4-25: Hauptkurven der Steifigkeit aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	1 TS 20			1 TS 40			1 TS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]
-10	10	6,1	5,1	5,9	8,8	7,4	5,8	4,3	3,5	3,9
-10	5	6,1	5,6	6,6	10,0	8,3	5,8	4,4	3,7	3,6
-10	3	6,5	5,7	7,6	10,9	8,7	6,7	4,3	4,2	3,9
-10	1	7,6	6,5	7,9	11,6	10,1	7,7	5,4	5,0	5,1
-10	0,3	9,0	8,0	9,5	13,9	11,4	8,7	6,1	5,2	5,2
-10	0,1	10,4	8,9	11,1	16,2	13,2	9,8	7,3	5,5	6,4
-10	10	5,9	5,3	5,7	9,7	7,5	5,8	4,2	3,9	3,9
0	10	10,3	8,8	10,7	14,6	12,7	9,8	7,0	5,5	6,6
0	5	10,7	9,8	11,7	15,4	14,3	10,5	7,5	6,2	6,4
0	3	11,5	9,9	12,5	16,5	14,9	11,3	8,1	6,5	7,2
0	1	13,1	12,1	14,2	19,6	17,2	12,9	9,3	7,7	8,6
0	0,3	15,5	14,1	17,4	22,2	20,1	15,8	10,8	9,2	9,8
0	0,1	18,0	16,9	19,5	25,3	23,0	18,6	12,3	10,6	11,5
0	10	11,0	8,8	10,5	14,8	13,5	9,6	6,9	5,8	6,8
5	10	12,4	10,7	14,0	16,8	15,2	13,2	8,4	6,7	8,5
5	5	13,7	11,9	14,8	18,4	16,9	13,8	9,0	7,4	8,8
5	3	15,1	12,9	16,0	19,7	17,9	14,2	9,8	8,5	9,8
5	1	17,4	15,4	18,6	23,0	19,8	16,5	11,8	9,3	11,7
5	0,3	20,1	17,5	21,7	26,0	22,7	19,2	13,8	11,3	13,1
5	0,1	23,5	21,2	24,6	28,7	26,0	22,7	16,1	12,8	15,5
5	10	13,2	10,7	14,1	17,7	15,5	12,5	9,1	7,9	9,0
10	10	15,7	14,7	17,2	21,9	19,2	15,2	11,2	10,1	9,7
10	5	18,1	15,9	18,3	23,3	20,7	17,3	12,7	11,4	11,2
10	3	19,5	17,3	20,0	24,0	22,2	18,2	13,4	12,0	11,8
10	1	22,5	20,2	22,9	27,8	25,6	22,0	15,8	13,6	13,8
10	0,3	25,8	23,4	26,9	30,9	28,2	24,4	19,1	16,6	19,5
10	0,1	29,6	26,6	30,5	33,9	31,3	28,8	21,9	19,3	19,6
10	10	16,6	14,6	17,1	21,0	19,4	15,5	11,7	10,4	10,8
20	10	23,9	22,5	25,1	27,4	25,8	23,4	18,0	16,6	17,4
20	5	24,5	23,9	26,3	27,6	25,7	24,3	19,6	17,2	18,8
20	3	26,6	25,7	27,7	28,5	26,8	26,1	20,5	18,6	20,3
20	1	30,1	28,5	30,8	30,7	29,1	29,1	23,8	21,8	23,5
20	0,3	32,8	31,2	33,0	32,2	30,4	32,7	26,9	24,6	27,2
20	0,1	35,4	34,9	35,4	34,3	33,2	35,4	30,2	28,3	30,1
20	10	23,5	22,0	24,1	26,1	23,9	22,3	18,1	16,2	17,3

Tab. 4-19: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	2 TS 20			2 TS 40			2 TS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]
-10	10	22.524	26.000	26.005	25.981	24.325	27.060	29.804	28.006	26.151
-10	5	21.941	25.188	25.202	25.170	23.258	25.541	29.047	27.334	25.042
-10	3	21.350	24.289	24.375	23.992	22.328	24.801	28.605	26.757	24.383
-10	1	19.769	22.708	22.562	22.740	20.518	22.940	27.509	25.297	22.906
-10	0,3	17.939	21.183	20.564	20.740	18.455	20.978	26.425	23.918	20.859
-10	0,1	16.371	19.692	18.594	19.081	16.356	18.894	24.922	22.431	19.075
-10	10	22.447	25.711	26.461	25.950	23.738	26.879	29.594	27.560	25.987
0	10	18.606	21.085	21.454	21.134	18.930	21.601	25.607	25.248	22.187
0	5	17.313	19.787	19.781	19.928	17.268	19.955	25.252	23.913	21.075
0	3	16.301	18.738	18.536	18.803	16.308	19.161	24.742	22.878	20.172
0	1	14.312	16.731	16.307	16.720	14.218	16.611	23.526	21.581	18.098
0	0,3	12.057	14.452	13.665	14.433	12.141	14.274	21.690	19.583	15.805
0	0,1	10.009	12.502	11.383	12.351	10.033	11.990	20.074	17.581	13.863
0	10	18.040	20.656	20.839	20.769	18.604	21.344	26.128	24.637	22.149
5	10	15.906	18.896	18.658	19.016	16.661	19.181	25.987	23.419	19.186
5	5	14.586	17.538	16.999	17.667	15.108	17.278	24.937	22.049	17.513
5	3	13.580	16.399	15.751	16.406	14.058	16.239	24.039	21.371	16.731
5	1	11.450	14.254	13.316	14.339	11.929	13.799	22.159	19.504	14.655
5	0,3	9.223	11.912	10.644	12.128	9.772	11.373	20.441	17.354	12.556
5	0,1	7.314	9.760	8.553	10.067	7.878	9.334	18.533	15.264	10.646
5	10	15.716	18.798	18.409	18.605	16.229	19.000	25.824	23.239	18.971
10	10	12.586	16.357	14.823	15.146	13.025	15.813	22.574	20.805	16.682
10	5	11.414	14.738	13.305	13.558	11.547	14.403	21.297	19.166	15.198
10	3	10.113	13.665	12.082	12.403	10.486	12.954	20.376	18.156	14.089
10	1	8.075	11.232	9.582	10.205	8.285	10.592	18.289	15.769	11.831
10	0,3	6.132	8.697	7.413	8.132	6.344	8.282	16.078	13.445	9.517
10	0,1	4.547	6.847	5.588	6.233	4.846	6.509	14.018	11.250	7.600
10	10	12.529	15.947	14.713	14.656	12.886	15.650	22.300	20.109	16.266
20	10	7.537	10.378	9.079	10.366	8.652	10.746	18.624	15.510	10.839
20	5	6.508	8.937	7.933	9.057	7.525	9.398	17.258	13.804	9.694
20	3	5.590	7.837	6.803	8.030	6.521	8.258	15.769	12.680	8.569
20	1	3.964	5.867	4.867	6.089	4.807	6.215	13.466	10.385	6.468
20	0,3	2.673	4.137	3.359	4.541	3.472	4.441	10.937	8.155	4.839
20	0,1	1.885	2.960	2.349	3.224	2.461	3.210	8.784	6.206	3.515
20	10	7.339	10.252	9.126	10.254	8.577	10.735	18.267	15.201	10.813

Tab. 4-20: Ergebnisse der Steifigkeit aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

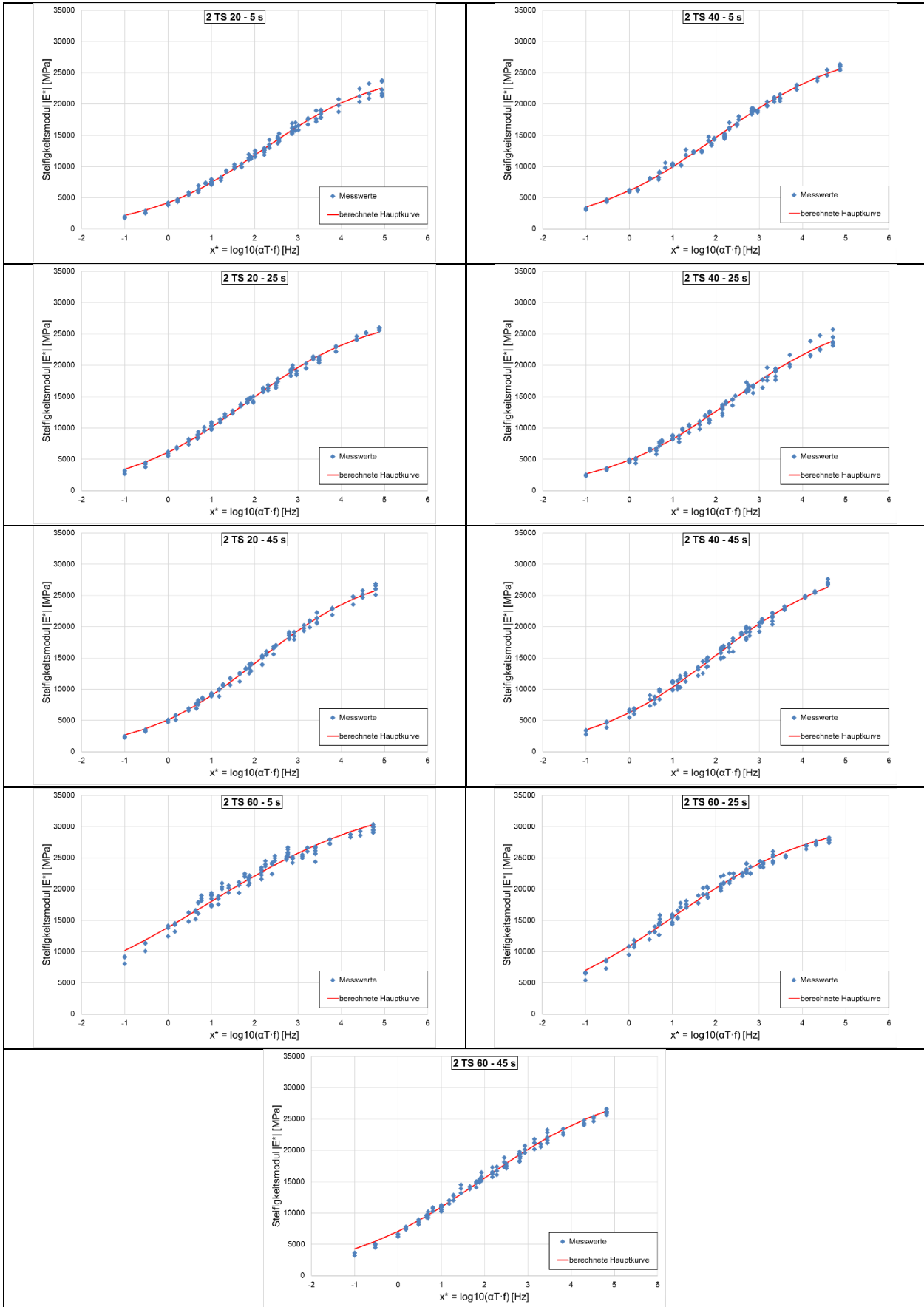


Bild 4-26: Hauptkurven der Steifigkeit aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	2 TS 20			2 TS 40			2 TS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]
-10	10	4,8	3,9	5,2	5,1	6,0	6,0	3,3	4,1	5,1
-10	5	5,2	4,2	5,8	5,3	6,3	5,8	3,3	3,8	5,3
-10	3	6,1	5,1	5,8	5,6	7,5	5,7	3,5	3,8	6,0
-10	1	6,7	5,6	7,3	6,0	8,0	7,4	4,0	4,4	6,5
-10	0,3	8,1	6,5	8,5	7,0	8,9	8,2	4,2	4,7	7,3
-10	0,1	8,9	7,4	9,8	8,0	10,3	9,7	4,5	6,0	8,2
-10	10	5,1	4,2	5,6	5,6	6,4	6,0	3,6	3,7	5,3
0	10	8,6	7,8	9,4	8,3	9,9	9,5	5,5	5,5	8,4
0	5	9,9	8,4	9,8	9,3	10,7	10,2	6,1	6,2	8,4
0	3	10,5	8,9	10,7	9,4	11,9	10,1	5,6	6,4	9,0
0	1	12,7	10,8	12,8	10,7	12,6	12,0	6,0	7,0	10,1
0	0,3	15,1	12,5	15,3	13,4	15,6	14,1	5,9	8,3	11,1
0	0,1	18,3	14,8	18,1	15,1	17,8	16,6	7,8	9,2	13,0
0	10	8,9	8,2	9,6	8,9	10,3	9,8	4,3	6,1	8,3
5	10	11,2	11,3	11,9	9,9	11,9	10,2	5,5	6,5	9,7
5	5	12,9	10,9	12,4	10,3	13,0	12,2	5,9	7,1	10,2
5	3	14,7	11,7	13,8	11,6	13,8	12,9	6,3	7,4	10,8
5	1	16,5	14,0	16,6	12,7	15,7	15,3	6,7	8,5	12,4
5	0,3	19,7	16,5	19,6	15,1	17,6	18,2	7,8	10,1	14,6
5	0,1	23,1	19,5	22,3	17,8	20,0	20,5	9,1	12,0	16,6
5	10	12,1	10,5	12,2	10,0	12,4	11,5	6,2	7,1	10,5
10	10	16,0	12,4	15,1	13,3	16,2	14,1	7,8	9,1	12,1
10	5	17,0	13,6	16,9	14,3	17,2	15,0	8,5	9,6	13,5
10	3	19,2	15,3	18,3	16,3	18,3	16,3	8,7	10,5	14,5
10	1	22,3	18,4	22,2	18,4	21,1	18,8	10,4	12,3	16,3
10	0,3	25,7	21,9	24,8	20,8	23,9	22,3	11,7	14,5	19,1
10	0,1	29,9	24,9	28,6	24,4	26,9	24,7	13,3	16,9	22,1
10	10	16,0	13,5	15,6	14,2	15,9	14,2	8,1	9,4	12,4
20	10	24,2	20,7	24,0	19,3	21,3	20,4	11,0	14,4	18,9
20	5	26,0	21,9	24,8	20,3	22,1	22,2	12,1	15,7	19,7
20	3	27,5	23,7	27,1	22,1	23,6	23,1	13,1	17,1	21,3
20	1	31,1	27,9	30,5	25,0	27,2	27,2	15,2	19,5	24,5
20	0,3	34,5	31,6	33,3	27,8	29,2	30,1	18,8	22,5	27,3
20	0,1	37,5	34,5	36,0	30,7	31,4	32,5	20,9	25,8	30,2
20	10	23,8	20,7	23,1	19,2	21,2	20,6	11,8	14,6	18,5

Tab. 4-21: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

In Bild 4-27 und Bild 4-28 sind die Asphaltsteifigkeiten der Asphalttragschichten über die Belastungsfrequenzen in Abhängigkeit von der Asphaltgranulatzugabemenge und der Nachmischzeit bei einer Prüftemperatur von 20 °C getrennt für Asphaltgranulat 1 und Asphaltgranulat 2 dargestellt.

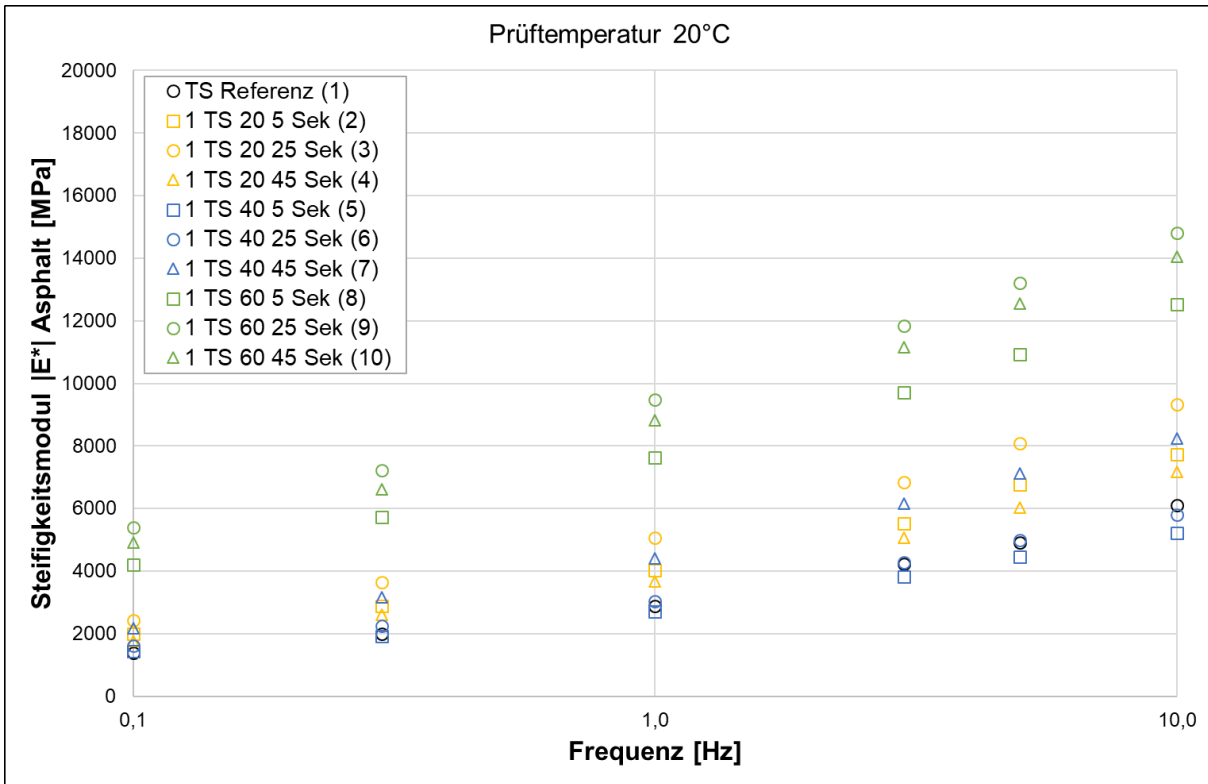


Bild 4-27: Steifigkeitsmoduln der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 1 über die Belastungsfrequenzen

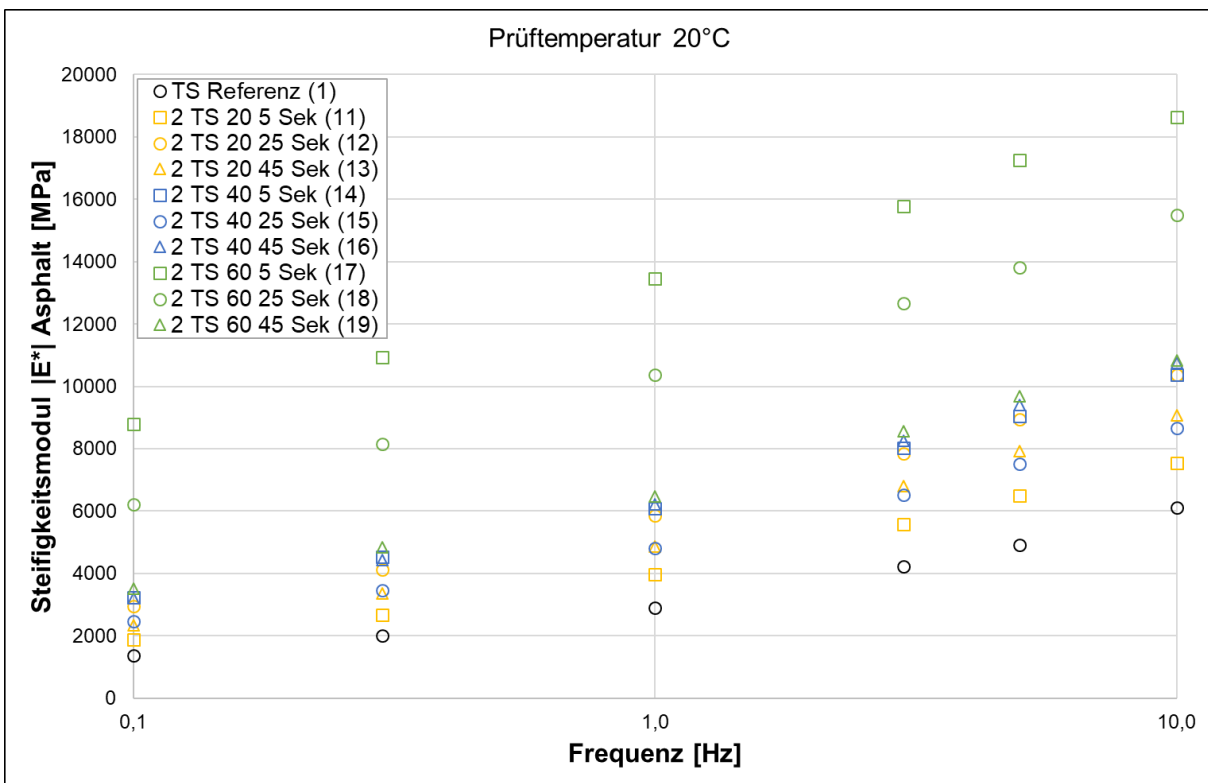


Bild 4-28: Steifigkeitsmoduln der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 2 über die Belastungsfrequenzen

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	1 BS 20			1 BS 40			1 BS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T	f	E*	E*	E*	E*	E*	E*	E*	E*	E*
[°C]	[Hz]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
-10	10	23.097	23.832	20.218	24.283	26.069	28.736	28.904	30.329	28.743
-10	5	22.356	22.930	19.086	23.900	24.972	27.697	27.763	29.082	27.909
-10	3	21.927	22.159	18.328	22.047	24.274	27.005	27.752	28.377	27.399
-10	1	20.644	20.811	16.503	20.306	22.419	25.596	26.105	27.114	25.917
-10	0,3	19.025	18.875	14.477	17.989	20.485	23.905	24.728	25.392	23.982
-10	0,1	17.409	17.289	12.567	16.134	18.341	21.983	23.391	23.660	22.111
-10	10	22.833	23.963	20.093	23.927	26.054	28.584	29.084	29.816	29.013
0	10	18.421	19.122	14.404	18.392	21.568	23.768	25.002	26.525	23.961
0	5	17.529	17.797	12.740	17.069	20.208	22.541	24.070	25.407	22.681
0	3	16.616	16.808	11.706	15.705	19.044	21.310	22.969	24.528	21.674
0	1	14.773	14.757	9.770	13.630	16.891	19.238	21.043	22.540	19.503
0	0,3	12.662	13.003	7.755	11.244	14.574	17.017	18.920	20.279	17.097
0	0,1	10.952	10.937	6.129	9.179	12.272	14.905	16.729	18.111	14.865
0	10	18.199	18.731	13.855	17.782	21.427	23.444	24.669	26.813	23.996
5	10	16.805	16.030	12.073	15.641	17.954	20.908	22.890	24.088	20.995
5	5	15.465	14.767	10.582	13.929	16.225	19.501	21.547	22.888	19.581
5	3	14.742	13.758	9.601	12.801	15.228	18.386	20.748	21.818	18.723
5	1	12.641	11.746	7.680	10.849	13.066	16.334	18.306	19.676	16.217
5	0,3	10.487	9.770	5.837	8.842	10.699	14.005	15.851	17.282	13.644
5	0,1	8.722	8.001	4.466	7.069	8.738	11.833	13.675	14.942	11.289
5	10	16.889	15.812	11.835	15.208	17.509	20.550	22.735	23.831	20.930
10	10	14.222	13.239	9.260	13.105	15.175	17.837	20.153	22.260	18.350
10	5	12.814	11.832	8.011	11.540	13.508	16.117	18.443	20.476	16.776
10	3	11.781	10.719	7.110	10.427	12.120	14.935	17.433	19.100	15.708
10	1	9.720	8.763	5.380	8.314	9.868	12.635	15.016	16.448	13.220
10	0,3	7.563	6.799	3.974	6.365	7.645	10.126	12.583	14.105	10.727
10	0,1	5.806	5.228	2.916	4.781	5.800	8.100	10.320	11.610	8.547
10	10	13.601	13.018	9.082	12.708	14.571	17.439	20.244	21.560	18.506
20	10	8.458	8.317	5.640	7.871	9.845	12.293	15.117	15.956	13.113
20	5	7.188	7.264	4.730	6.673	8.412	10.936	13.355	13.773	11.021
20	3	6.451	6.272	4.064	5.835	7.341	9.769	11.953	12.588	9.874
20	1	4.789	4.627	2.870	4.237	5.411	7.489	9.525	10.094	7.665
20	0,3	3.346	3.257	1.972	3.048	3.805	5.491	7.187	7.729	5.717
20	0,1	2.323	2.361	1.401	2.138	2.744	4.007	5.290	5.849	4.229
20	10	8.475	8.379	5.715	7.791	9.627	12.228	14.555	15.820	12.712

Tab. 4-22: Ergebnisse der Steifigkeit aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

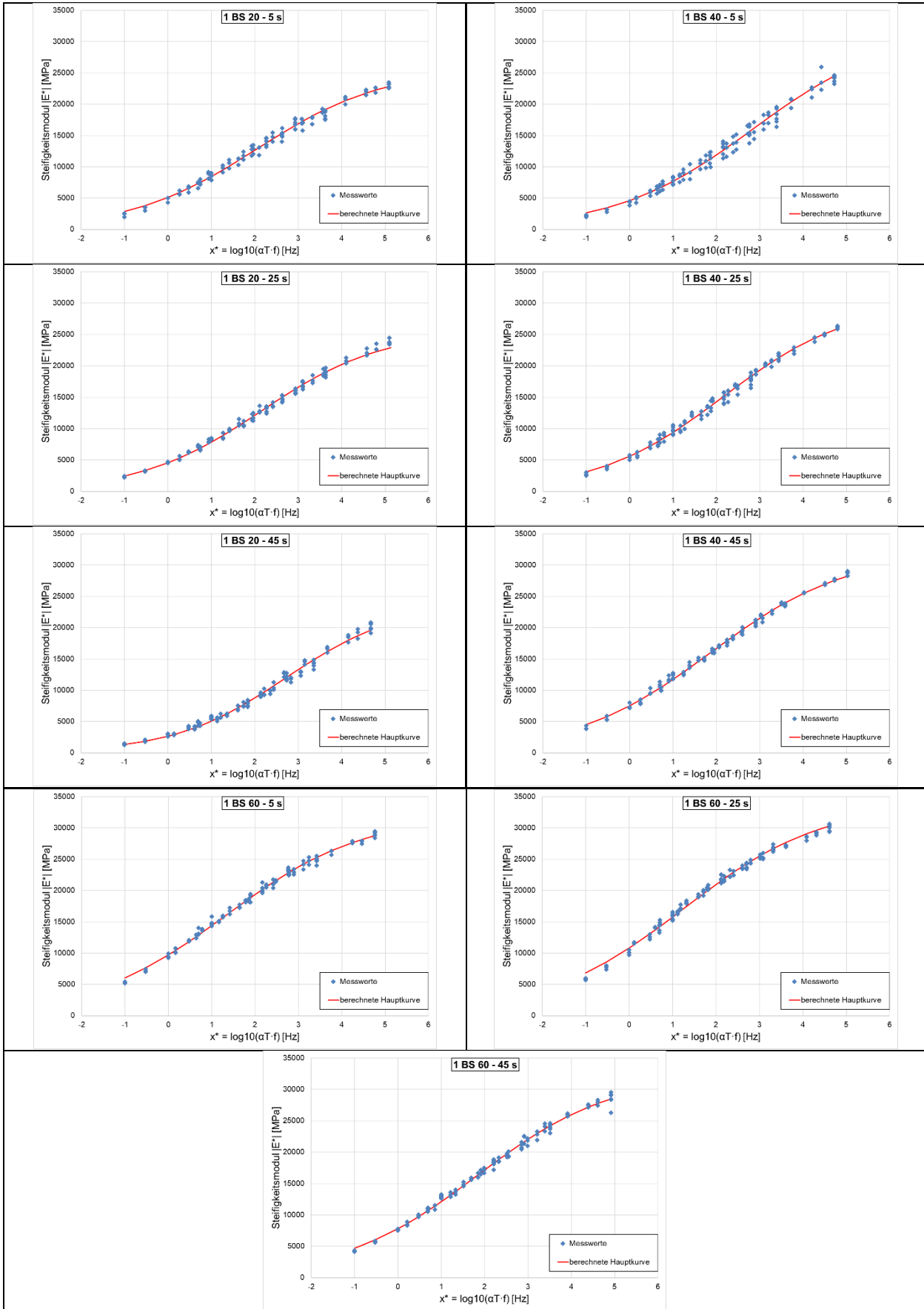


Bild 4-29: Hauptkurven der Steifigkeit aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	1 BS 20			1 BS 40			1 BS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T	f	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ
[°C]	[Hz]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]
-10	10	3,8	5,2	7,0	6,6	5,5	3,9	4,0	3,3	3,6
-10	5	4,9	5,9	8,5	7,2	6,0	4,3	4,1	3,9	4,9
-10	3	4,5	6,0	8,8	7,4	6,4	4,4	3,8	4,7	5,1
-10	1	5,6	6,0	10,0	8,4	7,3	5,8	4,9	4,7	5,8
-10	0,3	7,0	7,4	11,5	9,5	8,4	6,0	5,4	5,7	6,6
-10	0,1	7,8	8,5	13,2	10,0	9,6	6,9	6,0	6,1	7,0
-10	10	5,0	5,2	9,0	6,7	5,7	4,3	4,5	3,9	4,2
0	10	8,3	8,2	12,8	10,9	8,4	7,2	6,2	6,2	7,7
0	5	8,6	8,9	14,3	11,0	9,5	7,8	6,4	6,3	7,3
0	3	9,6	9,9	15,2	12,1	9,5	8,7	7,3	7,0	8,3
0	1	10,9	11,5	18,1	13,7	11,7	9,3	8,2	8,2	9,7
0	0,3	12,5	13,0	19,8	16,1	13,4	10,9	9,7	9,1	11,7
0	0,1	15,2	15,2	23,2	18,2	16,1	12,5	11,0	10,8	13,0
0	10	7,8	8,8	13,3	10,8	8,5	7,8	6,1	6,0	7,4
5	10	10,0	12,5	15,4	12,2	11,3	8,7	7,6	7,4	9,4
5	5	10,9	11,9	16,9	14,0	11,7	9,3	8,9	8,1	10,4
5	3	11,7	13,2	17,9	14,5	13,0	10,2	9,3	8,7	11,4
5	1	13,3	14,4	21,2	16,5	15,0	12,0	10,2	9,8	13,2
5	0,3	16,2	16,8	24,0	18,2	17,3	13,9	12,9	11,4	15,2
5	0,1	18,6	18,8	26,9	20,5	19,4	15,5	14,5	13,2	17,9
5	10	10,1	11,1	15,8	12,7	11,2	9,0	8,0	7,3	9,8
10	10	13,1	14,3	19,9	16,4	14,2	12,1	10,5	9,4	11,8
10	5	14,1	15,4	20,7	17,4	16,0	12,8	11,4	10,6	13,0
10	3	15,6	16,5	22,5	18,3	17,2	14,3	12,5	11,3	14,0
10	1	18,3	19,5	25,8	21,3	20,1	16,1	13,8	13,0	16,4
10	0,3	21,2	22,2	28,9	23,3	22,9	18,8	16,8	15,4	19,6
10	0,1	24,3	25,7	31,6	26,3	26,1	21,6	19,3	17,6	22,0
10	10	13,9	13,9	19,1	15,7	15,2	12,3	10,6	9,9	11,8
20	10	21,1	21,4	27,2	22,5	21,4	18,4	16,2	15,7	17,9
20	5	22,8	23,3	27,8	24,0	22,9	19,1	17,1	17,0	19,8
20	3	24,2	24,5	29,0	25,0	23,8	20,8	19,1	18,2	21,5
20	1	28,1	27,5	32,4	28,3	27,1	23,9	22,1	21,1	25,1
20	0,3	31,5	31,0	34,7	30,9	30,5	27,5	25,2	24,3	27,8
20	0,1	35,6	33,9	37,5	33,8	33,3	30,7	28,2	27,2	30,6
20	10	21,3	21,4	25,8	22,6	21,0	18,1	16,1	15,6	18,6

