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

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 220

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

von

Martin Radenberg, Jule Dominik, Nina Nytus, Deborah Müller

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

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Straßenbau Heft S 220

bast 
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

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 07.0308

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

Fachbetreuung:
Tobias Paffrath

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 978-3-95606-872-0 | <https://doi.org/10.60850/bericht-s220>

Bergisch Gladbach, August 2025

Kurzfassung – Abstract

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

Eine Änderung der Technischen Prüfvorschrift für den Einaxialen Druck-Schwellversuch im Jahr 2018 zielt auf besser differenzierbare Aussagen zum Verformungswiderstand ab. So sollen statt Marshall-Probekörpern künftig Bohrkern aus walzsegmentverdichteten Asphalt-Probepplatten oder aus walzverdichteten Asphalt-schichten von Straßen entnommen und untersucht werden, da Marshall-Probekörper aufgrund der Verdichtungsart (schlagende Verdichtung) nicht mit einer in der Praxis verdichteten Asphalt-schicht vergleichbar sind. Darüber hinaus wird im Rahmen der Überarbeitung der Technischen Regelwerke (TL Asphalt-StB und ZTV Asphalt-StB) zukünftig der Einaxiale Druck-Schwellversuch (DSV) nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] zur Beschreibung des Verformungswiderstandes Anwendung finden. Hierfür gibt es bisher keinen wissenschaftlich abgesicherten Bewertungshintergrund, weshalb eine prüftechnische Absicherung des Verformungswiderstandes notwendig ist. Ein weiterer, häufig diskutierter prüftechnischer Aspekt ist die Frage nach der Berücksichtigung einer definierten Querdehnungsbehinderung, die in der Straße vorhanden ist. Der Einaxiale Druckschwellversuch berücksichtigt keine Querdehnungsbehinderung, die [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] bietet eine Möglichkeit zur Laborprüfung mit Querdehnungsbehinderung. In diesem Forschungsprojekt wurde zudem eine Variante mit einer erhöhten seitlichen Stützeinwirkung untersucht, indem um die Mantelfläche des zylindrischen Probekörpers ein massiver Metallring angeordnet wurde.

Für die Bewertung des Verformungsverhaltens von Gussasphalt nach den [TP Asphalt-StB Teil 25 A1] gibt es bereits einen Vorschlag für einen Bewertungshintergrund, der mit den durchgeführten Untersuchungen kritisch überprüft und ggf. geändert wird.

Dafür wurden insgesamt 45 verschiedene Asphaltmischgutvarianten hergestellt und im Labor untersucht. Zusätzlich wurden Daten von externen Asphaltmischgutproduzenten gesammelt, um vorhandene Ergebnisse in die Auswertung miteinzubeziehen. Zur Validierung der im Labor hergestellten Asphaltkonzepte wurden zehn Praxisstrecken ausgewählt und Bohrkern entnommen. An allen Walzasphaltvarianten wurden dynamische Stempeleindringversuche gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] und bei den Gussasphalten gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1] durchgeführt und bei allen Walzasphalten Einaxiale Druck-Schwellversuche am Bohrkern gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1]. An ausgewählten Varianten wurden zudem der Einaxiale Druck-Schwellversuche am MPK und Stempeleindringversuche mit Querdehnungsbehinderung durchgeführt. Im ersten Schritt wurden die Daten statistisch ausgewertet, um eventuelle Ausreißer zu identifizieren und auszuschließen. Die Grundlage zur statistischen Bewertung der Verformungsergebnisse bildeten Box-Whisker-Plots und die Durchführung einer deskriptiven Statistik. Die Analysen fanden sowohl für die Ergebnisse der im Labor hergestellten Probekörper als auch der extern gesammelten Daten statt.

Die Auswertung der Dehnungsraten ermöglichte die Festlegung erster Zielwerte für verschiedene Belastungen, jedoch basieren diese auf einer geringen Datenbasis, was weitere Untersuchungen erforderlich macht. Die Untersuchungen zum dynamischen Stempeleindringversuch mit und ohne Stützring ergaben keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen, was darauf hindeutet, dass der Stützring keinen Einfluss hat. Der bestehende Erfahrungshintergrund für die dynamischen Stempeleindringtiefen von Gussasphalt konnte zum Teil bestätigt werden. Untersuchungen mit abgeänderten Prüfrandbedingung für hohe verformungswirksame Belastungen gaben erste Erkenntnisse darüber, wie sich verschiedene Zusammensetzung bei erhöhten Temperaturen und verlängerter Lastdauer verhalten. Dabei wurde festgestellt, dass Varianten mit unterschiedlichen Sieblinien unterschiedliche Verformungswiderstände aufwiesen, wobei jene, die sich an der oberen Sieblinie orientieren einen höheren Widerstand zeigten als jene, die sich an der unteren orientieren. Bei einer Prüftemperatur von 65 °C wurde bei allen Proben eine fortschreitende volumendilatante Gefügerstörung festgestellt.

New test methods and parameters: Transfer of the evaluation background of the resistance to permanent deformation of rolled asphalt for the contractual application of performance requirements

An update to the technical test specification for the cyclic compression test (DSV) in 2018 aims to provide more differentiated statements on resistance to permanent deformation. In future, drill cores from roller-compacted asphalt test slabs or from roller-compacted asphalt layers of roads are to be taken and examined instead of MPK, as Marshall test specimens are not comparable with an asphalt layer compacted in practice due to the type of compaction (percussive compaction). In addition, as part of the revision of the technical regulations (TL Asphalt-StB and ZTV Asphalt-StB), the uniaxial cyclic compression test (DSV) in accordance with [TP Asphalt-StB, Part 25 B1] will be used in future to describe the resistance to permanent deformation. To date, there is no scientifically validated assessment background for this, which is why it is necessary to validate the resistance to permanent deformation in terms of testing technology. Another frequently discussed technical testing aspect is the question of considering a defined transverse strain restraint, which exists in practice. The uniaxial cyclic compression test does not take transverse strain restraint into account; the [TP Asphalt-StB, Part 25 A2] offers a possibility for laboratory testing with transverse strain restraint. In this research project, a variant with an increased lateral support effect was also investigated by placing a solid metal ring around the outer surface of the cylindrical test specimen.

For the evaluation of the deformation behavior of mastic asphalt according to [TP Asphalt-StB Part 25 A1], there is already a proposal for an evaluation background, which is critically reviewed and, if necessary, changed with the investigations carried out.

A total of 45 different asphalt mix variants were produced and tested in the laboratory. In addition, data was collected from external asphalt mix producers to include existing results in the evaluation. To validate the asphalt concepts produced in the laboratory, ten practical sections were selected and drill cores were taken. Dynamic punch penetration tests were carried out on all rolled asphalt variants in accordance with [TP Asphalt-StB, Part 25 A2] and on the mastic asphalts in accordance with [TP Asphalt-StB, Part 25 A1] and uniaxial compression-swell tests on the drill core in accordance with [TP Asphalt-StB, Part 25 B1] for all rolled asphalts. In addition, uniaxial compression-swelling tests on the MPK and punch penetration tests with transverse strain restraint were carried out on selected variants. In the first step, the data was statistically evaluated to identify and exclude any outliers. The basis for the statistical evaluation of the deformation results was formed by box-whisker plots and the implementation of descriptive statistics, which were presented in tabular form. The analyses were carried out both for the results of the test specimens produced in the laboratory and the externally collected data.

The evaluation of the strain rates made it possible to determine initial target values for various loads, but these are based on a small database, which makes further investigations necessary. The investigations into the dynamic punch penetration test with and without a support ring did not produce any significant differences in the results, which indicates that the support ring has no influence. The existing empirical background for the dynamic stamp penetration depths of mastic asphalt could be partially confirmed. Investigations with modified test boundary conditions for high deformation-effective loads provided initial insights into how different compositions behave at elevated temperatures and extended load duration. It was found that variants with different grading curves exhibited different resistance to permanent deformations, with those based on the upper grading curve showing a higher resistance than those based on the lower curve. At a test temperature of 65 °C, progressive volume-dilatant microstructural destruction was observed in all samples.

Summary

New test methods and parameters: Transfer of the evaluation background of the resistance to permanent deformation of rolled asphalt for the contractual application of performance requirements

1 Introduction and objectives

Following the exceptionally hot summers from 2018 to 2020, the question of how to effectively measure the resistance of asphalt to permanent deformation has become the focus of discussions. A working group has been formed to investigate asphalt mixture designs with improved resistance against deformation and to identify suitable material tests. However, there is currently no scientifically validated evaluation framework for a practicable and distinct test procedure. Some initial approaches have been outlined in the regulations [TL Asphalt-StB 07/13] to evaluate the resistance of highly stressed asphalt layers (asphalt pavement and asphalt binder courses) against permanent deformation, but thus far they have been employed only for experiential purposes. In the future, the uniaxial cycling compression test (DSV) in accordance with TP Asphalt-StB, Part 25 B1 will be considered to describe the resistance to permanent deformation. In 2018, a modification to the type of test specimen was implemented, aiming to facilitate more practical statements. Furthermore, there are some discussions regarding the consideration of transverse expansion restraint, which was the objective of various test methods investigated in this area. The [TP Asphalt-StB, Part 25 A2] provides a possibility for laboratory testing of the deformation behavior with consideration of a certain transverse expansion restraint.

In this research, the main objective is to enhance the technical regulations by developing a robust evaluation framework for test methods. In addition, the existing proposed methods for evaluating the deformation behavior of mastic asphalt will be also critically reviewed and adapted if necessary. The findings of this study can be incorporated into the revision of the European standards.

2 Methodology

The objective of revising the framework for deformation resistance assessment in various ways was pursued within the scope of this project. An extensive literature review was conducted on the existing results of uniaxial cycling compression tests and punch penetration tests. Additionally, asphalt mix producers were contacted to obtain further data on deformation resistance, ideally including information on the composition of the asphalt mixes. The existing data was evaluated and complemented by our own laboratory tests using 45 different asphalt mix variants. These 45 variants include six mastic asphalts and six rolled asphalt mixtures provided by BAST. Furthermore, some drill cores were extracted from the ten on-site sections to validate the results of the asphalt designs produced in the laboratory. Dynamic punch penetration tests were performed on all rolled asphalt variants in accordance with [TP Asphalt-StB, Part 25 A2] and on the mastic asphalts based on the [TP Asphalt-StB, Part 25 A1]. The uniaxial cycling compression tests were also carried out on the drill cores according to [TP Asphalt-StB, Part 25 B1]. In addition, uniaxial cycling compression tests on the MPK and punch penetration tests with transverse expansion restraint were also conducted on selected variants.

3 Data evaluation

3.1 Recommended values for the resistance to permanent deformation of rolled asphalts and process precision

To determine empirical values for the strain rate, derived from the uniaxial compression-swell test, all collected data (laboratory variants, existing data sets, BAST variants and results of the interlaboratory test at the RUB) were statistically analyzed and evaluated. This comprehensive analysis encompassed a total of 118 data sets. The data were collectively and individually analyzed for each asphalt and binder type. However, the separate analysis failed to provide clear insights into the strain rate requirement values. A separate analysis yielded the requirement values listed in Tab. 3 1 for the main grades investigated. Given the relatively limited dataset upon which these values rely, they cannot be fully validated.

	90-% quantile value per asphalt type
alle values	11,6
AC 22 B	12,6
AC 16 B	6,4
AC 11	12,0
AC 8	4,1
SMA 16 B	14,9
SMA 11	6,8
SMA 8	9,0

Tab. 3-1: Strain rate requirements depending on asphalt type

Therefore, a general requirement value for a maximum strain rate of $\epsilon_i^* \leq 11 [\% \cdot 10^{-4}/n]$, which applies to all rolled asphalts, was defined as part of the initial test.

In addition, a stricter target value should be considered for particularly high deformation-effective stresses (Bk100). In this case, only SMA variants with a modified binder are used. A target value of $\epsilon_i^* \leq 6 [\% \cdot 10^{-4}/n]$ must be observed for this

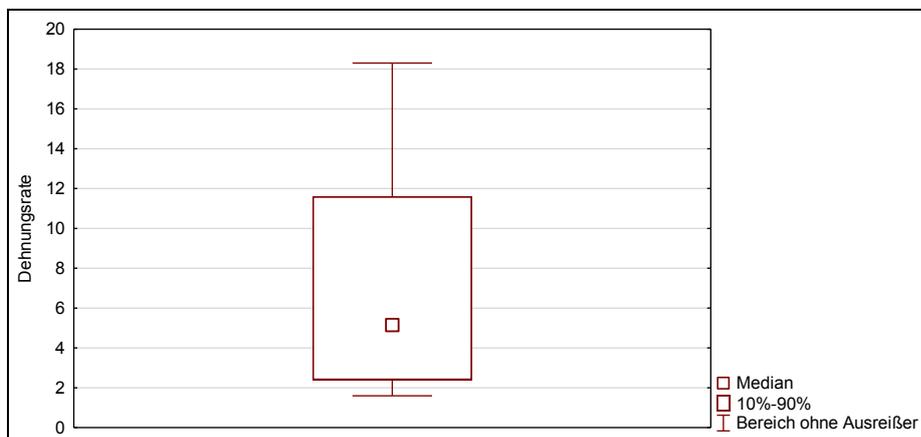


Bild 3-1: Requirement value for the expansion rate for rolled asphalt

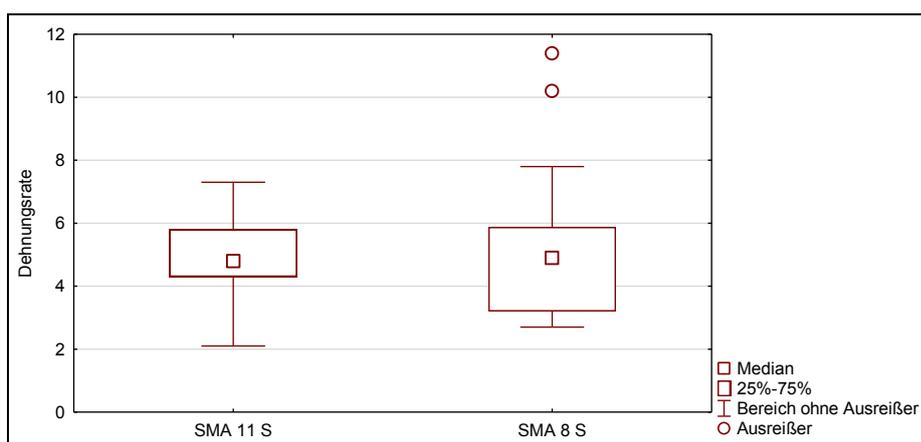


Bild 3-2: Requirement value for the strain rate for high deformation-effective stresses (SMA)

There are also special cases (e.g. B-number greater than 200). For these cases, the test conditions should be extended (higher temperatures and/or longer load exposure). No target value can yet be proposed for this at the end of the research project.

3.2 In situ strain rates

The validation of the strain values of the laboratory samples using the strain rates of the on-site samples is difficult due to the limited database and lack of detailed information. Therefore, no clear correlation can be established between the strain rates of the on-site specimens and the laboratory samples.

3.3 Process precision

The process precision, which was developed by Marshall specimens, can be adopted for the testing of drill cores from WSV slabs. The distribution of the data for Marshall specimens is similar to that comes from cores in WSV slabs, although these tend to have higher strain rates. By examining the threshold line for the valid critical span according to [TP Asphalt-StB, Part 25 B1] using the formula $d = 0.31x + 3.6$, the majority of the data sets are covered by the line. Only eight datasets fall at or above the boundary line. Among them, five datasets (represented by red triangles) exhibit variations that have inflection points within the three individual measurements and therefore have a large critical range. In summary, approximately 95% of the data sets are below this limit line.