Tab. 4-23: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	2 BS 20			2 BS 40			2 BS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]	E* [MPa]
-10	10	24.353	24.884	22.213	21.387	24.598	27.755	29.770	32.048	30.744
-10	5	23.414	24.291	21.246	20.482	23.866	26.705	29.053	31.479	29.564
-10	3	22.809	23.688	20.592	19.556	23.055	25.824	28.389	30.946	29.072
-10	1	21.754	22.380	18.894	17.804	21.275	24.387	26.946	29.881	28.127
-10	0,3	19.953	20.762	17.191	15.851	19.481	22.585	25.441	28.662	26.577
-10	0,1	18.534	19.155	15.459	14.045	17.594	20.677	24.045	27.248	25.068
-10	10	24.243	25.160	22.046	21.440	24.970	27.649	29.722	32.238	30.458
0	10	19.657	20.993	17.579	17.195	19.707	22.586	25.795	28.455	27.685
0	5	18.644	19.769	16.335	15.812	18.276	21.120	24.929	27.614	26.424
0	3	17.749	18.710	15.350	14.881	17.490	20.335	23.771	26.734	25.706
0	1	16.022	16.857	13.269	12.786	15.243	18.245	22.214	25.146	23.914
0	0,3	13.835	14.695	11.265	10.822	13.049	15.967	20.060	23.420	21.789
0	0,1	11.948	12.804	9.399	8.987	11.005	13.806	18.036	21.428	19.842
0	10	19.555	20.918	17.217	16.736	19.590	22.349	25.755	28.468	27.104
5	10	17.729	18.351	14.208	13.872	16.533	20.339	22.932	26.412	24.839
5	5	16.301	17.085	12.659	12.338	15.039	18.596	21.697	25.190	24.141
5	3	15.557	16.081	11.645	11.395	13.938	17.521	20.672	24.573	23.190
5	1	13.335	13.944	9.844	9.372	11.897	15.326	18.569	22.419	20.900
5	0,3	11.107	11.624	7.788	7.469	9.757	12.813	16.178	20.347	18.398
5	0,1	9.249	9.628	6.157	5.910	7.756	10.818	14.028	18.243	16.078
5	10	17.407	18.008	13.662	13.253	16.300	20.219	22.775	26.615	24.805
10	10	14.553	15.571	11.755	11.436	14.069	16.602	21.172	24.028	22.842
10	5	13.077	13.942	10.422	10.138	12.578	14.988	19.740	22.488	21.904
10	3	12.067	12.848	9.363	9.086	11.468	13.890	18.575	21.510	20.769
10	1	9.970	10.713	7.356	7.193	9.370	11.679	16.393	19.243	18.724
10	0,3	7.784	8.611	5.539	5.450	7.318	9.321	13.788	16.674	16.016
10	0,1	6.147	6.800	4.190	4.156	5.630	7.432	11.525	14.197	13.728
10	10	14.304	15.538	11.578	11.235	13.849	16.686	21.106	23.669	23.028
20	10	9.209	10.332	7.097	7.120	8.850	11.307	15.312	19.299	17.975
20	5	7.855	8.791	5.848	6.064	7.612	9.497	13.691	17.493	16.228
20	3	6.894	7.739	5.126	5.208	6.648	8.433	12.424	16.126	14.673
20	1	5.191	5.843	3.739	3.789	4.912	6.468	9.993	13.475	12.151
20	0,3	3.601	4.175	2.511	2.724	3.511	4.684	7.769	10.777	9.434
20	0,1	2.553	3.001	1.826	2.006	2.485	3.472	5.861	8.428	7.276
20	10	8.997	10.066	6.846	7.023	8.650	11.090	15.269	18.806	17.563

Tab. 4-24: Ergebnisse der Steifigkeit aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

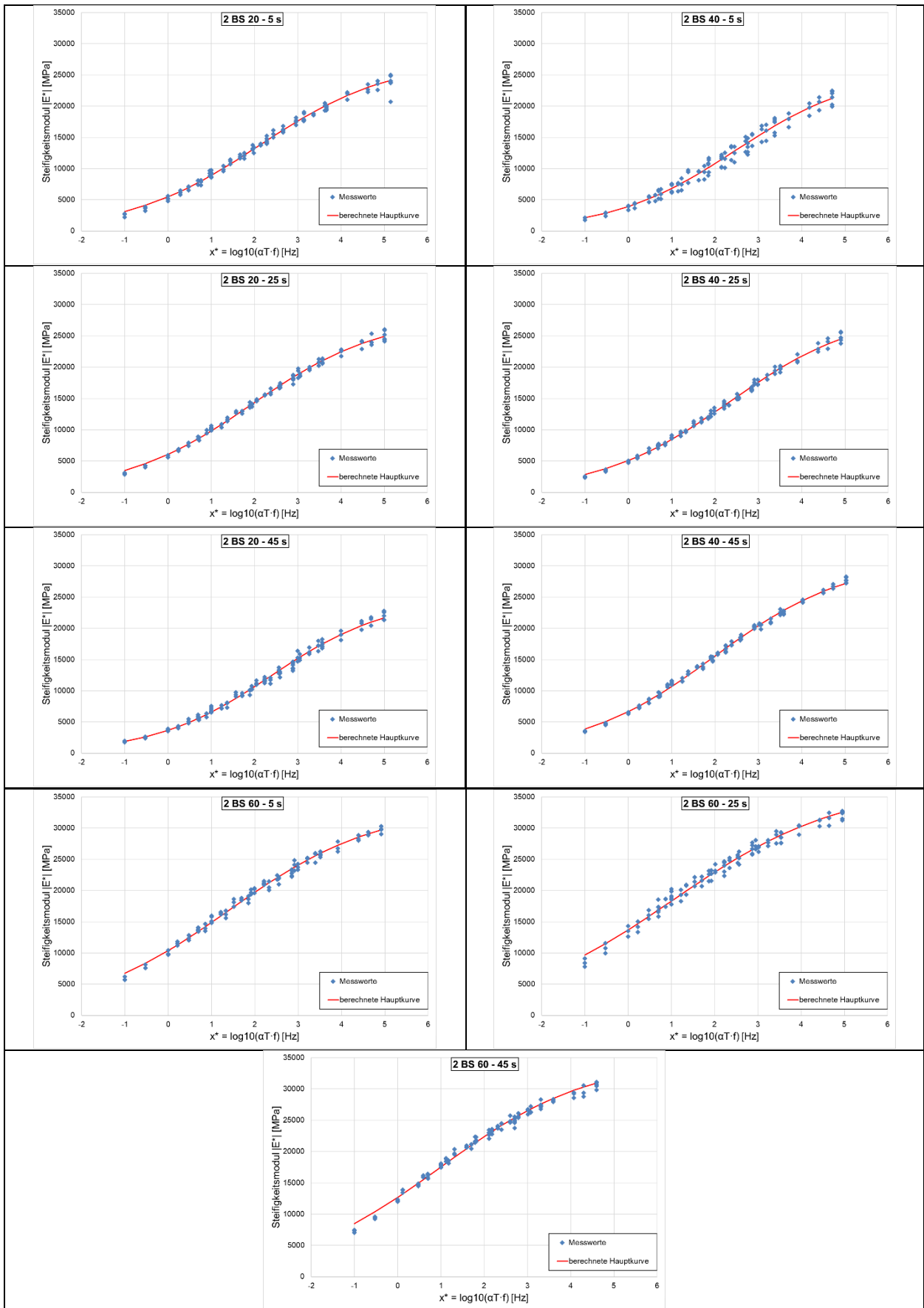


Bild 4-30: Hauptkurven der Steifigkeit aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	2 BS 20			2 BS 40			2 BS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T	f	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ	δ
[°C]	[Hz]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]	[°]
-10	10	4,3	4,1	6,1	6,9	5,7	4,0	3,9	3,2	2,9
-10	5	4,4	4,8	5,8	7,2	5,9	5,0	4,1	4,1	2,7
-10	3	4,8	5,2	6,4	7,7	6,5	5,1	4,4	3,0	3,5
-10	1	5,7	6,0	7,1	9,1	7,4	5,7	4,9	3,7	3,9
-10	0,3	7,0	6,3	8,2	10,2	7,8	6,4	5,5	4,3	4,6
-10	0,1	7,6	7,8	9,7	11,6	9,5	7,5	5,7	4,6	5,5
-10	10	4,8	5,9	6,5	7,2	5,6	4,7	3,6	2,8	3,5
0	10	7,7	7,5	9,0	9,9	9,6	7,5	6,0	5,9	5,2
0	5	7,9	8,0	10,0	11,0	9,9	8,1	5,9	4,9	5,4
0	3	8,7	9,0	10,9	11,8	10,2	8,2	7,1	5,2	6,1
0	1	10,6	9,8	13,0	13,5	12,0	9,8	7,6	6,4	6,6
0	0,3	12,3	11,9	14,7	15,7	14,1	11,9	8,7	7,0	8,1
0	0,1	13,8	13,7	17,2	18,1	15,7	13,6	10,1	8,1	8,9
0	10	7,9	7,5	9,3	10,5	10,1	7,8	7,4	4,9	5,0
5	10	10,4	9,3	12,7	13,5	11,7	10,5	8,0	6,5	6,8
5	5	10,8	10,6	14,2	14,9	12,9	10,7	8,2	6,4	7,2
5	3	11,4	11,2	15,1	15,8	13,4	11,5	8,8	7,1	8,0
5	1	13,1	13,4	17,1	17,7	16,3	13,5	10,5	7,5	8,6
5	0,3	15,4	15,4	20,6	20,3	18,4	14,9	12,2	9,2	10,7
5	0,1	17,8	18,2	22,6	23,2	21,0	17,7	14,1	10,7	12,4
5	10	10,2	10,2	13,1	13,6	12,2	10,0	7,6	6,1	6,8
10	10	12,7	12,5	16,2	16,8	14,8	13,4	9,3	8,3	7,9
10	5	14,5	13,9	17,5	18,3	15,8	14,1	10,6	8,9	9,3
10	3	15,1	15,2	19,0	19,6	16,6	14,9	11,1	8,9	9,6
10	1	17,6	16,9	22,1	21,7	19,7	17,4	13,3	11,1	11,3
10	0,3	20,8	20,3	24,7	25,1	22,1	20,0	15,1	12,1	13,6
10	0,1	24,0	22,8	27,8	27,2	24,6	22,5	17,2	14,6	15,3
10	10	13,0	12,7	15,9	17,3	14,6	12,9	9,7	8,3	9,9
20	10	21,1	20,2	23,6	23,6	21,2	19,4	14,8	12,2	13,6
20	5	22,7	21,7	25,0	24,6	22,9	21,3	16,3	13,9	15,2
20	3	24,1	23,6	26,0	25,3	24,0	22,3	17,7	15,1	15,9
20	1	27,2	26,7	29,3	28,6	27,1	25,4	20,5	17,5	18,7
20	0,3	30,9	30,4	33,0	31,6	30,6	28,9	23,1	20,3	22,2
20	0,1	34,3	33,9	35,5	33,8	33,4	31,6	26,6	23,0	25,5
20	10	21,3	20,0	23,0	22,7	21,6	19,3	15,3	13,1	14,2

Tab. 4-25: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

In Bild 4-31 und Bild 4-32 sind die Steifigkeiten der Asphaltbinderschichten über die Belastungsfrequenzen in Abhängigkeit von der Asphaltgranulatzugabemenge und der Nachmischzeit bei einer Prüftemperatur von 20 °C getrennt für Asphaltgranulat 1 und Asphaltgranulat 2 dargestellt.

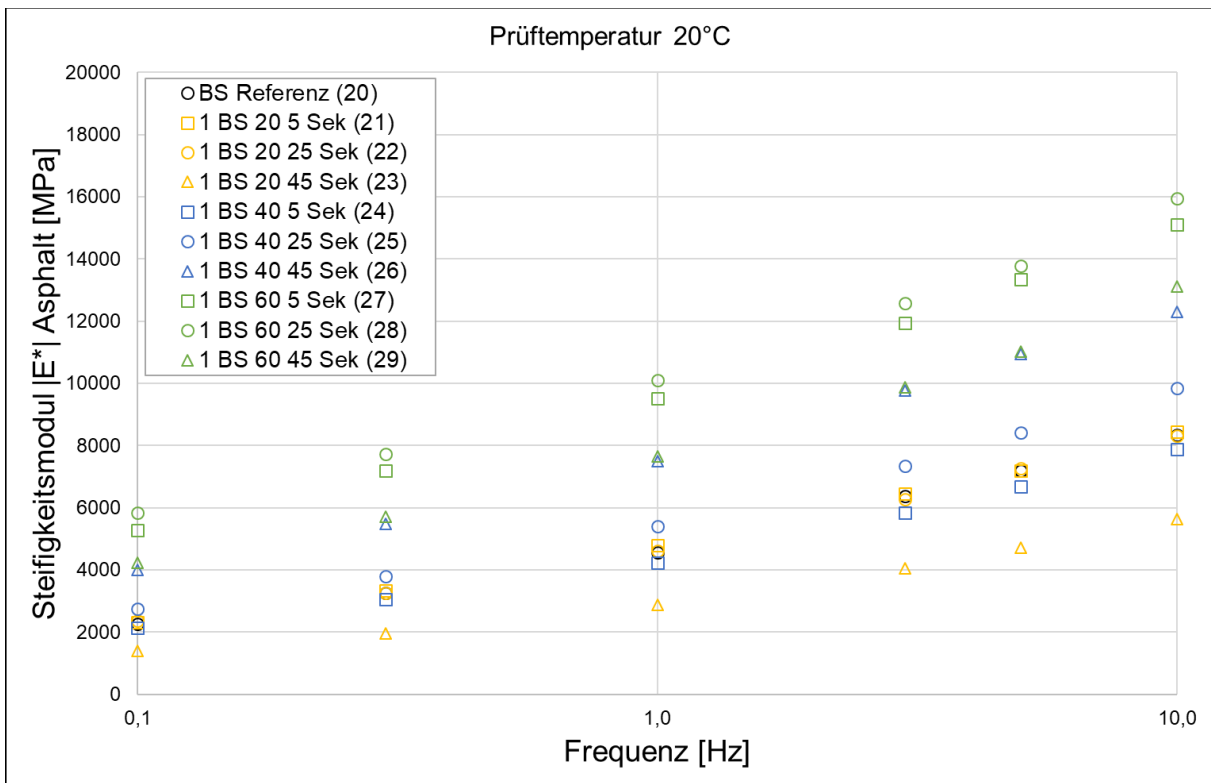


Bild 4-31: Steifigkeitsmodul der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 1 über die Belastungsfrequenzen

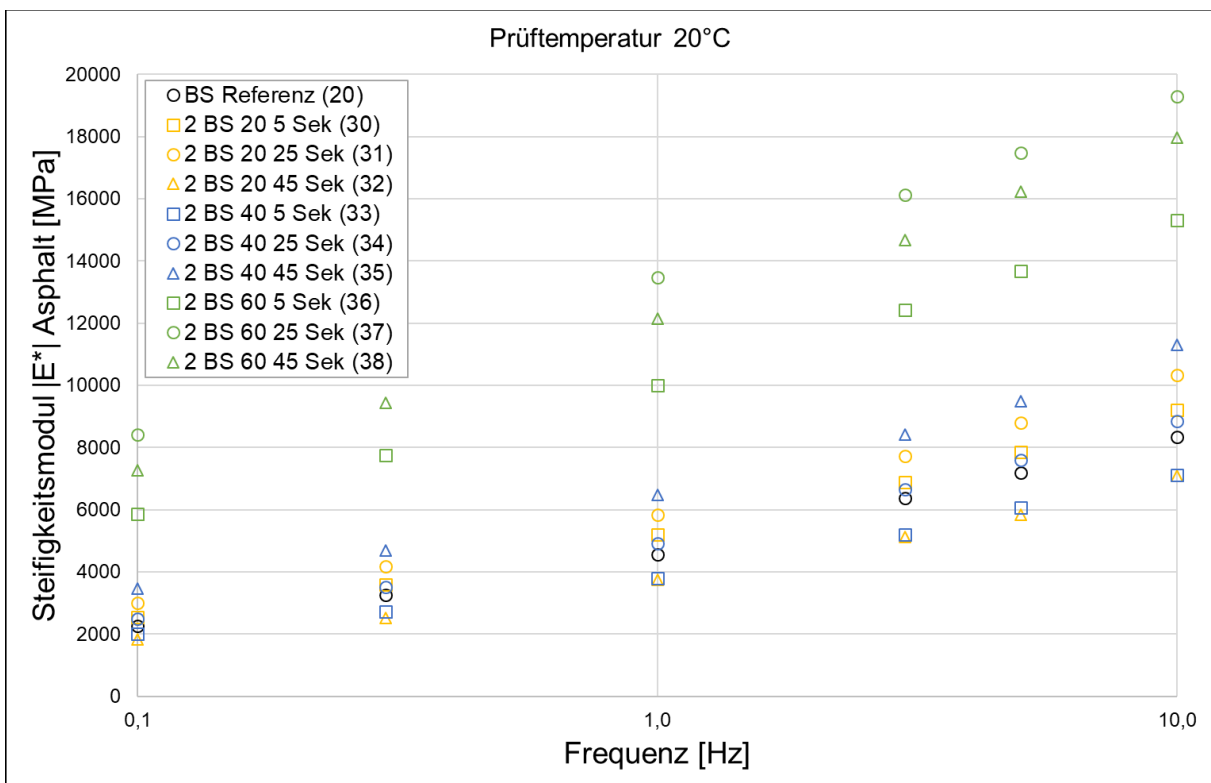


Bild 4-32: Steifigkeitsmodul der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 2 über die Belastungsfrequenzen

Die Steifigkeitsmoduln der Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulatzugabemenge sind systematisch höher gegenüber den anderen Varianten. Eine Differenzierung der übrigen Asphaltgranulatzugabemengen ist anhand der ermittelten Ergebnisse nicht möglich. Ebenso konnte keine eindeutige Abhängigkeit von den verschiedenen Nachmischzeiten festgestellt werden. Ein weiterer Ansatz zur Beurteilung der Ergebnisse war die Betrachtung der Messstreuung der Messergebnisse anhand der Differenz im unteren und oberen Bereich der Hauptkurve (s. Bild 4-33). Die ermittelten Differenzen der 38 Varianten sind in Tab. 4-26 zusammengefasst. Auch hierbei konnte keine systematische Abhängigkeit von den Differenzen hinsichtlich der Asphaltgranulatzugabemenge oder Nachmischzeit festgestellt werden.

Zusammensetzung	Nachmischzeit [s]	$\Delta_{\text{unten}} E^* $	$\Delta_{\text{oben}} E^* $
		[MPa]	[MPa]
TS Referenz	25	312	5813
1 TS 20	5	264	1447
	25	238	1059
	45	261	1361
1 TS 40	5	214	1825
	25	202	2069
	45	516	1532
1 TS 60	5	295	1524
	25	844	1647
	45	245	1065
2 TS 20	5	275	2472
	25	508	461
	45	192	1808
2 TS 40	5	277	1015
	25	182	2518
	45	673	998
2 TS 60	5	1158	1332
	25	1219	888
	45	417	955
BS Referenz	25	349	1767
1 BS 20	5	587	951
	25	210	1056
	45	255	1673
1 BS 40	5	329	1393
	25	481	514
	45	540	760
1 BS 60	5	229	1052
	25	317	1258
	45	218	1187
2 BS 20	5	573	1307
	25	249	1920
	45	210	1434
2 BS 40	5	415	2545
	25	212	1853
	45	161	1095
2 BS 60	5	512	1271
	25	1303	1535
	45	453	1272

Tab. 4-26: Differenzen der Steifigkeitsmoduln im unteren und oberen Bereich der Hauptkurven aller 38 Varianten

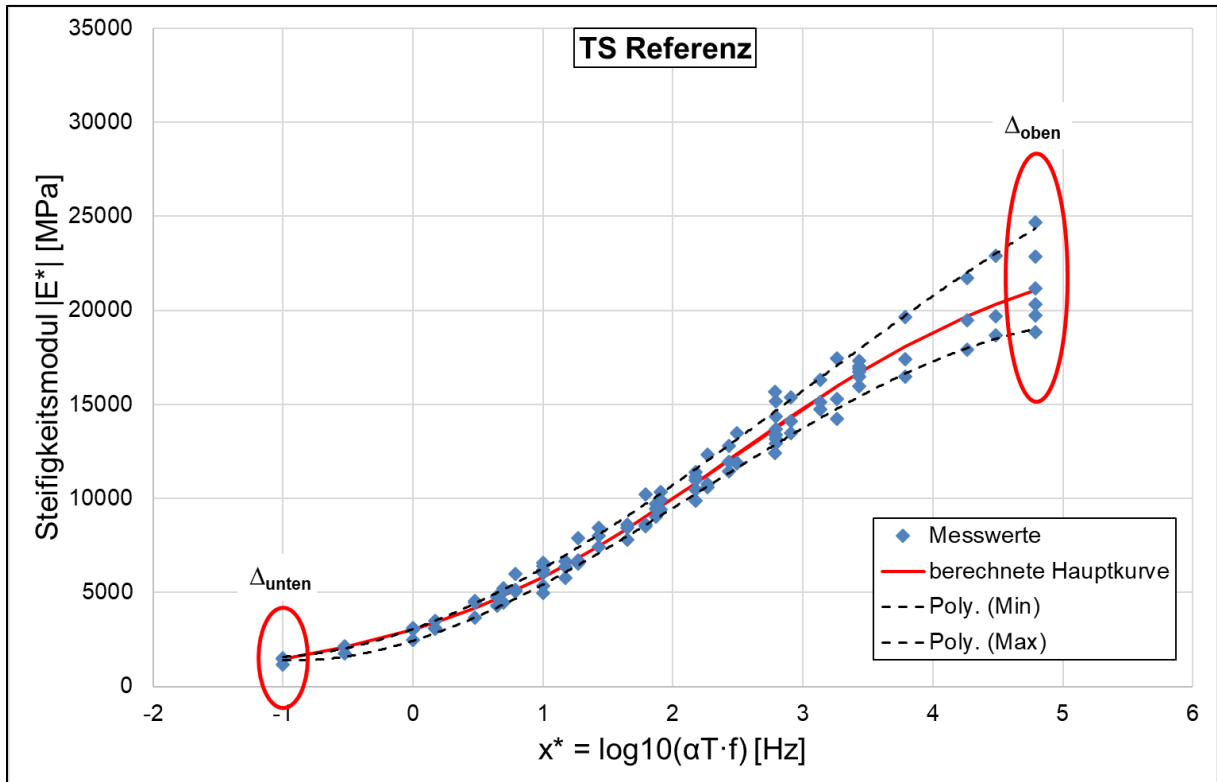


Bild 4-33: Darstellung der betrachteten Bereiche zur Ermittlung von Δ_{unten} und Δ_{oben} am Beispiel der Variante TS Referenz

4.4.7 Untersuchung einer Bitumen-Strukturänderung von Laborproben

Im Zuge der Performance-Untersuchungen dieses Forschungsprojektes sollte der Effekt einer Strukturänderung der beiden Bitumenkomponenten (Frischbitumen und Bitumen aus dem Asphaltgranulat) an zwischengelagerten Bohrkernen im Labor analysiert werden. Die dabei zu beantwortende Frage war, ob eine Veränderung der Performance-Eigenschaften innerhalb einer längeren Lagerungszeit nachgewiesen werden kann, die ggf. durch mikrostrukturelle Veränderungen in der Bitumenphase (z.B. nachträgliche Homogenisierung infolge Diffusion) auftritt. Die im Zuge der Voruntersuchungen nach [TP Asphalt, Teil 26] geprüften Bohrkern wurden dafür für einen Zeitraum von 14,5 Monaten bei Raumtemperatur, dunkel und luftdicht gelagert (um Oxidationsprozesse zu vermeiden) und anschließend erneut dieser Untersuchung unterzogen.

Der Vergleich der Untersuchungen ergab die in Bild 4-34 dargestellten Ergebnisse.

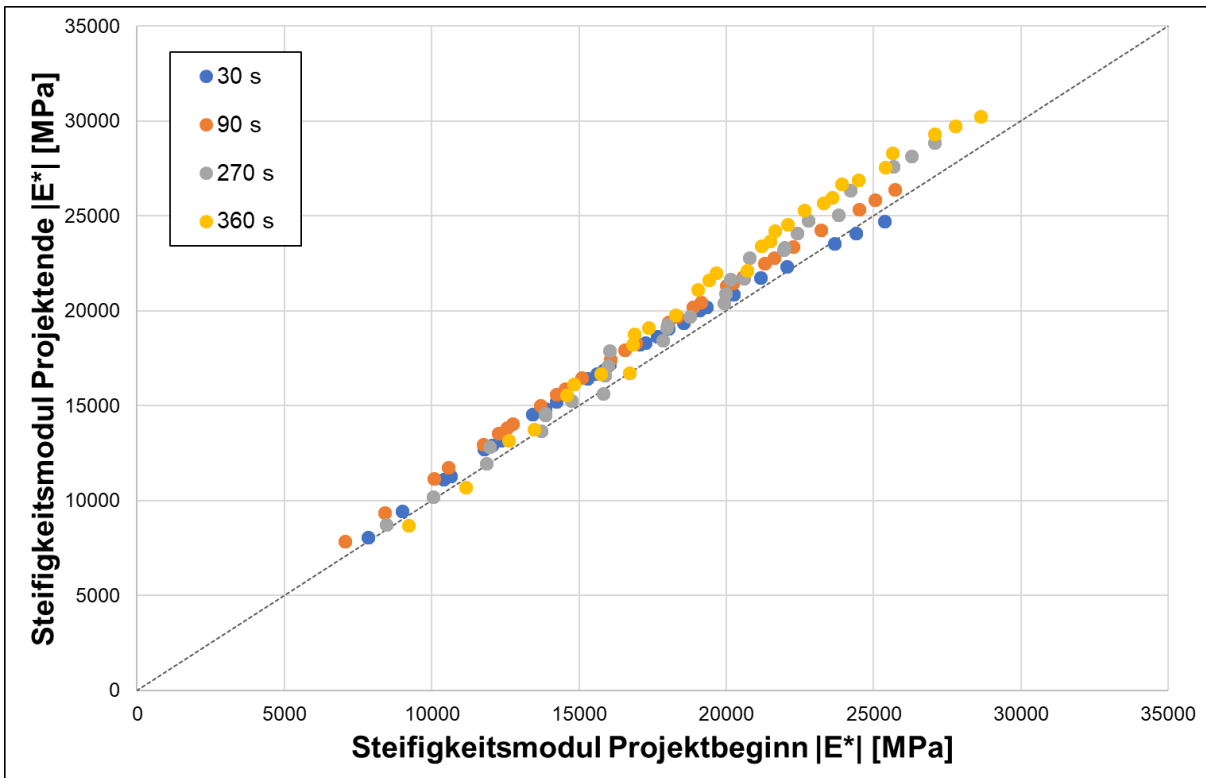


Bild 4-34: Vergleich der Steifigkeitsmoduln ausgewählter Varianten zu Projektbeginn und Projektende

Das Bild 4-34 zeigt, dass die Messwerte bei der zweiten Prüfung überwiegend oberhalb der Winkelhalbierenden liegen und somit höhere Steifigkeiten gemessen wurden. Bezogen auf die prozentualen Veränderungen sind dies jedoch keine signifikante Veränderung der Materialeigenschaften. Die Unterschiede in den Ergebnissen liegen in der Präzision des Messverfahrens, womit sich kein Einfluss einer strukturellen Veränderung nachweisen lässt.

4.5 Ansätze zur Definition eines Performance-Kriteriums für Heißasphalt mit Asphaltgranulat

4.5.1 Normierung der Prüfergebnisse zur Identifikation von geeigneten Performance-Kriterien

Im Kapitel 4.4 wurden die Ergebnisse der Untersuchungen der Verdichtbarkeit, des Verformungswiderstandes, der Asphaltsteifigkeit, des Ermüdungs- sowie des Tieftemperaturverhaltens dargestellt und isoliert ausgewertet.

Im nächsten Schritt soll eine gesamtheitliche Betrachtung der Prüfergebnisse ermöglichen, systematische Abhängigkeiten von der Nachmischzeit oder von der Zugabemenge von Asphaltgranulat ableiten zu können. Für diesen Schritt wurde eine Normierung der Messergebnisse je Prüfverfahren, isoliert nach Asphalttrag- und Asphaltbinderschicht durchgeführt. Die Normierung sieht dabei eine Werteskala von 0 („schlechteste“ Variante) bis 10 („beste“ Variante) vor. So wird je Prüfverfahren die Variante mit dem geringsten Verdichtungswiderstand, höchsten Verformungswiderstand, bester Kälteflexibilität, geringster elastischen Dehnung bei 10.000 Lastwechseln und der geringsten Streuung des Elastizitätsmoduls mit dem Wert 10 belegt.

Die Normierung ist in den Tabellen Tab. 4-27 und Tab. 4-28 getrennt für den Einfluss der Asphaltgranulatzugabemenge (beurteilt anhand der praxisnahen Nachmischzeit von 25 s) und der Nachmischzeit zusammengefasst. Die dargestellten Pfeile visualisieren die Systematik der Prüfergebnisse in Abhängigkeit des Differenzierungsfaktors.

Die Prüfverfahren der Verdichtbarkeit und des Verformungswiderstandes wurden unter Bezug auf die in Kapitel 4.4.2 und 4.4.3 festgestellten Divergenzen der Prüfergebnisse aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen und sind deswegen farbig hinterlegt.

Bei der Auswertung der Asphaltgranulatzugabemenge wurden für die Analyse der Systematik des Steifigkeitsmoduls die temperaturinvarianten Masterkurven verglichen und qualitativ die Zunahme des Steifigkeitsmoduls in Abhängigkeit von der Zugabemenge und der daraus resultierenden Bindemittelsteifigkeit beurteilt.

	Nachmischzeit [s]	Verdichtbarkeit	Verformungswiderstand	Kälte (ZFR)	Ermüdung ϵ_4	Steifigkeitsmodul
TS Ref	25					
1 TS 20	25	8,4	10,0	4,1	6,3	
1 TS 40	25	4,8	7,1	6,5	4,6	
1 TS 60	25	7,7	3,1	2,1	0,2	
2 TS 20	25	4,1	7,7	5,1	5,6	
2 TS 40	25	10,0	2,6	6,1	2,1	
2 TS 60	25	8,9	4,4	2,6	0,8	
BS Ref	25					
1 BS 20	25	1,5	4,4	7,4	8,4	
1 BS 40	25	5,4	5,0	4,3	7,5	
1 BS 60	25	6,2	10,0	2,3	3,0	
2 BS 20	25	4,3	5,8	3,9	1,7	
2 BS 40	25	6,4	1,1	7,9	1,7	
2 BS 60	25	9,3	5,9	0,0	0,0	

Tab. 4-27: Normierung zur Beurteilung des Einflusses der Asphaltgranulatzugabemenge

Für die weiteren drei Prüfverfahren kann festgestellt werden, dass lediglich für die Varianten der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 1 eine einheitliche, dem erwarteten Zusammenhang entsprechende Systematik zu erkennen ist. Diese Varianten zeigten auch die höchste Gleichmäßigkeit in der Mischgutzusammensetzung. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass die Prüfung der Ermüdung nach [TP Asphalt, Teil 24] über alle Varianten eine gleichbleibende Systematik aufweist und hervorgehoben werden muss. In

diesem Zusammenhang ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Prüfung der Asphaltermüdung keine Regelprüfung für Asphaltbinderschichten darstellt.

	Nachmischzeit [s]	Verdichtbarkeit	Verformungswiderstand	Kälte (ZFR)	Ermüdung ϵ_4	Steifigkeitsmodul
TS Ref	25	4,4	5,4	10,0	10,0	0,0
1 TS 20	5	2,8	6,0	5,9	7,4	8,6
	25	8,4	10,0	4,1	6,3	9,4
	45	9,1	7,6	6,2	6,6	8,7
1 TS 40	5	8,5	8,9	7,4	6,8	7,9
	25	4,8	7,1	6,5	4,6	7,5
	45	0,5	7,3	6,3	5,2	7,9
1 TS 60	5	7,7	0,7	2,9	1,0	8,4
	25	7,7	3,1	2,1	0,2	7,0
	45	6,6	3,9	2,1	2,3	9,3
2 TS 20	5	0,0	7,8	5,4	8,3	6,6
	25	4,1	7,7	5,1	5,6	10,0
	45	5,4	9,5	5,7	7,8	8,0
2 TS 40	5	4,7	8,2	5,5	1,3	9,4
	25	10,0	2,6	6,1	2,1	6,6
	45	8,3	0,0	5,4	3,1	8,6
2 TS 60	5	7,1	7,8	0,0	0,0	7,0
	25	8,9	4,4	2,6	0,8	7,8
	45	7,7	1,2	4,7	3,8	9,2
BS Ref	25	2,0	1,8	5,2	9,7	4,3
1 BS 20	5	0,0	2,8	4,8	7,2	7,2
	25	1,5	4,4	7,4	8,4	8,6
	45	3,6	5,7	10,0	10,0	5,2
1 BS 40	5	4,5	5,9	9,4	6,2	6,3
	25	5,4	5,0	4,3	7,5	10,0
	45	6,7	9,4	3,5	4,6	8,5
1 BS 60	5	3,1	4,7	1,4	4,9	8,5
	25	6,2	10,0	2,3	3,0	7,0
	45	7,7	4,3	2,6	3,2	7,9
2 BS 20	5	1,7	4,4	3,5	4,8	5,5
	25	4,3	5,8	3,9	1,7	4,0
	45	3,1	5,0	7,5	7,4	6,7
2 BS 40	5	5,4	0,0	7,6	1,4	0,0
	25	6,4	1,1	7,9	1,7	4,6
	45	9,6	2,6	5,7	2,0	8,7
2 BS 60	5	10,0	4,7	1,2	0,9	6,0
	25	9,3	5,9	0,0	0,0	0,6
	45	8,7	5,6	1,4	0,4	6,3

Tab. 4-28: Normierung zur Beurteilung des Einflusses der Nachmischzeit

Die Betrachtung des Einflusses der Nachmischzeit auf die Ergebnisse im Tieftemperaturverhalten, der Asphaltsteifigkeit und der Ermüdung erlaubt keine gesicherte Schlussfolgerung. Es muss festgestellt werden, dass die Prüfergebnisse innerhalb jeder Variante unterschiedliche Verläufe aufweisen. Eine mögliche Erklärung für diese Tatsache sind die Abweichungen in der Mischgutzusammensetzung zwischen Erstprüfung und großtechnisch hergestelltem Asphaltmischgut, wie in Kapitel 4.4.1 dargestellt wurde.

Darüber hinaus wurde geprüft, ob die Varianten mit 5 s Nachmischzeit aufgrund der mangelnden Homogenisierungsgrade die Ergebnisse maßgeblich verfälschen. Dies würde sich in geringen Abweichungen der Ergebnisse der normierten Werte zwischen 25 s und 45 s Nachmischzeit reproduzieren lassen. Diese Vermutung konnte jedoch nicht bestätigt werden.

4.5.2 Analyse des Zusammenhangs zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit

Ein möglicher Performance-Ansatz dieses Forschungsprojektes ist die Analyse und der Vergleich der Steifigkeiten des Asphaltes mit denen des verwendeten Bitumens (Gemisch aus Frischbitumen und Bitumen im Asphaltgranulat). Dieser Ansatz wurde für die vorliegenden 38 Datensätze untersucht und ist in Bild 4-35 bis Bild 4-38 getrennt nach Asphalttrag- und Asphaltbinderschicht sowie nach Asphaltgranulat 1 und Asphaltgranulat 2, der Nachmischzeit und der Zugabemenge des Asphaltgranulates dargestellt.

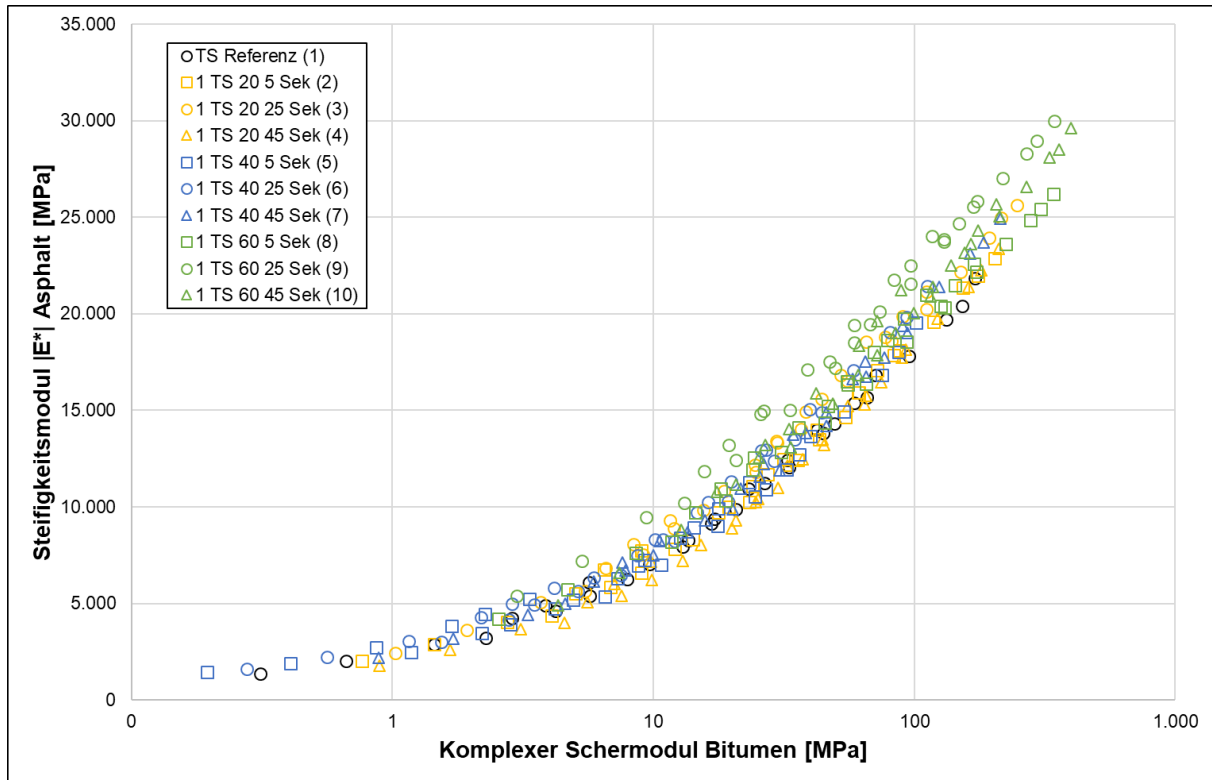


Bild 4-35: Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit der Asphalttragschichten unter Verwendung von Asphaltgranulat 1

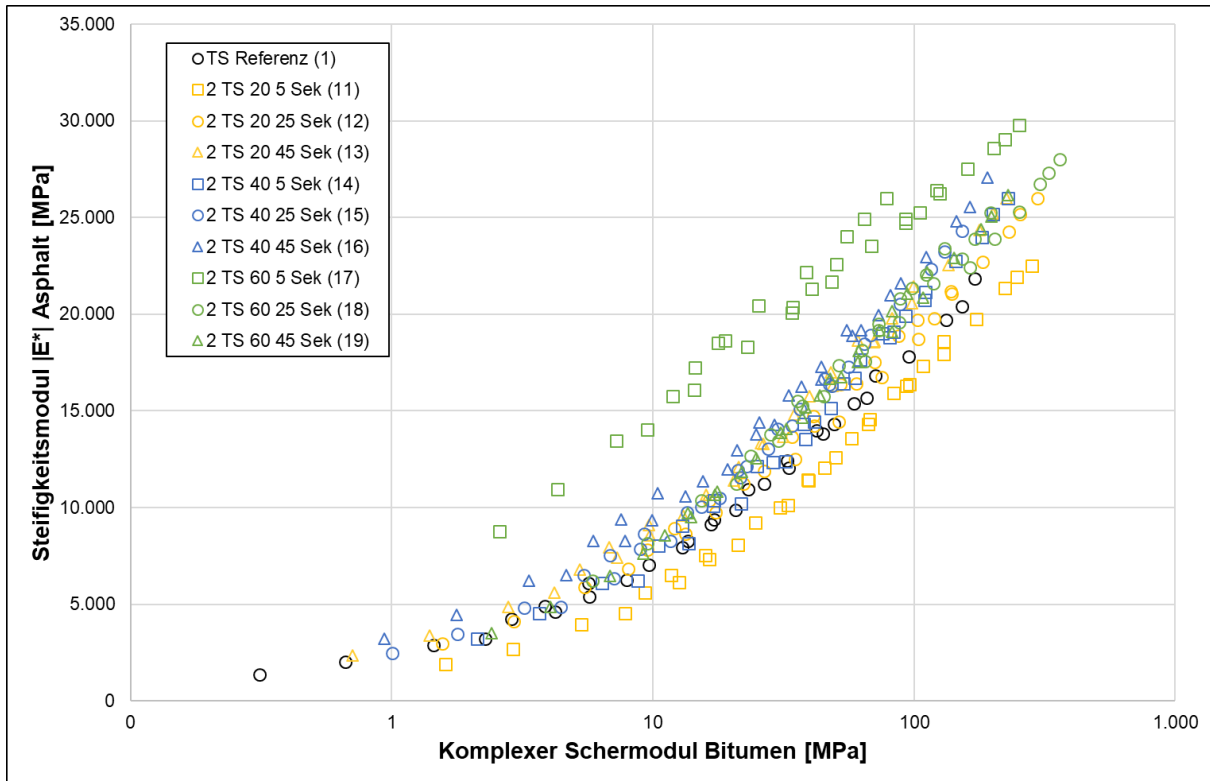


Bild 4-36: Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit der Asphalttragschichten unter Verwendung von Asphaltgranulat 2

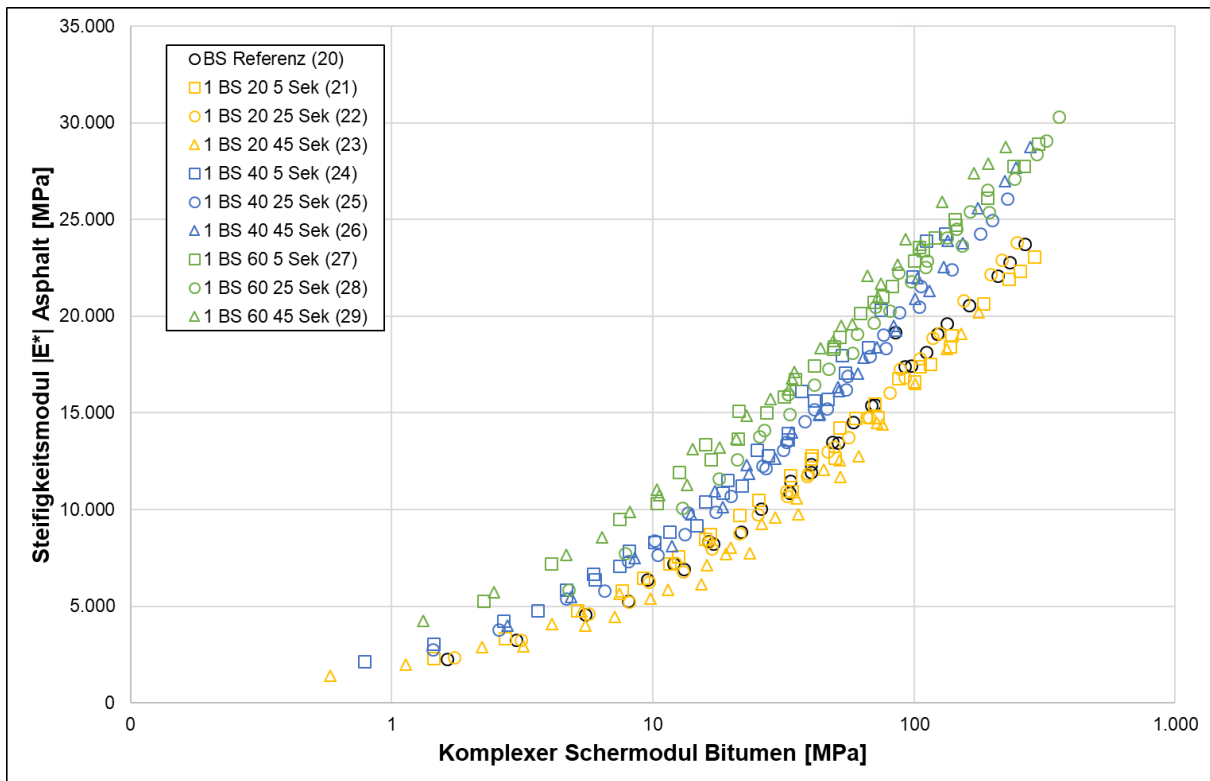


Bild 4-37: Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit der Asphaltbinderschichten unter Verwendung von Asphaltgranulat 1

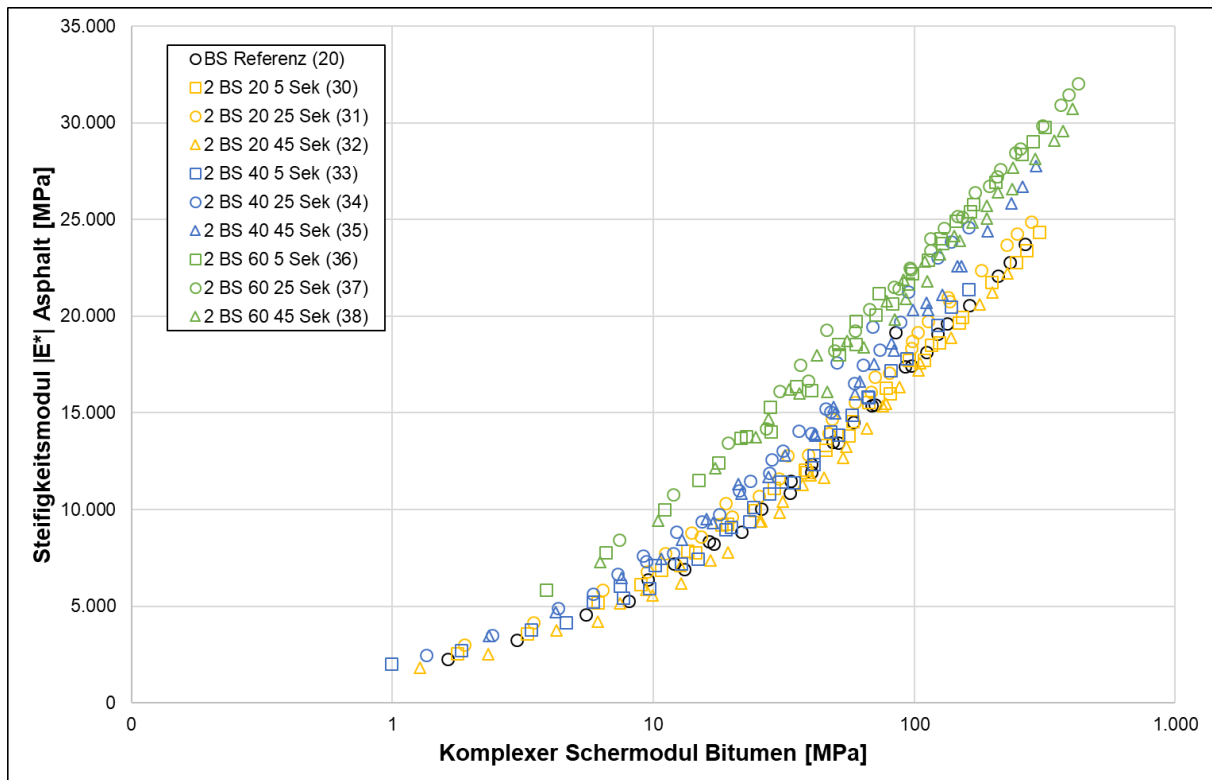


Bild 4-38: Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit der Asphaltbinderschichten unter Verwendung von Asphaltgranulat 2

Unter der Voraussetzung, dass der Zusammenhang zwischen Bitumen- und Asphaltsteifigkeit mit der Referenzvariante definiert wird („Soll-Funktion“), liegen die Versuchsvarianten überwiegend oberhalb dieser Funktion. Das bedeutet, die Asphaltsteifigkeiten der Versuchsvarianten, insbesondere die der Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat, sind höher, als aufgrund der Bitumensteifigkeit zu erwarten war. Bei einigen Varianten mit 20 M.-% Asphaltgranulat liegt der Funktionsverlauf unter dem des Referenzasphaltes, jedoch meist nur geringfügig. Inwieweit dies durch einen unzureichenden Homogenisierungsprozess der Bitumen (frisch – alt) beeinflusst wird, kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden.

4.5.3 Ansatz zur Ableitung eines Performance-Kriteriums für das Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat

Zur Ableitung eines Performance-Kriteriums für das Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat wurde eine Analyse systematischer Zusammenhänge zwischen den untersuchten Prüfmethode durchgeführt.

Aufgrund der in Kapitel 4.5.1 zusammengefassten Umstände wurden für diese Betrachtung die Prüfungen der Verdichtbarkeit und des Verformungswiderstandes von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Ein möglicher Ansatz sah die Definition von „kritischen“ Bereichen in den in Kapitel 4.5.2 dargestellten Zusammenhängen zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit, basierend auf den Ergebnissen des Tieftemperaturverhaltens nach [TP Asphalt, Teil 46 A] vor. Dafür wurde in einem ersten Schritt der Zusammenhang zwischen der Bruchtemperatur und der Steifigkeit des Asphaltes am kältesten Messpunkt der Steifigkeits-Temperaturfunktion (für 10 Hz unter Verweis auf die in der Regel für die RDO Asphalt verwendete Frequenz sowie für 1 Hz zur Berücksichtigung prüftechnischer Elemente) geprüft und in Bild 4-39 sowie in Bild 4-40 dargestellt. Unter Berücksichtigung des Arbeitspapiers Tieftemperaturverhalten von Asphalt, Teil 1 [AP TTV, Teil 1], lässt sich in Abhängigkeit von der Frosteinwirkungszone (hier beispielhaft für Zone II) ein kritischer Bereich für die Ausfalltemperatur definieren. Dieser ist farbig hinterlegt.

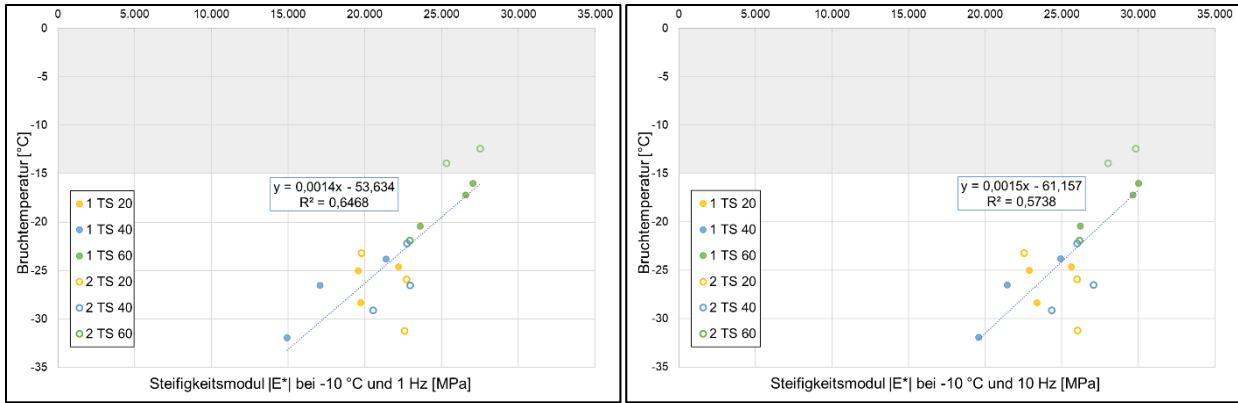


Bild 4-39: Vergleich der Ausfalltemperatur aus dem Abkühlversuch mit der Steifigkeit bei -10 °C und 1 Hz (links) sowie 10 Hz (rechts) - Asphalttragschichten

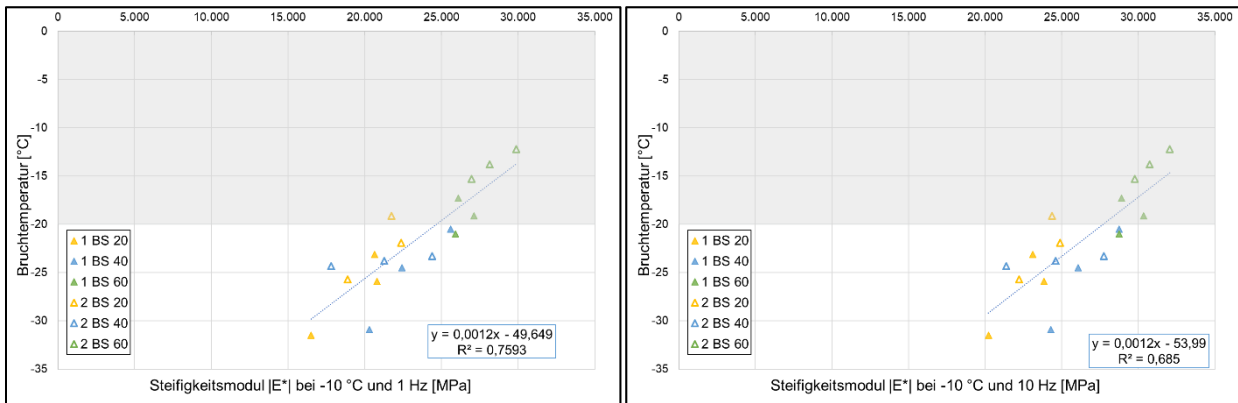


Bild 4-40: Vergleich der Ausfalltemperatur aus dem Abkühlversuch mit der Steifigkeit bei -10 °C und 1 Hz (links) sowie 10 Hz (rechts) - Asphaltbinderschichten

Anhand der in Bild 4-39 und Bild 4-40 dargestellten Zusammenhänge und unter Berücksichtigung des kritischen Bereichs für die Bruchtemperatur nach [AP TTV, Teil 1] ließe sich eine kritische Steifigkeit ableiten. Der kritische Steifigkeitsmodul beträgt dann bei einer Prüffrequenz von 10 Hz für die Asphalttragschicht 30.771 MPa und für die Asphaltbinderschicht 28.325 MPa.

An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass diese Ausführung einen beispielhaften Ansatz zur Definition eines Performance-Kriteriums liefern soll, aufgrund der bewusst gewählten Inhomogenität der Proben (insbesondere bei nur 5 s Nachmischzeit) jedoch nur zu Bestimmtheitsmaßen zwischen $R^2 = 0,57$ für die Asphalttragschicht und $R^2 = 0,76$ für die Asphaltbinderschichten führt und durch weitere Untersuchungen auf eine belastbare Basis fundiert werden müsste.

Bei dem Vergleich zwischen der Bruchtemperatur im Abkühlversuch und der Bindemittelsteifigkeit des rückgewonnenen Bindemittels bei -10 °C und 1 Hz sowie 10 Hz ergeben sich die in Bild 4-41 und Bild 4-42, nach [AP TTV, Teil 1] definierten, kritische Bereiche.

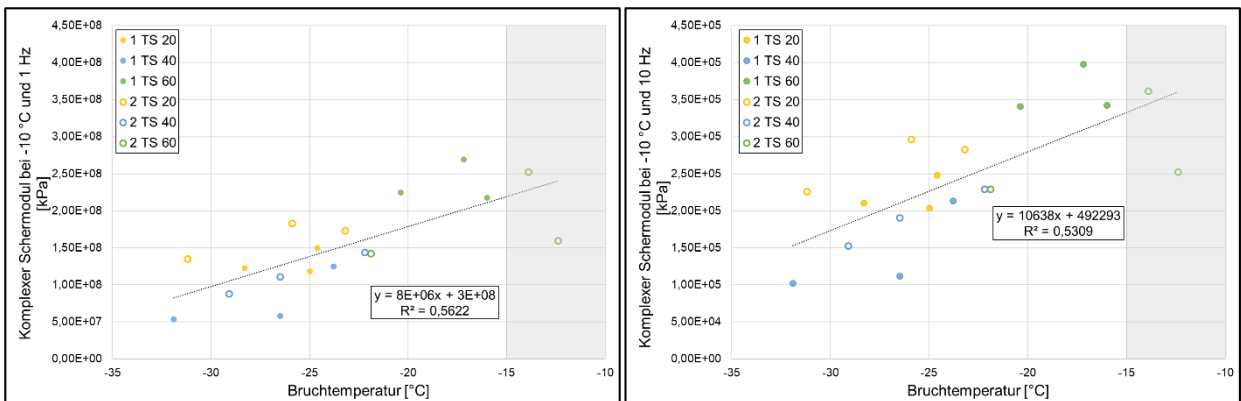


Bild 4-41: Vergleich der Bruchtemperatur aus dem Abkühlversuch mit der Bindemittelsteifigkeit des rückgewonnenen Bindemittels bei -10 °C und 1 Hz (links) sowie 10 Hz (rechts) - Asphalttragschichten

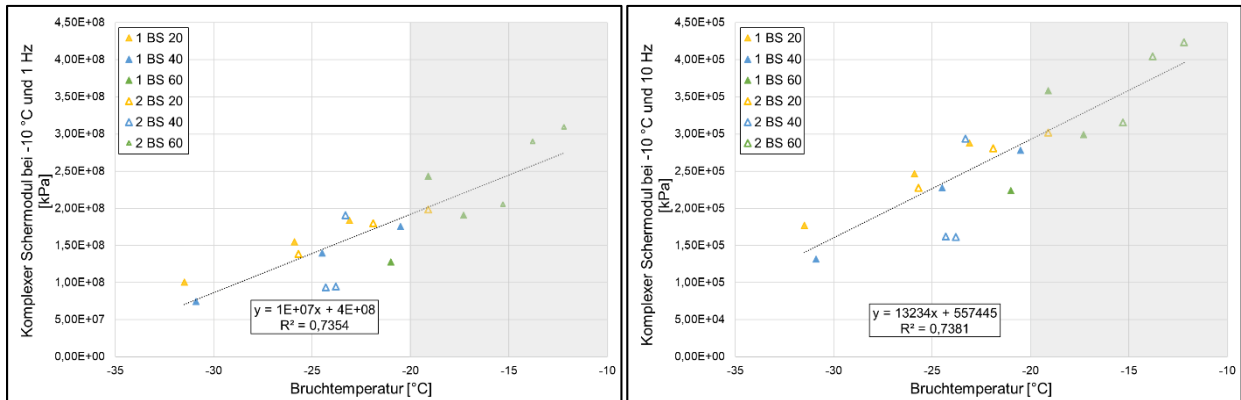


Bild 4-42: Vergleich der Bruchtemperatur aus dem Abkühlversuch mit der Bindemittelsteifigkeit des rückgewonnenen Bindemittels bei -10 °C und 1 Hz (links) sowie 10 Hz (rechts) - Asphaltbinderschichten

Basierend auf den in Bild 4-41 und Bild 4-42 abgebildeten Zusammenhängen resultiert bei 10 Hz Prüffrequenz eine kritische Bindemittelsteifigkeit von 332.723 kPa der Asphalttragschicht und von 292.765 kPa der Asphaltbinderschicht. Bei der Betrachtung des rückgewonnenen Bindemittels wurde zur Berücksichtigung des Phasenwinkels darüber hinaus die Korrelation mit dem Verlustmodul betrachtet, diese ergab jedoch keine höhere Präzision und wurde daher nicht weiter berücksichtigt.

Die ermittelten kritischen Bereiche lassen sich auf die in Kapitel 4.5.2 dargestellten Zusammenhänge übertragen und würden einen kritischen Bereich der Steifigkeit unter Berücksichtigung der Tieftemperatureigenschaften definieren. Dieser ist nachfolgend beispielhaft für die Varianten der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 2 dargestellt. Der kritische Bereich ist farbig hinterlegt und kann für Messwerte bei 10 Hz und -10 °C wie in Bild 4-43 definiert werden.

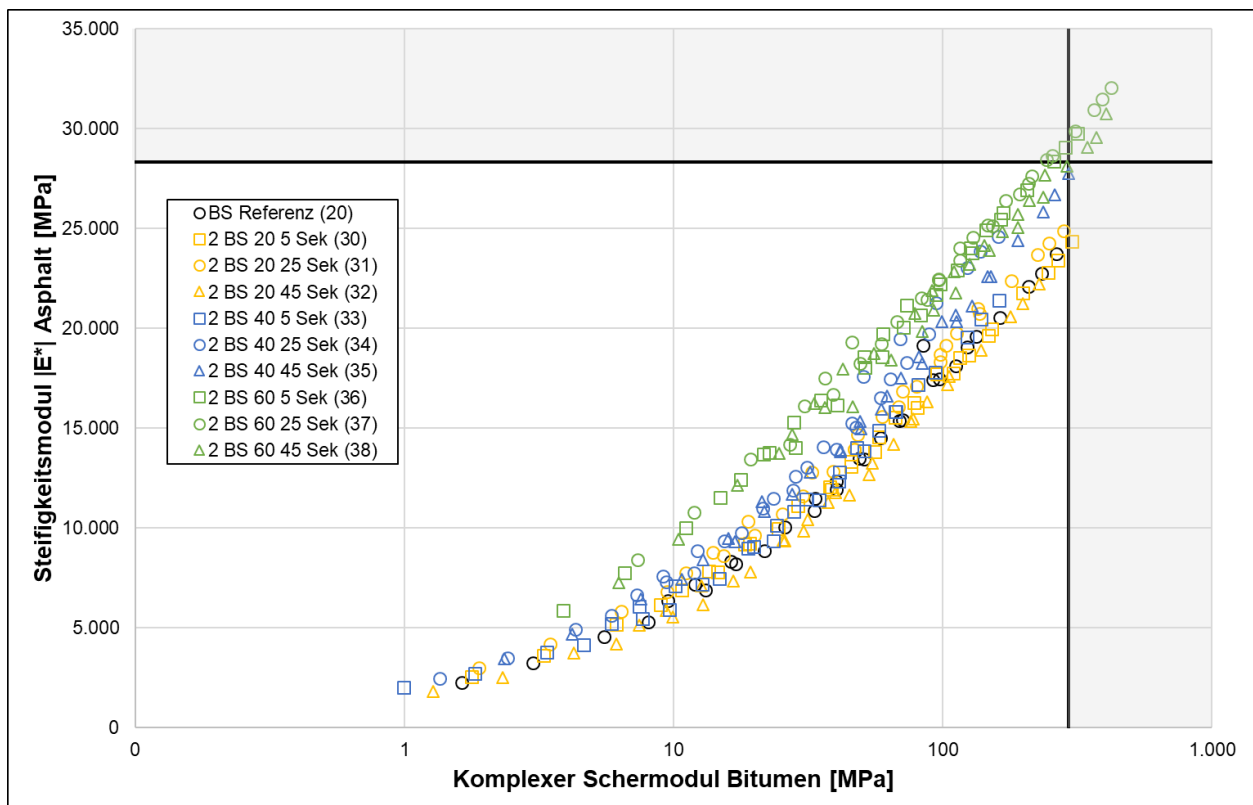


Bild 4-43: Definition kritischer Bereiche für die Asphalt- und Bindemittelsteifigkeit der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 2 unter Berücksichtigung der Tieftemperatur-Performance

Der vorgeschlagene Ansatz beschäftigt sich dementsprechend mit der Prüfung der Bindemittelleigenschaften, um unter Verwendung der dargestellten Zusammenhänge das Gebrauchsverhalten von Heißasphalt prognostizieren zu können.

4.5.4 Prognose der Asphaltsteifigkeiten anhand rheologischer Modelle

Die Steifigkeit von Asphalt spielt für die Dimensionierung von Asphaltbefestigungen eine maßgebende Rolle. Neben der prüftechnischen Ermittlung gibt es Ansätze zur Prognose der Steifigkeit anhand von Parametern der Mischgutzusammensetzung. National und international existieren dafür eine Vielzahl von Prognosemodellen.

In Deutschland wird im nationalen Regelwerk zur rechnerischen Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht [RDO Asphalt, 2009] auf das **Francken/Verstraeten-Modell** zur Prognose der Asphaltsteifigkeit verwiesen. Dieses kann zum Einsatz kommen sofern die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion nicht prüftechnisch ermittelt wurde und nur die Mischgutzusammensetzung bekannt ist. Allerdings ist die Gültigkeit dieser Funktion allenfalls bei Verwendung von Straßenbaubitumen anwendbar.

Im Zuge dieses Forschungsprojektes kam jedoch sowohl ein polymermodifiziertes Bindemittel sowie auch Asphaltgranulat zum Einsatz, weswegen das Francken/Verstraeten-Modell hier nicht weiter berücksichtigt wurde.

Ein weiteres Modell, welches Eingang in das nationale [FGSV-Arbeitspapier Nr. 65, 2006] gefunden hat, ist das **Shell-Modell**, welches von der deutschen Shell AG 1979 entwickelt wurde.

Im Shell-Modell wird, vergleichbar wie beim Francken/Verstraeten-Modell, der Elastizitätsmodul des Bitumens als Funktion aus Penetrationsindex (P.I.), Erweichungspunkt Ring und Kugel (T_{RK}), Prüftemperatur (T) und frequenzabhängiger Belastungszeit ($t = 1/f$) berechnet. Dementsprechend beruht auch das Shell-Modell auf konventionellen Bindemitteluntersuchungen und wird hier nicht tiefergehend untersucht.

In Amerika ist das **Witczak-Modell** im nationalen Regelwerk verankert. Dieses wurde von Fonseca und Witczak erstmals 1996 entwickelt und 1999 sowie 2006 modifiziert [FONSECA, WITZCAK, 1996] [WITZCAK et al., 1999] [BARI, WITZCAK, 2006]. Das 2006 modifizierte Prognosemodell berücksichtigt dabei neben dem Schermodul G_b^* , den Phasenwinkel (δ_b) des Bindemittels, die Korngrößenzusammensetzung an den Siebstellen ρ_{200} (Siebdurchgang durch Sieb Nummer 200) sowie ρ_4 (Siebdurchgang durch Sieb Nummer 4), ρ_{38} (Siebdurchgang durch das 3/8" Sieb) und ρ_{34} (Siebdurchgang durch das 3/4" Sieb), wie auch den Hohlraumgehalt (V_a) und das Bindemittelvolumen (V_{beff}).

Die Übertragbarkeit des Witczak-Modells auf europäische Mischgutzusammensetzung ist jedoch nur bedingt möglich, da die Rezepturen teils sehr unterschiedlich sind und im europäischen Regelwerk andere Kenngrößen in Bezug auf die Sieblinie gefordert werden. Aufgrund dieser Tatsache wurde dieses Modell ebenfalls nicht zur Analyse herangezogen.

Weitere international anerkannte Prognose-Modelle basieren auf dem **Hirsch-Modell**. Das Hirsch-Modell ist ein empirisches Verfahren zur Prognose der Asphaltsteifigkeit. Es basiert auf der „law of mixtures“ [NICHOLS, 1976] und beschreibt die Interaktion von parallel sowie in Serie geschalteten mechanischen Komponenten.

[CHRISTENSEN et al., 2003] befassten sich mit der Anwendung des Hirsch-Modells zur Prognose der Asphaltsteifigkeit. Über mehrere Jahre verfolgte das Forschungsteam den Ansatz von Hirsch und analysierte dabei systematisch Einflussgrößen aus der Mischgutzusammensetzung und der volumetrischen Zusammensetzung von Asphalt. Basierend auf den Forschungsergebnissen wurden mehrere zielführende Ansätze entwickelt.

Dabei wurde festgestellt, dass sich für Mischgutzusammensetzungen nach amerikanischem Standard die Asphaltsteifigkeit mit Hilfe der Schubsteifigkeit des Bindemittels G_{bit}^* nach Gleichung 1 prognostizieren lässt. Diese berücksichtigt das Kontaktvolumen P_c , welches nach Gleichung 2 bestimmt werden kann.

$$|E^*| = P_c \left[4.200.000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3 |G_{bit}^*| \left(\frac{VFB \cdot VMA}{10.000} \right) \right] + (1 - P_c) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4.200.000} + \frac{VMA}{VFB \cdot 3 |G_{bit}^*|} \right]^{-1} \quad \text{(Gleichung 1)}$$

$$\text{Mit} \quad P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFB \cdot 3 |G_{bit}^*|}{VMA} \right)^{0,58}}{650 + \left(\frac{VFB \cdot 3 |G_{bit}^*|}{VMA} \right)^{0,58}} \quad \text{(Gleichung 2)}$$

Im Jahr 2014 wurde in Österreich im Rahmen der Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2011 ein Forschungsprojekt zur Implementierung des GVO- und LCCA-Ansatzes in die österreichische Bemessungsmethode für Straßenoberbauten initiiert. Im Zuge dieses Forschungsprojektes sollte basierend auf

dem Ansatz von Christensen die Übertragbarkeit des Materialmodells auf europäische Mischgutzusammensetzungen untersucht werden [OBESTO, 2014].