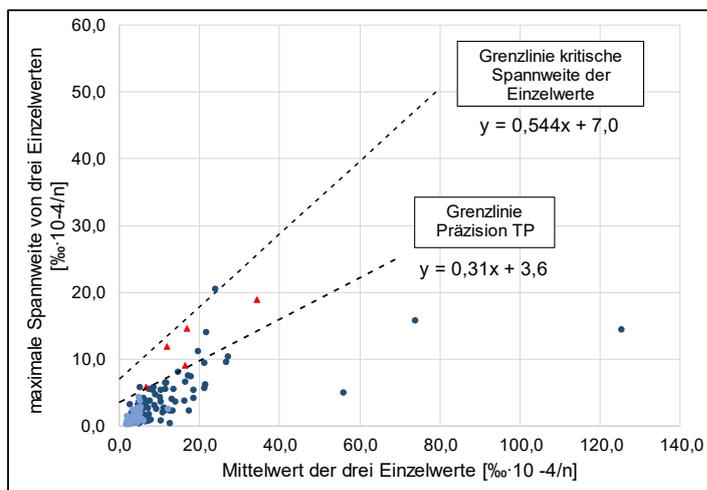


Bild 3-3: Correlation between the range of three individual results and their mean value

3.4 Resistance to permanent deformation under maximum loads (AS 3A)

The experimental investigation of the asphalt pavement's resistance against permanent deformation under extreme loads is still a challenge that has not yet been solved satisfactorily. These conditions often occur on newly constructed asphalt roads during the construction phase. To apply an existing assessment method to such challenging situations, extended test conditions are discussed, including changes in test temperature and load conditions according to [TP Asphalt-StB Part 25 B1]. Extended experimental tests were carried out on four selected stone mastic asphalts with high deformation resistance. The results showed that increasing the test temperature to 60 °C or 65 °C enables further differentiation of mix variants with high deformation resistance. Additionally, variations in load frequency (prolonged load duration) exhibit a relatively minor impact on the strain rate.

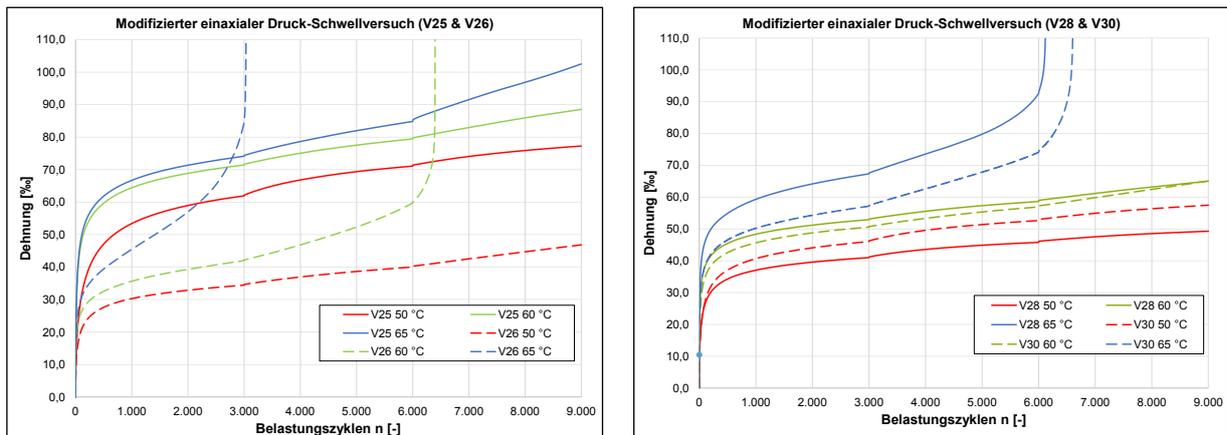


Bild 3-4: Pulse creep curves Special program AS 3A

3.5 Dynamic punch penetration test according to [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2]

To consider the lateral expansion restraint, which undoubtedly exists in real situations due to the large surface expansion around the wheel contact area, a variant with an increased lateral support effect was investigated by arranging a solid metal ring. The results indicate that it is not possible to clearly express whether the depth of penetration can be kept lower with an additional lateral strain constraint (support ring). Some variants (V3, V15, V20, V23, V29) showed a higher dynamic penetration depth when the specimen was tested with additional transverse expansion restraint. However, the differences between the penetration depth with and without the support ring are relatively small overall.

3.6 Deformation behavior of mastic asphalt

For the evaluation of the deformation behavior of mastic asphalt according to [TP Asphalt-StB Part 25 A1], there exists also a suggestion in this research project for assessment context. The results of the tests on the six mastic asphalt mixtures showed a reduction in the maximum values for the punch penetration depth. Tab. 3-2 shows the results of the tests on the mastic asphalts.

Asphalt type	Minimum value of the chisel penetration depth [mm]	Maximum value of the punch penetration depth [mm]
MA 5 S	0,4	0,7
MA 8 S	0,4	0,5
MA 11 S	0,7	1,1

Tab. 3-2: Empirical values for the punch penetration depth after 2,500 LW

4 Summary and outlook

As part of the research project "New test methods and parameters: Transferring the assessment background of the deformation resistance of rolled asphalt for the contractual application of performance requirements", various testing methodologies were explored to assess asphalt's deformation resistance. The feasibility of incorporating these methodologies into the revision of technical regulations was also thoroughly investigated. Since the current applicable evaluation framework is only based on tests on MPK and not on the drill cores from WSV slabs, it has been tried in this study to create an evaluation framework using the conducted laboratory tests on different asphalt mix variants. The results showed that the strain rates are not exclusively dependent on the type of asphalt and employed binders. A general requirement value of $\epsilon_i^* \leq 11 \text{ [}\% \cdot 10^{-4}/n\text{]}$ was defined for the strain rate as part of initial tests, which should apply to all rolled asphalt variants. Additional tests for high deformation-effective stresses were also carried out. Some differences have been found between the variants. Specifically, a differentiation was observed between the variants that exhibited similar deformation characteristics under the standard conditions and were subsequently tested under modified test conditions.

The conducted validation based on the on-site samples did not show a clear trend. Further investigations are required in order to create a more comprehensive data basis. The establishment of a database for the collection of results from the compression-swell test is proposed, aiming to generate reliable statements regarding the required values for the strain rate.

A lateral support ring was taken into account when investigating the dynamic punching penetration depth of rolled asphalts in order to better simulate the limited transverse strain on a laboratory scale. The results from comparative tests with and without the support ring revealed no definitive trend in terms of the change in punch penetration depth. Both lower and higher values were observed. It can therefore be concluded that a lateral support ring is not required and no adaptation of the method is necessary.

The deformation behavior of mastic asphalt is described exclusively by the dynamic stamp penetration test (SEV). Additional variants were investigated in order to supplement the existing evaluation framework. It was possible to reduce the maximum punch penetration depths. However, it should be noted that due to the limited sources of data, the change in the upper limit values is not completely certain, and further investigations are required.

5 Literature

[TP Asphalt-StB, Teil 25 A1]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 A1: Dynamischer Stempeleindringversuch an Gussasphalt bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2020

[TP Asphalt-StB, Teil 25 A2]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 A1: Dynamischer Stempeleindringversuch an Walzasphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2010

[TP Asphalt-StB, Teil 25 B1]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 B1: Einaxialer Druck-Swellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2022

Inhalt

1	Stand der Wissenschaft und Ziel der Forschung	12
1.1	Problemstellung	12
1.2	Stand der Wissenschaft und Technik	13
1.2.1	Laborverfahren zur Prüfung des Verformungswiderstandes	13
1.2.2	Empfehlungswerte bzw. Erfahrungshintergrund für das Verformungsverhalten von Asphaltgemischen	18
1.3	Ziel des Forschungsprojektes	22
2	Methodik	23
2.1	Auswertung von ZEB-Daten zur Auswahl von Praxisstrecken	24
2.2	Laboruntersuchungen	25
2.2.1	Varianten und Untersuchungsmaterialien der im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten	25
2.2.2	Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten	34
2.2.3	Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus Praxisstrecken	35
2.3	Verformungswiderstand bei höchsten Beanspruchungen (AS 3A)	35
2.4	Statistische Auswertung	37
2.4.1	Box-Whisker-Plots	37
2.4.2	Prüfpräzision	37
3	Auswertung der ZEB-Daten zur Auswahl der Praxisstrecken	38
3.1	Ergebnisse der ZEB-Auswertung	39
3.2	Auswahl der Praxisstrecken	41
4	Ergebnisse und Auswertung der Verformungsuntersuchungen	42
4.1	Ergebnisse und Auswertung der im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten	42
4.1.1	BASSt-Mischgutvarianten	58
4.1.2	Untersuchungen zum Verformungswiderstand bei höchsten Beanspruchungen	63
4.2	Ergebnisse und Auswertung der Praxisstrecken	63
4.2.1	Berliner Ring A10 – Strecke A	63
4.2.2	B51 Olzheim – Strecke B	68
4.2.3	B54 Münster / Ochtrup – Strecke C und D	72
4.2.4	B50 Hunsrück – Strecke E	76

4.2.5	B226 Witten – Strecke F	79
4.2.6	Hüllerstraße Gelsenkirchen – Strecke G	81
4.2.7	Hahnerberger Straße Wuppertal – Strecke H	85
4.2.8	L459 (Wertherbrucher Straße) Hamminkeln/Rees – Strecke I	88
4.2.9	B57 Aachen – Strecke J	91
4.2.10	Zusammenfassende Auswertung der Untersuchungen der Praxisstrecken	94
4.3	Ergebnisse und Auswertung von Bestandsdaten	98
4.3.1	Statistische Auswertung der Bestandsdaten	102
4.4	Zusammenfassende Auswertung aller erhobenen Daten	104
4.4.1	Bezug zu den Dehnungsraten in situ	112
4.5	Zielwerte für den Verformungswiderstand von Walzasphalten sowie Verfahrenspräzision	114
5	Zusammenfassung und Ausblick	120
	Literatur	122
	Bilder	125
	Tabellen	129
	Anhang A	131
	Anhang B	164

1 Stand der Wissenschaft und Ziel der Forschung

1.1 Problemstellung

Nach den Sommern in den Jahren 2018 bis 2020, die zum Teil außergewöhnliche Hitzeperioden aufwiesen, ist die Frage nach einer hinreichenden prüftechnischen Absicherung des Verformungswiderstandes zunehmend in den Fokus der asphalttechnologischen Diskussionen gerückt. So hat sich im Arbeitskreis AK 7.3.3 eine Bearbeitungsgruppe gebildet, die sich u.a. mit Asphaltkonzepten beschäftigt hat, die einen besonderen Widerstand gegen bleibende Verformungen haben und welche erweiterten Materialprüfungen ggf. notwendig sind. Nicht zuletzt bei diesen Diskussionen hat sich auch gezeigt, dass es bisher noch keinen wissenschaftlich abgesicherten Bewertungshintergrund für ein praktikables und gut differenzierendes Prüfverfahren zur Ermittlung des Verformungswiderstandes gibt.

Erste Ansätze zur Bewertung des Verformungswiderstandes von hoch beanspruchten Asphaltsschichten (Asphaltdeckschichten und Asphaltbinderschichten) sind im Regelwerk [TL Asphalt-StB 07/13] zwar vorhanden, wurden aber bisher nur zur Erfahrungssammlung herangezogen. Außerdem wurde der Verformungswiderstand dort anhand von Ergebnissen aus dem Spurbildungsversuch betrachtet, der zukünftig voraussichtlich keine nennenswerte Rolle mehr spielen wird. So wird im Rahmen der Überarbeitung des Technischen Regelwerkes (TL Asphalt-StB und ZTV Asphalt-StB) der Einaxiale Druck-Schwellversuch (DSV) nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] zur Beschreibung des Verformungswiderstandes Anwendung finden.

Die Probekörperart in der Technischen Prüfvorschrift des DSV wurde im Jahr 2018 geändert, da sich beim Marshall-Probekörper (MPK) aufgrund der Verdichtungsart (schlagende Verdichtung von beiden Seiten) eine Kornstruktur mit einer starken Verzahnung der groben Gesteinskörnungen einstellt, die nicht mit den Strukturen einer in der Praxis verdichteten Asphaltsschicht vergleichbar ist. Praxisgerechtere und besser differenzierende Aussagen zum Verformungswiderstand sollen nach [Renken, 2001] [Mollenhauer; Wistuba, 2016] daher an Bohrkernen (BK) getroffen werden können, die aus Walzsektor-verdichteten Asphalt-Probepplatten oder aus walzverdichteten Asphaltsschichten von Straßen entnommen wurden. Bedingt durch die andere Verdichtungsart haben Bohrkern aus mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV) hergestellten Platten und aus einer Asphaltsschicht geringere Verformungswiderstände als MPK. Dies hatte u.a. zur Folge, dass ein Abbruchkriterium (max. Dehnung) in der Technischen Prüfvorschrift im Jahr 2022 von 40 auf 80 ‰ erhöht wurde. Der Bewertungshintergrund für die Ergebnisse des Druck-Schwellversuches von bspw. [Karcher 2005] und [Schellenberg, Schellenberg, 2008] basiert jedoch auf Untersuchungen am MPK.

Ein weiterer, häufig diskutierter prüftechnischer Aspekt ist die Frage nach der Berücksichtigung einer definierten Querdehnungsbehinderung, die in der Praxis durch die große Flächenausdehnung um die Radaufstandsfläche herum zweifellos vorhanden ist. Beim Einaxialen Druck-Schwellversuch nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] fehlt eine solche Querdehnungsbehinderung vollständig. Allerdings könnten hier die Praxisverhältnisse durch eine reduzierte axiale Spannung (in der Größenordnung der Deviatorspannung) simuliert werden. Eine andere Möglichkeit der Laborprüfung des Verformungsverhaltens mit Berücksichtigung einer gewissen Querdehnungsbehinderung liefert die [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2]. Hier wird analog zum dynamischen Stempeldringversuch an Gussasphalt nur eine innere Teilfläche des zylindrischen Probekörpers belastet, sodass die außenliegende, unbelastete Ringfläche eine gewisse seitliche Abstützung erzeugt. In [Wistuba et. al, 2018] wurde festgestellt, dass sich so bei der Prüfung von Asphaltdeckschichten plausible Verformungswiderstände ermitteln lassen. In diesem Forschungsprojekt wurde zudem eine Variante mit einer erhöhten seitlichen Stützeinwirkung untersucht, indem um die Mantelfläche des zylindrischen Probekörpers ein massiver Metallring angeordnet wurde. Zu beiden Prüfmethode, insbesondere der mit Metallring, liegen jedoch nur sehr geringe Erfahrungen vor.

1.2 Stand der Wissenschaft und Technik

1.2.1 Laborverfahren zur Prüfung des Verformungswiderstandes

In Deutschland können zur Bewertung des Verformungsverhaltens von Asphalten der Spurbildungsversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 22, der dynamische Stempeleindringversuch an Walzasphalt bzw. Gussasphalt nach TP Asphalt-StB, Teil 25 A2 bzw. A1 und der Einaxiale Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 durchgeführt werden.

Der Spurbildungsversuch nach [EN 12697-22] (in internationalen Quellen auch als „Hamburg-Wheel-Tracking-Test“ (HWTT) bezeichnet) wird im europäischen Raum zum Teil mit unterschiedlichen Prüfrandbedingungen angewendet und „dient zur Bestimmung der Spurrinnentiefe bzw. der auf die Plattendicke bezogenen Spurrinnentiefe von Asphalt-Probekörpern“. Bei diesem Verfahren werden gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 22] zwei eingegipste Probekörper (240 mm x 300 mm oder Bohrkerne mit einem Durchmesser von 300 mm), die in einem Luftbad auf 60 °C temperiert werden, gleichzeitig durch jeweils ein hin und her rollendes Prüfrad mit bis zu 10.000 Zyklen beansprucht. Die Dicke der Probekörper hängt vom Größtkorn der Asphaltmischung ab. Die Prüfräder sind vollgummiummantelt und die Radlast beträgt 700 x (tatsächliche Reifenbreite/50 ± 10) N. „Wenn die Spurrinnentiefe vor Erreichen der 10.000 Zyklen mehr als 20 % der Plattendicke beträgt, ist der Versuch abzubrechen.“ [TP Asphalt-StB, Teil 22]

In der Vergangenheit wurde der Spurbildungsversuch in Deutschland auch mit Stahlrädern bei Lagerung der Probekörper in einem temperierten Wasserbad durchgeführt, da dadurch eine Verbesserung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, Verschärfung der Beanspruchung und damit bessere Differenzierbarkeit erreicht werden sollte. Diese Variante wurde jedoch nicht in die EN 12697-22 aufgenommen. [Steinauer; Scharnigg, 2007] International wird dieses Verfahren bei variierenden Prüftemperaturen auch vielfach als Adhäsionsprüfung entsprechend [EN 12697-22] im Wasserbad durchgeführt und der Stripping Inflection Point ermittelt (s. Bild 1-1)

Durch die Überarbeitung der Technischen Regelwerke (TL Asphalt-StB und ZTV Asphalt-StB) soll nun der Spurbildungsversuch durch den Einaxialen Druck-Schwellversuch ersetzt werden, womit der Spurbildungsversuch in Deutschland zukünftig weiter an Bedeutung verlieren wird.