Die bei [CHRISTENSEN et al., 2003] ermittelten Koeffizienten P_0 bis P_2 wurden erneut parametrisiert und anhand von 1.572 vorliegenden Datensätzen, zu Mischgutzusammensetzungen nach europäischem Standard, neu ausgewertet. Das Hirsch-Modell nach Christensen wurde zu dem nachfolgenden **Wiener-Modell** modifiziert und ist in den Gleichungen 3 und 4 dargestellt:

$$|E^*| = \frac{P_c}{145,0377} \left[a \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 145,0377 * 3 |G_{bit}^*| \left(\frac{VFB * VMA}{10.000} \right) \right] + \frac{(1 - P_c)}{145,0377} \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{a} + \frac{VMA}{VFB * 145,0377 * 3 |G_{bit}^*|} \right]^{-1}$$

(Gleichung 3)

Mit
$$P_c = \frac{(b + \frac{VFB * 145,0377 * 3 |G_{bit}^*|}{VMA})^c}{d + (\frac{VFB * 145,0377 * 3 |G_{bit}^*|}{VMA})^c}$$
 (Gleichung 4)

Die Auswertung erfolgte dabei differenziert für Straßenbaubitumen anhand von 333 Datensätzen unter Verwendung eines Bindemittels 70/100 und für ein polymermodifiziertes Bitumen 45/80-65 anhand von 1.239 Datensätzen unterschiedlicher volumetrischen Zusammensetzungen.

Die Auswertung ergab für die Prognose mit einem hohen Vertrauensniveau folgende Parameter:

	a	b	c	d	Vertrauensniveau	R ²
Straßenbaubitumen	3.918.366	687,25	1,05	135.252,8	95 %	0,92
Polymermod. Bitumen	8.289.775	9.997,45	1,01	309.275,4		0,91

Tab. 4-29: Parameter zur Prognose der Asphaltsteifigkeit in Abhängigkeit von der Bindemittelart [OBESTO, 2014]

Die im Wiener-Modell verwendeten Bindemittel wurden in dem vorliegenden Forschungsprojekt nicht verwendet, daher wurde das Wiener-Modell hier nicht weitergehend betrachtet.

Zur Prognose der Asphaltsteifigkeiten wurde im Zuge dieses Forschungsprojektes das Hirsch-Modell nach Christensen berücksichtigt. In Bild 4-44 und Bild 4-45 sind die für die Asphalttragschichten aus diesem Modell prognostizierten Werte den gemessenen gegenübergestellt, während in Bild 4-46 und Bild 4-47 die prognostizierten und gemessenen Werte für die Asphaltbinderschichten dargestellt sind.

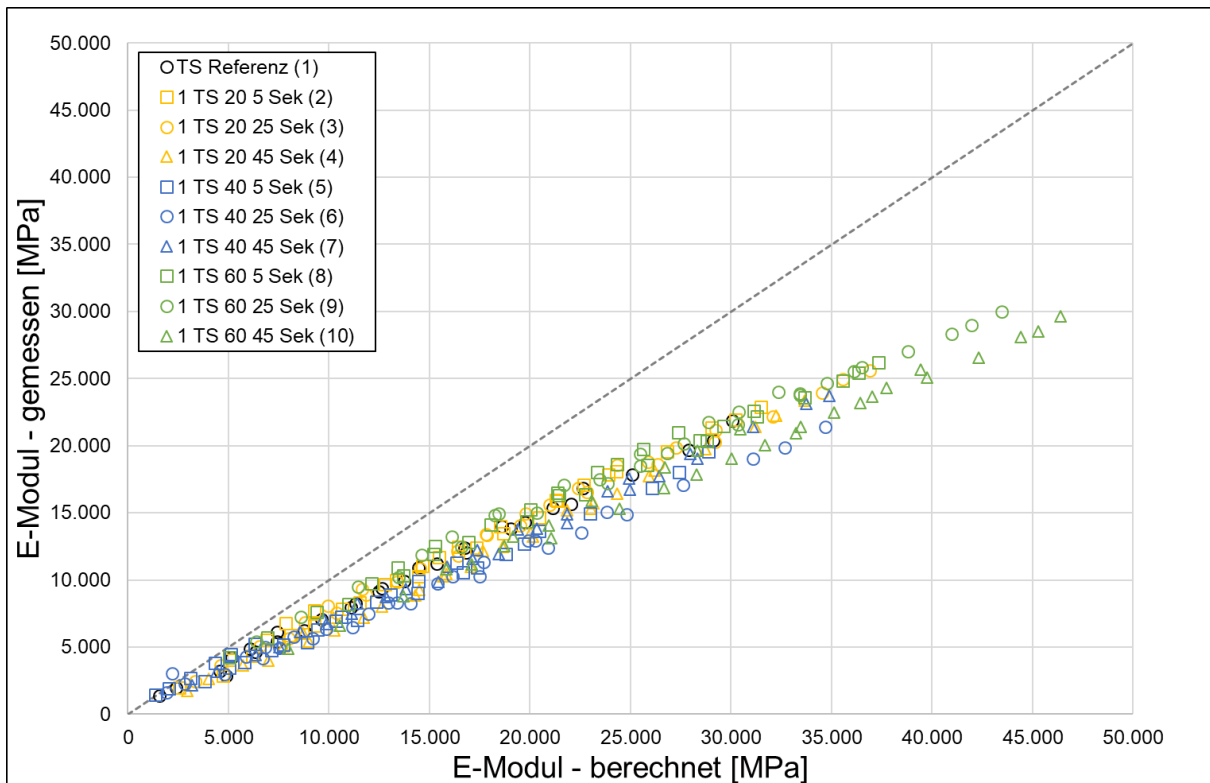


Bild 4-44: Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und Modellprognose für die Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat 1

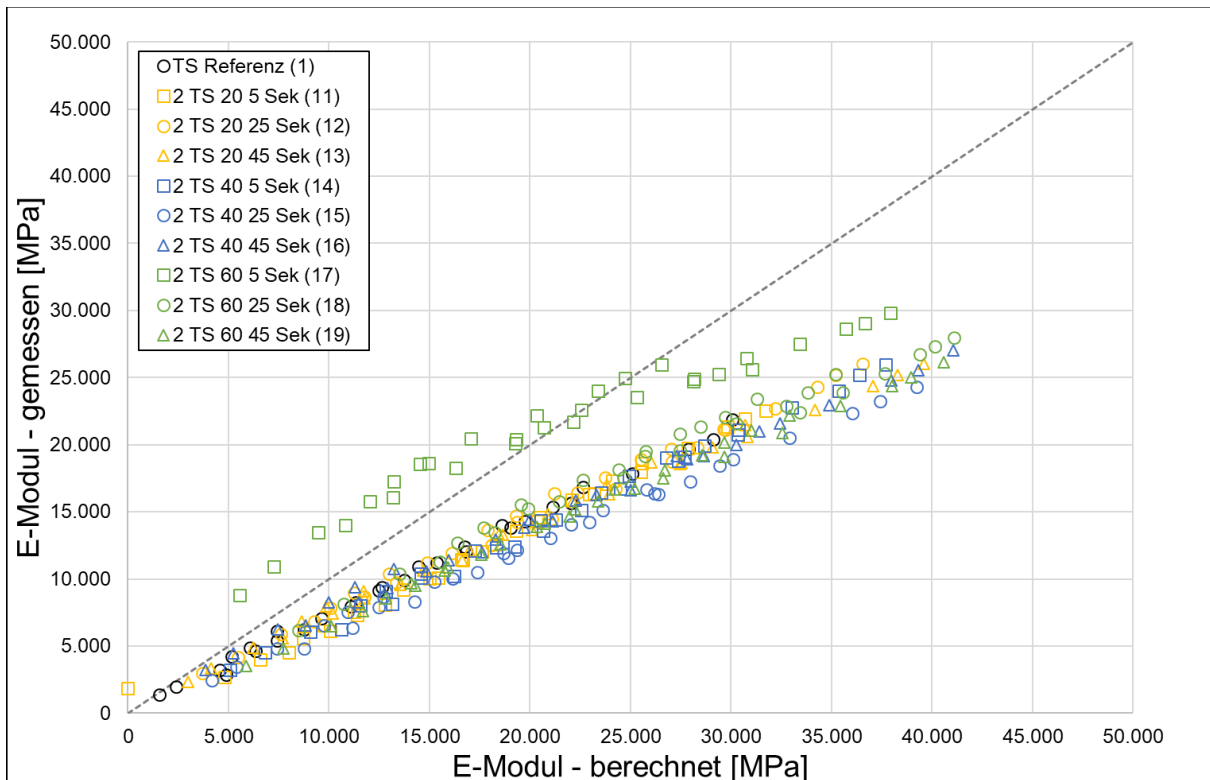


Bild 4-45: Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und Modellprognose für die Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat 2

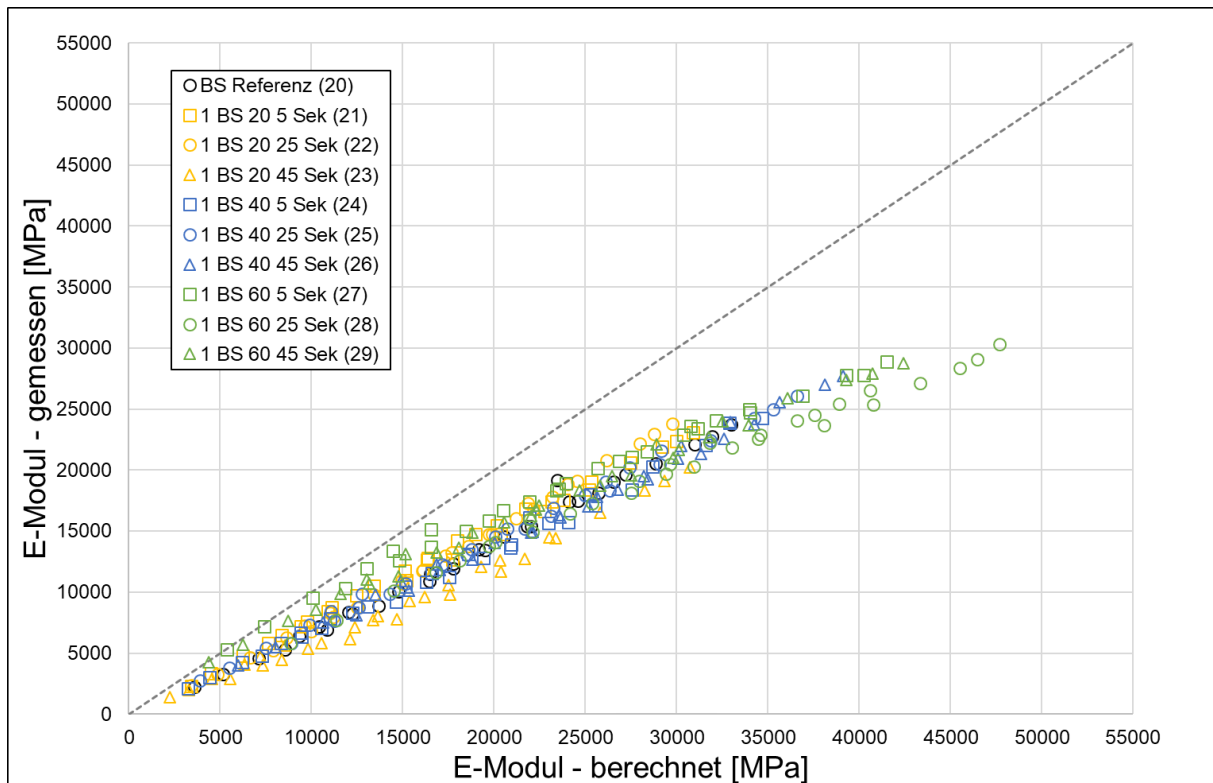


Bild 4-46: Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und Modellprognose für die Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 1

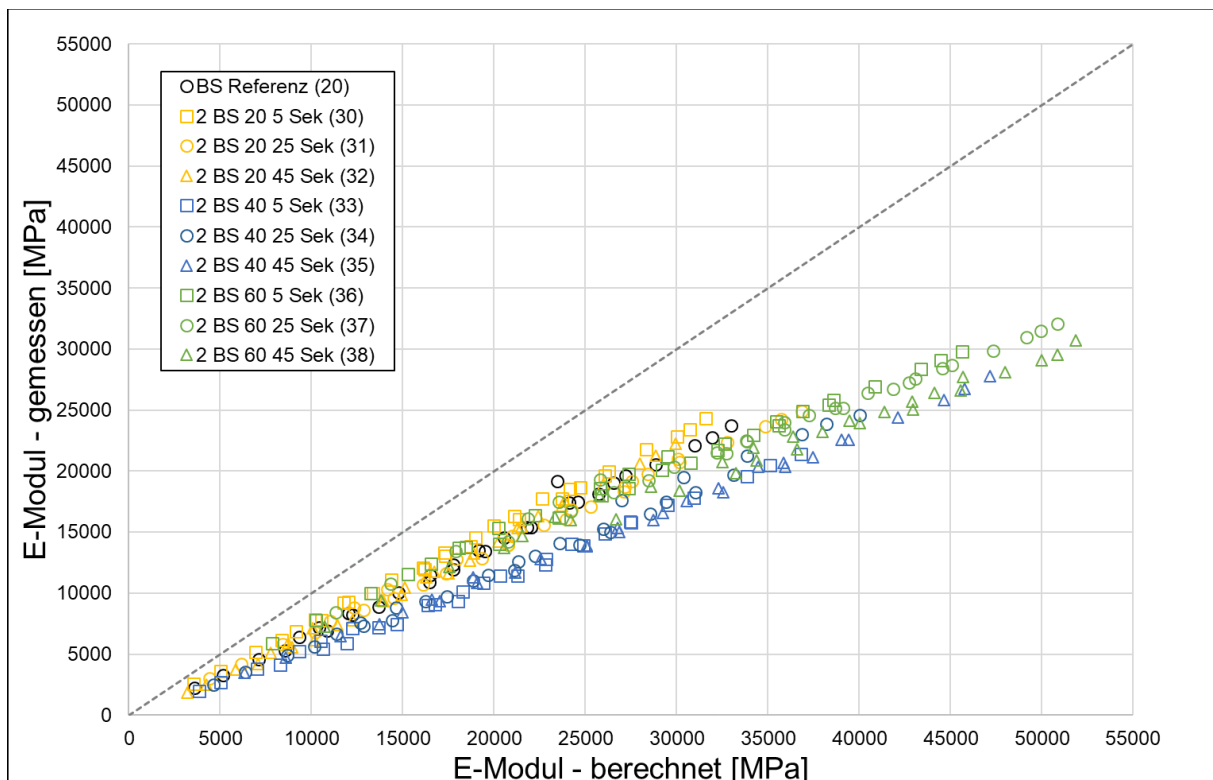


Bild 4-47: Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und Modellprognose für die Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 2

5 Validierung der Forschungsergebnisse anhand der Untersuchung von Praxisproben

Der Vergleich zwischen der Performance von labor- und praxisverdichteten Asphaltprobekörpern sollte abschließend für die Varianten ohne und mit maximaler Asphaltgranulatzugabemenge (60 M.-%) mit 25 Sekunden Nachmischzeit durchgeführt werden.

Für diesen Schritt wurde am 22.09.2020 durch die Firma Hermann Bettels Tief- und Straßenbau GmbH auf dem Gelände des Asphaltmischwerkes der DEUTAG Nord in Groß Bülten der Einbau unter Verwendung eines Fertigers Super 1600-2 von Vögele und einer Walze des Modells Hamm HD12 bei besten Wetterkonditionen (trocken, sonnig, ca. 20-24 °C) realisiert (Bild 5-1).



Bild 5-1: Einbau der Praxisvarianten

Von jeder Asphaltmischgutvariante wurde eine Menge von ca. 25 t (1 Lkw) hergestellt und nacheinander eingebaut. Die Einbaulänge jeder Variante betrug ca. 35 m, bei einer Einbaubreite von 3 m und 10 cm Schichtdicke. Die Übergangsbereiche wurden dabei für die nachfolgende Bohrkernentnahme farbig markiert.

Die Tab. 5-1 fasst die beim Einbau gemessenen Mischguttemperaturen für alle Variante zusammen.

Variante	Mischguttemperatur im Fertigerkübel
Referenzvariante Tragschicht (TS Ref PX)	163,0 °C
Tragschicht mit 60 % AG 1 (1 TS 60 PX)	149,0 °C
Tragschicht mit 60 % AG 2 (2 TS 60 PX)	153,0 °C
Referenzvariante Binderschicht (BS Ref PX)	173,0 °C
Binderschicht mit 60 % AG 1 (1 BS 60 PX)	153,0 °C
Binderschicht mit 60 % AG 2 (2 BS 60 PX)	156,0 °C

Tab. 5-1: Dokumentation der Einbautemperaturen für die durchgeführte Baumaßnahme

Im Anschluss wurden für die Durchführung der Spaltzug-Schwellversuche und zur Bestimmung der Ermüdungsfunktion sowie der Steifigkeits-Temperaturfunktion und des Tieftemperaturverhaltens Bohrkernentnommen und im Labor für die Prüfungen präpariert.

Darüber hinaus wurden Rückstellproben genommen, extrahiert und am rückgewonnenen Bindemittel Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer im selben Frequenz- und Temperaturbereich, wie bei den in Kapitel 4.4.1 dargestellten Proben aus der großtechnischen Herstellung, geprüft. Der Vergleich der Bindemittelkenngrößen von großtechnisch hergestelltem Asphaltmischgut und dem der Praxisstrecke ist in Bild 5-2 visualisiert. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang Teil C dokumentiert.

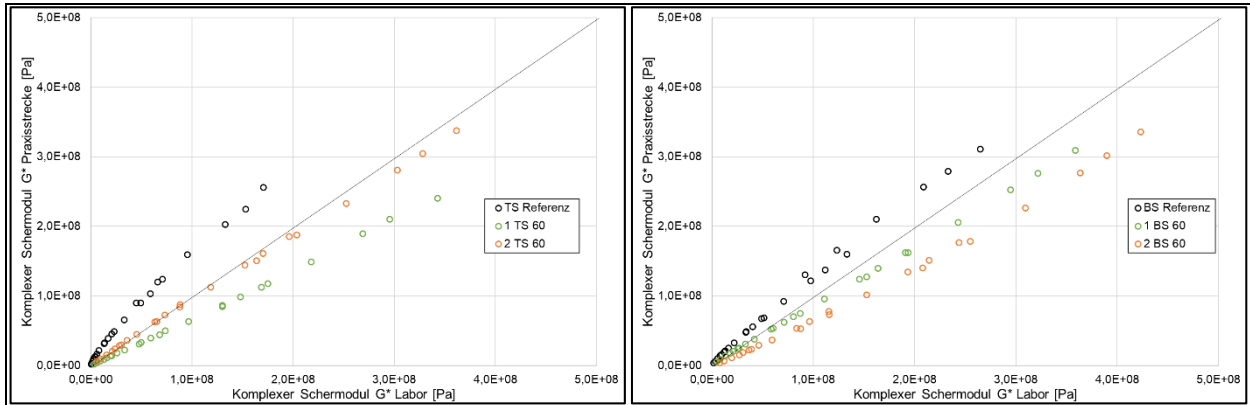


Bild 5-2: Vergleich der Bindemittelsteifigkeiten der großtechnisch hergestellten Varianten mit denen der Praxisvarianten

Basierend auf diesen Gegenüberstellungen ist festzustellen, dass die zugegebenen Frischbindemittel bei der Praxisstrecke eine höhere Steifigkeit aufwiesen, was aus den jeweiligen Referenzvarianten, ohne Asphaltgranulat, abzulesen ist. Eine Verschiebung der jeweiligen Varianten mit Asphaltgranulat in Richtung härterer resultierender Bindemittelhärte kann jedoch nicht festgestellt werden. Im Widerspruch zu der höheren Bindemittelsteifigkeit der Frischbindemittel weisen die Praxisvarianten mit Asphaltgranulat eine geringere resultierende Bindemittelsteifigkeit auf.

Die Ergebnisse der einaxialen Zugversuche nach [DIN EN 12697-46] sind in Tab. 5-2 unter Angabe der Zugfestigkeit β_t und der Ausfalldehnung $\epsilon_{\text{Ausfall}}$ ausgewertet.

Zusammensetzung	Einaxiale Zugversuche bei:							
	20 °C		5 °C		-10 °C		-25 °C	
	β_t [MPa]	$\epsilon_{\text{Ausfall}}$ [%]	β_t [MPa]	$\epsilon_{\text{Ausfall}}$ [%]	β_t [MPa]	$\epsilon_{\text{Ausfall}}$ [%]	β_t [MPa]	$\epsilon_{\text{Ausfall}}$ [%]
TS Ref PX	0,538	0,99	2,292	0,40	3,425	0,05	3,632	0,03
1 TS 60 PX	1,052	0,35	3,089	0,26	3,539	0,04	3,338	0,02
2 TS 60 PX	1,371	0,42	3,336	0,17	3,583	0,04	3,011	0,03
BS Ref PX	0,399	0,83	2,090	0,23	3,272	0,04	2,899	0,02
1 BS 60 PX	0,867	0,24	2,912	0,19	4,204	0,05	4,202	0,02
2 BS 60 PX	1,348	0,27	3,196	0,10	3,668	0,03	2,993	0,02

Tab. 5-2: Ergebnisse der einaxialen Zugversuche an den Praxisvarianten

An den sechs Praxisvarianten wurden ebenfalls Abkühlversuche nach [DIN EN 12697-46] durchgeführt. Die Ergebnisse der Ausfallspannung $\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$ und der Ausfalltemperatur T_{Ausfall} sind in Tab. 5-3 zusammengefasst. Zusätzlich wurde die maximale Zugfestigkeitsreserve $T_{\Delta \beta, \text{max}}$ zusammen mit dem Höchstwert der Zugfestigkeitsreserve $\Delta \beta_{t, \text{max}}$ ausgewertet und in Tab. 5-3 dokumentiert.

Zusammensetzung	Abkühlversuch		Zugfestigkeitsreserve	
	$\sigma_{\text{kry,Ausfall}}$ [MPa]	T_{Ausfall} [°C]	$T_{\Delta \beta, \text{max}}$ [°C]	$\Delta \beta_{t, \text{max}}$ [MPa]
TS Ref PX	3,200	-27,3	-5,1	2,836
1 TS 60 PX	2,404	-21,9	-4,6	3,164
2 TS 60 PX	3,240	-20,9	+2,7	3,090
BS Ref PX	3,560	-28,7	-5,4	2,756
1 BS 60 PX	3,423	-26,4	-4,4	3,341
2 BS 60 PX	2,370	-18,8	+0,2	3,062

Tab. 5-3: Ergebnisse der Abkühlversuche und der Zugfestigkeitsreserven an den Praxisvarianten

Der Vergleich der Zugfestigkeiten von laborverdichteten Proben (Tab. 4-14) und den Praxisvarianten (Tab. 5-3) ist in Bild 5-3 dargestellt.

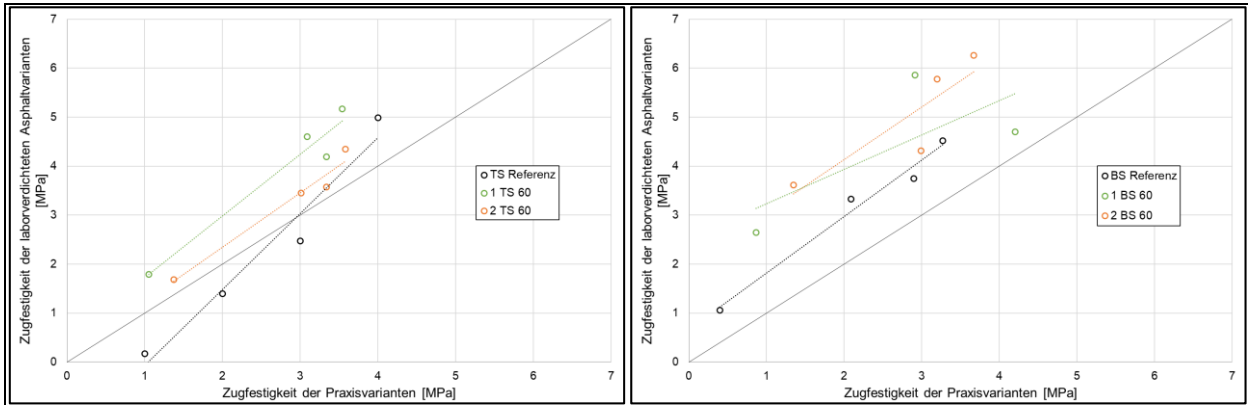


Bild 5-3: Vergleich der Ergebnisse der einaxialen Zugfestigkeit von labor- und praxisverdichtetem Asphaltmischgut

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Vergleichbarkeit zwischen der einaxialen Zugfestigkeit von laborverdichtetem und aus einer Praxisstrecke entnommenen Asphaltmischgut für das geprüfte Material hier nicht gegeben ist. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Messpräzision des Prüfverfahrens nicht eingehalten werden konnte.

Der Vergleich der Ergebnisse der Abkühlversuche zeigt ebenfalls kein vergleichbares Niveau der Absolutwerte. Bei den Abkühlversuchen ergibt sich jedoch die gleiche Reihenfolge für die Bruchtemperatur in Abhängigkeit von der Asphaltgranulatzugabemenge und einer damit einhergehenden erhöhten Bindemittelsteifigkeit. Diese Systematik entspricht dem prognostizierten Zusammenhang.

Die detaillierten Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche sind im Anhang Teil C dokumentiert. Für eine vergleichende Betrachtung der Messergebnisse wurde der Bericht in diesem Kapitel auf Abbildungen mit relevanten Zusammenhängen reduziert.

In Bild 5-4 sind die Ermüdungsfunktionen der Praxisvarianten zusammen mit denen der laborverdichteten Proben dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse der Asphalttragschichten (links) und der Asphaltbinderschichten (rechts) separiert.

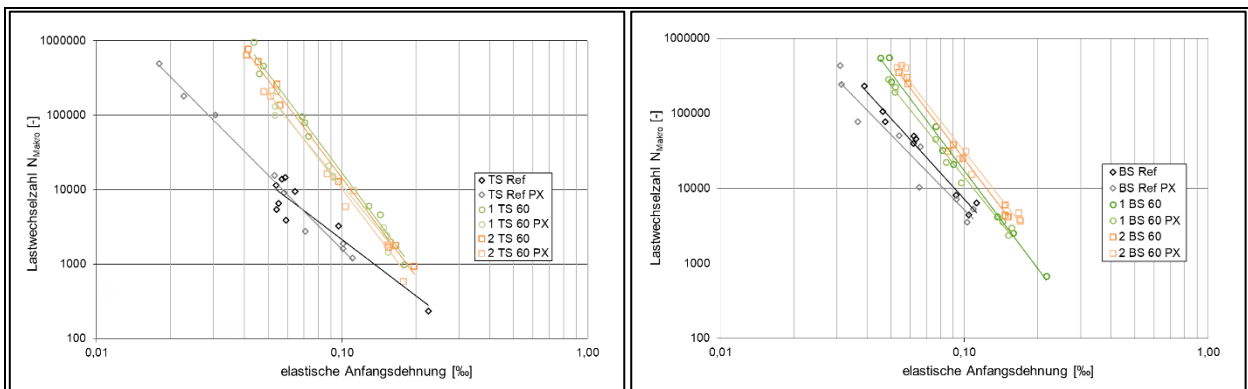


Bild 5-4: Vergleich der Ermüdungsfunktionen der großtechnisch hergestellten Varianten mit denen der Praxisvarianten

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Ermüdungsfunktionen der jeweiligen Varianten auf einem ähnlichen Niveau liegen. Die Reihung der Ermüdungsfunktionen in Abhängigkeit von den Prüfvarianten bestätigt sich.

Der Vergleich der Asphaltsteifigkeiten erfolgte im selben Frequenz- und Temperaturband wie bei den in Kapitel 4.4.6 dargestellten Untersuchungen. Ein Vergleich zwischen den labor- und praxisverdichteten Mischgutproben ist in Bild 5-5, getrennt nach Asphalttrag- (links) und Asphaltbinderschicht (rechts) dargestellt.

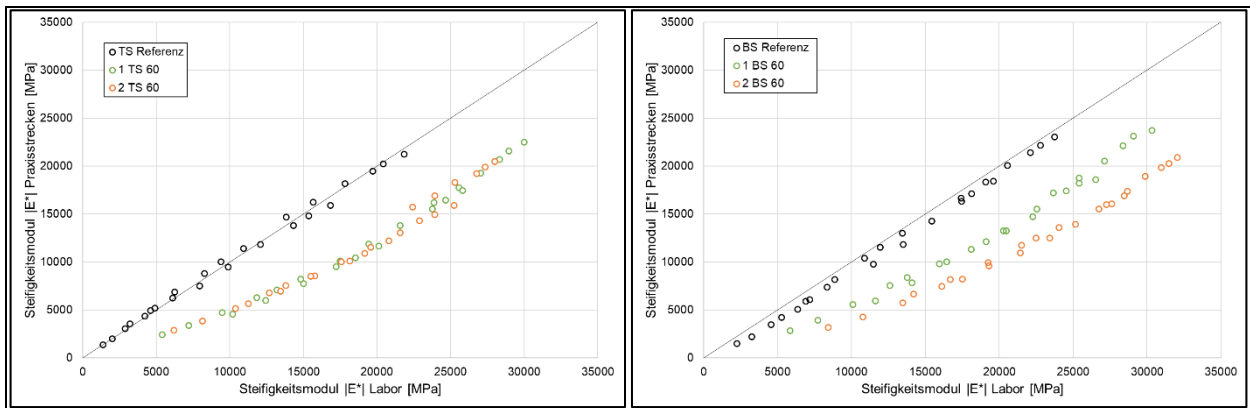


Bild 5-5: Vergleich der Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen an labor- und praxisverdichtetem Asphaltmischgut.

Wie in Bild 5-5 dargestellt, haben die Referenzvarianten der beiden Herstellungsverfahren sehr ähnliche Steifigkeiten. Die Varianten mit Asphaltgranulat dagegen weisen sowohl in der Asphalttrag- wie auch in der Asphaltbinderschicht bei der Praxisvariante deutlich geringere Steifigkeiten auf. Die Auswertung des Verdichtungszustandes der Praxisstrecke ergab, dass einige Bohrkerne lediglich einen Verdichtungsgrad von knapp 96 % aufwiesen (siehe Tab. 5-4). Der geringere Verdichtungsgrad kann möglicherweise auch auf die ungünstigen Randbedingungen beim Einbau, wie Unterlagensteifigkeit und Walzengewicht, zurückgeführt werden.

Variante	Verdichtungsgrad [%]
Referenzvariante Tragschicht (TS Ref PX)	98,0
Tragschicht mit 60 % AG 1 (1 TS 60 PX)	96,9
Tragschicht mit 60 % AG 2 (2 TS 60 PX)	96,2
Referenzvariante Binderschicht (BS Ref PX)	97,6
Binderschicht mit 60 % AG 1 (1 BS 60 PX)	98,5
Binderschicht mit 60 % AG 2 (2 BS 60 PX)	95,2

Tab. 5-4: Verdichtungsgrad der Praxisvarianten

Der Quervergleich zwischen den verwendeten Prüfmethode lässt keine eindeutige Schlussfolgerung zu. Die festgestellte höhere Steifigkeit der verwendeten Frischbindemittel (Bild 5-2) lässt sich insbesondere in Bezug auf die Ergebnisse der Spaltzug-Schwellversuche zur Bestimmung der Steifigkeits-Temperaturfunktion nicht nachvollziehen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung des Gebrauchsverhaltens von Heißasphalt mit Asphaltgranulat wurden 38 Asphaltmischgutvarianten, unter Verwendung von zwei unterschiedlichen Asphaltgranulaten und Berücksichtigung verschiedener Nachmischzeiten, großtechnisch an einer Asphaltmischanlage hergestellt. Nach großtechnischen Voruntersuchungen wurde eine geringe (5 Sekunden), eine ausreichende (25 Sekunden) und eine erhöhte (45 Sekunden) Nachmischzeit an der Asphaltmischanlage festgelegt. Aus den Asphaltmischgutvarianten wurden Prüfkörper für die Performance-Untersuchungen hergestellt sowie das Asphaltmischgut hinsichtlich der Zusammensetzung und der Bindemittleigenschaften geprüft. Anhand dieser Untersuchungen sollte u.a. die Auswirkung der Nachmischzeit hinsichtlich des Homogenisierungsgrades analysiert werden.