Bild 1-1: Theoretischer Spurrinnenverlauf im Stripping Test [Radenberg et al., 2016] nach [Solaimanian et al., 2003]

Beim dynamischen Stempelndringversuch (DSEV) an Walzasphalten gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 197 ± 5 mm bei 50 °C einer haversinenimpulsförmigen Druck-Schwellbelastung ausgesetzt. Der Spannungsverlauf während einer Impulsbelastung und die Prüfrandbedingungen sind in Bild 1-2 zu sehen. Die Höhe der Probekörper hängt vom Größtkorn ab. Die Stempelndringtiefe wird in Abhängigkeit von der Anzahl der Zyklen aufgezeichnet. Als Bewertungskriterium für den Verformungswiderstand wird die Stempelndringtiefe als Absolutwert nach 10.000 Belastungszyklen bezogen auf die Probekörperhöhe herangezogen. Der Stempel hat einen Durchmesser von 80 mm und ist somit kleiner als der Probekörperdurchmesser, weshalb nur das Probekörperzentrum belastet wird. Der umlaufende, unbelastete Asphalttring dient als Querdehnungsbehinderung [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2].

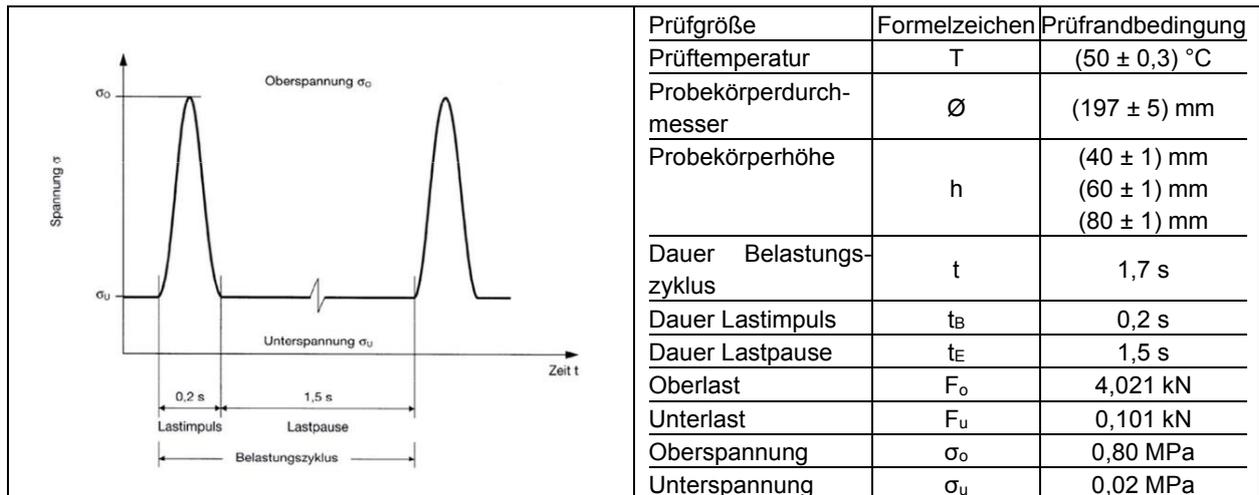


Bild 1-2: Prinzip des Spannungsverlaufs während einer Impulsbelastung links und die Prüfrandbedingungen des dynamischen Stempelndringversuches an Walzasphalten nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] rechts

[Wistuba; Isailović, 2018] untersuchten den Einfluss eines Stützringes aus Stahl, der die zylindrische Mantelfläche umschließt und mit der Unterlage fest verbunden ist, auf die resultierenden Dehnungen. Mit dem Stützring soll der querdehnungsbehindernde Zustand in der Straße besser abgebildet werden. Die Ergebnisse von Finite-Element-Analysen (Bild 1-4) und von Stempelndringversuchen mit und ohne Stützring (Bild 1-5) zeigen, dass die Spannungen und Dehnungen durch den Stützring beeinflusst werden. So sind die resultierenden Dehnungen bei der Versuchsdurchführung ohne Stützring signifikant höher.



Bild 1-3: Dynamischer Stempelndringversuch mit Stützring [Wistuba; Isailović, 2018]

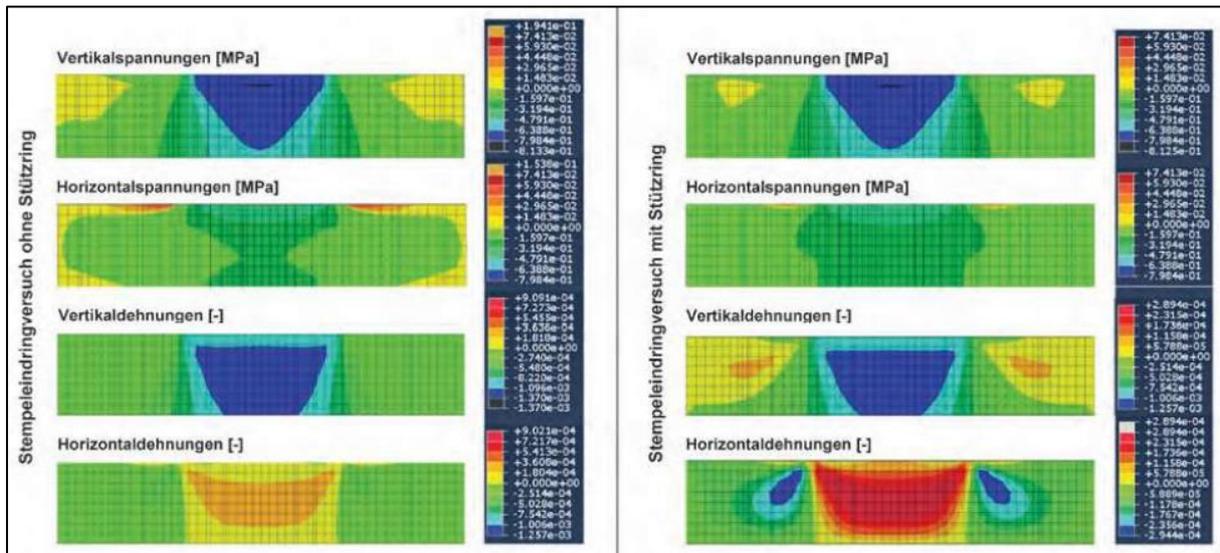


Bild 1-4: Ergebnisse der Finite-Element-Analyse: Stempeleindringversuch mit und ohne Verwendung eines Stützringes (Farblegende: Grün bis Blau = Druck, Gelb bis Rot = Zug; Achtung: veränderliche Werteskala) [Wistuba; Isailović, 2018]

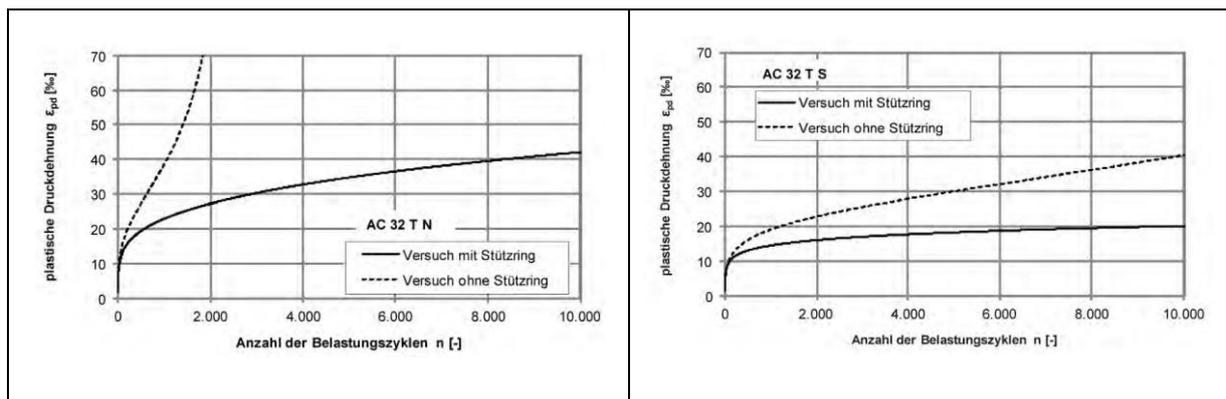


Bild 1-5: Vergleich der Impulskriechkurven mit und ohne Stützring der Asphaltmischgutsorten AC 32 T N (links) und S (rechts) [Wistuba; Isailović, 2018]

Beim dynamischen SEV an Gussasphalten (DSEV) gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1] werden abweichend vom DSEV an Walzasphalten zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 148 ± 5 mm und einer Höhe von 60 mm geprüft. Die Oberlast beträgt 0,875 kN, die Unterlast 0,2 kN, die Oberspannung 0,35 MPa und die Unterspannung 0,08 MPa. Die restlichen Prüfrandbedingungen entsprechen der Prüfung am Walzasphalt.

Der Einaxiale Druck-Schwellversuch (DSV) nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022] ist für Asphaltbetone und Splittmastixasphalte geeignet. Die Grundlage der Technischen Prüfvorschrift ist der Triaxiale Druckschwellversuch, Verfahren B der DIN EN 12697-25, als Sonderfall hier ohne seitliche Stützspannung. Bei diesem Verfahren „wird ein zylindrischer Walzasphalt-Probekörper bei isothermen Versuchsablauf einer haversinen-impulsförmigen Druckschwellbelastung mit Lastpausen ausgesetzt. Die axiale Verformung wird in Abhängigkeit von der Anzahl der Belastungszyklen registriert und aufgezeichnet“ (s. auch Bild 1-2 links). Die Probekörper weisen eine Höhe von 60 ± 1 mm und einen Durchmesser von 100 ± 5 mm auf und es sind drei Probekörper zu prüfen. Dies können Bohrkern aus nach den [TP Asphalt-StB, Teil 33] hergestellten Asphaltprobe-Platten oder aus einer Asphaltbefestigung entnommene Bohrkern sein. Bis zur Änderung der Technischen Prüfvorschrift im Jahr 2018 war ebenfalls eine Prüfung am MPK möglich und aufgrund des geringeren Herstellungs- und Materialaufwandes der Probekörper weit verbreitet. Der Stempel zur Lasteinleitung weist einen Durchmesser ≥ 110 mm auf, sodass der Probekörper vollflächig belastet

wird. Die Prüfung wird nach einer Temperierung der Probekörper für eine Dauer von min. 2,5 h bis max. 5 h auf 50 °C ebenfalls bei 50 °C durchgeführt. In Tab. 1-1 sind die Versuchsbedingungen zusammengefasst [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022].

Prüfgröße	Formelzeichen	Prüfrandbedingung
Prüftemperatur	T	(50 ± 0,5) °C
Probekörperdurchmesser	Ø	(100 ± 5) mm
Probekörperhöhe	h	(60 ± 1) mm
Dauer Belastungszyklus	t	1,7 s
Dauer Lastimpuls	t _B	0,2 s
Dauer Lastpause	t _E	1,5 s
Oberspannung	σ _o	0,350 MPa
Unterspannung	σ _u	0,025 MPa
Radialspannung	σ _c	0 MPa

Tab. 1-1: Versuchsbedingungen Einaxialer Druck-Schwellversuch gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022]

„Der Versuch wird nach 10.000 Belastungszyklen oder bei einer Überschreitung der Dehnung von 80 ‰ beendet, je nach Verlauf, welches Kriterium zuerst erreicht wird“ [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022].

Für jeden Belastungszyklus wird die Dehnung, der irreversible plastische Verformungsanteil, gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022] nach der folgenden Formel berechnet:

$$\varepsilon_n = \frac{(h_0 - h_n)}{h_0} \times 1.000 [\text{‰}]$$

In Bild 1-6 sind zwei typische Impulskriechkurven für Walzasphalte dargestellt. Die Impulskriechkurve ist die „für den untersuchten Asphalt charakteristische Summenkurve der plastischen Verformungsanteile über der Versuchsdauer“. [Karcher, 2005] Als maßgebende Kenngröße wird die Dehnungsrate im Wendepunkt (s. Bild 1-6 links) herangezogen. Wird im Versuchsablauf kein Wendepunkt erreicht (Bild 1-6 rechts), wird die Dehnungsrate aus der Steigung der lokalen Tangente zwischen den Punkten (9.800, ε_{9.800}) und (10.000, ε_{10.000}) berechnet. Zusätzlich sind in beiden Fällen die zugehörigen Dehnungen und Belastungszyklen anzugeben [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022].

Die Dehnungsrate kann wie folgt berechnet werden [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022]:

$$\varepsilon_i^* = \frac{\varepsilon_{(i+100)} - \varepsilon_{(i-100)}}{n_{(i+100)} - n_{(i-100)}}$$

mit:

ε_i^{*} = Dehnungsrate des Probekörpers im Messpunkt i in [‰ · 10⁻⁴/n]

ε_i = Dehnung des Probekörpers im Messpunkt i in mm

n_i = Anzahl der Belastungszyklen im Messpunkt i

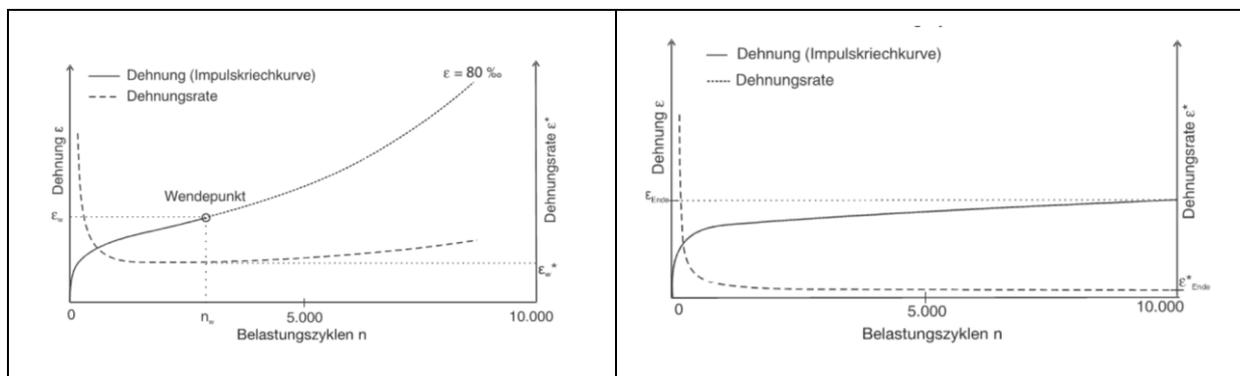


Bild 1-6: Typische Impulskriechkurven für Walzasphalte links: mit Wendepunkt, rechts: ohne Wendepunkt

Die verschiedenen Probekörperarten und Prüfrandbedingungen des Druck-Schwellversuches in den Jahren 1999 bis 2022 fasst Tab. 1-2 zusammen.

Jahr der Veröffentlichung/Änderung der TP Asphalt-StB, Teil 25 B1		1999	2010	2012	2018	2020	2022
Probekörper	Art	MPK/Bohrkern			Bohrkern		
	Durchmesser [mm]	DIN 1996-4	100 ± 5				
	Höhe [mm]	DIN 1996-4	60 ± 1				
	Anzahl [mm]	3					
Lagerungsdauer [d]		-	≥ 2		≥ 14 ≤ 42	≥ 2	
Temperierungsdauer [min]		≥ 150	150 ± 10		≥ 150	≥ 150 ≤ 300	
Prüftemperatur [°C]		50	150 ± 0,3		50 ± 0,5		
Durchmesser Laststempel [mm]		100	≥ 110				
Dauer Vorbelastung [s]		90	120 ± 6				
Dauer Lastimpuls [s]		0,2					
Dauer Lastpause [s]		1,5					
Oberspannung [MPa]		AC: 0,2 SMA: 0,35	0,35				
Unterspannung [MPa]		0,025			0,08	0,025	
Abbruchkriterium	Anzahl d. Belastungszyklen	10.000					
	Dehnung [‰]	40					80

Tab. 1-2: Vergleich der Randbedingungen des Druck-Schwellversuches in den Jahren 1999 - 2022 nach [Gilbers, 2022]

Die höchstmögliche Übereinstimmung mit den Spannungsverhältnissen in einer Straßenbefestigung aus Asphalt soll der Triaxialversuch haben, bei welchem der Probekörper neben der axialen Last auch eine variable, steuerbare radiale Stützspannung erhält. Dieser ist experimentell sehr aufwändig und es gibt für dieses Verfahren bisher keine gültige nationale Prüfvorschrift. [Arand et. al, 1996] stellten unter Berücksichtigung von 13 Praxisstrecken und labortechnisch geprüfem Mischgut mit zeitlich veränderlichem Stützdruck im Triaxialversuch sehr gute Korrelationen zu den in situ festgestellten Dehnungen fest. Der Versuch erfordert jedoch einen hohen Aufwand durch Vorversuche und hat hohe Anforderungen an die technische Spezifikation der verwendeten Prüfmaschine. Aufgrund der Komplexität wird der Triaxialversuch primär für Forschungszwecke verwendet.

[Wellner et. al, 2007] stellten fest, dass aus wissenschaftlicher Sicht vermutlich nur der Triaxialversuch zur Prognose der Spurrinnenbildung von Strecken in situ, der Einaxiale Druck-Schwellversuch aber durchaus zur Abschätzung und Erstellung einer Reihung für den Verformungswiderstand verschiedener Asphalte geeignet ist. Auch im IGF-Vorhaben Nr. 18472 BR wurde von [Wellner, 2018] untersucht, ob der Einaxiale Druck-Schwellversuch geeignet ist, den Triaxialversuch zu ersetzen. Er kam dabei zu der Erkenntnis, dass die Prognose der Spurrinnenbildung anhand der Versuchsergebnisse der Triaxialversuche genauer und realitätsnäher ermittelt werden kann. Die Versuchsdurchführung wird auch in diesem Beitrag als komplex dargestellt, sodass der Einaxiale Druck-Schwellversuch als Alternative gesehen werden kann. Es wird jedoch eine Durchführung der Prüfung an schlanken Probekörpern empfohlen, um Randeinspannungseffekte aus der Messung zu reduzieren.

Unter Berücksichtigung von Aspekten wie Prüfaufwand, vorhandene Erfahrungswerte und Aussagekraft wird bei der Überarbeitung des Technischen Regelwerkes (TL- und ZTV Asphalt-StB) der Einaxiale Druck-

Schwellversuch nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022] für zukünftige bauvertragliche Bewertungen des Verformungsverhaltens favorisiert.

1.2.2 Empfehlungswerte bzw. Erfahrungshintergrund für das Verformungsverhalten von Asphaltgemischen

Der bisherige Erfahrungshintergrund und die darauf basierenden Empfehlungen für maximale Dehnungsraten im Einaxialen Druck-Schwellversuch basieren vor allem auf Prüfungen von MPK. Zum Teil wurden aber auch Vergleichsuntersuchungen zwischen MPK und BK durchgeführt, die hier ebenfalls vorgestellt werden.

[Karcher, 2005] entwickelte ein Konzept für eine Standardisierung des Einaxialen Druck-Schwellversuchs unter Berücksichtigung praxisrelevanter Einflussgrößen und leitete daraus einen Bewertungshintergrund für die Bestimmung des Verformungsverhaltens von Splittmastixasphalt im Einaxialen Druck-Schwellversuch ab. Im Zuge dieser Forschungsarbeit konnte ein Prognoseansatz für den Verformungswiderstand von SMA in Form eines Nomogramms (Bild 1-7) entwickelt werden, das auf Basis des Zusammenhangs zwischen der Spurrinnenrate SPT (als Quotient aus der in situ Spurrinntiefe und der bemessungsrelevanten Beanspruchung) und der Dehnungsrate an Laborprüfkörpern (MPK) abgeleitet wurde.

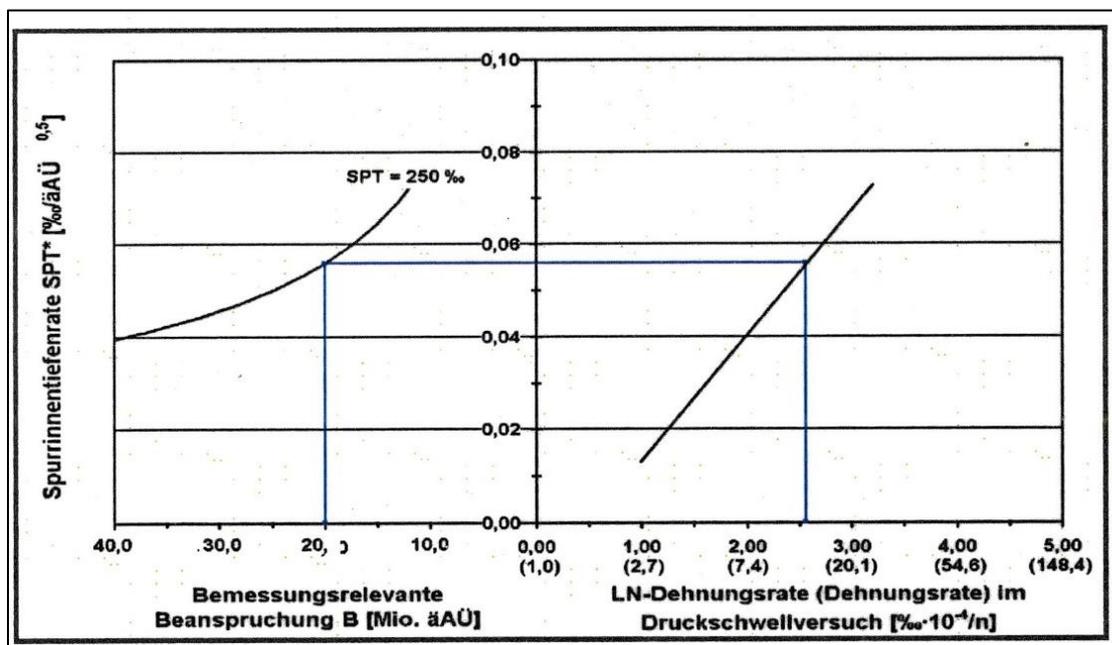


Bild 1-7: Nomogramm zur Spurrinnenprognose aus Einaxialen Druck-Schwellversuchen [Karcher, 2005]

Hieraus leitete [KARCHER, 2005] Maximalwerte für die Dehnungsraten im Druck-Schwellversuch in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung ab (Tab. 1-3).

Verkehrskategorie	Maximalwert für die Dehnungsrate im Druck-Schwellversuch [% · 10 ⁻⁴ /n]
1 (bis 30,0 Mio. äÄÜ)	9,0 (2,20)
2 (bis 20,0 Mio. äÄÜ)	13,0 (2,56)
3 (bis 13,2 Mio. äÄÜ)	21,0 (3,04)

()-Werte: logarithmische Dehnungsrate

Tab. 1-3: Vorschlag für maximale Dehnungsraten im DSV nach Verkehrskategorien, [in Anlehnung an Karcher, 2005]

[Schellenberg; Schellenberg, 2008] resümieren in ihrer Arbeit, dass der Druck-Schwellversuch „ein erprobtes und preiswertes dynamisches Prüfverfahren“ zur Bestimmung der Verformungsneigung für Asphalt-

deckschichten, Asphaltbinderschichten und Asphalttragschichten ist. Diese Aussagen stützen sie u.a. darauf, dass unter Berücksichtigung von 15 Praxisstrecken unterschiedlicher Liegedauer gute Zusammenhänge zwischen der Spurrinntentiefe in situ und der Dehnungsrate im Laborversuch festgestellt wurden. Darüber hinaus weisen sie auf den langjährigen Erfahrungshintergrund [Schellenberg, 1985] hin. Im abschließenden Fazit des Beitrags werden Grenzwerte für die Dehnungsrate in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung definiert, welche in recht guter Übereinstimmung mit den in [Karcher, 2005] definierten Grenzwerten stehen.

Bauklasse	Dehnungsrate am MPK [% \cdot 10 ⁻⁴ /n]	Dehnungsrate am BK [% \cdot 10 ⁻⁴ /n]
IV und höher	< 50	< 200
III – II	< 30	< 100
I, SV	< 15	
I, SV mit besonderen Beanspruchungen	< 5	

Tab. 1-4: Vorschlag für maximale Dehnungsraten im DSV nach Verkehrskategorien, [Schellenberg; Schellenberg, 2008]

Die Bundesländer Hamburg und Baden-Württemberg geben in ihren zu den [ZTV Asphalt-StB 07/13] ergänzenden Länderregelungen folgende Anforderungen für das Verformungsverhalten an:

„Über die Festlegungen der ZTV Asphalt-StB 07/13 hinaus sind im Eignungsnachweis anzugeben: Dehnungsrate im Druck-Schwellversuch in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 25 B1 für AC D SP, AC B S, SMA B S, AC B S SG, gummimodifizierter SMA LA“ [ETV-StB-BW, Teil 3, 2020].

„Für Asphaltbindergemische nach den H AI ABi ist die Zugabe von bis zu 40 M.-% Asphaltgranulat zulässig (Erlass Az.: 2-3946.0/242, z. d. A. des MVI vom 23.07.2018). Das Verformungsverhalten von den mit „S“ gekennzeichneten Asphaltbinder bei Wärme ist mit Hilfe des Einaxialen Druck-Schwellversuchs abweichend zu den TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 am Marshall-Probekörper bei einer Oberspannung von 0,50 MPa zu überprüfen und das Ergebnis im Erstprüfungsbericht anzugeben. Die Anforderung an die Dehnungsrate beträgt $\epsilon_w^* \leq 10 \cdot 10^{-4} \text{‰} / n$. Die proportionale Spurrinntentiefe ist nicht festzustellen“ [ETV-StB-BW, Teil 3, 2020].

„Das Verformungsverhalten von splittreichem Asphaltbeton bei Wärme ist mit Hilfe des Einaxialen Druck-Schwellversuchs abweichend zu den TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 am Marshall-Probekörper bei einer Oberspannung von 0,35 MPa zu überprüfen und das Ergebnis im Erstprüfungsbericht anzugeben. Die Anforderung an die Dehnungsrate beträgt in Abhängigkeit des verwendeten Polymermodifizierten Bitumens - bei 10/40-65 A: $\epsilon_w^* \leq 5 \cdot 10^{-4} \text{‰} / n$, - bei 25/55-55 A: $\epsilon_w^* \leq 10 \cdot 10^{-4} \text{‰} / n$.“ [ETV-StB-BW, Teil 3, 2020]

„Für Maximalrecycling ist zusätzlich zu beachten: [...] Das Verformungsverhalten von Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten bei Wärme ist mit Hilfe des Einaxialen Druck-Schwellversuchs abweichend zu den TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 am Marshall-Probekörper bei einer Oberspannung von 0,35 MPa zu überprüfen und das Ergebnis im Erstprüfungsbericht anzugeben. Die Anforderung an die Dehnungsrate beträgt $\epsilon_w^* \leq 10 \cdot 10^{-4} \text{‰} / n$ Die proportionale Spurrinntentiefe ist nicht festzustellen“ [ETV-StB-BW, Teil 3, 2020].

„Für gummimodifizierten SMA LA ist in Ergänzung der Tabelle 11 der TL Asphalt-StB „Prüfung der Baustoffe im Rahmen der Erstprüfung“ bei der „Prüfung Asphaltmischgut/Probekörper“ das Verformungsverhalten bei Wärme durch einen Einaxialen Druck-Schwellversuch abweichend zu den TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 am Marshall-Probekörper bei einer Oberspannung von 0,2 MPa zu überprüfen und das Ergebnis im Erstprüfungsbericht anzugeben. Die Anforderung an die Dehnungsrate beträgt $\epsilon_w^* \leq 10 \cdot 10^{-4} \text{‰} / n$.“

Bei der Eignungsprüfung von Asphaltdeckschichten sind „Zur Erfahrungssammlung [...] folgende Orientierungswerte für die Dehnungsrate aus dem Einaxialen Druckschwellversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 (Bestimmung des Verformungsverhaltens bei 50°C und 0,35 MPa Oberspannung) zu beachten: Belastungsklasse Bk100 $\leq 9 [10^{-4} \text{‰}/n]$ Belastungsklasse Bk3,2 bis Bk32 $\leq 21 [10^{-4} \text{‰}/n]$ “ [ZTV/St HmB 09, 2022].

„Abschnitt 3.9.3 der ZTV Asphalt-StB 07/13 wird ergänzt um: Es gilt sinngemäß Ziffer 5.6.2. An den Prüfkörpern der gewählten Asphaltmischgutzusammensetzung darf die Dynamische Stempeleindringtiefe nach den Technischen Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 A 1: Dynamischer Stempeleindringversuch an Gussasphalt, Ausgabe 2009 für die Belastungsklasse Bk100 höchstens 1,5 mm und für die

Belastungsklasse Bk32 bis Bk3,2 höchstens 2,5 mm betragen. Im Eignungsnachweis ist die dynamische Stempelleindringtiefe anzugeben“ [ZTV/St HmB 09, 2022].

In jüngerer Vergangenheit griffen [Mollenhauer et. al, 2016] noch einmal eine Problematik auf, welche bereits in [Renken, 2001] behandelt wurde. Der Fokus lag hier auf der Probekörperherstellung und deren Auswirkung auf die resultierenden Performance-Ergebnisse an Laborprüfverfahren. Die schlagende Verdichtung von MPK erzeugt einen deutlich erhöhten Verformungswiderstand als praxisadäquat verdichtete Probekörper. Eine gute Übertragbarkeit vom Labor auf die Praxis wird somit bei Bohrkernen aus WSV-Platten erwartet, was dazu führte, dass die nationale Prüfvorschrift nun Bohrkern aus WSV-Platten statt MPK bei der Prüfung vorsieht und der über Jahrzehnte erlangte Erfahrungshintergrund nicht mehr uneingeschränkt verwendbar ist. Nach [Karcher, 2005] ist die Steifigkeit am MPK erfahrungsgemäß um den Faktor 2 bis 3 höher als bei BK aus Asphalt-Platten oder Straßen. [Plachkova-Dzhurova.; Milch, 2020] und [Arnold, 2009] führten Einaxiale Druck-Schwellversuche sowohl an MPK als auch an BK aus mit dem WSV hergestellten Asphalt-Platten durch. [Arnold, 2009] untersuchte zudem auch BK aus Asphaltbefestigungen. Die Ergebnisse und die Faktoren zwischen den Ergebnissen am MPK und BK aus den im Labor hergestellten Platten sind in den Tab. 1-5 und Tab. 1-6 aufgeführt. Die Ergebnisse bestätigen die bisher mehrfach genannte Aussage, dass am BK höhere Dehnungen und Dehnungsraten ermittelt werden als am MPK. Das Verhältnis der Dehnungen (Umrechnungsfaktor) unterscheidet sich jedoch deutlich je nach Asphaltmischgutsorte und Bindemittel und schwankt zwischen 1,8 und 5,3.