Ein Ansatz zur Ermittlung der Intensität des Aufschlusses des Asphaltgranulates war die vergleichende Betrachtung der Bindemittel- und Asphaltsteifigkeiten. Um dabei direkte Zusammenhänge analysieren zu können, wurden zur Ermittlung der Asphaltmischgutzusammensetzung und der Bindemittelkennwerte die Asphalt-Probepplattenreste extrahiert. Die Analyse der Extraktionsergebnisse ergab ebenfalls teils deutliche Abweichung der Hohlraumgehalte verglichen mit den Ergebnissen der Erstprüfung. Zur Vergleichbarkeit der Steifigkeiten wurden die Untersuchungen im DSR und mit dem Spaltzug-Schwellversuch im gleichen Temperatur- und Frequenzbereich durchgeführt. Bei der vergleichenden Betrachtung der Ergebnisse konnte kein systematischer Einfluss der Nachmischzeit und somit kein indirekter Nachweis der Intensität des Aufschlusses des Asphaltgranulates festgestellt werden.

Für die Bewertung des Gebrauchsverhaltens der Asphaltmischgutvarianten wurden fünf Performance-Untersuchungen durchgeführt: Verdichtbarkeit des Asphaltes mit Hilfe des Marshall-Verfahrens, Untersuchungen zur Verformungsbeständigkeit mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch, Prüfung des Tieftemperaturverhaltens sowie Bestimmung der Ermüdungsfunktion und Steifigkeits-Temperaturfunktion mit dem Spaltzug-Schwellversuch.

Die Analyse der Ergebnisse der Verdichtbarkeit des Asphaltes mit Hilfe des Marshall-Verfahrens ergab, dass diese zur Ableitung eines Performance-Kriteriums zu wenig differenzieren. Ein Einfluss der Nachmischzeit konnte nicht nachgewiesen werden.

Bei den Untersuchungen zur Verformungsbeständigkeit musste festgestellt werden, dass die Verfahrenspräzision nicht eingehalten werden konnte. Die Inhomogenität der Proben besonders bei der geringen Nachmischzeit von 5 Sekunden könnte dafür ursächlich sein. Aber auch die Probengeometrie ist für die in diesem Forschungsprojekt verwendeten Varianten zu hinterfragen. Aufgrund der unterschiedlichen Abbruchkriterien in Kombination mit den unterschiedlichen Verläufen ist eine generelle Beurteilung der Nachmischzeit sowie der Zugabemenge des Asphaltgranulates basierend auf diesem Verfahren nicht zielführend.

Das Tieftemperaturverhalten der Asphaltvarianten wurde durch Abkühlversuche und einaxiale Zugversuche untersucht. Bei der Analyse der Ergebnisse der einaxialen Zugversuche wurde eine große Messstreuung der Einzelversuche festgestellt, sodass die einaxialen Zugversuche zur Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums als kritisch angesehen werden. Die Ergebnisse der Abkühlversuche ergaben einen Zusammenhang mit der Bindemittelsteifigkeit des extrahierten Bindemittels und somit wird die Bruchtemperatur als Beurteilungsgröße zur Definition eines kritischen Bereichs der Bindemittelsteifigkeit als geeignet angesehen.

Bei der Ermittlung der Ermüdungsfunktion mit dem Spaltzug-Schwellversuch wurde eine deutliche Differenzierung der Ergebnisse aufgrund der unterschiedlichen Nachmischzeiten erwartet. Diese These konnte basierend auf den Messergebnissen nicht bestätigt werden. Zur Differenzierung der drei Spannungszustände mussten zur Bestimmung der Ermüdungsfunktionen auch sehr geringe anfängliche elastische Dehnungen $< 0,05 \%$ berücksichtigt werden, woraus geschlossen werden kann, dass die untersuchten Varianten ein vergleichsweise schlechtes Ermüdungsverhalten aufwiesen.

Bei den mit dem Spaltzug-Schwellversuch ermittelten Steifigkeitsmoduln der untersuchten Asphaltvarianten konnten keine eindeutigen Abhängigkeiten der verschiedenen Nachmischzeiten festgestellt werden. Bei Betrachtung der Zugabemenge der Asphaltgranulate war anhand der Messergebnisse nur die Differenzierung der höchsten Zugabemenge möglich. Darüber hinaus wurde in diesem Forschungsprojekt eine Strukturveränderung (mikrostrukturelle Umlagerungen im Bitumen) infolge einer konservierten Langzeitlagerung von Bohrkernen untersucht. Dafür wurden die Bohrkern in dem nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

definierten Prüfzeitraum und anschließend nach 14,5 Monaten Lagerungsdauer geprüft. Die Messergebnisse lagen dabei in der Präzision des Verfahrens. Eine Strukturveränderung der Probekörper konnte anhand der untersuchten Varianten nicht festgestellt werden.

Die Streuungen von Untersuchungsergebnissen hängen allgemein von der Präzision des jeweiligen Prüfverfahrens, der sorgfältigen Gewinnung der Messprobe aus der Laboratoriumsprobe und der Entnahme von Mischgutproben auf der Baustelle oder in einem Asphaltmischwerk ab.

Die Rahmenbedingungen dieses Forschungsprojektes enthielten Einschränkungen hinsichtlich des durchführbaren Aufwandes bei der Entnahme der Mischgutproben, die vermutlich zu den teilweise sehr großen Streuungen der Untersuchungsergebnisse beigetragen haben. Aus diesen Erkenntnissen können die folgenden Empfehlungen für zukünftige Projekte abgeleitet werden, um Streuungen durch die Probenahme von Mischgutproben zu minimieren:

- Asphaltgranulat: die benötigte Teilmenge sollte aus einem großen Haufwerk separiert und gesondert homogenisiert werden. Vor der Verwendung sollte eine Klassifizierung gemäß [TL AG-StB 09] stattfinden. Die Kriterien für die Gleichmäßigkeit sollten vorab festgelegt werden. Dabei sollten erhöhte Anforderungen gestellt werden, so dass z. B. eine maximale Zugabemenge für Asphalttragschichten von mindestens 80% erreicht wird.
- An- und Abfahren der Asphaltmischanlage: für jede Asphaltmischgutvariante sollte das separate An- und Abfahren der Asphaltmischanlage vorgegeben werden. Das bedeutet, dass jeweils die folgenden Schritte berücksichtigt werden müssen:
 - Abziehen sämtlicher Gesteinskörnungen, die sich noch in der Mischanlage befinden, inklusive eventuell vorhandener Vorräte an erhitztem Asphaltgranulat.
 - Erhitzen von frischen Gesteinskörnungen und frischem Asphaltgranulat.
 - Herstellen des gewünschten Mischguts. Die Menge muss so groß ausgelegt werden, dass die Füllstände der Gesteinsbehälter nicht mehr schwanken. Erfahrungsgemäß müssen 15 bis 20 t Asphaltmischgut hergestellt werden, bevor sich ein Gleichgewicht eingestellt hat und ein repräsentatives Asphaltmischgut hergestellt werden kann. Erst dann kann die Probenahme der Mischgutproben erfolgen.
- Probenahme von Mischgutproben: eine Menge von 2 bis 3 t (je nach optimaler Chargengröße) wird in die Radladerschaufel überführt. Der Radlader entleert die Charge auf einer befestigten Unterlage und zieht das Haufwerk mit der Schaufel glatt, so dass eine ca. 20 cm dicke Asphaltsschicht entsteht. Die Befüllung jedes einzelnen Mischguteimers erfolgt durch kleine Schaufeln aus mindestens 10 gleichmäßig über die Fläche verteilten Entnahmestellen der Asphaltsschicht. Für jeden Mischguteimer sollten dieselben 10 Entnahmestellen verwendet werden.

Für die Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums wurden sowohl Bindemittel- als auch Asphaltkennwerte verwendet. Basierend auf der Literaturrecherche wurden Methoden gesucht, welche als geeignet zur Prognose der Performance-Eigenschaften von Asphalt eingestuft werden können. Dabei wurden insbesondere Modelle zur Prognose der Asphaltsteifigkeit, basierend auf Bindemittelkenngrößen und volumetrischen Kenngrößen des Asphaltmischguts betrachtet. In diesem Forschungsprojekt wurde das Hirsch-Modell nach Christensen verwendet. Dabei musste festgestellt werden, dass die prognostizierten Asphaltsteifigkeiten noch nicht abschließend zufriedenstellend mit den Messergebnissen übereinstimmen und die tatsächlich vorhandenen Steifigkeiten systematisch unterschätzen. Die Adaptierung des Modells auf europäische Mischgutzusammensetzungen, wie es im Wiener-Modell bereits für zwei ausgewählte Bindemittel realisiert wurde, ist anzustreben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass basierend auf den Ergebnissen dieses Forschungsprojektes keine finale Bewertung des Gebrauchsverhaltens von Heißasphalt mit Asphaltgranulat möglich ist. Die vielen Einflussparameter, wie die großtechnische Herstellung, Variation der Nachmischzeit, Auswahl von Asphaltgranulat mit einer sehr hohen Bindemittelhärte sowie die Variation der Asphaltgranulatzugabemenge resultierten in teils stark inhomogenen Proben, welche eine systematische Analyse schwierig machten. Es wird empfohlen in weiterer Forschung die einzelnen Einflussfaktoren systematisch in einem Labormaßstab zu analysieren, um unerwünschte Effekte auf die Asphalt-Performance identifizieren und für die weitere Prüfung ausschließen zu können.

Durch die festgestellten Zusammenhänge zwischen den Bindemittelkenngrößen und der Asphalt-Performance im Tieftemperaturbereich sowie der Asphaltsteifigkeit lässt sich jedoch eine Empfehlung für den

weiteren Umgang mit Asphaltgranulat definieren. So können Mischguthersteller anhand einer Probemischung mit Asphaltgranulat sowie einer anschließenden Extraktion und DSR-Prüfung des Bindemittels die Performance-Wirkung im Asphaltmischgut, basierend auf den in Kapitel 4.5.3 dargestellten Zusammenhängen, prognostizieren. Zur Kontrolle der Asphalt-Performance sind für den Auftraggeber Prüfungen von Steifigkeits- und/oder Abkühlversuchen zu empfehlen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Datengrundlage dieses Forschungsprojektes, unter anderem aufgrund bewusst gewählter Inhomogenität bei 5 s Nachmischzeit, zu schwach für eine finale Aussage ist und durch weitere Forschung validiert werden sollte.

Literatur

[AL-QADI et al., 2007]:

Al-Qadi, Imad L.; Elseifi, Mostafa A.; Carpenter, Samuel H.: Reclaimed Asphalt Pavement - A Literature Review. Hg. v. Illinois Department of Transportation. Illinois Center for Transportation, 2007

[AP TTV, Teil 1]:

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

[ARAND; RENKEN, 1994]:

Arand, W., Renken, P.: Verwendung größtmöglicher Ausbauasphaltanteile im Straßenbau. Schlussbericht zum BMFT-Forschungsvorhaben Nr. Q 27, Braunschweig, 1994

[AV ÜBER TL ASPHALT-STB 07/13 (BERLIN)]:

Ausführungsvorschriften zu § 7 des Berliner Straßengesetzes über Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. AV über TL Asphalt-StB 07/13 (Berlin), Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Mai/2015

[BARI, WITZCAK, 2006]

Bari, Javid; Witczak, Matthew W.: Development of a New Revised Version of the Witczak E* Predictive Model for Hot Mix Asphalt Mixtures. In: Conference Paper for Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 2006

[BRESSI et al., 2015a]:

Bressi, Sara; Cavalli, Maria Chiara; Partl, Manfred N.; Tebaldi, Gabriele; Dumont, Andre Gilles; Poulidakos, Lily D.: Particle clustering phenomena in hot asphalt mixtures with high content of reclaimed asphalt pavements. In: *Construction and Building Materials* 100, S. 207–217, 2015

[BRESSI et al., 2015b]:

Bressi, Sara; Dumont, André-Gilles; Pittet, Michel: Cluster phenomenon and partial differential aging in RAP mixtures. In: *Construction and Building Materials* 99, S. 288–297, 2015

[BTR RC-STB]:

Brandenburgische Technische Richtlinien für Recycling-Baustoffe im Straßenbau. BTR RC-StB, Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz und das Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg

[CHRISTENSEN, et al., 2003]

Christensen D.W., T.K. Pellinen und R.F. Bonaquist: Hirsch Model for Estimating the Modulus of Asphalt Concrete. In: *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 72, Lexington, KY, 2003

[DANIEL; LACHANCE, 2005]:

Daniel, Jo Sias; Lachance, Aaron: Mechanistic and Volumetric Properties of Asphalt Mixtures with RAP. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1929 (1), 2005

[Deutscher Asphaltverband, 2019]:

Deutscher Asphaltverband e. V.: Wiederverwendung von Asphalt und alternative Verwendungskonzepte für Asphaltgranulat zur weiteren Steigerung der Nachhaltigkeit. Hg. v. Deutscher Asphaltverband e. V. Bonn, 2019

[Deutscher Asphaltverband, 2020]:

Asphaltproduktion in Deutschland, Hg. v. Deutscher Asphaltverband e. V., Juli 2020

[DIN EN 933-1]:

DIN EN 933-1, März 2012: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung- Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:2012, Beuth Verlag, Berlin

[DIN EN 933-10]:

DIN EN 933-10, September 2014: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen — Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung) Deutsche Fassung EN 933-10:2014, Beuth Verlag, Berlin

[DIN EN 1097-7]:

DIN EN 1097-7, Januar 2008: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 7: Bestimmung der Rohdichte von Füllern - Pyknometer-Verfahren; Deutsche Fassung EN 1097-7:2008, Beuth Verlag, Berlin

[DIN EN 1427]:

Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, Fassung 2015, Beuth Verlag, Berlin

[DIN EN 12697-24]:

Asphalt – Prüfverfahren – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung, Fassung 2018, Beuth Verlag, Berlin

[DIN EN 14770]:

Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels – Dynamisches Scherrheometer (DSR), Fassung 2012, Beuth Verlag, Berlin

[EF Asphalt 2017/HE]:

Ergänzende Festlegungen Asphalt 2017 / Hessen zu den ZTV/TL Asphalt-StB 07/13 für den Bereich von Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement, EF Asphalt 2017/HE, Fassung 2017, Hessen Mobil - Straßen- und Verkehrsmanagement

[Ergänzungen TL Asphalt-StB/LMB RP]:

Baubeschreibung Straßenbau mit Ergänzungen zur TL Asphalt-StB. Ergänzungen TL Asphalt-StB/LMB RP, Fassung 2017, Landesbetrieb Mobilität Rheinland-Pfalz (LMB RP)

[Erg. Regelungen AG LSBB ST]:

Ergänzende Regelungen zur Gewinnung und Verwendung von Asphaltgranulat (Ausbauasphalt) in Asphaltsschichten. Erg. Regelungen AG LSBB ST, Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt

[E TL Asphalt-StB 07/13, 2020]:

Ergänzungen zu den TL Asphalt-StB 07/13 des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr, München, 2020

[ETV-StB-BW]:

Ergänzungen zu den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen im Straßenbau Baden-Württemberg (ETV-StB-BW), Ministerium für Verkehr, Stuttgart, 2020

[FGSV-Arbeitspapier Nr. 65, 2006]

FGSV-Arbeitspapier Nr. 65: Mechanisches Verhalten von Asphalt in Befestigungen für Verkehrsflächen – Eingangsgrößen in die Bemessung (Materialkennwerte), Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2006

[FONSECA, WITCZAK, 1996]

Fonseca, O. A.; Witczak, M. W.: A Predictive Methodolgy for the Dynamic Modulus of In-Place Aged Asphalt Mixtures. In: *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, S. 532-567, 1996

[HIERSCHE et al., 1988]:

Hiersche, E.-U., u. a.: Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt auf das Langzeitverhalten bituminöser Tragschichten, Abschlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 7026, Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1988

[HIERSCHE et al., 1991]:

Hiersche, E.-U., Charif, K., Dengiz, A., Kössl, H.: Auswirkung der Wiederverwendung von Ausbauasphalt auf das Langzeitverhalten von Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichten, Abschlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 7900; Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1991

[HVA B-StB (SH)-S]:

HVA B-StB (SH)-S Leistungsbeschreibung - Baubeschreibung Abschnitt 5 - Straßenbau. HVA B-StB (SH)-S, Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein

[KIUNTKE, 1996]:

Kiuntke, Martin: Bewährung von Asphaltbefestigungen mit hohen Anteilen von Ausbauasphalt, Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1996

[LEHNÉ, 2003]:

Lehné, Reinhard: Asphaltbinder mit 50 % Asphaltgranulat – neue Erkenntnisse von der Berliner Erprobungsstrecke Heerstraße (B2/B5). Baubericht. In: *Bitumen* 65 (1), S. 26–29, 2003

[LEUTNER; DRÖGE, 2000]:

Leutner, R., Dröge, Ch.: Ermittlung von Einsatzgrenzen für die Zugabe von Ausbauasphalt in Asphaltdecken anhand von Erprobungsstrecken, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 1481045 des Bundesministeriums für Verkehr, Braunschweig, 2000

[LEUTNER et al., 2005]:

Leutner, R., Renken, P., Lobach, T.: Wirksamkeit der Zugabe von Asphaltgranulat auf die mechanischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten, Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 07.194/2001/CGB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Heft 908, Bonn, 2005

[M WA 09/13]

Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA), Ausgabe 2009/ Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2013

[Nichols, 1976]

Nichols, R.: *Composite Construction Materials Handbook* S. 259-262, Englewood Cliffs, 1976

[Nytus et al., 2018a]

Nytus, N., Rudi, E., Stutz, B., Müssenich, H.: Erprobung von zwei Rejuvenatoren mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht - Teil 1, Straße und Autobahn, Heft 5, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2018

[NYTUS et al., 2018b]:

Nytus, N., Rudi, E., Stutz, B., Müssenich, H.: Erprobung von zwei Rejuvenatoren mit unterschiedlichen Asphaltgranulat-Anteilen in Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht - Teil 2, Straße und Autobahn, Heft 6, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2018

[OBESTO, 2014]

Blab, R.; Eberhardsteiner, L.; Haselbauer, K.; Marchart, B.; Hessmann, T.: Implementierung des GVO und LCCA-Ansatzes in die österreichische Bemessungsmethode für Straßenoberbauten (OBESTO). Projekt finanziert im Rahmen der Pilotinitiative Verkehrsinfrastrukturforschung 2011, Institut für Verkehrswissenschaften –Forschungsbereich Straßenwesen, Technische Universität Wien, 2014

[POHL; KYTZIA, 2018]:

Pohl, T., Kytzia, S.: Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen, Straße und Autobahn, Heft 10, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2018

[RADENBERG et al., 2016]:

Radenberg, M., Wistuba, M., Boetcher, S., Sedaghat, N., Walther, A., Büchler, St., Schmidt, H., Cektinkaya, R.: Schlussbericht zum FE 07.0250/2011/LRB "Einsatz von Rejuvenatoren bei der Wiederverwendung von Asphalt". Bergisch-Gladbach (unveröffentlicht) im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2016.

[RADENBERG; NYTUS, 2018]:

Erstellung der Erst- und Kontrollprüfungen für eine Erprobungsstrecke mit den Rejuvenatoren SYLVAROAD RP1000 und STORFLUX PLUS sowie Durchführung weitergehender Untersuchungen, Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum (unveröffentlicht), Bochum, 2018

[RAHBAR-RASTEGAR; DANIEL, 2016]:

Rahbar-Rastegar, Reyhaneh; Daniel, Jo Sias: Laboratory versus plant production. Impact of material properties and performance for RAP and RAS mixtures. In: *International Journal of Pavement Engineering* 20 (1), S. 61–72, 2016

[RDO Asphalt, 2009]

Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt), Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2009

[RENKEN, LOBACH, 2007]:

Renken, P., Lobach, T.: Einfluss der Zugabe von Ausbauasphalten in Asphaltbinderemischgut mit PmB 45, Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE 07.205/2003/BGB des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Heft 954, Bonn, 2007

[RINALDINI et al., 2014]:

Rinaldini, E.; Schuetz, P.; Partl, M. N.; Tebaldi, G.; Poulidakos, L. D.: Investigating the blending of reclaimed asphalt with virgin materials using rheology, electron microscopy and computer tomography. In: *Composites Part B: Engineering* 67, S. 579–587, 2014

[SHIRODKAR et al., 2011]:

Shirodkar, Prashant; Mehta, Yusuf; Nolan, Aaron; Sonpal, Khyati; Norton, Alan; Tomlinson, Chris et al.: A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt. In: *Construction and Building Materials* 25 (1), S. 150–155, 2011

[STEPHAN, 2019]:

Stephan, Frank: Ermittlung der optimalen Nachmischzeit. Unveröffentlichter Untersuchungsbericht zum Forschungsprojekt FE 07.0299/2018/LGB - Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat unterschiedlicher Art und Menge sowie Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums. Hannover, 2019

[TL AG-StB 09]:

Technische Lieferbedingungen für Asphaltgranulat (TL AG-StB 09), Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2013

[TL Asphalt-StB 07/13]:

Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB), Ausgabe 2007/ Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2013

[TL Bitumen-StB 07/13]:

TL Bitumen-StB, 2007/13: Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen, Ausgabe 2007/ Fassung 2013, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

[TP Asphalt-StB, Teil 1]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 1: Bindemittelgehalt, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2013

[TP Asphalt-StB, Teil 2]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 2: Korngrößenverteilung, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2013

[TP Asphalt-StB, Teil 5]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 5: Rohdichte von Asphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2013

[TP Asphalt-StB, Teil 10 B]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 10 B: Verdichtungswiderstand mit Hilfe des Marshall-Verdichtungsgerätes, Verfahren B: Änderung der Probekörperdicke, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2010

[TP Asphalt-StB, Teil 24]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 24: Spaltzug-Schwellversuch – Beständigkeit gegen Ermüdung, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2018

[TP Asphalt-StB, Teil 25 B1]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 B1: Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2018

[TP Asphalt-StB, Teil 26]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 26: Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2018

[TP Asphalt-StB, Teil 27]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 27: Probennahme, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2016

[TP Asphalt-StB, Teil 33]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 33: Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV): Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

[TP Asphalt-StB, Teil 35]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 35: Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007

[TP Asphalt-StB, Teil 46A]:

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

[TP Gestein-StB, Teil 4.1.4, 2008]:

Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau TP Gestein-StB, Teil 4.1.4 Bestimmung der Korngrößenverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung), Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2008

[WALTHER; WISTUBA, 2014]:

Walther, Axel; Wistuba, Michael P.: Auswirkungen der Wiederverwendung von Ausbausphaltp in Asphalttragschichten auf mechanische Eigenschaften. [Bericht zum Forschungsprojekt FE 07.0245/2011/CGB], 2014

[WILLIAMS et. al, 1955]:

Williams, M.L., Landel, R.F., Ferry, J.D.: The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids, *Journal of the American Chemical Society*, Nr. 77, pp. 3701-3707, 1955

[WITZCAK, et al., 1999]:

Witzcak, M. W.; Andrei, D.; Mirza, W.: Development of a Revised Predictive Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures; In: Inter Team Technical Report prepared for the NCHRP 1-37A Project, Department of Civil Engineering, University of Maryland, MD, 1999

[WU et al., 2018]:

Wu, Jiantao; Liu, Quan; Wang, Yu; Chen, Jun; Wang, Dawei; Xie, Linlin; Ago, Cadnel: Effect of Mixing Time and Temperature on the Homogeneity of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement Material. In: *Transportation Research Record* 2672 (28), S. 167–177, 2018

[YUSOFF et. al., 2011]

Yusoff, N.I., Chailleux, E., Airey, G.D.: A Comparative Study of the Influence of Shift Factor Equation on Master Curve Construction, In: *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol.4 No.6, 2011

[ZTV Asphalt-StB 07/13]:

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2007, Fassung 2013

[ZTV Asphalt-StB 07/13 By]:

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, Ausgabe 2007, Fassung 2013, ZTV Asphalt-StB 07/13 Bekanntmachung des Bayerischen Staatsministeriums für Wohnen, Bau und Verkehr, 2020

[ZTV Asphalt-StB/NRW]:

Ergänzungen zu den ZTV Asphalt-StB - NRW. ZTV Asphalt-StB/NRW, Straßen.NRW

[ZTV-StB LSBB ST 17]:

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Straßen- und Ingenieurbau für den Geschäftsbereich der Landestraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt. ZTV-StB LSBB ST 17, Landestraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt, Fassung 2017

[ZTV/St-Hmb.09]:

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Straßenbauarbeiten im Hamburg. ZTV/St-Hmb.09, Behörde für Wirtschaft, Verkehr und Innovation, Hamburg, Ausgabe 11/17

Bilder

- Bild 1-1: Zusammenhang zwischen der Steifigkeit des Bitumens und der Steifigkeit des Asphaltes [RADENBERG et al., 2016]
- Bild 1-2: Zusammenhang zwischen Phasenwinkel des Bitumens und Phasenwinkel des Asphaltes [RADENBERG et al., 2016]
- Bild 2-1: Fließdiagramm zum Forschungsprojekt FE 07.0299/2018/LGB
- Bild 3-1: Asphaltmischanlage der DEUTAG Nord, Zweigniederlassung der BAG, in Groß Bülden
- Bild 4-1: Frequenz- und temperaturabhängige Ergebnisse der rückgewonnenen Bindemittel aus Asphaltgranulat 1 (links) und 2 (rechts) im Dynamischen Scherrheometer
- Bild 4-2: Visuelle Erfassung des Homogenisierungsgrades der Asphaltmischungen im Labor unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-3: Hauptkurven der Steifigkeitsuntersuchungen nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] an den Varianten der Voruntersuchungen
- Bild 4-4: Zusammenhang zwischen der Steifigkeit des Bitumens und der des Asphaltes in Abhängigkeit von der Nachmischzeit
- Bild 4-5: Zusammenhang zwischen dem Phasenwinkel des Bitumens und dem des Asphaltes in Abhängigkeit von der Nachmischzeit
- Bild 4-6: Visuelle Erfassung des Homogenisierungsgrades für Mischungen am Asphaltmischwerk unter Variation der Nachmischzeit, Teil 1 [STEPHAN, 2019]
- Bild 4-7: Visuelle Erfassung des Homogenisierungsgrades für Mischungen am Asphaltmischwerk unter Variation der Nachmischzeit, Teil 2 [STEPHAN, 2019]
- Bild 4-8: Beladung der Radladerschaufel mit Asphaltmischgut (links) sowie Entnahme der Asphaltmischgutproben durch vier Probennehmer
- Bild 4-9: Korngrößenverteilung der großtechnisch hergestellten Asphaltmischgutvarianten nach Extraktion
- Bild 4-10: Vergleich der komplexen Schermoduln und Phasenwinkel ermittelt mit der PP04- und der PP08-Prüfgeometrie im Frequenzbereich von 0,1 bis 10 Hz und im Temperaturbereich von -10 bis 20 °C
- Bild 4-11: Prüfgenaugigkeit von komplexen Schermodul und Phasenwinkel ausgewählter Asphaltmischgutvarianten über den gesamten Temperaturbereich
- Bild 4-12: Masterkurven der extrahierten Bindemittel aus den Mischgutvarianten der Asphalttragschichten
- Bild 4-13: Masterkurven der extrahierten Bindemittel aus den Mischgutvarianten der Asphaltbinderschichten
- Bild 4-14: Tieftemperaturverhalten der Referenzvarianten
- Bild 4-15: Tieftemperaturverhalten der Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-16: Tieftemperaturverhalten der Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-17: Tieftemperaturverhalten der Asphaltbinderschichtvarianten mit Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-18: Tieftemperaturverhalten der Asphaltbinderschichtvarianten mit Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-19: Ermüdungsfunktion der Referenzvarianten
- Bild 4-20: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-21: Ermüdungsfunktion der Asphalttragschichtvarianten mit Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-22: Ermüdungsfunktion der Asphaltbinderschichtvarianten mit Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-23: Ermüdungsfunktion der Asphaltbinderschichtvarianten mit Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit
- Bild 4-24: Hauptkurve der Referenzvarianten
- Bild 4-25: Hauptkurven der Steifigkeit aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

- Bild 4-26: Hauptkurven der Steifigkeit aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Bild 4-27: Steifigkeitsmoduln der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 1 über die Belastungsfrequenzen
- Bild 4-28: Steifigkeitsmoduln der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 2 über die Belastungsfrequenzen
- Bild 4-29: Hauptkurven der Steifigkeit aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Bild 4-30: Hauptkurven der Steifigkeit aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Bild 4-31: Steifigkeitsmoduln der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 1 über die Belastungsfrequenzen
- Bild 4-32: Steifigkeitsmoduln der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 2 über die Belastungsfrequenzen
- Bild 4-33: Darstellung der betrachteten Bereiche zur Ermittlung von Δ_{unten} und Δ_{oben} am Beispiel der Variante TS Referenz
- Bild 4-34: Vergleich der Steifigkeitsmoduln ausgewählter Varianten zu Projektbeginn und Projektende
- Bild 4-35: Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit der Asphalttragschichten unter Verwendung von Asphaltgranulat 1
- Bild 4-36: Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit der Asphalttragschichten unter Verwendung von Asphaltgranulat 2
- Bild 4-37: Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit der Asphaltbinderschichten unter Verwendung von Asphaltgranulat 1
- Bild 4-38: Zusammenhang zwischen Bindemittel- und Asphaltsteifigkeit der Asphaltbinderschichten unter Verwendung von Asphaltgranulat 2
- Bild 4-39: Vergleich der Ausfalltemperatur aus dem Abkühlversuch mit der Steifigkeit bei -10 °C und 1 Hz (links) sowie 10 Hz (rechts) - Asphalttragschichten
- Bild 4-40: Vergleich der Ausfalltemperatur aus dem Abkühlversuch mit der Steifigkeit bei -10 °C und 1 Hz (links) sowie 10 Hz (rechts) - Asphaltbinderschichten
- Bild 4-41: Vergleich der Bruchtemperatur aus dem Abkühlversuch mit der Bindemittelsteifigkeit des rückgewonnenen Bindemittels bei -10 °C und 1 Hz (links) sowie 10 Hz (rechts) - Asphalttragschichten
- Bild 4-42: Vergleich der Bruchtemperatur aus dem Abkühlversuch mit der Bindemittelsteifigkeit des rückgewonnenen Bindemittels bei -10 °C und 1 Hz (links) sowie 10 Hz (rechts) - Asphaltbinderschichten
- Bild 4-43: Definition kritischer Bereiche für die Asphalt- und Bindemittelsteifigkeit der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 2 unter Berücksichtigung der Tieftemperatur-Performance
- Bild 4-44: Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und Modellprognose für die Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat 1
- Bild 4-45: Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und Modellprognose für die Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat 2
- Bild 4-46: Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und Modellprognose für die Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 1
- Bild 4-47: Zusammenhang zwischen Versuchsergebnis und Modellprognose für die Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 2
- Bild 5-1: Einbau der Praxisvarianten
- Bild 5-2: Vergleich der Bindemittelsteifigkeiten der großtechnisch hergestellten Varianten mit denen der Praxisvarianten
- Bild 5-3: Vergleich der Ergebnisse der einaxialen Zugfestigkeit von labor- und praxisverdichtetem Asphaltmischgut
- Bild 5-4: Vergleich der Ermüdungsfunktionen der großtechnisch hergestellten Varianten mit denen der Praxisvarianten
- Bild 5-5: Vergleich der Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen an labor- und praxisverdichtetem Asphaltmischgut

Tabellen

- Tab. 1-1: Zugabemöglichkeiten von Asphaltgranulat in Hamburg nach [ZTV/St-Hmb.09]
- Tab. 1-2: Zugabemöglichkeiten von Asphaltgranulat in Hessen nach [EF Asphalt 2017/HE]
- Tab. 1-3: Erfahrungswerte der Asphaltgranulatzugabe in Sachsen-Anhalt nach [ZTV-StB LSBB ST 17]
- Tab. 1-4: Maximale Zugabemenge von Asphaltgranulat in SH in Abhängigkeit von der Zugabeart nach [HVA B-StB(SH)-S]
- Tab. 2-1: Mischgutvarianten für die labortechnische Untersuchung
- Tab. 3-1: Angaben des Asphaltmischwerks zur Klassifizierung des Asphaltgranulats für die Asphaltgranulatauswahl
- Tab. 3-2: Auswahl projektbezogener Gesteinskörnung
- Tab. 3-3: Auswahl projektbezogener Bindemittel
- Tab. 4-1: Rohdichten der verwendeten Gesteinskörnung
- Tab. 4-2: Kornzusammensetzung der verwendeten Gesteinskörnung
- Tab. 4-3: Zusammensetzung der verwendeten Asphaltgranulate
- Tab. 4-4: Kennwerte der rückgewonn
- Tab. 4-5: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen nach [TP Asphalt-StB, Teil 26] an den Varianten der Voruntersuchungen
- Tab. 4-6: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an den Varianten der Voruntersuchungen
- Tab. 4-7: Gesteinszusammensetzung der Asphalttragschichtvarianten
- Tab. 4-8: Gesteinszusammensetzung der Asphaltbinderschichtvarianten
- Tab. 4-9: Asphaltrohddichte, Raumdichte und Hohlraumgehalt der Marshall-Probekörper zur Auswahl der Bindemittelgehalte
- Tab. 4-10: Asphaltmischgutzusammensetzung und Hohlraumgehalt der Asphalttragschicht- und Asphaltbinderschichtvarianten sowie Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen am rückgewonnenen Bindemittel
- Tab. 4-11: Ergebnisse der Bindemitteluntersuchungen an den rückgewonnenen Bindemitteln
- Tab. 4-12: Ergebnisse der Untersuchungen der Verdichtbarkeit am Asphaltmischgut aus der großtechnischen Herstellung
- Tab. 4-13: Ergebnisse der einaxialen Druck-Schwellversuche zur Bestimmung der Verformungsbeständigkeit der Asphalttrag- sowie Asphaltbinderschichtvarianten unter Variation der Nachmischzeit
- Tab. 4-14: Ergebnisse der einaxialen Zugversuche an den Asphalttrag- sowie Asphaltbinderschichtvarianten unter Variation der Nachmischzeit
- Tab. 4-15: Ergebnisse des Abkühlversuchs und der Zugfestigkeitsreserve der 38 Varianten unter Variation der Nachmischzeit
- Tab. 4-16: Dehnung bei 10^4 bzw. 10^6 Zyklen in Anlehnung an die [DIN EN 12697-24]
- Tab. 4-17: Ergebnisse der Steifigkeit und des Phasenwinkels aus Messungen der Referenzvarianten von Asphaltbinder- und Asphalttragschicht nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-18: Ergebnisse der Steifigkeit aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-19: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-20: Ergebnisse der Steifigkeit aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-21: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-22: Ergebnisse der Steifigkeit aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-23: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 1 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-24: Ergebnisse der Steifigkeit aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-25: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat 2 nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]
- Tab. 4-26: Differenzen der Steifigkeitsmoduln im unteren und oberen Bereich der Hauptkurven aller 38 Varianten

- Tab. 4-27: Normierung zur Beurteilung des Einflusses der Asphaltgranulatzugabemenge
Tab. 4-28: Normierung zur Beurteilung des Einflusses der Nachmischzeit
Tab. 4-29: Parameter zur Prognose der Asphaltsteifigkeit in Abhängigkeit von der Bindemittelart
[OBESTO, 2014]
Tab. 5-1: Dokumentation der Einbautemperaturen für die durchgeführte Baumaßnahme
Tab. 5-2: Ergebnisse der einaxialen Zugversuche an den Praxisvarianten
Tab. 5-3: Ergebnisse der Abkühlversuche und der Zugfestigkeitsreserven an den Praxisvarianten
Tab. 5-4: Verdichtungsgrad der Praxisvarianten

Anhang A – Bindemittelkenngrößen

Variante		komplexer Schermodul in [Pa] bei 1,59 Hz, nach Extraktion, bei Prüftemperatur T [°C]:																		
		-10	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	
TS Referenz		110.192.000	39.381.150	20.519.600	10.087.870	1.950.535	307.152	12.541	51.252	12.541	3.245	965	315	120	52	25	13	8	5	3
1 TS 20 5 s		132.783.500	49.794.900	28.311.000	14.955.050	3.611.580	759.846	165.123	43.180	11.805	3.470	1.086	374	146	64	31	16	9	6	6
1 TS 20 25 s		167.699.000	63.899.150	35.478.900	19.027.350	4.760.890	983.639	200.434	46.340	11.914	3.341	1.027	360	140	61	30	16	9	6	6
1 TS 20 45 s		138.546.000	52.813.550	29.682.900	16.010.900	4.044.060	875.717	192.461	50.986	13.491	3.819	1.165	399	152	66	31	16	9	6	6
1 TS 40 5 s		62.225.750	21.210.850	10.878.250	5.343.850	1.157.160	231.653	49.488	13.127	3.510	1.033	344	131	56	27	15	8	5	3	3
1 TS 40 25 s		67.170.000	23.055.000	12.480.000	6.451.250	1.523.900	323.715	73.290	17.027	4.555	1.326	422	152	63	29	15	8	5	3	3
1 TS 40 45 s		140.300.000	53.685.000	30.605.000	16.609.000	4.270.550	928.200	205.215	53.340	13.970	3.931	1.204	410	159	69	34	18	10	6	6
1 TS 60 5 s		246.550.000	106.500.000	64.595.000	37.122.500	10.819.000	2.617.200	599.785	143.339	35.351	9.352	2.649	830	296	117	53	26	14	8	8
1 TS 60 25 s		238.751.000	109.893.000	68.756.050	39.717.600	11.824.300	2.995.905	713.037	171.005	43.764	11.888	3.398	1.044	363	140	62	30	16	9	9
1 TS 60 45 s		250.398.500	111.807.000	68.565.800	40.061.700	12.209.300	3.157.305	771.058	160.031	40.217	10.997	3.159	988	351	140	62	31	16	9	9
2 TS 20 5 s		194.514.000	77.450.750	46.547.500	25.759.350	6.885.065	1.539.445	328.339	79.331	20.492	5.701	1.665	539	199	82	38	19	11	6	6
2 TS 20 25 s		202.797.000	86.666.100	48.896.150	26.839.800	7.006.465	1.499.670	311.880	84.669	21.246	5.826	1.735	561	208	87	41	21	12	8	8
2 TS 20 45 s		152.645.000	57.169.200	31.389.200	16.253.900	3.702.570	707.390	137.953	32.628	8.181	2.279	694	245	98	44	22	12	7	4	4
2 TS 40 5 s		159.464.500	67.874.450	44.102.000	25.869.200	7.980.525	2.092.345	518.251	130.324	35.272	10.020	2.942	922	331	131	59	29	15	9	9
2 TS 40 25 s		99.380.650	39.625.700	24.976.850	14.134.950	4.059.105	1.016.550	246.697	71.995	19.534	5.533	1.657	540	200	83	39	20	11	6	6
2 TS 40 45 s		125.599.500	51.508.700	29.606.150	16.287.100	4.312.115	969.585	213.561	60.136	15.461	4.327	1.301	428	164	70	34	18	10	6	6
2 TS 60 5 s		235.342.000	116.311.000	76.607.700	48.798.000	18.216.800	5.937.165	1.765.925	452.397	133.903	40.967	12.983	4.194	1.438	528	219	97	48	25	25
2 TS 60 25 s		273.709.000	132.237.000	83.543.900	52.447.300	18.619.500	5.638.415	1.521.425	400.420	107.998	30.195	8.775	2.661	882	325	132	60	30	16	16
2 TS 60 45 s		158.430.000	69.817.250	43.528.900	26.190.050	8.532.875	2.429.315	641.398	196.896	53.510	15.193	4.505	1.366	478	185	80	38	20	11	11
BS Referenz		182.486.000	81.373.550	47.532.000	26.251.250	7.046.900	1.593.020	349.510	89.987	24.989	7.763	2.639	920	342	136	60	29	16	9	9
1 BS 20 5 s		203.517.500	83.726.600	48.255.200	26.218.950	6.666.830	1.423.880	301.424	69.871	18.442	5.454	1.771	615	232	95	44	22	12	7	7
1 BS 20 25 s		172.703.000	77.082.600	45.787.000	25.818.600	7.199.395	1.699.245	385.618	95.672	26.148	7.870	2.542	884	343	141	64	33	18	11	11
1 BS 20 45 s		113.937.000	42.310.850	23.168.000	12.221.100	2.912.645	620.181	139.575	43.515	12.175	3.684	1.184	413	157	66	31	16	9	6	6
1 BS 40 5 s		84.205.950	38.194.600	22.078.400	12.320.800	3.419.080	848.263	210.782	46.417	13.079	3.955	1.289	474	184	79	38	21	12	8	8
1 BS 40 25 s		155.189.000	63.763.600	37.544.900	21.184.750	5.972.595	1.473.875	355.991	87.918	23.590	6.748	2.069	685	250	102	45	22	12	7	7
1 BS 40 45 s		195.756.500	97.266.100	59.577.050	34.934.000	10.617.150	2.756.265	674.002	164.431	44.420	12.443	3.641	1.157	433	172	77	38	21	12	12
1 BS 60 5 s		210.669.000	87.155.450	57.508.200	32.788.200	9.406.920	2.303.315	530.551	131.075	33.603	9.427	2.825	913	332	133	60	30	16	9	9
1 BS 60 25 s		264.759.500	124.796.500	81.227.900	49.249.750	16.256.300	4.717.740	1.261.405	341.471	93.228	26.842	8.155	2.579	893	356	150	70	36	20	20
1 BS 60 45 s		143.883.500	61.200.900	39.510.400	21.927.700	5.962.125	1.415.445	328.052	84.713	22.628	6.598	2.051	750	294	127	61	33	19	12	12
2 BS 20 5 s		217.478.500	91.934.000	54.151.250	29.923.550	7.894.185	1.753.210	379.844	102.740	27.015	8.118	2.572	944	368	153	71	37	21	13	13
2 BS 20 25 s		198.397.000	81.613.750	55.533.900	30.798.500	8.198.370	1.841.875	403.009	98.807	26.573	8.013	2.635	893	331	134	59	29	16	9	9
2 BS 20 45 s		154.932.500	63.212.100	36.322.800	20.284.000	5.479.145	1.276.170	298.110	81.327	22.488	6.888	2.214	833	330	138	64	34	20	12	12
2 BS 40 5 s		105.764.550	47.736.650	27.841.000	15.551.200	4.321.230	1.048.145	254.701	72.030	19.924	5.998	1.925	694	267	111	52	27	16	10	10
2 BS 40 25 s		106.022.500	52.929.700	32.722.700	18.522.150	5.457.995	1.412.465	352.373	107.529	30.055	9.215	2.950	1.019	381	153	69	35	19	11	11
2 BS 40 45 s		209.313.500	95.508.600	57.641.600	33.142.050	9.597.800	2.338.465	534.225	133.577	34.385	9.996	3.047	1.140	469	178	100	78	80	85	85
2 BS 60 5 s		230.882.500	110.203.500	68.964.350	41.519.750	13.678.350	3.894.955	1.023.980	309.966	85.234	25.217	7.965	2.594	908	346	143	64	30	15	15
2 BS 60 25 s		332.863.000	169.465.000	110.597.000	69.185.100	23.927.950	6.980.975	1.810.375	471.627	120.174	33.072	9.988	3.147	1.060	392	160	73	36	20	20
2 BS 60 45 s		315.502.500	165.643.500	106.799.500	64.981.400	21.422.050	5.926.470	1.455.410	382.706	96.946	26.710	8.033	2.534	873	329	136	62	32	18	18

Tab. A-1: Komplexer Schermodul der extrahierten Bindemittel

Variante	Phasenwinkel in [°] bei 1,59 Hz, nach Extraktion, bei Prüftemperatur T [°C]:																		
	-10	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	
TS Referenz	24,6	32,4	37,3	42,6	54,9	65,0	72,5	77,1	81,8	85,3	87,9	89,4	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	
1 TS 20 5 s	22,6	29,4	33,4	37,7	47,1	55,1	61,9	66,4	72,5	78,2	82,6	85,8	88,0	89,3	90,0	90,0	90,0	90,0	
1 TS 20 25 s	20,5	27,7	31,5	36,0	45,8	55,1	62,7	66,9	75,0	80,2	84,1	86,9	88,6	89,2	89,6	90,0	90,0	90,0	
1 TS 20 45 s	21,5	28,1	32,0	36,2	45,6	54,1	61,3	66,9	73,0	78,5	82,9	86,1	88,2	89,4	89,9	90,0	90,0	90,0	
1 TS 40 5 s	27,0	34,3	39,3	44,2	53,9	62,1	69,2	74,6	80,0	84,1	87,0	88,8	89,7	90,0	90,0	90,0	90,0	90,0	
1 TS 40 25 s	26,2	33,1	37,4	41,8	50,8	58,9	66,2	72,0	78,0	82,6	85,9	87,9	88,6	89,5	90,0	88,1	90,0	87,1	
1 TS 40 45 s	21,7	28,6	32,7	37,0	46,3	55,0	62,4	68,0	74,1	79,5	83,7	86,7	88,4	89,6	90,0	90,0	90,0	90,0	
1 TS 60 5 s	17,5	24,5	28,5	32,7	41,9	51,2	59,3	65,3	71,5	77,2	81,9	85,3	87,7	89,0	89,7	90,0	90,0	90,0	
1 TS 60 25 s	17,5	24,0	27,6	31,7	40,5	49,5	57,3	62,5	68,6	74,6	79,8	83,8	86,6	88,3	89,2	89,6	89,7	89,7	
1 TS 60 45 s	16,9	23,8	27,7	31,8	40,6	49,5	57,3	64,3	70,4	76,0	80,9	84,5	87,2	88,7	89,6	90,0	90,0	90,0	
2 TS 20 5 s	19,3	26,5	30,0	34,2	43,6	52,6	60,2	65,3	71,4	77,0	81,6	85,2	87,5	88,8	89,3	89,3	90,0	90,0	
2 TS 20 25 s	18,8	25,8	29,9	34,4	44,2	53,9	61,8	66,5	72,5	77,9	82,4	85,8	88,0	89,2	89,9	90,0	90,0	84,7	
2 TS 20 45 s	21,7	29,4	33,9	38,8	49,6	59,0	66,5	71,8	77,4	81,9	85,5	87,9	89,3	89,9	89,9	90,0	90,0	90,0	
2 TS 40 5 s	18,8	24,8	27,8	31,4	39,3	47,6	55,1	60,7	66,8	72,9	78,5	82,9	86,1	88,2	89,4	89,7	89,7	89,3	
2 TS 40 25 s	21,9	27,8	30,4	34,1	42,0	49,9	57,1	62,4	68,7	74,9	80,2	84,1	86,7	88,5	88,5	87,5	88,7	90,0	
2 TS 40 45 s	21,6	28,2	31,9	36,2	45,5	54,4	61,9	66,6	72,7	78,2	82,6	86,0	88,1	89,4	90,0	90,0	90,0	90,0	
2 TS 60 5 s	18,6	24,2	27,6	30,9	38,0	45,1	51,9	53,3	58,6	64,2	70,1	75,6	80,2	83,9	86,5	88,1	89,0	89,3	
2 TS 60 25 s	14,6	20,2	23,3	26,6	33,9	42,1	50,1	56,5	62,4	68,4	74,4	79,5	83,6	86,5	88,1	88,8	89,0	88,4	
2 TS 60 45 s	18,6	23,9	27,0	30,4	38,0	45,8	53,2	58,3	64,3	70,4	76,2	81,1	84,7	87,2	88,5	89,2	89,1	88,4	
BS Referenz	18,9	25,5	29,7	34,0	43,3	52,2	58,9	61,7	64,9	68,4	72,6	77,6	82,7	86,7	88,8	89,8	90,0	90,0	
1 BS 20 5 s	18,3	25,8	30,3	35,0	45,4	55,0	62,0	65,7	69,0	72,7	77,0	81,6	85,8	88,4	89,8	90,0	90,0	90,0	
1 BS 20 25 s	19,0	25,2	29,1	33,2	42,2	51,2	58,3	62,6	66,5	70,7	75,4	80,3	84,6	87,6	89,1	89,8	89,9	90,0	
1 BS 20 45 s	22,7	29,7	34,2	38,8	48,6	56,8	62,5	64,5	68,8	73,5	78,3	83,0	86,7	89,0	89,9	90,0	90,0	90,0	
1 BS 40 5 s	23,4	28,4	32,1	35,9	44,2	52,0	58,4	64,5	68,8	73,5	78,3	82,8	86,3	88,2	87,6	88,9	90,0	90,0	
1 BS 40 25 s	20,0	26,3	30,2	34,1	42,9	51,2	58,2	63,0	67,7	72,7	77,7	82,3	86,0	88,2	89,2	89,0	89,1	89,9	
1 BS 40 45 s	18,1	23,6	27,2	31,1	39,6	48,4	56,0	59,4	65,6	71,9	77,7	82,3	85,6	87,7	89,0	89,7	89,9	90,0	
1 BS 60 5 s	18,8	26,1	28,8	33,1	42,3	51,5	59,2	64,1	69,1	73,9	78,5	82,8	86,2	88,4	89,7	90,0	90,0	90,0	
1 BS 60 25 s	15,9	21,9	25,6	29,1	36,8	44,6	52,0	57,0	62,3	67,8	73,4	78,5	82,8	86,0	88,0	88,9	89,2	89,0	
1 BS 60 45 s	21,6	28,2	31,3	35,7	44,9	53,6	60,7	65,5	70,3	75,1	79,7	83,6	86,7	88,5	89,3	89,7	90,0	90,0	
2 BS 20 5 s	17,6	25,0	29,4	34,0	44,2	53,8	60,9	64,3	67,5	71,1	75,2	79,9	84,4	87,5	89,0	89,6	89,8	90,0	
2 BS 20 25 s	18,6	26,0	29,3	33,7	43,4	52,7	59,6	62,9	66,0	69,4	73,6	78,5	83,4	87,0	89,1	89,9	90,0	90,0	
2 BS 20 45 s	19,8	26,3	30,4	34,5	43,6	52,2	58,7	62,5	66,2	70,4	75,0	79,9	84,3	87,4	88,8	89,2	89,2	88,9	
2 BS 40 5 s	21,8	27,2	31,1	35,1	43,8	52,2	58,6	62,6	66,5	70,9	75,6	80,6	84,9	87,8	89,3	89,8	89,8	89,2	
2 BS 40 25 s	21,7	26,3	29,6	33,5	41,7	49,7	56,3	60,1	64,2	68,7	73,6	78,7	83,4	86,8	88,7	89,7	89,8	90,0	
2 BS 40 45 s	17,5	23,9	27,9	32,1	41,5	50,9	58,9	63,7	68,2	72,4	76,6	81,6	86,4	89,7	85,0	86,0	88,0	88,0	
2 BS 60 5 s	16,2	22,0	25,7	29,4	37,2	45,2	52,5	56,9	61,2	65,6	70,2	75,1	80,0	84,1	86,8	87,7	86,9	84,7	
2 BS 60 25 s	12,9	18,9	22,6	26,3	34,6	43,6	52,0	58,2	63,2	67,6	72,0	76,7	81,2	85,1	87,6	88,8	89,4	88,3	
2 BS 60 45 s	13,6	19,4	23,3	27,3	36,1	45,4	54,0	59,5	64,3	68,5	72,8	77,4	81,8	85,4	87,2	87,3	84,0	81,2	

Tab.A-2: Phasenwinkel der extrahierten Bindemittel

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	TS Referenz		BS Referenz	
		25 s	25 s	25 s	25 s
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
-10	0,1	44.884	30,9	91.873	24,3
-10	0,3	65.861	28,3	123.157	22,1
-10	1	95.525	25,7	162.403	20,0
-10	3	132.588	23,1	208.676	17,7
-10	5	152.994	21,9	233.148	16,7
-10	10	170.409	20,4	264.748	15,4
0	0,1	12.928	39,0	33.549	31,3
0	0,3	20.658	36,2	48.759	28,8
0	1	33.033	33,4	70.769	26,4
0	3	49.301	31,1	97.215	24,3
0	5	58.942	30,0	111.699	23,3
0	10	70.891	28,4	133.228	22,0
5	0,1	5.690	45,3	17.009	36,3
5	0,3	9.671	42,3	25.870	33,9
5	1	16.714	38,7	40.306	30,9
5	3	26.641	35,7	58.511	28,3
5	5	32.645	34,5	68.841	27,3
5	10	42.403	33,0	84.626	25,9
10	0,1	2.276	51,6	8.025	41,3
10	0,3	4.231	48,3	13.100	38,6
10	1	7.958	44,3	21.732	35,3
10	3	13.603	40,9	33.370	32,5
10	5	17.137	39,5	40.251	31,4
10	10	23.110	37,8	51.094	29,9
20	0,1	313	62,0	1.629	50,4
20	0,3	665	59,5	2.993	47,7
20	1	1.443	56,5	5.525	44,8
20	3	2.868	53,0	9.550	41,6
20	5	3.859	51,5	12.032	40,5
20	10	5.686	49,4	16.285	38,9

Tab. A-3: Ergebnisse der komplexen Schermoduln und Phasenwinkel aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Referenzvarianten nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	1 TS 20			1 TS 40			1 TS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]
-10	0,1	60.850	81.812	65.248	24.496	27.042	65.125	131.250	130.070	164.667
-10	0,3	83.800	110.976	89.564	36.368	39.817	90.467	172.917	168.523	212.000
-10	1	118.545	150.152	122.801	53.806	58.360	125.000	225.000	217.801	269.300
-10	3	153.586	193.452	160.906	75.446	80.775	163.600	278.000	268.736	328.900
-10	5	175.894	215.339	180.417	87.369	93.269	184.000	304.375	295.596	357.938
-10	10	203.957	248.036	210.736	101.991	112.000	213.500	341.063	342.865	398.000
0	0,1	17.760	24.616	20.068	6.519	7.505	20.142	45.525	47.516	61.108
0	0,3	27.435	36.891	30.087	10.738	12.042	30.425	65.408	67.903	85.025
0	1	42.237	55.163	45.188	17.679	19.330	46.035	93.520	96.548	118.000
0	3	61.220	77.550	64.322	26.964	29.045	65.575	126.000	130.125	156.000
0	5	72.034	89.975	74.942	32.433	34.831	76.738	143.500	148.078	176.063
0	10	87.657	111.476	92.637	39.963	44.088	93.900	169.500	174.952	206.000
5	0,1	9.018	12.015	9.881	2.832	3.502	9.983	23.958	26.478	33.608
5	0,3	14.160	18.704	15.228	4.932	5.893	15.775	36.008	39.043	48.600
5	1	23.371	29.817	24.672	8.760	10.150	25.530	55.165	58.958	71.935
5	3	35.831	44.294	37.225	14.326	16.225	38.520	78.775	83.324	99.820
5	5	43.107	52.378	44.407	17.710	19.888	46.056	91.656	96.845	115.500
5	10	54.604	65.382	55.688	23.394	25.906	58.031	111.500	117.273	138.000
10	0,1	4.071	5.464	4.563	1.183	1.539	4.579	11.759	13.183	17.468
10	0,3	6.865	9.157	7.551	2.208	2.792	7.823	18.978	20.756	26.852
10	1	12.051	15.599	12.999	4.195	5.130	13.520	30.960	33.280	41.988
10	3	19.525	24.512	20.694	7.294	8.665	21.548	46.723	49.622	61.325
10	5	24.072	29.725	25.273	9.269	10.888	26.394	55.668	59.030	72.144
10	10	31.471	38.345	32.691	12.699	14.674	34.284	69.933	73.691	88.974
20	0,1	766	1.023	893	195	276	887	2.556	2.998	4.301
20	0,3	1.443	1.933	1.658	406	562	1.710	4.690	5.306	7.423
20	1	2.760	3.689	3.113	867	1.155	3.303	8.545	9.416	12.747
20	3	5.033	6.566	5.575	1.690	2.183	5.922	14.526	15.703	20.728
20	5	6.470	8.399	7.106	2.269	2.883	7.607	18.167	19.480	25.376
20	10	9.021	11.604	9.786	3.347	4.153	10.555	24.301	25.828	33.061

Tab. A-4: Ergebnisse der komplexen Schermoduln aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat 1 nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	1 TS 20			1 TS 40			1 TS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]
-10	0,1	27,7	25,7	26,4	32,5	31,2	26,9	22,8	22,7	21,0
-10	0,3	25,6	23,5	24,3	30,1	29,0	24,7	20,5	20,6	18,9
-10	1	23,5	21,4	22,3	27,9	26,9	22,6	18,3	18,4	16,9
-10	3	21,5	19,3	20,4	25,9	25,2	20,6	16,3	16,4	15,1
-10	5	20,5	18,4	19,5	25,0	24,4	19,8	15,4	15,5	14,3
-10	10	19,2	17,1	18,4	23,7	23,4	18,6	14,2	14,0	13,2
0	0,1	34,9	33,9	33,5	40,9	39,0	34,3	30,3	29,7	27,6
0	0,3	32,6	31,0	31,2	38,1	36,4	31,9	27,8	27,3	25,5
0	1	30,3	28,6	29,0	35,4	34,0	29,5	25,5	24,9	23,4
0	3	28,3	26,5	27,0	33,1	32,0	27,5	23,3	22,8	21,5
0	5	27,4	25,6	26,2	32,1	31,1	26,6	22,4	21,8	20,7
0	10	26,2	24,3	25,3	31,7	30,0	25,4	21,1	20,5	19,6
5	0,1	40,0	38,0	38,5	46,5	44,0	39,2	35,2	34,0	32,1
5	0,3	38,0	35,6	36,6	43,8	41,5	36,8	32,7	31,7	29,9
5	1	34,8	32,7	33,4	40,5	38,6	33,8	29,7	28,8	27,2
5	3	32,1	30,3	30,8	37,8	36,1	31,4	27,2	26,3	25,0
5	5	31,1	29,3	29,8	36,6	35,1	30,4	26,2	25,3	24,1
5	10	29,9	28,0	28,7	35,1	33,8	29,2	24,8	24,0	22,9
10	0,1	44,7	43,3	43,3	51,6	48,8	44,3	40,3	38,8	36,4
10	0,3	42,5	40,5	41,0	48,8	46,1	41,5	37,4	36,2	34,0
10	1	39,2	37,3	37,7	45,6	43,0	38,2	34,0	33,0	31,0
10	3	36,3	34,5	34,9	42,6	40,4	35,6	31,3	30,4	28,6
10	5	35,2	33,4	33,8	41,4	39,3	34,5	30,1	29,3	27,6
10	10	33,9	32,0	32,5	39,8	37,9	33,1	28,7	27,8	26,4
20	0,1	52,9	52,7	51,9	60,5	57,4	53,2	49,8	47,9	45,0
20	0,3	50,8	50,1	49,5	57,8	54,7	50,4	46,6	45,0	42,2
20	1	48,6	47,3	47,2	55,1	52,0	47,7	43,5	42,1	39,4
20	3	45,7	44,2	44,1	52,3	49,4	44,7	40,2	38,9	36,4
20	5	44,7	43,0	43,2	51,2	48,3	43,6	38,9	37,8	35,4
20	10	43,3	41,4	41,8	49,5	46,9	42,0	37,3	36,2	34,0

Tab. A-5: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat 1 nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-fre- quenz	2 TS 20			2 TS 40			2 TS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]
-10	0,1	96.172	102.954	70.704	83.615	47.230	58.093	93.001	163.646	82.535
-10	0,3	129.560	138.045	97.845	109.751	64.405	81.337	122.091	203.500	108.443
-10	1	173.577	183.300	135.082	144.075	88.099	111.157	159.958	252.496	142.409
-10	3	222.769	230.570	177.749	181.842	115.760	145.781	201.554	302.955	180.674
-10	5	248.232	255.204	200.144	201.248	130.683	164.050	222.358	327.939	197.130
-10	10	282.711	296.607	226.093	229.088	152.448	190.833	252.801	361.678	229.053
0	0,1	30.596	35.111	20.401	28.824	15.318	19.265	33.963	65.032	30.937
0	0,3	45.265	51.506	31.579	41.438	22.829	29.242	48.216	87.929	43.554
0	1	66.732	75.192	48.634	59.387	34.011	44.148	68.505	118.380	61.403
0	3	93.295	103.697	70.185	80.831	48.235	62.798	92.638	152.428	82.411
0	5	108.058	119.463	82.495	92.572	56.115	73.168	105.578	170.356	93.953
0	10	129.984	139.201	99.878	110.282	68.352	89.101	125.298	196.078	112.274
5	0,1	16.449	17.388	9.699	17.091	8.929	9.924	17.712	37.340	5.690
5	0,3	24.745	26.581	15.495	25.095	13.531	15.501	25.471	51.650	9.671
5	1	39.097	41.435	25.842	37.792	21.108	24.813	38.796	73.228	16.714
5	3	57.488	60.248	39.818	53.609	30.924	37.019	55.407	98.259	26.641
5	5	67.686	70.842	47.995	62.423	36.543	44.136	64.397	111.567	32.645
5	10	83.500	87.146	60.777	75.966	45.400	55.230	78.272	131.251	42.403
10	0,1	7.806	8.076	4.192	8.785	4.424	4.666	9.509	20.815	9.200
10	0,3	12.590	13.293	7.277	13.677	7.112	7.826	14.416	30.321	13.966
10	1	21.126	22.187	13.036	21.736	11.702	13.344	22.982	45.125	21.993
10	3	32.816	34.138	21.366	32.246	17.964	21.004	34.207	63.205	32.461
10	5	39.532	41.157	26.470	38.344	21.664	25.641	40.488	73.106	38.370
10	10	50.266	52.335	34.729	47.907	27.655	33.098	50.412	88.076	47.596
20	0,1	1.607	1.567	708	2.127	1.002	937	2.585	5.883	2.406
20	0,3	2.920	2.925	1.401	3.682	1.785	1.767	4.300	9.489	4.046
20	1	5.339	5.477	2.798	6.403	3.215	3.357	7.227	15.319	6.838
20	3	9.350	9.547	5.242	10.513	5.453	5.929	11.874	23.610	11.133
20	5	11.758	12.089	6.821	12.981	6.841	7.571	14.500	28.263	13.592
20	10	15.898	16.458	9.631	17.121	9.229	10.433	18.905	35.780	17.699

Tab. A-6: Ergebnisse der komplexen Schermoduln aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat 2 nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	2 TS 20			2 TS 40			2 TS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]
-10	0,1	24,7	24,3	27,6	23,2	26,1	26,9	22,8	18,7	22,7
-10	0,3	22,5	22,0	25,2	21,3	24,3	24,6	21,0	17,0	21,0
-10	1	20,2	19,7	22,7	19,5	22,6	22,5	19,3	15,3	19,3
-10	3	18,2	17,7	20,5	17,9	21,1	20,6	17,7	13,7	17,8
-10	5	17,3	16,8	19,5	17,2	20,4	19,7	17,0	13,0	17,1
-10	10	16,0	15,4	18,6	16,2	19,5	18,5	16,1	12,1	16,3
0	0,1	32,4	31,8	36,1	30,0	32,9	34,4	29,1	25,0	28,5
0	0,3	29,9	29,2	33,2	27,7	30,6	31,7	27,0	22,9	26,5
0	1	27,5	26,7	30,5	25,6	28,5	29,1	25,0	21,0	24,6
0	3	25,3	24,5	28,1	23,8	26,8	27,0	23,3	19,3	23,0
0	5	24,4	23,6	27,1	23,0	26,0	26,0	22,6	18,5	22,3
0	10	23,1	22,2	25,8	22,0	25,1	24,8	21,6	17,5	21,5
5	0,1	36,8	36,6	41,6	33,3	35,9	38,5	33,3	28,5	32,6
5	0,3	34,8	34,1	39,2	31,3	33,9	36,1	31,7	26,6	30,8
5	1	31,4	31,1	35,5	28,8	31,4	33,1	28,8	24,2	28,2
5	3	28,7	28,5	32,4	26,7	29,4	30,6	26,5	22,3	26,0
5	5	27,7	27,5	31,2	25,9	28,5	29,6	25,7	21,5	25,2
5	10	26,4	26,1	29,7	24,9	27,5	28,3	24,7	20,5	24,2
10	0,1	41,7	42,0	47,2	37,7	40,2	43,5	37,0	32,5	36,6
10	0,3	39,2	39,1	44,4	35,3	37,9	40,7	35,1	30,3	34,5
10	1	35,7	35,7	40,5	32,5	35,2	37,5	32,1	27,6	31,6
10	3	32,8	32,9	37,1	30,2	32,9	34,8	29,7	25,5	29,3
10	5	31,7	31,7	35,8	29,3	32,0	33,6	28,8	24,6	28,4
10	10	30,3	30,2	34,2	28,2	30,9	32,2	27,8	23,6	27,3
20	0,1	50,5	51,8	56,8	45,9	48,2	52,6	43,8	40,7	44,4
20	0,3	48,0	48,8	54,2	43,3	45,7	49,8	41,8	38,0	41,9
20	1	45,4	45,8	51,3	40,7	43,3	46,9	39,7	35,4	39,5
20	3	42,0	42,5	47,8	37,9	40,7	43,9	36,8	32,6	36,6
20	5	40,9	41,3	46,5	37,0	39,8	42,7	36,0	31,7	35,7
20	10	39,4	39,6	44,8	35,7	38,5	41,1	34,9	30,4	34,5

Tab. A-7: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Asphalttragschichten mit Asphaltgranulat 2 nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-fre- quenz	1 BS 20			1 BS 40			1 BS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]
-10	0,1	105.149	88.075	51.801	36.957	78.099	102.904	108.571	152.769	66.510
-10	0,3	139.540	117.558	72.301	52.947	104.665	134.814	144.028	193.461	92.804
-10	1	183.803	154.900	100.731	74.478	139.628	175.347	190.653	243.073	127.765
-10	3	231.124	196.221	133.578	98.561	178.711	223.589	239.838	294.782	169.600
-10	5	255.078	216.899	151.088	111.554	198.813	246.538	264.234	321.783	192.773
-10	10	287.961	246.763	176.951	131.787	227.493	278.033	299.178	358.649	223.676
0	0,1	34.087	32.476	15.283	14.664	26.243	43.209	35.089	58.204	22.883
0	0,3	49.860	46.788	23.457	21.894	38.187	60.834	51.731	80.396	34.723
0	1	72.708	67.406	36.037	32.878	55.619	85.589	75.856	110.705	52.478
0	3	100.171	91.887	52.085	46.616	76.536	114.532	104.587	145.474	74.494
0	5	115.088	105.163	61.313	54.428	87.978	130.163	120.028	163.882	86.818
0	10	137.314	125.321	75.608	66.670	105.799	153.206	143.694	190.713	105.685
5	0,1	16.558	16.777	7.157	7.458	13.251	23.265	21.209	33.431	13.501
5	0,3	25.345	25.228	11.391	11.586	19.905	34.074	31.861	47.166	20.894
5	1	40.412	38.872	19.018	18.522	31.474	51.131	48.946	69.889	33.164
5	3	59.778	56.159	29.480	27.672	46.425	72.092	70.345	97.315	49.192
5	5	70.487	65.760	35.550	32.946	54.712	83.747	82.282	112.146	58.207
5	10	86.912	80.650	45.216	41.457	67.717	101.284	100.588	134.024	72.487
10	0,1	7.599	8.114	3.203	3.624	6.511	11.830	10.372	17.860	6.372
10	0,3	12.552	13.070	5.494	5.989	10.423	18.467	16.673	26.634	10.606
10	1	21.395	21.417	9.787	10.119	17.386	29.355	27.256	41.540	17.969
10	3	33.587	32.634	16.063	15.877	26.964	43.475	41.367	60.476	28.151
10	5	40.670	39.087	19.865	19.305	32.473	51.617	49.514	71.061	34.107
10	10	51.831	49.394	26.099	24.968	41.368	64.225	62.395	87.145	43.820
20	0,1	1.442	1.730	583	786	1.434	2.783	2.245	4.759	1.319
20	0,3	2.716	3.127	1.130	1.444	2.576	4.855	4.078	7.849	2.469
20	1	5.123	5.681	2.216	2.680	4.657	8.493	7.431	13.003	4.653
20	3	9.163	9.679	4.096	4.662	8.071	14.006	12.642	21.059	8.158
20	5	11.618	12.133	5.306	5.918	10.110	17.293	15.837	25.504	10.376
20	10	15.864	16.312	7.456	8.109	13.609	22.793	21.254	32.831	14.215