Asphaltsorte	Bindemittel-sorte	σ_0 [Mpa]	Dehnungsrate [‰*10 ⁻⁴ /n]			Dehnung [‰]			Belastungszyklen	
			MPK	WSV	Faktor WSP-MPK	MPK	WSV	Faktor WSP-MPK	MPK	WSV
AC 11 D S	25/55-55 A	0,35	1,2	6,2	5,2	9,1	41,3	4,5	10.000	10.000
			0,9	4,9	5,4	7,9	37,3	4,7	10.000	10.000
AC 8 D SP	25/45 VL	0,35	0,80	2,6	3,3	7,9	31,3	4,0	10.000	10.000
AC 11 D SP	25/55-55 A RC	0,35	1,4	3,2	2,3	9,3	26,1	2,8	10.000	10.000
			4,1	4,7	1,1	11,2	26,3	2,3	10.000	10.000
			1,4	4,4	3,1	11,3	31,2	2,8	10.000	10.000
			1,1	4,3	3,9	10,0	29,5	3,0	10.000	10.000
			1,1	4,0	3,6	8,9	24,9	2,8	10.000	10.000
SMA 8 S	25/55-55 A	0,35	0,70	5,1	7,3	6,9	36,9	5,3	10.000	10.000
AC 16 B S	25/55-55 A	0,35	2,3	5,5	2,4	8,9	27,3	3,1	10.000	10.000
			9,1	7,4	0,8	12,1	29,8	2,5	5.107	10.000
			14,3	30,2	2,1	14,7	40,7	2,8	5.049	5.580
AC 16 BS SG	25/55-55 A RC	0,50	1,0	5,9	5,9	6,4	30,8	4,8	10.000	10.000
	25/55-55 A		3,9	6,4	1,6	12,5	34,6	2,8	10.000	10.000
SMA 16 B S	10/40-65 A	0,50	2,8	5,6	2,0	10,3	40,6	3,9	10.000	10.000
			4,9	7,4	1,5	13,8	46,4	3,4	10.000	10.000
	10/40-65 A RC		1,2	5,5	4,6	7,7	24,4	3,2	10.000	10.000

Tab. 1-5: Vergleichsuntersuchungen DSV am BK und MPK des KIT [Plachkova-Dzhurova.; Milch, 2020]

Asphalt-sorte	Probekörper-art	Bindemittel-sorte	Bindemittelgehalt [M.-%]	Dehnungs-rate [%*10 ⁻⁴ /n]	Faktor WSV-MPK	Dehnung [%]	Belastungs-zyklen
SMA 0/8 S	Referenz BK	PmB 45 A	7,0	17,7*	1,8	81,7	9389
	MPK			7,4		17,9	5251
	BK (WSV)			13,3		36,9	8227
AB 0/8	Referenz BK	70/100	6,4	176,5	3,9	40,0	625
	MPK			2,6		8,1	10000
	BK (WSV)			10,2		22,5	10000
AB 0/11 S	Referenz BK	PmB 45 A	6,2	57,6*	3,9	64,1	3038
	MPK			1,5		10,4	10000
	BK (WSV)			5,9		25,8	10000
SMA 0/11 S	Referenz BK	50/70	6,5	303,9*	3,3	70,5	650
	MPK			31,8*		28,5	2085
	BK (WSV)			105,1		53,1	1602

*größere Abweichung bei einem der drei Durchläufe

Tab. 1-6: Vergleichsuntersuchungen an Referenz BK, MPK und BK (WSV) nach [Arnold, 2009]

Mit dem FE 29.0327/2013/BAST [RADENBERG et al., 2017] wurde u.a. eine statistische Auswertung der zur Erfahrungssammlung durchgeführten Verformungsuntersuchungen an Gussasphalten (Dynamischer Stempel Eindringversuch an Gussasphalten) durchgeführt. Bild 1-8 zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung getrennt für die Sorten MA 5 S, MA 8 S und MA 11 S. Es zeigt sich die erwartete Abhängigkeit vom Größtkorn, wobei die mittleren dynamischen Eindringtiefen (Median) der drei Sorten zwischen 1,0 und 2,5 mm liegen.

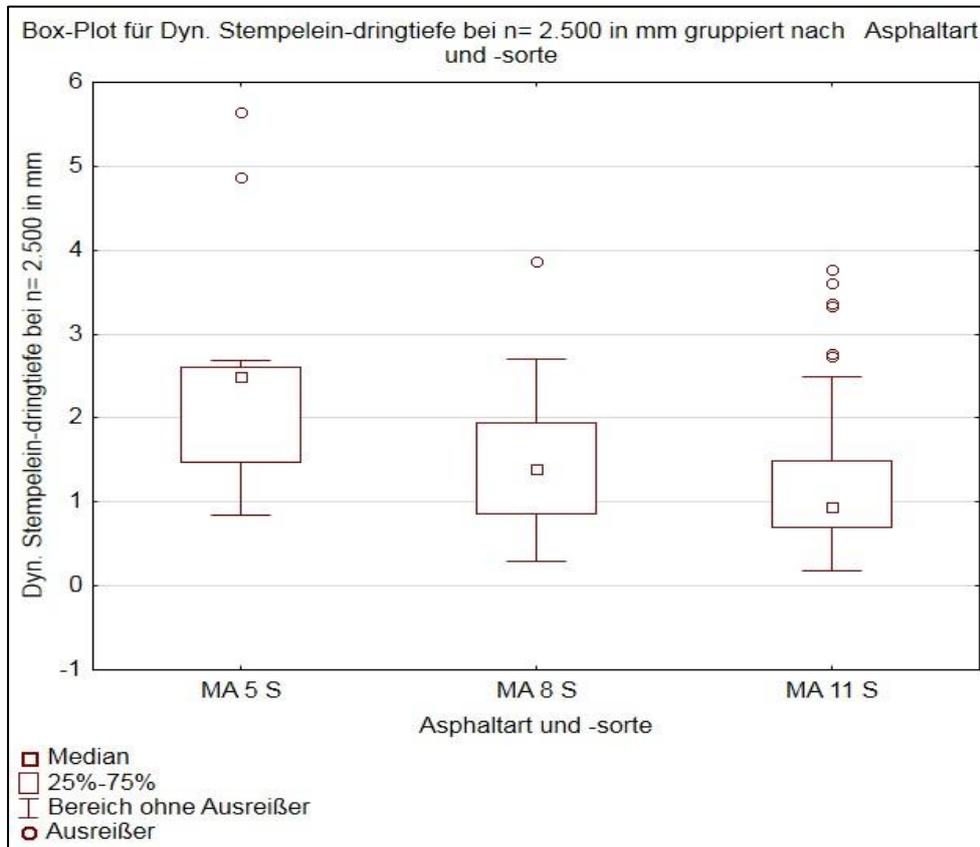


Bild 1-8: Statistische Auswertung der dynamischen Eindringtiefen an Gussasphalten [Radenberg et al., 2017]

Zur Bewertung der dynamischen Stempfeleindringtiefe nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1] lagen 15 Datensätze für Gussasphalte MA 5 S, 69 Datensätze für Gussasphalte MA 8 S und 136 Datensätze für Gussasphalte MA 11 S vor. In [Radenberg et. al, 2017] werden auf Basis dieser Datenlage die in der Tab. 1-7 aufgeführten Erfahrungswerte abgeleitet und empfohlen.

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

Tab. 1-7: Erfahrungswerte für die dynamische Stempfeleindringtiefe an Gussasphalten bei $n = 2.500$ LW

Vor dem Hintergrund der in Kapitel 1.1 geschilderten steigenden Bedeutung des Verformungswiderstandes scheinen die Maximalwerte etwas zu hoch angesetzt, wobei die Datenlage auch eine leichte Reduzierung zuließe.

1.3 Ziel des Forschungsprojektes

Nachdem eine Änderung der [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] dahingehend vorgenommen wurde, dass nun praxisgerechtere, walzverdichtete Probekörper zu prüfen sind und mit der Überarbeitung des Technischen Regelwerkes (TL Asphalt-StB und ZTV Asphalt-StB) diese Prüfvorschrift zur Beschreibung des Verformungswiderstandes zur Regel werden soll, liegt der Schwerpunkt des Projektes in der Schaffung eines belastbaren Bewertungshintergrundes für diese Prüfmethode. Dabei sollen die Erkenntnisse aus den in der Vergangenheit an MPK durchgeführten Untersuchungen so umfassend wie möglich in die Daten für diesen Bewertungshintergrund eingebunden werden. Hierzu werden direkte vergleichende Untersuchungen durchgeführt und die Daten aus der Literaturrecherche berücksichtigt.

Für das zweite Prüfverfahren für Walzasphalte [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] liegen nach bisherigem Kenntnisstand weniger Daten vor und diese Methode wird auch nur selten durch einzelvertragliche Regelungen gefordert. Dennoch stellt diese Methode eine interessante Alternative dar. Eine intensive und vergleichende Betrachtung dieses Verfahren ist daher ebenfalls sinnvoll, zumal die Praxisbedingungen hier möglicherweise besser abbildet werden, da die Querausdehnung behindert wird. Es werden daher alle Varianten mit der in [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] beschriebenen Methode untersucht und ein Teil der Varianten mit der nicht in den TP beschriebenen Alternative (mit Stützring). Die Ergebnisse sollen ggf. in eine Überarbeitung dieser TP einfließen und zudem eine weitere Bewertungsgrundlage liefern.

Für die Bewertung des Verformungsverhaltens von Gussasphalt nach den [TP Asphalt-StB Teil 25 A1] gibt es bereits einen Vorschlag für einen Bewertungshintergrund, der mit den hier durchgeführten Untersuchungen kritisch überprüft und ggf. geändert wird.

Grundsätzlich sollen alle hilfreichen Erkenntnisse aus diesem Projekt in die Überarbeitungsaktivitäten der Europäischen Normen eingebunden werden.

2 Methodik

Das Ziel der Übertragung des Bewertungshintergrundes des Verformungswiderstandes wurde im Rahmen dieses Projektes auf verschiedenen Wegen verfolgt. So wurde eine umfangreiche Literaturstudie zu vorhandenen Ergebnissen von Einaxialen Druck-Schwellversuchen und Stempel Eindringversuchen durchgeführt und zusätzlich Asphaltmischgutproduzenten angeschrieben, um weitere Ergebnisse zum Verformungswiderstand, möglichst mit Informationen zur Zusammensetzung der Asphaltmischgüter zu bekommen. Diese bestehenden Daten wurden ausgewertet und durch eigene Laboruntersuchungen an 45 verschiedenen Asphaltmischgutvarianten ergänzt. Diese 45 Varianten enthalten sechs Gussasphalte und sechs weitere Walzasphaltgemische, die von der BAST zur Verfügung gestellt wurden. Zusätzlich wurden zehn Praxisstrecken ausgewählt, aus denen Bohrkern entnommen wurden, um die Ergebnisse der im Labor hergestellten Asphaltkonzepte zu validieren. An allen Walzasphaltvarianten wurden dynamische Stempel Eindringversuche gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] und bei den Gussasphalten gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1] durchgeführt und bei allen Walzasphalten Einaxiale Druck-Schwellversuche am Bohrkern gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1]. An ausgewählten Varianten wurden zudem Einaxiale Druck-Schwellversuche am MPK und Stempel Eindringversuche mit Querdehnungsbehinderung durchgeführt. Die gewählte Untersuchungsmethodik ist in Bild 2-1 als Fließdiagramm dargestellt.

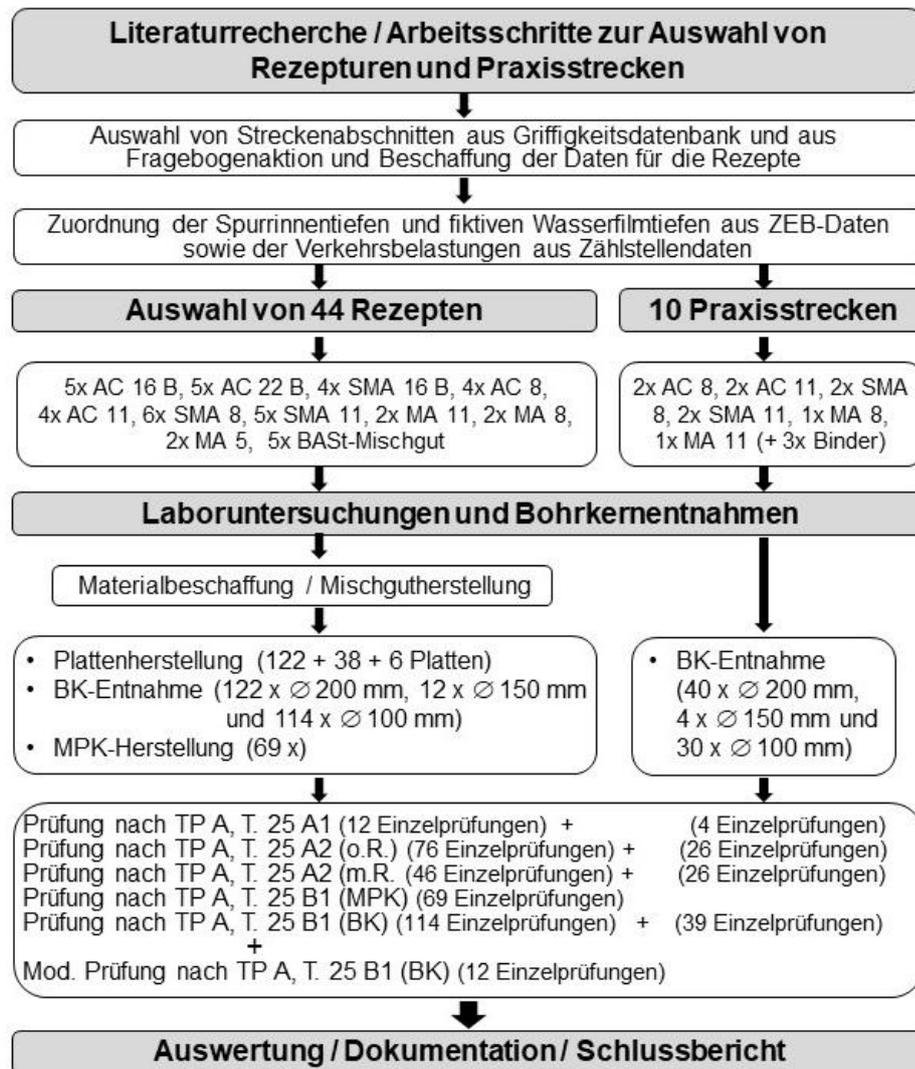


Bild 2-1: Fließdiagramm zum Forschungsvorhaben FE 07.0308/2020/EGB

2.1 Auswertung von ZEB-Daten zur Auswahl von Praxisstrecken

In regelmäßigen Abständen findet für alle Bundesfernstraßen in Deutschland eine bundeseinheitliche Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) statt. Hierbei werden verschiedene Messgrößen, welche den Straßenzustand charakterisieren, mit schnellfahrenden Messfahrzeugen erfasst. Besonders wichtig für die Aussage über den Verformungswiderstand einer Straße sind hierbei die Zustandsgrößen Spurrinntentiefe (MSPT) und fiktive Wassertiefe (MSPH). Mithilfe der [ZTV ZEB-StB, 2006] können diese Messgrößen normiert und bewertet werden.

Zur Auswahl von Praxisstrecken wurden aus den ZEB-Daten Straßenabschnitte mit unterschiedlichen Spurrinntiefen detektiert. Hierbei lag der Fokus sowohl auf besonders guten als auch auf besonders schlechten Streckenabschnitten hinsichtlich der Spurrinntentiefe. Durch die Betrachtung mehrerer Kampagnenjahre sollten erste Entwicklungen der ausgewählten Abschnitte ersichtlich werden. Da aus den Daten der ZEB keine Angaben über das Einbaudatum und die Materialart der Asphaltdeckschicht zu finden sind, erfolgte eine Überlagerung mit Daten aus einer SKM-Datenbank, die solche Angaben oftmals in den Messprotokollen der bauvertraglichen Abnahmeprüfung der Griffigkeit haben. Insgesamt lagen mehrere tausend Messkilometer aus Abnahmemessungen in der Griffigkeits-Datenbank vor, welche für die Auswertungen genutzt wurden.

Eine Fragebogenaktion bezüglich markanter Streckenabschnitte führte bei verschiedenen Ämtern zu weiterführenden Ergebnissen, jedoch konnten über diesen Weg keine neuen Strecken ausgewählt werden. Auf Basis der ZEB-Daten wurden daraufhin weitere Strecken mit vergleichsweise schlechten Zustandswerten ausgewählt, von denen allerdings keine weiteren Informationen vorlagen oder über die SKM-Datenbank generiert werden konnten. Zu diesen Streckenabschnitten wurden die jeweiligen Straßenbaubehörden kontaktiert, um weitere Informationen zu den Strecken, wie Liegezeit und Mischgutsorte, zu erhalten. Weiterhin wurden Asphaltmischgutproduzenten angeschrieben, um Daten zu Verformungsprüfungen an Asphalten aus Erstprüfungen zu sammeln und auswerten zu können.

Die Vorgehensweise für die Streckenfindung ist in Bild 2-2 und detaillierter in der darauffolgenden Aufzählung dargestellt.



Bild 2-2: Fließdiagramm zur Vorgehensweise für die Streckenfindung

Detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zur Streckenfindung:

- Auswahl von Straßenabschnitten (BAB oder Bundesstraße) mit auffälligen Verformungseigenschaften aus den ZEB-Daten
- Überlagerung der ausgewählten Straßenabschnitte mit den Informationen aus einer SKM-Datenbank
- Auswahl von geeigneten Abschnitten und Zusammentragen von möglichst detaillierten Angaben zur Mischgutzusammensetzung
- Auswahl von möglichen Strecken für die Bohrkernentnahmen
- Weitergehende Nachfrage bei Behörden, wenn nicht alle geforderten Informationen vorliegen oder ermittelt werden konnten
- Absprache mit den Behörden, welche ausgewählten Strecken tatsächlich zur Bohrkernentnahme in Frage kommen
- Erlaubnis zur Bohrkernentnahme anfragen

2.2 Laboruntersuchungen

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden dynamische Stempelleindringversuche nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] bzw. [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1] mit und ohne Querdehnungsbehinderung an Walz- bzw. Gussasphalten durchgeführt und Einaxiale Druck-Schwellversuche gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] am Bohrkern und zu Vergleichszwecken exemplarisch am MPK an verschiedenen Walzasphalten durchgeführt. Im Folgenden werden die genauen Versuchsrandbedingungen und die untersuchten Asphaltvarianten sowie die Zuordnung zu den jeweiligen Prüfverfahren beschrieben. Zur Validierung der Laborergebnisse wurde zudem das Verformungsverhalten von Praxisstrecken untersucht. In Tab. 2-1 ist eine Übersicht der Anzahl der durchgeführten Untersuchungen in Abhängigkeit von dem Versuch und der Art der Proben gegeben.