Tab. A-8: Ergebnisse der komplexen Schermoduln aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 1 nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	1 BS 20			1 BS 40			1 BS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]
-10	0,1	23,9	24,0	27,8	28,0	24,6	23,0	24,2	20,4	27,1
-10	0,3	21,6	21,9	25,7	26,0	22,7	21,0	22,0	18,5	24,8
-10	1	19,3	19,9	23,6	24,1	20,8	19,0	19,7	16,7	22,5
-10	3	17,2	17,9	21,7	22,6	19,0	17,0	17,7	14,9	20,3
-10	5	16,2	17,1	20,8	21,9	18,2	16,2	16,7	14,0	19,2
-10	10	15,0	15,9	19,7	20,9	17,1	15,1	15,5	12,9	17,9
0	0,1	31,9	30,6	35,6	33,4	31,4	28,7	32,3	26,9	34,5
0	0,3	29,3	28,3	33,1	31,2	29,2	26,5	29,7	24,8	31,8
0	1	26,8	26,0	30,7	29,2	27,1	24,4	27,1	22,7	29,2
0	3	24,6	24,1	28,6	27,4	25,3	22,5	24,8	20,9	26,9
0	5	23,6	23,2	27,6	26,7	24,4	21,6	23,8	20,1	25,9
0	10	22,2	22,0	26,5	25,7	23,4	20,5	22,5	18,9	24,6
5	0,1	37,9	35,4	41,4	37,9	36,7	33,3	35,5	31,5	38,0
5	0,3	35,5	33,1	39,2	35,8	34,7	31,1	33,0	29,8	35,6
5	1	31,9	30,2	35,7	33,1	31,6	28,3	30,0	26,9	32,5
5	3	28,9	27,9	32,9	31,0	29,0	26,1	27,5	24,5	30,0
5	5	27,7	26,9	31,8	30,1	28,0	25,1	26,5	23,6	29,0
5	10	26,3	25,6	30,5	29,0	26,8	23,9	25,1	22,4	27,6
10	0,1	43,4	40,2	46,4	42,3	41,2	37,9	40,5	35,5	43,1
10	0,3	40,5	37,6	43,8	39,9	38,9	35,3	37,7	33,5	40,3
10	1	36,7	34,4	40,3	37,1	35,6	32,3	34,4	30,4	37,0
10	3	33,4	31,8	37,2	34,7	32,8	29,8	31,7	27,9	34,2
10	5	32,1	30,8	36,0	33,7	31,7	28,8	30,5	26,9	33,0
10	10	30,6	29,4	34,6	32,5	30,5	27,5	29,1	25,7	31,6
20	0,1	53,1	49,3	55,0	50,4	49,6	46,7	49,9	43,3	52,1
20	0,3	50,3	46,6	52,6	47,9	47,1	43,9	47,0	40,9	49,3
20	1	47,3	43,7	50,1	45,4	44,6	41,1	43,9	38,6	46,4
20	3	43,5	40,6	47,0	42,8	41,3	38,1	40,6	35,3	43,2
20	5	42,3	39,5	45,9	41,8	40,4	37,0	39,4	34,5	42,0
20	10	40,6	38,0	44,3	40,5	39,0	35,6	37,8	33,2	40,4

Tab. A-9: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 1 nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-fre- quenz	2 BS 20			2 BS 40			2 BS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]
-10	0,1	115.867	102.787	77.821	47.780	50.514	111.542	126.723	208.022	190.281
-10	0,3	152.386	136.530	104.070	66.491	69.365	146.401	163.818	254.850	236.547
-10	1	198.151	180.073	138.767	93.491	94.559	190.473	205.366	309.444	290.075
-10	3	245.691	225.463	178.117	123.133	122.772	236.265	257.771	363.298	344.616
-10	5	268.610	248.202	198.714	138.654	138.004	260.507	284.311	389.645	370.762
-10	10	301.891	280.939	227.616	161.972	161.198	293.833	315.748	423.307	404.660
0	0,1	38.632	32.566	25.527	18.875	21.366	41.674	51.530	87.234	83.914
0	0,3	55.874	48.211	37.414	27.859	31.271	59.188	71.222	115.614	112.068
0	1	80.488	70.808	54.730	41.267	45.787	83.838	98.058	152.643	149.152
0	3	109.389	98.111	75.904	57.733	63.614	112.753	128.347	193.136	189.406
0	5	124.709	112.616	87.707	66.980	73.480	128.394	144.330	214.314	209.724
0	10	148.013	134.711	105.531	81.226	88.524	151.373	167.986	243.581	238.991
5	0,1	19.217	20.025	12.823	9.644	11.897	21.734	28.275	49.254	46.231
5	0,3	28.958	30.173	19.299	14.825	17.912	32.105	40.401	67.314	64.069
5	1	45.585	47.017	30.452	23.416	27.731	49.114	59.539	96.487	92.773
5	3	66.580	68.235	44.970	34.622	40.303	70.093	82.483	129.587	125.751
5	5	77.906	79.875	53.177	41.063	47.608	81.663	94.565	146.709	142.429
5	10	95.396	97.804	65.842	51.160	58.726	99.066	113.006	171.086	166.761
10	0,1	8.923	9.430	6.130	4.644	5.857	10.728	14.932	26.997	24.606
10	0,3	14.541	15.277	9.900	7.640	9.385	16.950	22.676	39.097	36.357
10	1	24.512	25.401	16.603	12.804	15.374	27.585	35.181	59.101	55.414
10	3	38.084	39.092	25.929	19.909	23.499	41.579	51.044	83.291	78.706
10	5	45.719	46.929	31.381	24.172	28.399	49.614	59.734	96.261	91.154
10	10	57.873	59.364	39.999	30.994	36.036	62.022	73.343	115.337	109.933
20	0,1	1.775	1.893	1.275	994	1.352	2.351	3.889	7.374	6.254
20	0,3	3.291	3.476	2.322	1.830	2.410	4.214	6.552	11.932	10.416
20	1	6.107	6.398	4.253	3.392	4.327	7.550	11.069	19.266	17.285
20	3	10.751	11.114	7.443	5.875	7.311	12.834	17.753	30.511	27.571
20	5	13.546	13.984	9.364	7.435	9.142	15.955	21.630	36.427	33.247
20	10	18.324	18.884	12.664	10.129	12.272	21.215	28.021	45.959	42.434

Tab. A-10: Ergebnisse der komplexen Schermoduln aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 2 nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	2 BS 20			2 BS 40			2 BS 60		
		5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s	5 s	25 s	45 s
T [°C]	f [Hz]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]
-10	0,1	23,0	24,1	24,5	26,7	26,2	22,6	21,0	17,3	18,4
-10	0,3	20,8	21,8	22,5	24,7	24,2	20,4	19,1	15,5	16,4
-10	1	18,5	19,5	20,6	22,6	22,3	18,3	17,6	13,6	14,6
-10	3	16,5	17,5	18,8	20,9	20,8	16,5	15,2	12,0	12,6
-10	5	15,6	16,5	18,0	20,2	20,1	15,7	14,2	11,3	11,8
-10	10	14,4	15,3	16,9	19,2	19,1	14,5	13,1	10,4	10,8
0	0,1	31,1	32,3	31,7	32,6	31,6	29,5	27,1	23,9	24,7
0	0,3	28,5	29,6	29,4	30,2	29,3	27,1	24,9	21,8	22,5
0	1	26,0	27,0	27,2	28,0	27,1	24,7	22,8	19,7	20,3
0	3	23,7	24,7	25,2	26,2	25,3	22,7	21,0	17,9	18,3
0	5	22,7	23,7	24,4	25,4	24,6	21,8	20,1	17,1	17,4
0	10	21,4	22,3	23,3	24,3	23,5	20,6	19,0	16,0	16,3
5	0,1	37,0	36,3	37,1	37,3	35,5	34,8	31,5	29,1	29,9
5	0,3	34,6	33,9	35,1	35,0	33,4	32,5	29,5	27,2	27,8
5	1	31,0	30,6	31,8	32,2	30,7	29,2	26,7	23,9	24,6
5	3	28,0	27,9	29,2	29,9	28,5	26,6	24,5	21,4	22,0
5	5	26,8	26,8	28,2	28,9	27,7	25,6	23,6	20,4	21,0
5	10	25,4	25,4	27,0	27,8	26,6	24,3	22,4	19,3	19,8
10	0,1	42,4	41,4	41,8	42,1	40,0	39,9	35,8	33,5	34,6
10	0,3	39,6	38,7	39,4	39,4	37,6	37,1	33,4	31,2	32,1
10	1	35,7	35,2	36,0	36,3	34,7	33,6	30,5	27,7	28,7
10	3	32,4	32,2	33,1	33,8	32,2	30,7	28,1	25,0	25,9
10	5	31,2	31,0	32,0	32,7	31,3	29,5	27,1	23,9	24,8
10	10	29,6	29,5	30,7	31,4	30,1	28,1	25,8	22,7	23,5
20	0,1	52,1	50,8	50,5	50,6	48,2	49,4	43,9	42,2	43,9
20	0,3	49,2	48,0	47,9	48,0	45,6	46,4	41,3	39,5	40,9
20	1	46,1	45,1	45,3	45,2	43,0	43,4	38,6	36,8	38,0
20	3	42,3	41,7	42,0	42,3	40,2	39,8	35,7	33,0	34,4
20	5	41,1	40,5	41,0	41,2	39,2	38,6	34,7	32,0	33,3
20	10	39,4	38,9	39,6	39,8	37,9	37,0	33,3	30,6	31,8

Tab. A-11: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln der Asphaltbinderschichten mit Asphaltgranulat 2 nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-fre- quenz	TS Ref	1 TS 60	2 TS 60	BS Ref	1 BS 60	2 BS 60
		25 s	25 s	25 s	25 s	25 s	25 s
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]	G* [kPa]
-10	0,1	74.367	185.750	195.356	164.614	208.350	329.630
-10	0,3	102.038	231.303	239.333	210.099	258.063	393.115
-10	1	140.222	289.597	293.837	267.813	318.796	467.528
-10	3	182.167	347.384	347.819	327.056	377.635	537.002
-10	5	204.364	375.357	372.796	356.703	406.750	566.960
-10	10	235.692	413.043	407.328	396.854	445.496	609.199
0	0,1	19.536	66.758	79.999	56.255	80.553	142.232
0	0,3	30.005	91.535	105.167	78.533	107.187	183.229
0	1	46.264	125.816	139.068	110.176	143.571	236.368
0	3	66.592	163.902	175.899	146.419	183.423	291.652
0	5	78.368	184.560	194.529	166.137	205.379	319.277
0	10	96.394	214.065	222.316	194.860	236.572	358.608
5	0,1	8.807	35.977	46.974	29.333	45.844	84.017
5	0,3	14.405	51.458	64.235	42.979	63.411	113.095
5	1	23.917	75.272	89.480	64.212	90.029	154.358
5	3	36.600	102.955	117.620	89.497	120.017	198.886
5	5	44.204	118.242	132.817	103.736	136.657	222.373
5	10	56.236	141.052	155.269	125.232	161.071	256.052
10	0,1	3.607	18.441	26.013	14.294	25.023	46.504
10	0,3	6.403	28.045	37.397	22.285	36.399	66.150
10	1	11.551	43.308	54.733	35.355	54.229	95.423
10	3	18.925	62.193	75.104	52.043	75.529	128.741
10	5	23.535	73.059	86.453	61.801	87.662	146.994
10	10	31.118	89.645	103.583	76.897	105.944	173.898
20	0,1	528	4.345	7.084	2.963	6.692	12.444
20	0,3	1.074	7.389	11.316	5.201	10.754	19.854
20	1	2.246	12.689	18.187	9.235	17.462	31.740
20	3	4.263	20.285	27.539	15.222	26.779	47.684
20	5	5.661	24.963	33.034	18.976	32.325	56.899
20	10	8.171	32.625	41.764	25.219	41.240	71.338

Tab. A-12: Ergebnisse der komplexen Schermoduln aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln ausgewählter Varianten mit der PP04-Prüfgeometrie nach [DIN EN 14770]

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	TS Ref	1 TS 60	2 TS 60	BS Ref	1 BS 60	2 BS 60
		25 s	25 s	25 s	25 s	25 s	25 s
T [°C]	f [Hz]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]	δ [°]
-10	0,1	27,0	19,5	17,5	20,9	18,3	15,4
-10	0,3	24,7	17,6	15,9	19,0	16,6	13,7
-10	1	22,2	15,6	14,3	17,0	14,6	12,0
-10	3	20,0	13,8	12,9	15,2	13,0	10,5
-10	5	19,0	13,0	12,2	14,5	12,3	9,9
-10	10	17,6	11,9	11,4	13,4	11,3	9,1
0	0,1	36,4	26,8	23,5	28,5	24,7	21,9
0	0,3	33,6	24,7	21,7	26,2	22,9	20,0
0	1	30,8	22,5	19,9	24,0	21,0	18,0
0	3	28,5	20,6	18,4	22,1	19,3	16,3
0	5	27,4	19,7	17,7	21,2	18,5	15,5
0	10	26,0	18,6	16,8	20,1	17,4	14,5
5	0,1	42,5	31,3	27,4	33,3	28,7	26,2
5	0,3	39,4	29,1	25,4	30,9	26,9	24,1
5	1	36,0	26,5	23,2	28,1	24,5	21,6
5	3	33,3	24,4	21,5	26,0	22,7	19,7
5	5	32,1	23,5	20,7	25,0	21,8	18,8
5	10	30,6	22,3	19,7	23,8	20,7	17,7
10	0,1	49,0	36,0	31,6	38,2	32,8	30,8
10	0,3	45,7	33,5	29,3	35,6	30,6	28,3
10	1	41,7	30,6	26,7	32,5	28,1	25,5
10	3	38,6	28,4	24,8	30,1	26,1	23,4
10	5	37,2	27,4	24,0	29,0	25,2	22,4
10	10	35,5	26,1	22,9	27,7	24,0	21,2
20	0,1	59,7	45,4	40,4	47,9	41,1	40,6
20	0,3	57,0	42,6	37,6	45,1	38,6	37,5
20	1	53,8	39,7	34,9	42,1	36,1	34,4
20	3	50,4	36,9	32,3	39,3	33,6	31,5
20	5	48,9	35,7	31,3	38,0	32,5	30,4
20	10	46,8	34,2	30,0	36,5	31,2	28,9

Tab. A-13: Ergebnisse der Phasenwinkel aus Messungen der rückgewonnenen Bindemitteln ausgewählter Varianten mit der PP04-Prüfgeometrie nach [DIN EN 14770]

Anhang B
–
Kenngößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
TS Referenz	7	150,0	60,6	2,400	0,2247	0,035	0,500	3.026	234
	4	150,0	60,1	2,424	0,0587	0,035	0,250	5.290	14.625
	6	150,0	60,6	2,399	0,0591	0,035	0,200	4.110	3.868
	14	150,0	61,3	2,401	0,0542	0,035	0,200	3.976	5.408
	8	150,0	60,5	2,397	0,0967	0,035	0,250	2.349	3.272
	9	150,0	60,3	2,396	0,0552	0,035	0,200	4.302	6.581
	1	150,0	60,3	2,424	0,0570	0,035	0,230	4.752	13.817
	12	150,0	60,8	2,424	0,0540	0,035	0,200	4.626	11.476
	11	150,0	61,2	2,421	0,0643	0,035	0,250	4.223	9.407
BS Referenz	6	150,0	59,9	2,533	0,1043	0,035	0,500	8.448	4.459
	14	150,0	59,8	2,516	0,1122	0,035	0,500	7.854	6.382
	2	150,0	60,0	2,546	0,0926	0,035	0,500	9.515	8.103
	10	150,0	60,0	2,541	0,0620	0,035	0,340	9.325	39.923
	12	150,0	60,1	2,519	0,0635	0,035	0,300	7.910	45.435
	5	150,0	59,7	2,527	0,0621	0,035	0,300	8.091	50.018
	1	150,0	60,0	2,541	0,0474	0,035	0,260	9.002	77.879
	9	150,0	60,0	2,516	0,0464	0,035	0,240	8.373	106.578
	4	150,0	60,0	2,516	0,0389	0,035	0,220	9.003	230.456

Tab. A-14: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Referenzvarianten

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
1 TS 20 5 s	5	150,0	60,2	2,397	0,1130	0,035	0,450	5.914	1.414
	12	150,0	60,0	2,417	0,0948	0,035	0,400	7.297	3.739
	2	150,0	59,7	2,425	0,0927	0,035	0,400	7.465	4.851
	13	150,0	59,9	2,402	0,0461	0,035	0,220	7.606	27.343
	11	150,0	60,1	2,398	0,0471	0,035	0,240	8.252	28.663
	4	150,0	59,8	2,402	0,0521	0,035	0,240	7.443	36.314
	9	150,0	59,7	2,402	0,0374	0,035	0,190	7.853	79.377
	8	150,0	60,0	2,429	0,0375	0,035	0,220	9.351	131.896
	7	150,0	59,9	2,420	0,0372	0,035	0,210	8.927	83.829
1 TS 20 25 s	9	150,0	60,4	2,435	0,0857	0,035	0,450	9.180	5.580
	7	150,0	60,2	2,431	0,0836	0,035	0,400	8.272	9.583
	11	150,0	60,0	2,407	0,0861	0,035	0,400	8.035	8.766
	12	150,0	60,2	2,411	0,0515	0,035	0,250	7.918	25.156
	6	150,0	60,1	2,422	0,0526	0,035	0,300	9.543	20.726
	13	150,0	59,9	2,441	0,0525	0,035	0,300	9.566	40.609
	2	150,0	60,9	2,422	0,0337	0,035	0,200	9.268	223.991
	10	150,0	60,3	2,412	0,0354	0,035	0,170	7.227	101.778
	4	150,0	60,0	2,433	0,0324	0,035	0,180	8.484	239.564
1 TS 20 45 s	2	150,0	60,3	2,438	0,0968	0,035	0,450	8.127	3.428
	8	150,0	60,3	2,426	0,0901	0,035	0,400	7.674	6.337
	10	150,0	60,7	2,398	0,0917	0,035	0,350	6.511	5.100
	4	150,0	60,1	2,439	0,0499	0,035	0,250	8.170	39.635
	1	150,0	60,3	2,414	0,0519	0,035	0,220	6.756	62.569
	14	150,0	60,6	2,416	0,0539	0,035	0,250	7.559	12.534
	6	150,0	60,5	2,417	0,0329	0,035	0,150	6.629	278.332
	12	150,0	60,3	2,416	0,0263	0,035	0,150	8.285	165.608
	7	150,0	60,3	2,430	0,0252	0,035	0,150	8.665	455.021

Tab. A-15: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht mit 20 % Zugabe von Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
1 TS 40 5 s	4	150,0	60,4	2,453	0,0645	0,035	0,200	4.844	14.114
	7	150,0	60,2	2,462	0,0830	0,035	0,300	6.048	7.474
	2	150,0	60,4	2,455	0,0838	0,035	0,300	5.993	8.240
	3	150,0	60,3	2,432	0,0887	0,035	0,250	4.592	3.479
	6	150,0	60,4	2,441	0,0554	0,035	0,150	3.936	26.055
	9	150,0	60,3	2,434	0,0552	0,035	0,150	3.945	29.256
	13	150,0	60,3	2,438	0,0383	0,035	0,120	4.206	81.479
	1	150,0	60,5	2,442	0,0287	0,035	0,100	4.295	401.721
	14	150,0	60,4	2,453	0,0278	0,035	0,110	5.104	175.641
1 TS 40 25 s	6	150,0	60,1	2,437	0,1081	0,035	0,350	5.522	5.963
	9	150,0	60,1	2,481	0,1118	0,035	0,350	5.340	4.619
	1	150,0	60,1	2,468	0,1042	0,035	0,350	5.728	2.984
	8	150,0	60,1	2,456	0,0758	0,035	0,280	6.127	14.742
	10	150,0	60,2	2,461	0,0505	0,035	0,200	6.195	92.839
	4	150,0	59,9	2,482	0,0549	0,035	0,200	5.694	56.241
	11	150,0	60,1	2,459	0,0297	0,035	0,120	5.425	1.178.992
	3	150,0	59,7	2,477	0,0356	0,035	0,140	5.598	269.794
	12	150,0	60,1	2,462	0,0345	0,035	0,170	7.416	178.715
1 TS 40 45 s	8	150,0	60,2	2,439	0,0992	0,035	0,500	6.515	7.721
	1	150,0	60,1	2,427	0,0922	0,035	0,400	6.089	4.994
	12	150,0	60,3	2,453	0,0857	0,035	0,450	6.842	8.593
	9	150,0	60,3	2,454	0,0542	0,035	0,300	6.310	38.969
	11	150,0	60,2	2,449	0,0557	0,035	0,300	6.781	54.556
	14	150,0	60,2	2,455	0,0514	0,035	0,300	7.004	36.366
	7	150,0	60,3	2,443	0,0606	0,035	0,300	6.922	21.822
	6	150,0	60,4	2,439	0,0596	0,035	0,300	6.687	34.459
	13	150,0	60,2	2,453	0,0623	0,035	0,350	6.840	20.243

Tab. A-16: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht mit 40 % Zugabe von Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
1 TS 60 5 s	7	150,0	60,5	2,452	0,1631	0,035	0,900	7.300	1.539
	8	150,0	60,3	2,450	0,0551	0,035	0,400	8.768	167.020
	6	150,0	60,5	2,457	0,0608	0,035	0,400	8.624	147.127
	10	150,0	60,5	2,471	0,0498	0,035	0,400	9.556	286.873
	2	150,0	60,1	2,446	0,1097	0,035	0,700	7.775	11.547
	12	150,0	60,4	2,472	0,1119	0,035	0,800	8.749	7.463
	9	150,0	60,3	2,475	0,0735	0,035	0,550	8.875	51.752
	1	150,0	59,4	2,468	0,0750	0,035	0,550	9.083	45.535
	4	150,0	60,4	2,446	0,0807	0,035	0,550	8.796	35.656
1 TS 60 25 s	6	150,0	60,2	2,487	0,1798	0,035	1,300	13.331	992
	11	150,0	59,9	2,472	0,1434	0,035	1,000	12.750	4.592
	12	150,0	59,9	2,485	0,1289	0,035	1,000	14.190	6.011
	2	150,0	59,8	2,490	0,0687	0,035	0,600	15.580	95.797
	4	150,0	60,3	2,473	0,0730	0,035	0,600	14.664	51.966
	10	150,0	59,8	2,477	0,0705	0,035	0,550	13.851	78.726
	7	150,0	60,1	2,474	0,0438	0,035	0,350	13.617	952.368
	14	150,0	60,3	2,486	0,0479	0,035	0,400	14.432	455.078
	1	150,0	59,9	2,479	0,0460	0,035	0,420	15.848	356.897
1 TS 60 45 s	13	150,0	60,4	2,492	0,1478	0,035	1,100	13.660	2.136
	12	150,0	60,0	2,493	0,1358	0,035	1,000	13.469	4.233
	1	150,0	60,3	2,466	0,1304	0,035	0,900	12.575	2.167
	7	150,0	60,3	2,475	0,0638	0,035	0,500	13.812	42.990
	11	150,0	60,4	2,481	0,0827	0,035	0,600	12.944	20.130
	4	150,0	60,2	2,494	0,0601	0,035	0,500	14.663	120.723
	2	150,0	60,3	2,481	0,0339	0,035	0,300	14.822	n.b.
	5	150,0	60,3	2,476	0,0367	0,035	0,300	13.703	708.117
	9	150,0	60,3	2,493	n.b.	0,035	0,300	n.b.	n.b.

Tab. A-17: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht mit 60 % Zugabe von Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul [E*]	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
2 TS 20 5 s	12	150,0	60,3	2,306	0,1036	0,035	0,300	3.766	5.168
	14	150,0	60,3	2,305	0,0855	0,035	0,250	3.534	2.809
	2	150,0	60,3	2,393	0,0583	0,035	0,300	5.859	9.846
	8	150,0	60,3	2,375	0,0623	0,035	0,300	5.421	16.771
	6	150,0	60,4	2,390	0,0813	0,035	0,350	5.259	4.381
	3	150,0	60,4	2,392	0,0573	0,035	0,270	5.883	19.487
	1	150,0	60,1	2,374	0,0527	0,035	0,250	5.299	11.911
	9	150,0	60,3	2,390	0,0513	0,035	0,250	5.329	17.387
	10	150,0	60,2	2,378	0,0601	0,035	0,300	4.898	12.523
2 TS 20 25 s	5	150,0	60,5	2,419	0,0970	0,035	0,500	9.087	5.216
	10	150,0	60,7	2,416	0,0951	0,035	0,500	9.268	5.028
	11	150,0	60,7	2,406	0,1009	0,035	0,500	8.735	4.596
	2	150,0	60,5	2,411	0,0547	0,035	0,330	10.216	37.605
	7	150,0	60,5	2,414	0,0701	0,035	0,350	8.512	14.461
	14	150,0	60,6	2,420	0,0579	0,035	0,350	10.308	25.431
	1	150,0	60,4	2,414	0,0405	0,035	0,240	9.584	184.603
	9	150,0	60,4	2,412	0,0373	0,035	0,240	10.421	383.395
	13	150,0	60,5	2,417	0,0362	0,035	0,240	10.719	434.636
2 TS 20 45 s	13	150,0	60,1	2,442	0,0867	0,035	0,450	9.070	5.340
	12	150,0	60,4	2,445	0,0871	0,035	0,450	9.030	3.387
	10	150,0	64,4	2,430	0,0772	0,035	0,400	8.965	4.105
	8	150,0	60,2	2,448	0,0574	0,035	0,300	8.750	19.359
	7	150,0	60,2	2,435	0,0527	0,035	0,300	9.529	33.090
	3	150,0	60,3	2,432	0,0516	0,035	0,300	9.734	27.848
	2	150,0	60,3	2,433	0,0350	0,035	0,200	8.923	95.099
	4	150,0	60,4	2,435	0,0360	0,035	0,200	8.694	72.598
	5	150,0	60,5	2,443	0,0367	0,035	0,200	8.515	108.761

Tab. A-18: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht mit 20 % Zugabe von Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
2 TS 40 5 s	10	150,0	59,9	2,458	0,1919	0,035	0,900	8.544	1.416
	4	150,0	59,8	2,452	0,1664	0,035	0,900	9.851	1.576
	1	150,0	60,3	2,439	0,1668	0,035	0,750	8.123	1.545
	7	150,0	60,5	2,439	0,0999	0,035	0,500	8.824	7.929
	14	150,0	60,1	2,462	0,0654	0,035	0,450	12.028	57.425
	3	150,0	60,1	2,445	0,0740	0,035	0,450	10.631	32.175
	2	150,0	60,0	2,445	0,0445	0,035	0,300	11.295	413.345
	5	150,0	59,9	2,455	0,0484	0,035	0,300	10.367	413.172
	13	150,0	60,0	2,443	0,0476	0,035	0,300	10.547	178.055
2 TS 40 25 s	2	150,0	60,1	2,462	0,1574	0,035	0,600	6.805	1.899
	5	150,0	60,2	2,474	0,1351	0,035	0,600	7.927	2.409
	7	150,0	59,8	2,474	0,1334	0,035	0,600	8.025	2.806
	8	150,0	59,7	2,463	0,0650	0,035	0,300	7.730	74.542
	3	150,0	60,1	2,468	0,0541	0,035	0,300	9.275	135.542
	1	150,0	60,0	2,476	0,0600	0,035	0,320	9.008	102.777
	13	150,0	59,7	2,474	0,0401	0,035	0,220	8.737	843.811
	4	150,0	60,1	2,469	0,0429	0,035	0,250	9.505	246.912
	10	150,0	59,9	2,464	0,0412	0,035	0,250	9.892	205.953
2 TS 40 45 s	13	150,0	60,2	2,465	0,1081	0,035	0,600	9.905	7.367
	9	150,0	60,3	2,485	0,1150	0,035	0,600	9.307	5.635
	8	150,0	60,3	2,482	0,1130	0,035	0,600	9.479	5.253
	2	150,0	60,5	2,465	0,0706	0,035	0,400	9.799	24.877
	6	150,0	60,4	2,471	0,0843	0,035	0,450	9.331	17.588
	4	150,0	60,4	2,488	0,0730	0,035	0,430	10.253	21.517
	10	150,0	60,3	2,466	0,0311	0,035	0,200	10.062	2.362.428
	12	150,0	60,5	2,476	0,0529	0,035	0,300	9.498	79.434
	14	150,0	60,4	2,482	0,0431	0,035	0,250	9.452	469.325

Tab. A-19: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht mit 40 % Zugabe von Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
2 TS 60 5 s	7	150,0	60,1	2,444	0,2679	0,035	1,700	11.780	330
	11	150,0	60,2	2,459	0,1905	0,035	1,600	15.573	945
	12	150,0	60,1	2,455	0,1723	0,035	1,400	15.010	1.201
	8	150,0	60,2	2,452	0,1077	0,035	1,000	16.987	8.924
	4	150,0	60,0	2,448	0,0813	0,035	0,800	17.828	29.123
	3	150,0	59,7	2,463	0,0766	0,035	0,800	18.938	67.178
	1	150,0	59,8	2,453	0,0497	0,035	0,550	19.635	648.117
	2	150,0	60,1	2,452	0,0567	0,035	0,600	18.887	232.715
	9	150,0	60,1	2,457	0,0538	0,035	0,600	19.898	278.645
2 TS 60 25 s	13	150,0	60,4	2,467	0,1969	0,035	1,500	14.103	935
	8	150,0	60,9	2,432	0,1654	0,035	0,900	9.909	1.790
	4	150,0	60,8	2,471	0,1550	0,035	1,200	14.242	1.678
	3	150,0	60,7	2,436	0,0968	0,035	0,800	14.975	12.854
	9	150,0	60,4	2,471	0,0559	0,035	0,500	15.755	137.159
	1	150,0	60,5	2,457	0,0543	0,035	0,450	14.478	259.856
	7	150,0	60,6	2,458	0,0415	0,035	0,400	16.657	762.669
	6	150,0	60,8	2,454	0,0408	0,035	0,400	16.936	641.342
	14	150,0	60,4	2,471	0,0456	0,035	0,450	17.231	522.854
2 TS 60 45 s	1	150,0	59,8	2,486	0,1989	0,035	1,000	9.194	1.006
	9	150,0	59,6	2,473	0,1625	0,035	0,850	9.507	1.025
	10	150,0	59,7	2,490	0,1146	0,035	0,700	10.995	7.839
	6	150,0	59,7	2,482	0,0459	0,035	0,300	10.951	933.958
	7	150,0	60,0	2,492	0,0847	0,035	0,550	11.517	26.286
	4	150,0	59,9	2,473	0,0680	0,035	0,470	12.130	44.071
	5	150,0	59,5	2,479	0,0494	0,035	0,380	13.238	125.382
	2	150,0	60,1	2,479	0,0703	0,035	0,470	11.727	55.059
	8	150,0	59,4	2,490	0,0481	0,035	0,360	12.816	322.574

Tab. A-20: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphalttragschicht mit 60 % Zugabe von Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
1 BS 20 5 s	3	150,0	60,7	2,490	0,1069	0,035	0,500	8.243	9.268
	8	150,0	60,7	2,486	0,1139	0,035	0,500	7.740	5.276
	12	150,0	60,5	2,470	0,1189	0,035	0,500	7.411	5.405
	1	150,0	60,6	2,471	0,0744	0,035	0,350	8.026	21.399
	5	150,0	60,6	2,493	0,0622	0,035	0,330	8.987	41.238
	7	150,0	60,6	2,479	0,0672	0,035	0,330	8.322	56.581
	10	150,0	60,8	2,477	0,0341	0,035	0,200	9.759	283.289
	13	150,0	60,6	2,479	0,0387	0,035	0,200	8.089	334.491
	14	150,0	60,5	2,487	0,0394	0,035	0,240	9.873	215.757
1 BS 20 25 s	5	150,0	59,9	2,498	0,1210	0,035	0,450	6.498	4.737
	13	150,0	60,2	2,475	0,1250	0,035	0,500	7.050	4.442
	10	150,0	60,0	2,505	0,1300	0,035	0,550	7.508	2.889
	11	150,0	60,1	2,502	0,0491	0,035	0,260	8.684	100.893
	1	150,0	60,2	2,485	0,0481	0,035	0,250	8.466	132.276
	12	150,0	60,0	2,482	0,0491	0,035	0,240	7.917	99.533
	6	150,0	60,0	2,482	0,0779	0,035	0,340	7.423	20.841
	9	150,0	59,8	2,509	0,0614	0,035	0,320	8.791	35.742
	7	150,0	60,1	2,478	0,0607	0,035	0,300	8.275	42.397
1 BS 20 45 s	1	150,0	60,0	2,503	0,1072	0,035	0,280	4.331	3.937
	2	150,0	59,7	2,531	0,0919	0,035	0,300	5.462	9.566
	6	150,0	59,5	2,539	0,0959	0,035	0,300	5.239	10.358
	5	150,0	58,9	2,509	0,0728	0,035	0,230	5.080	24.642
	13	150,0	59,6	2,546	0,0607	0,035	0,230	6.093	54.593
	14	150,0	59,6	2,513	0,0695	0,035	0,230	5.317	23.476
	4	150,0	60,6	2,535	0,0414	0,035	0,150	5.264	303.515
	9	150,0	59,4	2,516	0,0432	0,035	0,150	5.044	109.991
	11	150,0	59,7	2,510	0,0438	0,035	0,150	4.977	207.964