	Laborvarianten	BASSt-Varianten	Bohrkernvarianten	Σ Versuche	Σ Probekörper
TP A, T.25 A2 m.R.	18	5	13	36	2 x 36 = 72
TP A, T.25 A2 o.R.	33	5	13	51	2 x 51 = 102
TP A, T.25 B1 MPK	18	5	-	23	3 x 23 = 69
TP A, T.25 B1 BK	33	5	13	51	3 x 51 = 153
TP A, T.25 A1	6	-	2	8	2 x 8 = 16

Tab. 2-1: Anzahl der durchgeführten Untersuchungen in Abhängigkeit von dem Versuch und Praxis- und Laborproben

2.2.1 Varianten und Untersuchungsmaterialien der im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten

Für die Untersuchungen des Verformungsverhaltens wurden Asphaltmischgutsorten ausgewählt, für die nach dem derzeitigen Bearbeitungsstand der Technischen Regelwerke zukünftig die Dehnungsraten angegeben werden sollen. Innerhalb dieser Asphaltvarianten wurde die Bindemittelsorte und zum Teil die Gesteinsart und die Zusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches variiert. Die Übersicht der Varianten ist in Tab. 2-2 gegeben.

Die Gesteinsart G1 entspricht einem Diabas, G2 und GG1 sind Gabbro und G3 Moräne. Diese Gesteinsarten wurden für die feine Gesteinskörnung 0/2 mm und grobe Gesteinskörnung 2 bis 22,4 mm gleichermaßen verwendet. Als Füller wurde ein Kalksteinfüller verwendet. Die Rohdichten und Korngrößenverteilung der Lieferkörnungen sind in Tab. 2-4 bis Tab. 2-6 zusammengefasst. 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. Für die Laboruntersuchungen wurde das Über- und Unterkorn entfernt, um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Gesteinskörnungszusammensetzung zu erzielen.

Eine Übersicht der sechs, von der BASSt zur Verfügung gestellten Mischgutvarianten ist der Tab. 2-3 zu entnehmen.

Lfd. Nr.	Mischgutart	Bindemittel	Gesteinsart	Sieblinie
1	AC 22 B S	25/55-55 A	G1	m
2		10/40-65 A	G1	m
3		30/45	G1	m
4		10/40-65 A	G1	o
5		10/40-65 A	G1	u
6	AC 16 B S	25/55-55 A	G1	m
7		10/40-65 A	G1	m
8		30/45	G1	m
9		10/40-65 A	G2	m
10		10/40-65 A	G3	m
11	AC 11 D S	25/55-55 A	G1	m
12		10/40-65 A	G1	m
13		25/55-55 A	G2	m
14		25/55-55 A	G3	m
15	AC 8 D S	25/55-55 A	G1	m
16		50/70	G1	m
17		25/55-55 A	G1	o
18		25/55-55 A	G1	u
19	SMA 16 B S	10/40-65 A	G1	m
20		PmB 25/45 VL	G1	m
21		PmB 10/25 VL	G1	m
22		45/80-65 A	G1	m
23	SMA 11 S	25/55-55 A	G1	m
24		45/80-65 A	G1	m
25		25/55-55 A	G1	o
26		25/55-55 A	G1	u
27		25/55-55 A	G2	m
28	SMA 8 S	25/55-55 A	G1	m
29		45/80-65 A	G1	m
30		25/55-55 A	G1	o
31		25/55-55 A	G1	u
32		25/55-55 A	G2	m
33		25/55-55 A	G3	m
34	MA 11 S	15/25 VL	GG1	m
35		25/35 VH	GG1	m
36	MA 8 S	15/25 VL	GG1	m
37		PmB 10/25 VL	GG1	m
38	MA 5 S	15/25 VL	GG1	m
39		PmB 25/45 VL	GG1	m

m = mittlere Sieblinie, o = obere Sieblinie, u = untere Sieblinie

Tab. 2-2: Variantenübersicht der im Labor hergestellten Asphaltmischgüter

40	AC 11 D S	50/70	k. A.
41	AC 11 D SP	10/40-65 A (RC)	KS + Moräne + AG (15 M.-%)
42	SMA 8 S	25/55-55 A	Basalt + KS + Grauwacke
43	AC 16 B S	25/55-55 A	k. A.
44	AC 22 B S	10/40-65 A	k. A.
45	AC 22 B SG	25/55-55 A (RC)	KS + Granodiorit + AG (40 M.-%)

Tab. 2-3: Variantenübersicht der von der BAST zur Verfügung gestellten Mischgutvarianten

Kornzusammensetzung des verwendeten Kalksteinfüller, Fa. Rheinkalk und der Lieferkörnungen des Diabas Gewinnungsstätte Silbach							
[mm]	Siebrückstand [M.-%]						
	Kalksteinfüller	0/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22
22,40							8,4
16,00						2,1	86,2
11,20					7,5	82,9	5,0
8,00				9,1	76,7	14,6	0
5,60			2,5	78,2	15,2	0	0
2,00		12,5	88,2	12,3	0	0	0
0,125		75,3	7,6	0	0	0	0
0,063	15,0	8,7	0	0	0	0	0
< 0,063	85,0	3,5	1,7	0,4	0,6	0,4	0,4
Rohdichte [g/cm³]	2,720	2,845	2,839	2,853	2,846	2,852	2,836

Tab. 2-4: Kornzusammensetzung des verwendeten Kalksteinfüller und der Lieferkörnungen des Diabas

Kornzusammensetzung der Lieferkörnungen des verwendeten Gabbros, Bezugsstätte Mischwerk Groß Bülden							
[mm]	Siebrückstand [M.-%]						
	0/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22	
22,40							5,7
16,00						19,0	80,6
11,20				7,0	66,4		12,6
8,00			7,9	71,8	13,5		0,5
5,60		5,4	65,7	16,3	0,9		0,1
2,00	5,1	81,8	24,7	2,8	0		0
0,125	73,3	11,7	1,0	0	0		0
0,063	9,0	1,2	0,6	0	0		0
< 0,063	12,5	0	0	2,1	0,2		0,5
Rohdichte [g/cm³]	2,910	2,833	2,850	2,830	2,888		2,902

Tab. 2-5: Kornzusammensetzung der Lieferkörnungen des verwendeten Gabbros

Kornzusammensetzung der Lieferkörnungen der verwendeten Moräne, Gewinnungsstätte Rheinzabern							
[mm]	Siebrückstand [M.-%]						
	0/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22	
22,40							1,6
16,00					6,1		87,7
11,20		0,4		22,2	81,9		10,5
8,00	0,1	0,7	14,1	63,7	11,2		0,0
5,60	0,2	11,3	77,3	13,7	0,0		0,0
2,00	10,2	83,9	8,6	0,1	0,0		0,0
0,125	79,7	3,5	0,0	0,0	0,0		0,0
0,063	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0
< 0,063	1,8	0,1	0,0	0,3	0,8		0,2
Rohdichte [g/cm³]	2,636	2,631	2,622	2,629	2,686		2,683

Tab. 2-6: Kornzusammensetzung der Lieferkörnungen der verwendeten Moräne

Bei den polymermodifizierten Bitumen und den Bitumen mit viskositätsveränderten Zusätzen wurden lieferfertige Bindemittel verwendet. Die Bindemittel wurden in ausreichenden Mengen beschafft, um alle Asphaltmischgutvarianten mit der jeweiligen Bindemittelsorte mit dem gleichen Bindemittel aus einer Produktion sicherzustellen. Die rheologischen Kennwerte komplexer Schermodul $|G^*|$ und Phasenwinkel δ der verschiedenen Bindemittel, ermittelt mit dem T-Sweep nach [DIN EN 14770], sind als Blackdiagramm in Bild 2-3 dargestellt. Die Äqui-Schermodultemperaturen T ($G^* = 15 \text{ kPa}$) und die zugehörigen Phasenwinkel sind in Tab. 2-7 zusammengefasst.

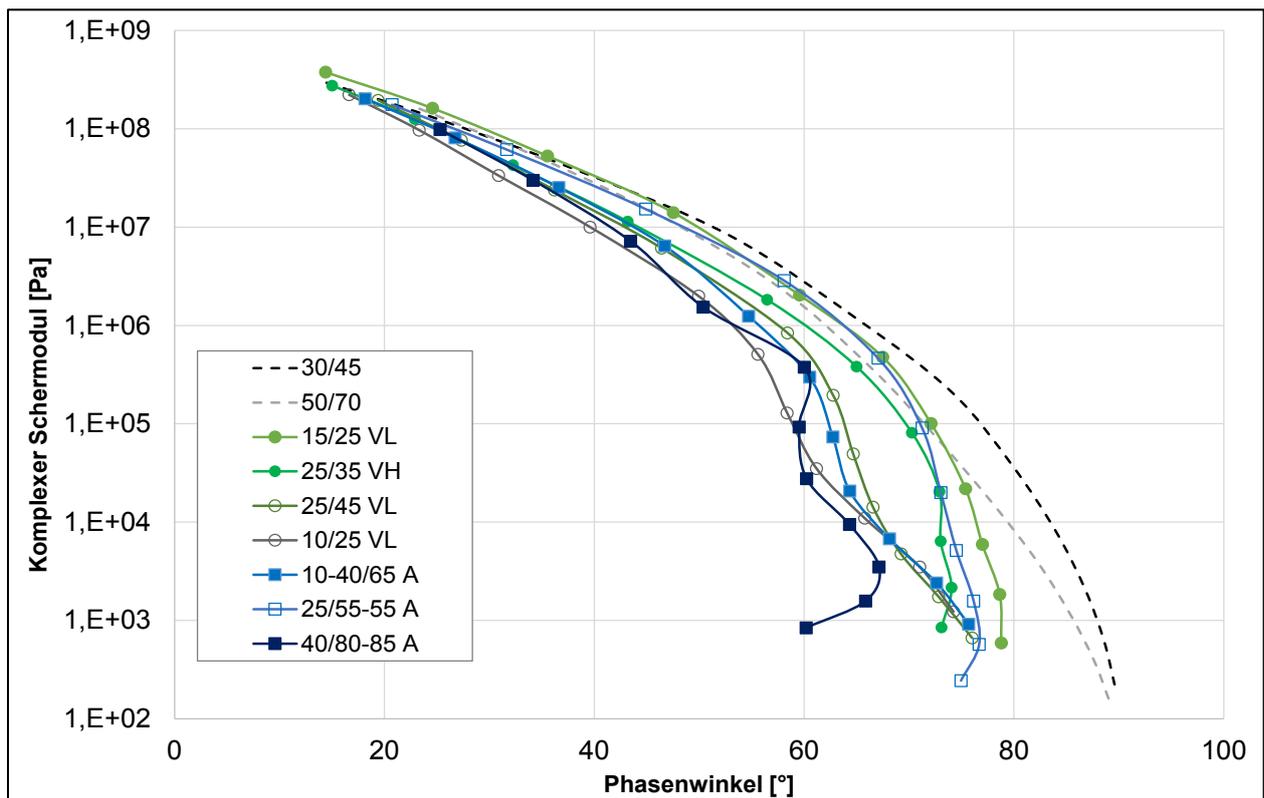


Bild 2-3: Blackdiagramm der verwendeten Bindemittel

Bindemittel	T bei $G^* = 15 \text{ kPa}$	δ bei $G^* = 15 \text{ kPa}$
[-]	[°C]	[°]
30/45	57,0	82,5
50/70	52,3	77,7
10/40-65 A	63,5	64,8
25/55-55 A	52,7	73,4
45/80-65 A	57,0	54,3
15/25 VL	63,6	77,5
25/35 VH	64,0	73,1
PmB 10/25 VL	65,2	65,2
PmB 25/45 VL	63,4	64,4

Tab. 2-7: Äqui-Schermodultemperaturen T ($G^* = 15 \text{ kPa}$) sowie zugehörige Phasenwinkel δ der verwendeten Bindemittel

Die Bindemittel der sechs von der BAST zur Verfügung gestellten Mischgüter wurden extrahiert und anschließend analog zu den in den Laborvarianten verwendeten Bindemitteln untersucht. Bis auf das Bindemittel im AC 22 B S lagen für alle Asphaltmischgüter Angaben zur Bindemittelsorte vor. Die Analyse des extrahierten Bindemittels ergab für den AC 22 B S eine Zuordnung des Bindemittels zur Sorte 10/40-65 A. Die rheologischen Kennwerte komplexer Schermodul $|G^*|$ und Phasenwinkel δ der verschiedenen Bindemittel, ermittelt mit dem T-Sweep nach [DIN EN 14770], sind als Blackdiagramm in Bild 2-4 dargestellt. Die Äqui-Schermodultemperaturen T ($G^* = 15 \text{ kPa}$) und die zugehörigen Phasenwinkel sind in Tab. 2-8 zusammengefasst.

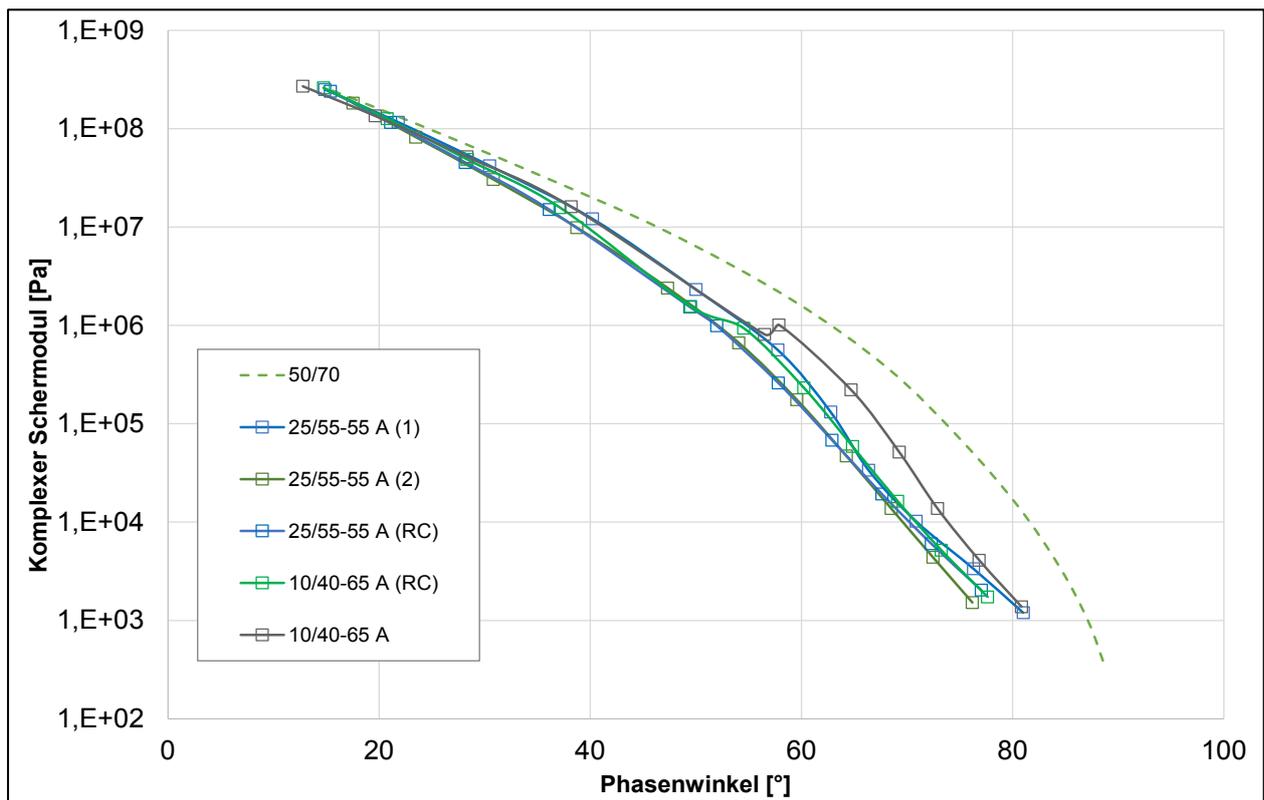


Bild 2-4: Blackdiagramm der verwendeten Bindemittel (BAST-Varianten)

Bindemittel	T bei $G^* = 15 \text{ kPa}$	δ bei $G^* = 15 \text{ kPa}$
[-]	[°C]	[°]
50/70	59,7	80,3
25/55-55 A (1)	67,6	69,6
25/55-55 A (2)	69,8	68,8
25/55-55 A (RC)	74,5	69,5
10/40-65 A (RC)	71,6	69,8
10/40-65 A	69,9	73,1

Tab. 2-8: Äqui-Schermodultemperaturen T ($G^* = 15 \text{ kPa}$) sowie zugehörige Phasenwinkel δ der verwendeten Bindemittel (BAST-Varianten)

Für die Asphaltmischgutherstellung wurde aus den vom Über- und Unterkorn bereinigten Lieferkörnungen die Korngrößenverteilung errechnet und im ersten Schritt der Mindestbindemittelgehalt gewählt. Wurden die volumetrischen Anforderungswerte am MPK bei dem Bindemittelgehalt nicht eingehalten, wurde der Bindemittelgehalt oder die Korngrößenverteilung angepasst. In Tab. 2-9 sind die Zugabeanteile und Rohdichten der Gesteinskörnungsgemische für die Asphaltvarianten zusammengefasst. Die Varianten wurden entsprechend Tab. 2-2 nummeriert. Die resultierenden Sieblinien sind in Bild 2-5 und Bild 2-6 grafisch dargestellt.