Tab. A-21: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschicht mit 20 % Zugabe von Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul [E*]	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
1 BS 40 5 s	1	150,0	60,0	2,578	0,0944	0,035	0,350	6.325	15.219
	5	150,0	59,8	2,572	0,0939	0,035	0,400	7.364	13.696
	12	150,0	59,8	2,562	0,0913	0,035	0,400	7.576	18.305
	3	150,0	60,1	2,567	0,0479	0,035	0,240	8.119	261.791
	4	150,0	60,1	2,590	0,0696	0,035	0,280	6.669	70.719
	2	150,0	59,9	2,568	0,0660	0,035	0,300	7.604	57.298
	7	150,0	60,0	2,569	0,0499	0,035	0,240	7.783	205.770
	6	150,0	60,1	2,566	0,0627	0,035	0,300	8.009	60.930
	8	150,0	59,7	2,574	0,0516	0,035	0,220	6.795	324.779
1 BS 40 25 s	12	150,0	60,2	2,529	0,1385	0,035	0,600	7.733	2.431
	11	150,0	60,1	2,546	0,1329	0,035	0,650	8.773	2.803
	1	150,0	59,9	2,552	0,1362	0,035	0,650	8.558	3.433
	2	150,0	59,8	2,534	0,0692	0,035	0,400	9.999	48.609
	9	150,0	59,8	2,558	0,0717	0,035	0,400	9.646	22.666
	3	150,0	60,3	2,537	0,0451	0,035	0,280	10.303	211.588
	7	150,0	60,2	2,536	0,0714	0,035	0,420	10.226	46.756
	13	150,0	59,9	2,535	0,0490	0,035	0,280	9.476	204.476
	5	150,0	60,2	2,552	0,0482	0,035	0,280	9.630	112.077
1 BS 40 45 s	5	150,0	60,1	2,552	0,1443	0,035	0,900	11.442	3.518
	12	150,0	59,7	2,565	0,1341	0,035	0,900	12.220	3.137
	4	150,0	59,8	2,561	0,1445	0,035	0,900	11.343	3.645
	8	150,0	60,0	2,552	0,0916	0,035	0,600	11.686	17.831
	9	150,0	59,7	2,571	0,0760	0,035	0,520	12.098	35.172
	10	150,0	59,6	2,555	0,0710	0,035	0,500	12.404	56.163
	11	150,0	60,0	2,555	0,0477	0,035	0,350	12.517	293.632
	2	150,0	60,0	2,561	0,0505	0,035	0,330	11.075	443.800
	6	150,0	60,1	2,554	0,0509	0,035	0,370	12.475	202.243

Tab. A-22: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschicht mit 40 % Zugabe von Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
1 BS 60 5 s	5	150,0	60,0	2,555	0,1531	0,035	1,000	11.946	2.733
	7	150,0	60,0	2,561	0,1546	0,035	1,050	12.440	1.557
	13	150,0	60,2	2,572	0,1482	0,035	1,050	12.980	2.194
	2	150,0	60,2	2,557	0,0940	0,035	0,750	14.423	12.978
	3	150,0	60,2	2,556	0,0823	0,035	0,600	13.014	45.374
	9	150,0	60,1	2,572	0,0883	0,035	0,700	14.278	27.032
	12	150,0	60,1	2,556	0,0559	0,035	0,450	14.074	212.339
	6	150,0	60,1	2,557	0,0507	0,035	0,430	14.758	190.673
	8	150,0	60,0	2,568	0,0496	0,035	0,430	15.086	290.207
1 BS 60 25 s	11	150,0	60,1	2,586	0,2175	0,035	1,500	12.765	668
	5	150,0	60,0	2,579	0,1588	0,035	1,200	13.900	2.513
	4	150,0	60,1	2,571	0,1366	0,035	1,100	14.779	4.173
	8	150,0	60,1	2,586	0,0903	0,035	0,800	16.063	20.979
	9	150,0	59,8	2,574	0,0816	0,035	0,720	15.900	31.992
	3	150,0	60,0	2,572	0,0766	0,035	0,650	15.221	66.551
	1	150,0	59,9	2,575	0,0502	0,035	0,470	16.431	262.223
	13	150,0	59,8	2,582	0,0454	0,035	0,450	17.330	546.527
	14	150,0	60,1	2,574	0,0493	0,035	0,450	15.955	555.203
1 BS 60 45 s	14	150,0	60,0	2,572	0,1551	0,035	0,980	11.548	2.407
	7	150,0	60,1	2,586	0,1617	0,035	0,980	11.079	2.953
	8	150,0	60,1	2,593	0,1578	0,035	0,980	11.353	2.556
	6	150,0	60,1	2,577	0,0994	0,035	0,700	12.684	15.847
	5	150,0	60,1	2,596	0,0897	0,035	0,650	12.988	21.401
	1	150,0	60,1	2,574	0,0832	0,035	0,550	11.736	26.549
	11	150,0	60,0	2,578	0,0385	0,035	0,300	13.055	1.039.301
	10	150,0	60,1	2,577	0,0543	0,035	0,400	12.738	231.754
	9	150,0	60,1	2,591	0,0533	0,035	0,400	12.983	273.594

Tab. A-23: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschicht mit 60 % Zugabe von Asphaltgranulat 1 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
2 BS 20 5 s	3	150,0	60,2	2,467	0,1329	0,035	0,500	6.630	5.268
	5	150,0	59,9	2,501	0,1375	0,035	0,700	9.167	3.952
	7	150,0	60,3	2,496	0,1184	0,035	0,600	9.046	6.778
	9	150,0	60,1	2,474	0,0790	0,035	0,400	8.752	32.976
	11	150,0	60,1	2,509	0,0738	0,035	0,430	10.137	37.842
	14	150,0	60,0	2,484	0,0770	0,035	0,400	8.979	27.248
	2	150,0	60,0	2,480	0,0444	0,035	0,250	9.180	172.944
	12	150,0	60,1	2,487	0,0438	0,035	0,250	9.306	346.868
	13	150,0	60,2	2,499	0,0412	0,035	0,250	9.899	299.582
2 BS 20 25 s	11	150,0	60,0	2,529	0,1553	0,035	0,800	9.335	3.081
	3	150,0	60,1	2,512	0,1573	0,035	0,760	8.737	4.611
	9	150,0	60,1	2,524	0,1547	0,035	0,810	9.495	3.907
	1	150,0	60,1	2,516	0,1002	0,035	0,550	9.745	21.490
	2	150,0	60,2	2,520	0,0970	0,035	0,530	9.673	18.431
	12	150,0	60,1	2,532	0,0855	0,035	0,500	10.301	23.891
	13	150,0	60,1	2,527	0,0395	0,035	0,250	10.329	527.033
	7	150,0	60,1	2,519	0,0508	0,035	0,300	9.894	184.336
	10	150,0	60,1	2,520	0,0511	0,035	0,280	9.080	198.446
2 BS 20 45 s	2	150,0	60,4	2,482	0,1037	0,035	0,400	6.670	7.331
	3	150,0	60,5	2,499	0,1134	0,035	0,400	6.102	6.225
	8	150,0	60,4	2,503	0,1081	0,035	0,400	6.401	8.704
	4	150,0	60,6	2,483	0,0667	0,035	0,270	6.680	43.799
	6	150,0	60,5	2,503	0,0698	0,035	0,300	7.197	25.310
	11	150,0	60,4	2,487	0,0621	0,035	0,260	6.861	49.949
	9	150,0	60,5	2,501	0,0401	0,035	0,200	7.790	198.070
	12	150,0	60,4	2,486	0,0535	0,035	0,200	5.841	134.012
	13	150,0	60,3	2,490	0,0451	0,035	0,200	6.927	242.540

Tab. A-24: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschicht mit 20 % Zugabe von Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
2 BS 40 5 s	3	150,0	60,3	2,565	0,1423	0,035	0,400	4.862	6.365
	5	150,0	60,1	2,544	0,1317	0,035	0,420	5.542	6.236
	10	150,0	60,0	2,569	0,1387	0,035	0,400	4.987	5.490
	4	150,0	59,9	2,569	0,0907	0,035	0,400	7.628	35.834
	6	150,0	60,5	2,551	0,0927	0,035	0,330	6.033	17.764
	13	150,0	60,0	2,548	0,0820	0,035	0,330	6.817	32.593
	1	150,0	59,5	2,551	0,0524	0,035	0,220	6.686	267.612
	8	150,0	60,0	2,568	0,0549	0,035	0,220	6.381	342.678
	9	150,0	59,7	2,553	0,0512	0,035	0,220	6.855	226.985
2 BS 40 25 s	9	150,0	60,1	2,561	0,1243	0,035	0,600	8.618	7.266
	14	150,0	60,1	2,579	0,1366	0,035	0,620	8.119	6.284
	5	150,0	60,2	2,575	0,1348	0,035	0,640	8.506	4.621
	2	150,0	60,2	2,569	0,0929	0,035	0,450	8.466	37.786
	13	150,0	60,0	2,567	0,0905	0,035	0,450	8.693	30.980
	4	150,0	60,3	2,580	0,0941	0,035	0,480	8.959	23.891
	3	150,0	60,2	2,576	n.b.	0,035	0,000	n.b.	n.b.
	7	150,0	60,1	2,568	0,0525	0,035	0,300	9.565	426.357
	11	150,0	60,1	2,570	0,0604	0,035	0,320	8.937	201.006
2 BS 40 45 s	3	150,0	60,0	2,580	0,1414	0,035	0,850	10.924	4.050
	6	150,0	59,8	2,564	0,1557	0,035	0,900	10.527	3.196
	11	150,0	60,0	2,576	0,1412	0,035	0,850	10.939	4.363
	8	150,0	60,1	2,570	0,0838	0,035	0,550	11.649	36.134
	9	150,0	58,1	2,585	0,0917	0,035	0,550	10.642	23.404
	14	150,0	59,6	2,565	0,0794	0,035	0,540	12.055	46.808
	1	150,0	60,4	2,578	0,0539	0,035	0,360	11.420	366.722
	2	150,0	59,7	2,572	0,0668	0,035	0,400	10.362	214.506
	10	150,0	58,5	2,570	0,0510	0,035	0,370	12.456	602.106

Tab. A-25: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschicht mit 40 % Zugabe von Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul [E*]	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
2 BS 60 5 s	5	150,0	60,0	2,559	0,1551	0,035	1,200	14.234	3.862
	10	150,0	60,1	2,542	0,1558	0,035	1,220	14.419	3.873
	13	150,0	60,1	2,562	0,1570	0,035	1,250	14.662	2.865
	3	150,0	59,8	2,553	0,1026	0,035	0,900	15.974	15.140
	14	150,0	60,1	2,563	0,0893	0,035	0,800	16.231	23.182
	9	150,0	60,1	2,550	0,0834	0,035	0,700	15.111	56.076
	6	150,0	60,2	2,559	0,0508	0,035	0,430	14.722	882.932
	8	150,0	60,0	2,551	0,0649	0,035	0,600	16.495	171.453
	12	150,0	60,1	2,555	0,0602	0,035	0,570	16.855	272.454
2 BS 60 25 s	13	150,0	59,9	2,571	0,1472	0,035	1,400	17.573	5.994
	4	150,0	59,7	2,570	0,1474	0,035	1,450	18.192	4.357
	14	150,0	59,7	2,557	0,1513	0,035	1,400	17.094	4.183
	6	150,0	60,3	2,558	0,0989	0,035	1,000	18.492	25.149
	5	150,0	60,0	2,558	0,0902	0,035	0,950	19.219	38.347
	10	150,0	59,9	2,572	0,0858	0,035	0,950	20.210	31.110
	9	150,0	59,8	2,571	0,0540	0,035	0,600	19.846	351.254
	8	150,0	60,0	2,559	0,0583	0,035	0,630	19.357	300.775
	3	150,0	59,7	2,558	0,0588	0,035	0,660	20.161	247.153
2 BS 60 45 s	4	150,0	59,3	2,569	0,1330	0,035	1,200	16.596	6.027
	2	150,0	59,8	2,552	0,1336	0,035	1,200	16.520	6.304
	8	150,0	59,6	2,567	0,1353	0,035	1,200	16.324	7.388
	13	150,0	59,9	2,562	0,0557	0,035	0,550	17.536	378.097
	1	150,0	59,7	2,560	0,0874	0,035	0,850	17.666	39.476
	12	150,0	59,8	2,575	0,0908	0,035	0,800	15.965	46.196
	9	150,0	59,6	2,561	0,0899	0,035	0,850	17.175	38.455
	5	150,0	59,5	2,560	0,0607	0,035	0,580	17.014	300.200
	11	150,0	59,7	2,569	0,0593	0,035	0,580	17.409	259.590

Tab. A-26: Kenngrößen zur Ermittlung der Ermüdungsfunktionen der Asphaltbinderschicht mit 60 % Zugabe von Asphaltgranulat 2 unter Variation der Nachmischzeit

Anhang C
–
Prüfergebnisse der Praxisvarianten

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	TS Referenz PX		1 TS 60 PX		2 TS 60 PX	
		25 s	25 s	25 s	25 s	25 s	25 s
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
-10	10	256.006	16,1	240.494	16,6	337.417	12,6
-10	5	224.967	17,3	210.324	17,7	304.598	13,5
-10	3	202.916	18,1	189.424	18,4	280.657	14,1
-10	1	159.289	20,1	149.083	20,1	232.997	15,5
-10	0,3	120.131	22,0	112.477	21,8	187.477	17,1
-10	0,1	90.094	24,0	84.636	23,6	150.470	18,7
0	10	123.844	22,4	117.989	22,3	185.166	17,6
0	5	103.561	23,6	98.901	23,3	161.064	18,5
0	3	90.094	24,4	86.407	24,0	144.460	19,1
0	1	65.711	26,3	63.555	25,7	112.552	20,6
0	0,3	45.439	28,3	44.445	27,6	84.368	22,4
0	0,1	31.500	30,4	31.181	29,6	63.260	24,2
5	10	79.761	25,8	78.035	25,3	129.364	20,4
5	5	64.957	27,0	63.873	26,4	110.102	21,3
5	3	55.468	27,9	54.758	27,2	96.643	22,1
5	1	38.551	30,1	38.372	29,3	71.527	24,3
5	0,3	25.061	32,8	25.257	31,8	49.800	27,1
5	0,1	16.711	34,9	17.114	33,8	36.556	28,6
10	10	49.183	29,3	49.795	28,5	87.416	23,3
10	5	38.959	30,6	39.742	29,7	72.683	24,3
10	3	32.568	31,6	33.436	30,6	62.707	25,1
10	1	21.535	34,0	22.391	32,8	44.629	27,5
10	0,3	13.212	36,9	14.019	35,6	29.761	30,5
10	0,1	8.247	39,4	8.957	37,9	20.811	32,3
20	10	16.707	37,4	18.429	35,7	35.941	30,0
20	5	12.498	38,8	13.969	37,0	28.624	31,1
20	3	10.024	39,8	11.317	37,9	24.105	31,9
20	1	5.932	42,7	6.889	40,6	15.479	35,1
20	0,3	3.316	45,3	3.963	43,2	9.826	37,3
20	0,1	1.864	47,9	2.288	45,8	6.255	39,6

Tab. A-27: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an den Praxisvarianten Asphalttragschicht

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	BS Referenz PX		1 BS 60 PX		2 BS 60 PX	
		25 s	25 s	25 s	25 s	25 s	25 s
T [°C]	f [Hz]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]	G* [kPa]	δ [°]
-10	10	310.998	13,2	309.539	14,2	335.902	13,3
-10	5	279.451	14,3	276.239	15,1	301.916	14,3
-10	3	256.775	15,1	252.726	15,7	277.073	15,1
-10	1	210.295	16,7	205.791	17,1	226.471	16,8
-10	0,3	165.968	18,6	162.167	18,6	178.284	18,7
-10	0,1	130.349	20,4	127.775	20,1	140.273	20,6
0	10	159.924	19,3	162.498	19,1	176.595	19,2
0	5	137.159	20,3	139.684	19,9	151.552	20,3
0	3	121.871	21,1	124.295	20,6	134.399	21,1
0	1	92.553	22,8	95.607	21,9	101.598	23,0
0	0,3	67.304	24,7	70.523	23,5	73.442	25,2
0	0,1	49.099	26,5	52.297	25,0	52.903	27,4
5	10	107.060	22,5	111.686	21,8	119.323	22,6
5	5	89.479	23,6	94.009	22,6	99.828	23,7
5	3	77.700	24,4	82.362	23,3	86.511	24,7
5	1	55.796	26,7	60.140	25,3	61.777	27,3
5	0,3	37.624	29,5	41.473	27,8	41.119	30,5
5	0,1	26.696	31,1	30.246	29,1	28.907	32,5
10	10	68.509	25,8	75.079	24,4	77.672	26,0
10	5	55.780	26,9	61.957	25,3	63.208	27,3
10	3	47.495	27,8	53.503	26,0	53.670	28,3
10	1	32.640	30,2	37.662	28,1	36.707	31,0
10	0,3	20.965	33,1	24.979	30,7	23.305	34,4
10	0,1	14.095	34,9	17.448	32,3	15.430	36,7
20	10	25.093	33,1	31.007	30,5	29.194	33,9
20	5	19.492	34,2	24.627	31,4	22.553	35,3
20	3	16.104	35,0	20.722	32,0	18.536	36,3
20	1	9.988	37,9	13.352	34,8	11.313	39,7
20	0,3	6.072	39,9	8.534	36,6	6.704	42,3
20	0,1	3.721	41,8	5.504	38,5	3.984	44,9

Tab. A-28: Ergebnisse der DSR-Untersuchungen an den Praxisvarianten der Asphaltbinderschicht

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul [E*]	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
TS Referenz PX	3	150,0	61,0	2,399	0,1010	0,035	0,380	6.476	1.621
	15	150,0	60,6	2,377	0,1102	0,035	0,400	6.280	1.212
	17	150,0	60,7	2,411	0,1012	0,035	0,420	7.212	1.875
	5	150,0	61,3	2,411	0,0709	0,035	0,300	7.088	2.745
	7	150,0	60,8	2,381	0,0581	0,035	0,250	7.013	9.096
	10	150,0	60,3	2,384	0,0531	0,035	0,230	6.961	15.551
	6	150,0	60,7	2,383	0,0227	0,035	0,100	5.423	181.306
	9	150,0	60,9	2,385	0,0306	0,035	0,100	4.032	99.943
	11	150,0	60,5	2,404	0,0180	0,035	0,100	6.856	494.939
1 TS 60 PX	7	150,0	61,4	2,409	0,1541	0,035	0,650	7.564	1.451
	11	150,0	58,4	2,408	0,1479	0,035	0,610	7.370	3.096
	17	150,0	60,0	2,378	0,1519	0,035	0,580	6.799	2.441
	9	150,0	59,8	2,410	0,0920	0,035	0,400	7.520	14.552
	13	150,0	60,1	2,395	0,0883	0,035	0,380	7.404	20.820
	15	150,0	61,0	2,389	0,0916	0,035	0,380	7.136	15.301
	1	150,0	60,5	2,408	0,0533	0,035	0,260	8.005	98.787
	8	150,0	59,9	2,396	0,0543	0,035	0,220	6.461	206.682
	14	150,0	61,2	2,394	0,0536	0,035	0,240	7.253	130.532
2 TS 60 PX	10	150,0	60,0	2,360	0,1579	0,035	0,750	8.580	1.964
	11	150,0	60,6	2,330	0,1777	0,035	0,750	7.624	587
	15	150,0	59,5	2,355	0,1532	0,035	0,750	8.844	1.806
	2	150,0	59,9	2,363	0,1115	0,035	0,600	9.607	9.718
	8	150,0	60,0	2,335	0,1032	0,035	0,480	8.172	5.921
	17	150,0	61,1	2,331	0,0868	0,035	0,450	9.059	16.304
	4	150,0	60,5	2,359	0,0481	0,035	0,300	10.441	207.030
	5	150,0	59,5	2,333	0,0512	0,035	0,300	9.804	181.306
	14	150,0	60,6	2,338	0,0517	0,035	0,270	8.619	211.802

Tab. A-29: Kennwerte zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion der Praxisvarianten der Asphalttragschicht

Variante	Probekörper	Durchmesser	Höhe	Raum-dichte	elasti-sche An-fangs-dehnung	Unter-span-nung	Ober-span-nung	Steifig-keits-modul E*	N _{Makro}
	[-]	[mm]	[mm]	[g/cm ³]	[‰]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
BS Referenz PX	14	150,0	60,3	2,492	0,0928	0,035	0,400	7.456	7.152
	4	150,0	60,4	2,468	0,1089	0,035	0,410	6.528	5.286
	1	150,0	59,8	2,496	0,1027	0,035	0,430	7.289	3.522
	10	150,0	60,2	2,504	0,0660	0,035	0,310	7.891	36.069
	16	150,0	60,7	2,478	0,0655	0,035	0,280	7.091	10.276
	6	150,0	60,3	2,475	0,0540	0,035	0,230	6.841	50.229
	13	150,0	60,6	2,477	0,0366	0,035	0,170	7.000	77.896
	9	150,0	60,6	2,494	0,0310	0,035	0,160	7.632	433.244
	5	150,0	59,9	2,492	0,0314	0,035	0,160	7.546	242.682
1 BS 60 PX	3	150,0	60,4	2,492	0,1569	0,035	0,750	8.637	2.984
	17	150,0	58,0	2,516	0,1520	0,035	0,780	9.289	2.357
	5	150,0	60,2	2,524	0,1437	0,035	0,760	9.561	3.601
	12	150,0	60,4	2,493	0,0973	0,035	0,520	9.449	11.825
	13	150,0	60,5	2,497	0,0843	0,035	0,460	9.555	22.118
	18	150,0	60,2	2,525	0,0764	0,035	0,460	10.540	44.832
	10	150,0	60,5	2,496	0,0522	0,035	0,300	9.618	223.757
	7	150,0	60,6	2,505	0,0520	0,035	0,310	10.029	191.940
	14	150,0	60,4	2,524	0,0490	0,035	0,310	10.635	283.745
2 BS 60 PX	11	150,0	60,3	2,382	0,1686	0,035	0,780	8.372	3.831
	2	150,0	59,1	2,402	0,1672	0,035	0,800	8.671	4.697
	4	150,0	60,5	2,405	0,1700	0,035	0,780	8.308	3.672
	15	150,0	60,2	2,385	0,1072	0,035	0,540	8.929	15.260
	3	150,0	58,3	2,386	0,1016	0,035	0,520	9.050	31.254
	7	150,0	60,5	2,406	0,0956	0,035	0,520	9.613	24.636
	10	150,0	60,2	2,386	0,0531	0,035	0,300	9.454	407.522
	12	150,0	60,3	2,390	0,0553	0,035	0,310	9.430	432.617
	5	150,0	60,5	2,404	0,0575	0,035	0,320	9.398	405.034

Tab. A-30: Kennwerte zur Ermittlung der Ermüdungsfunktion der Praxisvarianten der Asphaltbinderschicht

Prüf-Temp.	Prüf-fre-quenz	TS Referenz PX		1 TS 60 PX		2 TS 60 PX	
		25 s	25 s	25 s	25 s	25 s	25 s
T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]
-10	10	21.223	6,1	22.501	5,5	20.499	4,3
-10	5	20.241	6,1	21.562	5,5	19.904	4,6
-10	3	19.492	7,0	20.701	5,9	19.222	5,6
-10	1	18.164	7,9	19.263	6,5	18.291	6,2
-10	0,3	16.260	9,4	17.773	8,0	16.919	7,5
-10	0,1	14.679	11,1	16.211	9,1	15.720	7,4
-10	10	20.827	5,9	21.751	5,5	20.318	4,7
0	10	15.910	10,7	17.475	8,2	15.897	7,1
0	5	14.826	11,9	16.471	8,7	14.928	7,9
0	3	13.824	13,0	15.510	9,9	14.325	8,9
0	1	11.819	16,2	13.807	11,2	13.057	9,6
0	0,3	9.469	18,6	11.890	13,5	11.520	11,7
0	0,1	7.502	22,5	10.128	15,8	10.029	13,3
0	10	15.524	11,0	17.067	9,7	15.748	7,2
5	10	13.507	14,0	13.429	11,5	14.494	9,0
5	5	12.317	15,3	12.199	13,2	13.443	10,1
5	3	11.237	16,8	11.329	13,6	12.602	10,9
5	1	9.218	19,9	9.603	16,3	11.128	12,0
5	0,3	7.123	23,4	7.835	19,5	9.462	14,6
5	0,1	5.390	27,6	6.181	22,2	8.035	16,8
5	10	13.309	14,0	13.377	12,4	14.350	9,9
10	10	11.418	17,9	11.666	14,6	12.224	12,0
10	5	10.035	19,9	10.454	16,1	10.929	13,3
10	3	8.808	21,1	9.521	16,9	10.093	13,6
10	1	6.864	24,5	7.755	19,9	8.576	16,3
10	0,3	4.935	29,6	6.009	23,5	6.968	19,2
10	0,1	3.574	33,5	4.591	26,5	5.657	22,3
10	10	11.168	17,4	11.405	14,7	11.940	12,0
20	10	6.241	29,0	8.212	21,3	8.534	18,5
20	5	5.214	29,0	7.110	22,5	7.539	19,4
20	3	4.341	31,1	6.297	23,6	6.775	20,4
20	1	3.044	34,4	4.732	27,5	5.145	24,4
20	0,3	1.989	36,8	3.387	30,5	3.873	27,5
20	0,1	1.363	39,1	2.426	33,1	2.896	30,2
20	10	6.158	26,4	8.121	20,5	8.425	18,1

Tab. A-31: Ergebnisse der Steifigkeit und Phasenwinkel aus Messungen der Praxisvarianten der Asphalttragschicht nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Prüf-Temp.	Prüf-frequenz	BS Referenz PX		1 BS 60 PX		2 BS 60 PX	
		25 s	25 s	25 s	25 s	25 s	25 s
T [°C]	f [Hz]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]	E* [MPa]	δ [°]
-10	10	23.056	5,3	23.712	5,0	20.917	4,3
-10	5	22.170	5,5	23.106	5,8	20.274	4,9
-10	3	21.425	6,1	22.109	6,0	19.834	5,1
-10	1	20.061	6,7	20.519	6,6	18.917	5,8
-10	0,3	18.332	8,4	18.763	8,0	17.364	6,9
-10	0,1	16.658	10,1	17.223	9,0	15.985	7,4
-10	10	23.175	5,4	23.672	5,0	20.674	4,6
0	10	18.429	9,4	18.579	7,6	16.929	6,8
0	5	17.129	10,1	18.218	9,5	16.060	7,3
0	3	16.340	11,1	17.427	9,8	15.526	7,8
0	1	14.274	13,3	15.530	11,2	13.943	9,3
0	0,3	11.832	16,2	13.244	13,2	12.493	10,7
0	0,1	9.783	19,8	11.315	15,3	10.969	12,7
0	10	18.413	9,2	19.078	11,2	17.148	6,8
5	10	15.637	13,2	16.643	10,6	15.119	8,9
5	5	14.289	14,2	15.448	12,2	14.206	9,4
5	3	13.146	16,0	14.612	13,0	13.439	9,9
5	1	10.904	19,0	12.332	15,1	11.854	12,1
5	0,3	8.459	22,5	10.149	18,2	10.215	14,3
5	0,1	6.432	26,5	8.198	20,9	8.623	16,5
5	10	15.385	12,9	16.839	11,0	15.128	8,8
10	10	13.007	16,0	14.741	13,6	13.583	11,2
10	5	11.557	18,6	13.271	14,5	12.512	12,1
10	3	10.407	20,5	12.128	16,0	11.769	12,9
10	1	8.167	23,9	10.021	18,8	9.950	15,0
10	0,3	5.919	28,1	7.862	22,0	8.162	18,0
10	0,1	4.217	32,0	5.959	25,2	6.662	20,9
10	10	12.818	16,4	14.619	13,9	13.630	11,4
20	10	7.362	26,9	9.803	21,0	9.611	17,8
20	5	6.087	28,4	8.381	22,6	8.233	19,8
20	3	5.060	30,4	7.539	23,7	7.449	20,8
20	1	3.489	34,5	5.594	27,7	5.730	24,1
20	0,3	2.235	36,9	3.950	31,2	4.260	28,1
20	0,1	1.522	39,3	2.843	34,5	3.177	31,3
20	10	7.225	26,2	9.753	20,8	9.366	18,0

Tab. A-32: Ergebnisse der Steifigkeit und Phasenwinkel aus Messungen der Praxisvarianten der Asphaltbinderschicht nach [TP Asphalt-StB, Teil 26]

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Straßenwesen“

2024

S 202: Schaffung von Grundlagen für eine einheitliche Erfassung der Maschinenrohdaten im Seitenkraftmessverfahren – Weiterentwicklung der SKM-Griffigkeitsmessung durch Berücksichtigung der gemessenen Vertikalkraft

Jürgen Schmidt, Julius Schmidt, Johannes Schmidt, Müller

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

S 203: Prognose der Wirtschaftlichkeit von Betonfahrbahndecken – Bauweisen RStO/RDO

Beckenbauer, Gebhardt, Riwe, Tschernack, Villaret

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

S 204: Überprüfung der Auswirkungen der Anwendung der Filterregeln für Geokunststoffe des M Geok E

Moormann, Liebl, Schlee

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

S 205: Alternative Verfahren zur Beurteilung Offenporiger Asphaltdeckschichten hinsichtlich Hohlraumgehalt und Verdichtungszustand

Roos, Plachkova-Dzhurova, Schwarzmann

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

S 206: Weiterentwicklung der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit, Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit

Neumann, Oeser, Reinhardt, Blasl, Canon Falla, Wellner, Kayser

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

2025

S 207: Optimierung der Kompositbauweise (Durchgehend bewehrte Betondecke mit dünner flexibler Deckschicht)

Freudenstein, Dirnhöfer, Eger

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

S 208: Verifizierung der Mischgutkonzeptionierung kaltgebundener bitumen-dominanter Tragschichten und Ableitung von Dimensionierungsgrundsätzen

Radenberg, Staschkiewicz, Vienenkötter, Mollenhauer, Winter

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

S 209: Grundlagen für die Eignungsprüfung von Böden mit organischen Bestandteilen zur Verwendung als Baustoffe im Erdbau

Uday, Huber, Birle, Cudmani

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

S 210: Prüfung und Bewertung der Dauerhaftigkeit „zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Verfüllbaustoffe (ZFSV)“ im Unterbau von Verkehrsflächen

Zeni, Huber, Birle, Cudmani

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

S 211: Literaturstudie zur Nachhaltigkeit im Straßenbau

Carreño, Schmitz, Kemper, Cypra, Holldorb

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

S 212: Einfluss von temporär auftretendem Grundwasser auf die Standsicherheit von Straßeneinschnittsböschungen

Denne, Festag, Gattermann

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

S 213: Einfluss der Pendelbewegung der Fahrzeuge des Schwerverkehrs auf die Beanspruchung und Nutzungsdauer von Straßenbefestigungen

Uhlig, Schlimper, Seeger, Zeißler, Wellner, Blasl, Kathmann, Scharrenbroich, Roggendorf, Haas
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden

S 214: Kritikalitätsanalyse für die Bundesverkehrswege als Baustein der Klimawirkungsanalyse

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

S 215: Erstellung eines Verfahrens zur rechnerischen Dimensionierung und zur Prognose des Verhaltens von Pflasterbefestigungen

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

S 216: Prüfmethode zur validen Bestimmung von Luftporengehalten an Fahrbahndeckenbetonen

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

S 217: Untersuchung zur Wirksamkeit der Ansprühmittel zwischen Asphaltsschichten und -lagen zur Erzielung eines anforderungsgerechten Schichtenverbundes

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

S 218: Zur experimentellen Bestimmung der Wärmedehnzahl von Beton im Straßenbau

Spilker 20,50 €

S 219: Anpassung der Dimensionierung an den Klimawandel

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

S 220: Neue Prüfverfahren und -parameter: Übertragung des Bewertungshintergrundes des Verformungswiderstandes von Walzasphalt für die vertragliche Anwendung von Performance-Anforderungen

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

S 221: Entwicklung von Asphaltsschichten für Straßen und Brückenbeläge unter extremen Klimaeinwirkungen

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


S 222: Langfristige Schwermetalleinbindung in Böden und Ersatzbaustoffen durch Behandlung mit Bindemitteln

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

S 223: Gebrauchsverhalten von Heißasphalt mit Asphaltgranulat unterschiedlicher Art und Menge sowie Ableitung eines einfachen Performance-Kriteriums

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
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.



ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-883-6
<https://doi.org/10.60850/bericht-s223>
www.bast.de