Asphaltmischgutsorte	Art der Sieblinie	Zugabeanteil [M.-%]								Rohdichte Gesteinskörnungsgemisch [g/cm³]
		Füller	0/2	2/5	5/8	8/11	11/16	16/22,4	22/31,5	
AC 22 B S	m	9	20	12	22	4	14	14	5	2,834
	o	7,5	24,5	19	15	3	15	16	0	2,835
	u	7,5	18	14	3	18	14	15	10	2,834
AC 16 B S	m	8	22	14	22	12	17	4,5	0	2,856
		9	22	13	22	12	17	4,5	0	2,649
		8	22	14	22	12	17,5	4,5	0	2,836
AC 11 D S	m	8	38,5	23	11	14,5	5	-	-	2,835
	m	7	39	23	11	15	5	-	-	2,858
	m	8	38,5	23	11	14,5	5	-	-	2,641
AC 8 D S	m	10	38	30	17	5	-	-	-	2,832
	o	10	44	30	16	0	-	-	-	2,831
	u	10	35	25	20	10	-	-	-	2,832
SMA 16 B S	m	9,5	18	0	24	17	27	4,5	0	2,836
SMA 11 S	m	11	12,5	15	18	39	4,5	-	-	2,845
	m	12,5	12	15	18	38	4,5	-	-	2,830
	o	12,5	16	16	20	35,5	0	-	-	2,830
	u	12,5	7,5	16	16	38	10	-	-	2,830
SMA 8 S	m	11	14,5	25	45,5	4	0	-	-	2,838
	m	12	14	20	50	4	0	-	-	2,637
	m	12	14	25	45	4	-	-	-	2,832
	o	12	17	25	46	0	-	-	-	2,846
	u	13	9	15	55	8	-	-	-	2,844
MA 11 S	m	33	19	13	12	18	5	-	-	2,813
MA 8 S	m	34	22	24	15	5	-	-	-	2,812
MA 5 S	m	34	26	35	5	-	-	-	-	2,813

Tab. 2-9: Zugabeanteile der Gesteinskörnungen je nach Asphaltmischgutsorte, Gesteinsart und Art der Sieblinie (m = mittlere Sieblinie, o = obere Sieblinie, u = untere Sieblinie) sowie die Rohdichte des Gesteinskörnungsgemisches

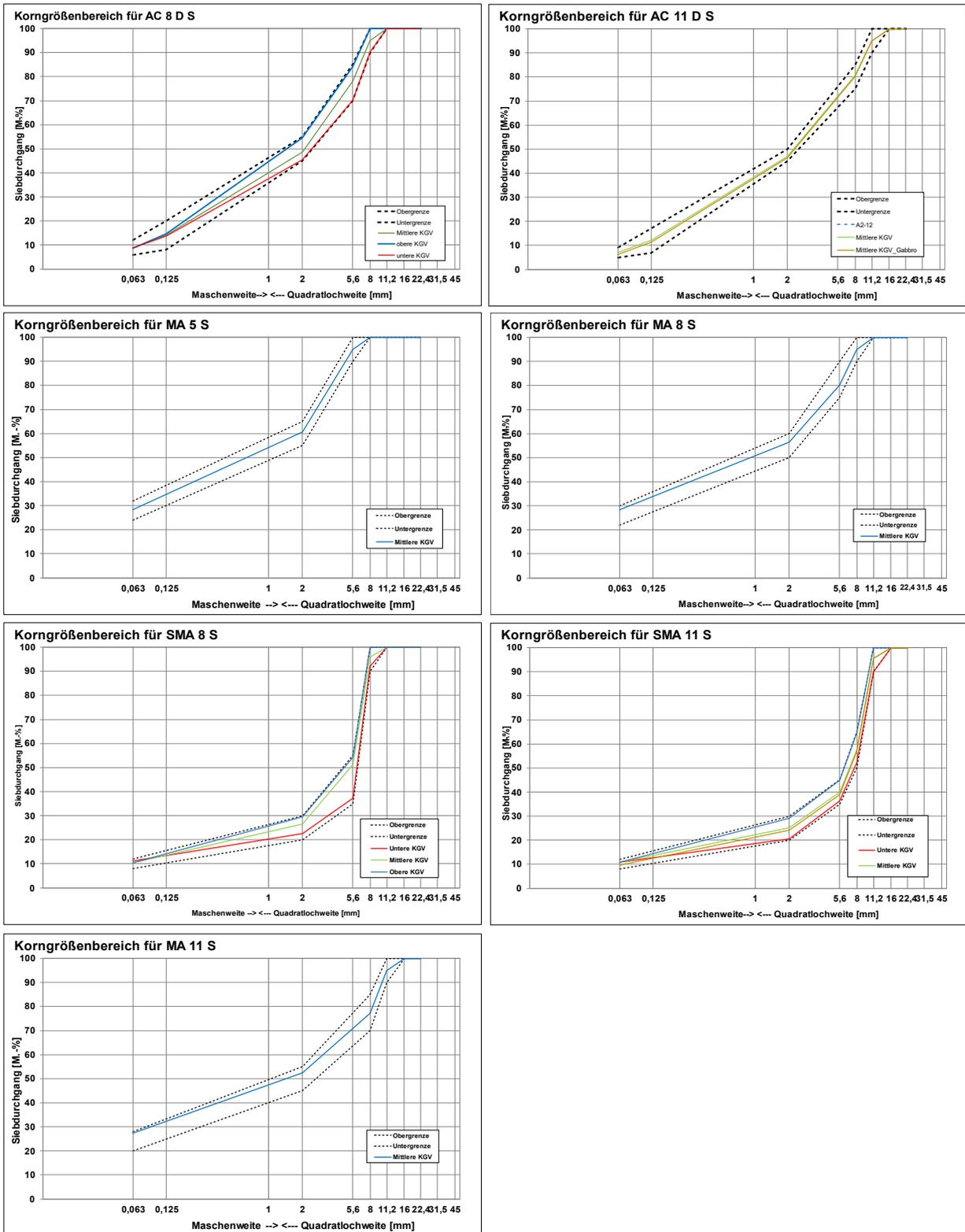


Bild 2-5: Sieblinien der verschiedenen Asphaltdeckschichtvarianten

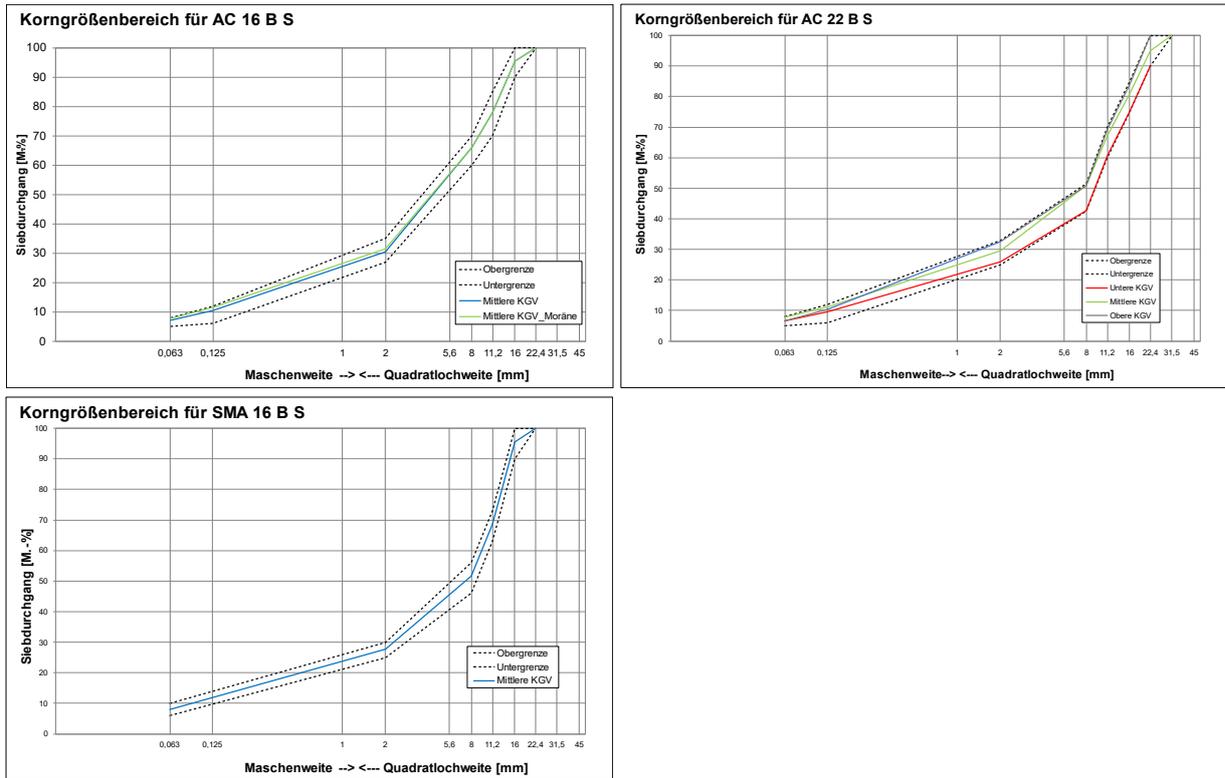


Bild 2-6: Sieblinien der verschiedenen Asphaltbinderschichtvarianten

Die Ergebnisse der Asphaltrohichte, der Raumdichte, des Hohlraumgehaltes und des Bindemittelvolumens der finalen Mischgutzusammensetzungen der Walzasphalte sind in Tab. 2-10 und die Ergebnisse der Gussasphaltvarianten in Tab. 2-11 zusammengefasst. Die Asphaltmischgutkonzeption erfolgte im ersten Schritt für die Varianten mit der mittleren Korngrößenverteilung. Durch die Anwendung einer Korngrößenverteilung, die sich an der oberen bzw. unteren Grenzlinie nach den [TL Asphalt-StB 07/13] orientieren, ergeben sich bei diesen Varianten zum Teil Hohlraumgehalte ober- oder unterhalb der Anforderungen an den Hohlraumgehalt. Diese wurden im weiteren Verlauf des Projektes dennoch belassen, um die Schwankungen während der Asphaltmischgutherstellung in der Praxis und die daraus folgenden volumetrischen Eigenschaften ebenfalls abzubilden.

Variante	Asphaltmischgutsorte	Bindemittelart	Bindemittelgehalt [M.-%]	Asphaltroh-dichte [g/cm³]	Raum-dichte [g/cm³]	Hohlraum-gehalt [Vol.-%]	Anforderungen an den Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Bindemittelvolumen [Vol.-%]
1	AC 22 B S	25/55-55	4,2	2,637	2,543	3,6	3,0 - 4,0	10,8
2		10/40-65	4,2	2,637	2,537	3,8		10,4
3		30/45	4,2	2,637	2,548	3,4		10,5
4		10/40-65	4,2	2,638	2,550	3,3		10,5
5		10/40-65	4,2	2,637	2,549	3,3		10,5
6	AC 16 B S	25/55-55	4,5	2,626	2,526	3,8	3,0 - 4,0	11,1
7		10/40-65	4,5	2,626	2,515	3,9		11,1
8		30/45	4,5	2,626	2,539	3,3		11,2
9		10/40-65	4,5	2,642	2,555	3,3		11,3
10		10/40-65	4,8	2,460	2,374	3,5		11,2
11	AC 11 D S	25/55-55	5,6	2,578	2,501	3,0	2,5 - 3,5	13,7
12		10/40-65	5,6	2,578	2,488	3,5		13,7
13		25/55-55	5,6	2,596	2,529	2,6		13,9
14		25/55-55	6,0	2,411	2,347	2,7		13,8
15	AC 8 D S	25/55-55	5,8	2,567	2,509	2,3	2,0 - 3,5	14,3
16		50/70	5,8	2,567	2,507	2,4		14,3
17		25/55-55	5,8	2,567	2,481	3,3		14,1
18		25/55-55	5,8	2,567	2,500	2,6		14,2
19	SMA 16 B S	10/40-65	5,2	2,596	2,496	3,8	3,0 - 4,0	12,7
20		25/45 VL	5,2	2,596	2,495	3,9		12,7
21		10/25 VL	5,2	2,596	2,484	3,9		12,7
22		45/80-65	5,2	2,596	2,494	3,9		12,7
23	SMA 11 S	25/55-55	6,3	2,545	2,477	2,7	2,5 - 3,0	15,3
24		45/80-65	6,3	2,545	2,464	2,6		15,2
25		25/55-55	6,3	2,545	2,496	1,9 (o.)		15,4
26		25/55-55	6,3	2,545	2,454	3,2 (u.)		15,2
27		25/55-55	6,3	2,548	2,474	2,9		15,3
28	SMA 8 S	25/55-55	6,7	2,540	2,467	2,9	2,5 - 3,0	16,2
29		45/80-65	6,7	2,540	2,456	3,3		16,1
30		25/55-55	6,7	2,541	2,483	2,3 (o.)		16,3
31		25/55-55	6,7	2,540	2,433	4,2 (u.)		16,0
32		25/55-55	6,7	2,535	2,467	2,7		16,2
33		25/55-55	7,2	2,367	2,294	3,1 (3,0)		16,2

Tab. 2-10: Asphaltroh-dichte, Raum-dichte und Hohlraumgehalt der Marshall-Probekörper der Walzasphalte

Variante	Asphaltmischgutsorte	Bindemittelart	Bindemittelgehalt [M.-%]	Asphaltroh-dichte [g/cm³]	Raum-dichte [g/cm³]	Füller-Bindemittel-Verhältnis [%]	Gemessene Stempel-eindringtiefe (1,0-3,0) [mm]	Zunahme Stempel-eindringtiefe (max. 0,4) [%]
34	MA 11 S	15/25 VL	6,4	2,529	2,521	5,2	2,0	0,14
35		25/35 VH	6,4	2,529	2,486	5,2	1,9	0,13
36	MA 8 S	15/25 VL	6,5	2,524	2,499	5,2	2,1	0,09
37		PmB 10/25 VL	7,0	2,504	2,461	4,9	1,2	0,06
38	MA 5 S	15/25 VL	6,6	2,521	2,477	5,2	1,7	0,18
39		PmB 25/45 VL	6,6	2,521	2,469	5,2	1,9	0,13

Tab. 2-11: Asphaltroh-dichte, Raum-dichte, Füller-Bindemittel-Verhältnis und Stempel-eindringtiefen sowie deren Zunahme der Gussasphalte

2.2.2 Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten

Wie bereits beschrieben, wurden im Rahmen dieses Projektes dynamische Stempelleitungsversuche nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1] bzw. [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] mit und ohne Querdehnungsbehinderung an Guss- bzw. Walzasphalten durchgeführt (s. Kapitel 1.2.1) und Einaxiale Druck-Schwellversuche gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] am Bohrkern und zu Vergleichszwecken exemplarisch am MPK (s. Kapitel 1.2.1) durchgeführt. Abweichend von den aktuell gültigen Prüfvorschriften wurden die Versuche immer bis zu 10.000 Belastungszyklen durchgeführt, auch wenn ggf. ein anderes Abbruchkriterium früher gegriffen hätte. Die genaue Zuordnung der Versuche zu den jeweiligen Varianten ist den Tab. 2-12 bis Tab. 2-14 zu entnehmen. Die Probekörperhöhe für die dynamischen Stempelleitungsversuche an den Walzasphalten wurde entsprechend [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] in Abhängigkeit vom Größtkorn festgelegt ($h = 40 \pm 1$ mm bei $D = 8$ und 11 mm, $h = 60 \pm 1$ mm bei $D = 16$ und $h = 80 \pm 1$ mm bei $D = 22$).

Mischgut	AC22BS					AC16BS					AC11DS				AC8 D S			
Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
TP A, T.25 A2 m.R.	X	X	X			X	X	X			X	X			X	X		
TP A, T.25 A2 o.R.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TP A, T.25 B1 MPK	X	X	X			X	X	X			X	X			X	X		
TP A, T.25 B1 BK	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tab. 2-12: Untersuchungsprogramm Asphaltbetone mit Zuordnung der Varianten zu den Prüfmethode

Mischgut	SMA16BS				SMA11S					SMA 8 S					
Variante	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
TP A, T.25 A2 m.R.	X	X			X	X	X			X	X	X			
TP A, T.25 A2 o.R.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
TP A, T.25 B1 MPK	X	X			X	X	X			X	X	X			
TP A, T.25 B1 BK	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tab. 2-13: Untersuchungsprogramm SMA mit Zuordnung der Varianten zu den Prüfmethode

Mischgut	MA11S		MA8S		MA5S	
Variante	34	35	36	37	38	39
TP A, T.25 A1	X	X	X	X	X	X

Tab. 2-14: Untersuchungsprogramm Gussasphalte mit Zuordnung der Varianten zu den Prüfmethode

2.2.3 Laboruntersuchungen an Bohrkernen aus Praxisstrecken

Nach Auswertung von ZEB-Daten (s. Kapitel 2.1) und der anschließenden Überlagerung der Abschnitte mit Informationen aus einer SKM-Datenbank konnten mögliche Praxisstrecken zusammengestellt werden. Das Zusammentragen von möglichst detaillierten Angaben zur Asphaltmischgutzusammensetzung und dem Aufbau der Abschnitte wurde an Behörden weitergegeben, um anschließend eine geeignete Auswahl für mögliche Bohrkernentnahmen treffen zu können. Für die dadurch gewählten Strecken wurde eine Erlaubnis zur Bohrkernentnahme gestellt, die allerdings aus unterschiedlichen Gründen abgelehnt wurde. Insofern konnte leider die umfassende Auswertearbeit der ZEB-Daten nicht genutzt werden und es musste eine alternative Vorgehensweise gewählt werden.

Mithilfe einer direkten Ansprache von Straßenbaubehörden konnten weitere mögliche Praxisstrecken ausgewählt werden. Zur abschließenden Erlaubnis einer Bohrkernentnahme kam es auch in diesem Fall aber leider nicht, da die Anzahl der benötigten Bohrkernentnahmen die genehmigte Anzahl überstieg.

Über den Kontakt zu kommunalen Straßenbaubehörden, kleineren Unternehmen und Fachleuten aus der Baubranche konnten schlussendlich einige Streckenabschnitte zur Beprobung gefunden werden. Die Entnahme fand meist im Zuge einer Deckensanierung oder baldigen Erneuerung der Fahrbahn statt. Somit konnte allerdings die Verformung (Spurrinntiefe) der Straße nicht mehr das maßgebende Kriterium zur Auswahl der Praxisstrecken darstellen. Die ZEB-Daten der Streckenabschnitte wurden, soweit vorhanden, erst anschließend zusammengestellt. Die in Tab. 2-15 zusammengefassten Strecken wurde im Rahmen dieses Projektes beprobt.

Streckenabschnitt	Asphaltmischgutsorte(n)	Datum der Probennahme
A10 km 77,39-81,95; rechte Fahrbahn	SMA 11 S, SMA 16 B S	31.05.2022
B51 km 2,758-5,834	SMA 8 S, AC 16 B S	10.01.2023
B57; Abs. Nr. 8	Gussasphalt	13.03.2023
B54; Abs. Nr. 150,1 (Münster)	SMA 8 S, AC 16 B S	20.03.2023
B54; Abs. Nr. 185 (Ochtrup)	SMA 11 S, AC 22 B S	20.03.2023
Hüller Str. (Gelsenkirchen)	AC 8 D S (N)	30.05.2023
B50 km 0,950 -1,010; rechte Fahrbahn	SMA 8 S, AC 16 B S	01.06.2023
B226 Witten (Station 0+400, links)	SMA 8 S, AC 22 B S	26.07.2023
Hahnerberger Str. (Höhe Nr. 112)	AC 11 D S	11.07.2023
L459 Hamminkeln (zw. 3+342 bis 4+725)	AC 11 D S	06.11.2023

Tab. 2-15: Übersicht der Praxisstrecken

Im Betreuerkreis wurde das folgende Vorgehen bei der Prüfung der BK aus den Praxisstrecken festgelegt:

- Stempeleindringversuch an der Asphaltdeckschicht (Prüfung der tatsächlich vorhandenen Schichtdicke)
- Einaxiale Druck-Schwellversuche an Systemprobekörpern (DS + BS, h = 60 cm)
- Einaxiale Druck-Schwellversuche an der Asphaltbinderschicht (h = 60 cm)

2.3 Verformungswiderstand bei höchsten Beanspruchungen (AS 3A)

Die Möglichkeit einer experimentellen Betrachtung des Verformungswiderstandes von Asphalttschichten mit höchsten verformungswirksamen Beanspruchungen ist ein bisher nicht zufriedenstellend gelöstes Problem. Solche Beanspruchungen treten häufig auf neu gebauten Asphaltbefestigungen in der Bauphase (Baustellenverkehrsführung) auf. Durch enge Fahrstreifen, einen hohen Anteil an langsam fahrenden oder stehenden Lkw-Verkehr und überproportional starker Erwärmung der noch sehr dunklen Asphaltoberfläche entstehen Belastungsbedingungen, die als außergewöhnlich eingestuft werden, aber zunehmend an Bedeutung gewinnen könnten.

Um ein bestehendes Verfahren für die Bewertung solcher Situationen einsetzen zu können, werden erweiterte Prüfungsrandbedingungen diskutiert, bei denen die Prüftemperatur und die Lastbedingungen der Prüfmethode nach [TP Asphalt-StB Teil 25 B1] geändert werden könnten. Bild 2-7 zeigt ein fiktives Beispiel, mit dem die vorgeschlagenen Randbedingungenänderungen veranschaulicht werden.

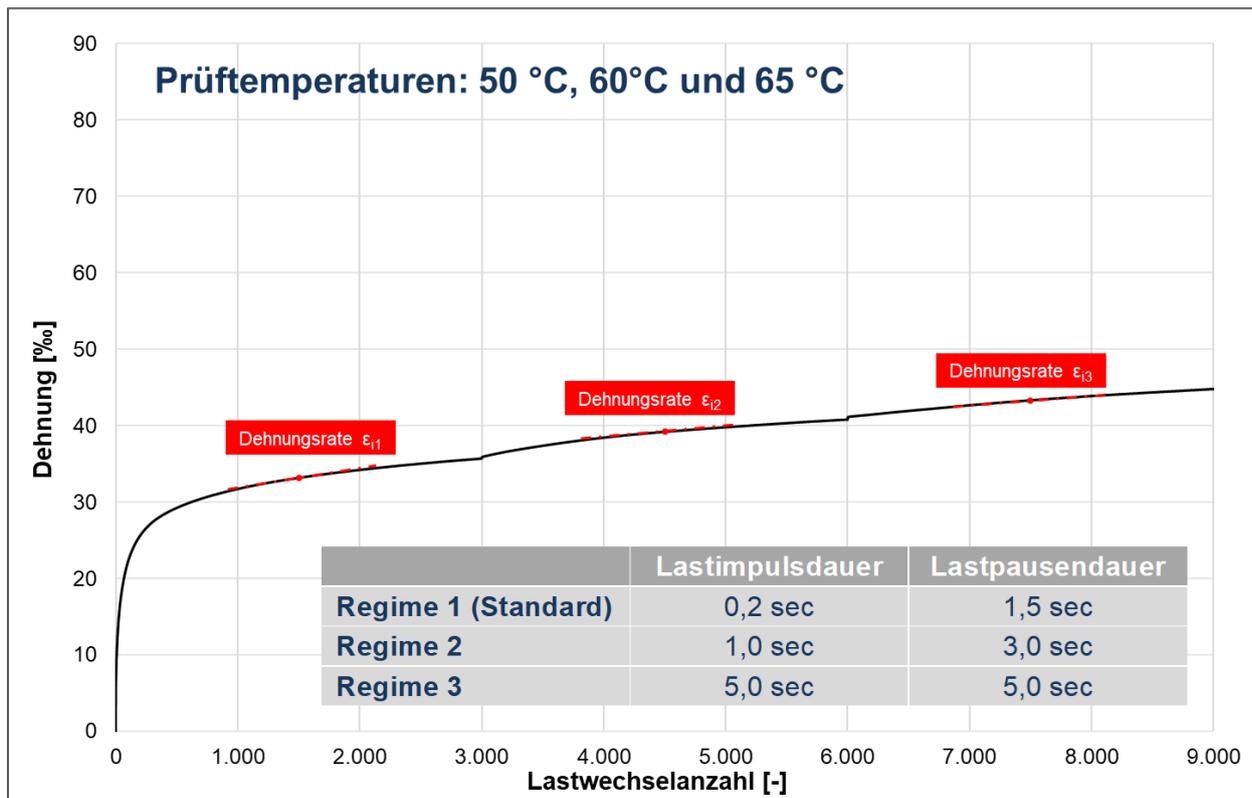


Bild 2-7: Prüfmethothenrandbedingungen und fiktives Prüfergebnis für die Bestimmung des Verformungswiderstandes von Asphalten bei höchsten Beanspruchungen

An vier ausgewählten Splittmastixasphalten, die in den Untersuchungen nach Arbeitsprogramm 3 einen hohen Verformungswiderstand zeigten, wurden diese erweiterten und orientierenden Untersuchungen durchgeführt. Aufgrund der drei Prüftemperaturen ergeben sich daraus zwölf zusätzliche Varianten, die gemäß TP Asphalt-StB Teil 25 B1 an Bohrkernen untersucht wurden (36 zusätzliche Probekörper).

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes festgelegten Randbedingungen für die Untersuchungen bei höchsten Beanspruchungen sind in Tab. 2-16 zusammengefasst. Ein Regime läuft dabei jeweils über 3.000 Lastzyklen, bevor das nächste Regime mit abgeänderter Lastimpuls- und Lastpausendauer startet.

50°C	60°C	65°C
3000 LW mit: Lastimpuls: 0.2 s und Lastpause 1.5 s, anschl. 3000 LW mit 1.0 s LI / 3.0 s LP, anschl. 3000 LW mit 5.0 s LI / 5.0 s LP	3000 LW mit: Lastimpuls: 0.2 s und Lastpause 1.5 s, anschl. 3000 LW mit 1.0 s LI / 3.0 s LP, anschl. 3000 LW mit 5.0 s LI / 5.0 s LP	3000 LW mit: Lastimpuls: 0.2 s und Lastpause 1.5 s, anschl. 3000 LW mit 1.0 s LI / 3.0 s LP, anschl. 3000 LW mit 5.0 s LI / 5.0 s LP

Tab. 2-16: Randbedingungen für die Untersuchungen bei höchsten Beanspruchungen

2.4 Statistische Auswertung

Für die Ergebnisse der dynamischen Stempel Eindringversuche gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1 bzw. A2] ist in den jeweiligen Prüfvorschriften keine Verfahrenspräzision angegeben. Die Messergebnisse wurden auf Plausibilität geprüft und die jeweiligen Standardabweichungen berechnet. Zudem wurde nach dem [M. stat. Ausw., Teil 1, 2000] der FGSV die kritische Spannweite berechnet und die Verträglichkeitsüberprüfung von Einzelmesswerten durchgeführt. Bei den Ergebnissen des Einaxialen Druck-Schwellversuches wurde die in der [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] angegebene kritische Spannweite und die Wiederholpräzision des Verfahrens berücksichtigt.

So festgestellte Ausreißer wurden eliminiert und ein weiterer Probekörper geprüft. Die in diesem Bericht angegebenen Ergebnisse basieren auf der Mittelung der Ergebnisse aus der nach der jeweiligen Technischen Prüfvorschrift erforderlichen Doppel- bzw. Dreifachbestimmung. Die Einzelmesswerte und deren Standardabweichung auf deren Basis eine Verfahrenspräzision abgeleitet wurde, sind dem Anhang zu entnehmen.

2.4.1 Box-Whisker-Plots

Mit Hilfe von Box-Whisker-Plots können verschiedene statistische Kenngrößen in einer Grafik visualisiert werden. Die untere Linie der Box ergibt sich aus dem 1. Quartil (25 %) und die obere Linie aus dem Dritten. Die Länge der Box entspricht somit den mittleren 50 % der Daten, dem Interquartilsabstand (IQR). Die Größe der Box ist somit auch ein Maß für die Streuung der Daten. Der Median wird als Linie oder Punkt innerhalb der Box dargestellt. Liegt er in der Mitte der Box, ist eine symmetrische Verteilung gegeben. Für die Whisker gibt es verschiedene Definitionen. Sie können die Minimal- und Maximalwerte der Daten darstellen oder ihre Länge ist auf den 1,5-fachen Interquartilsabstand begrenzt. [Weiß, 2007; Kuckartz et al., 2013]

In dieser Arbeit wird die letztgenannte Definition verwendet. Bei dieser Definition endet der Whisker beim letzten Datenwert, der innerhalb dieser Grenze liegt, so dass die Länge des oberen und unteren Whiskers unterschiedlich sein kann. Werte außerhalb des Whiskers werden als Ausreißer definiert. Ein Extremwert liegt vor, wenn die Abweichung vom Median mehr als 3 IQR beträgt. [Weiß, 2007; Kuckartz et al., 2013]

2.4.2 Prüfpräzision

Zur Festlegung einer Verfahrenspräzision für den Einaxialen Druck-Schwellversuch wird zunächst wie bisher die kritische Spannweite herangezogen. Diese zeigt, ob Messwerte mehr voneinander abweichen als im Rahmen der Verfahrenspräzision zu erwarten ist oder nicht. Es wird untersucht, ob die Messwerte „verträglich“ oder „nicht verträglich“ sind. Nach [M stat. Ausw., Teil 1, 2000] wird die kritische Spannweite als die größte akzeptable absolute Differenz zwischen den Einzelwerten einer Messreihe unter Berücksichtigung einer vordefinierten statistischen Sicherheit bezeichnet. Messwerte gelten als verträglich, wenn ihre Differenz innerhalb der kritischen Spannweite bleibt. Diese Spannweite wird durch das Produkt der entsprechenden Standardabweichung und des Faktors $W_p(n)$ bestimmt. [M stat. Ausw., Teil 1, 2000]

Für drei Einzelergebnisse wie Sie für den Einaxialen Druck-Schwellversuch nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] gefordert werden, ergibt sich für den Faktor $W_p(n)$, welcher abhängig von der Anzahl m der Einzelwerte ist und einer statistischen Sicherheit von 95% unterliegt, ein Wert von 3,31.

3 Auswertung der ZEB-Daten zur Auswahl der Praxisstrecken

Die seit Anfang der 1990er Jahre im Rahmen der ZEB ermittelten Zustandswerte können in acht Zustandsklassen unterteilt werden. Dabei beschreiben alle Werte zwischen 1,0 bis 3,5 einen sehr guten bis guten Straßenzustand, ab einem Wert von 3,5 wird der Warnwert überschritten und ab 4,5 der Schwellenwert (siehe Tab. 3-1). Bei einer Überschreitung des Warnwertes muss der entsprechende Abschnitt intensiv beobachtet werden und gegebenenfalls eine Planung geeigneter Maßnahmen erfolgen. Wird sogar der Schwellenwert überschritten, müssen bauliche und verkehrsbeschränkende Maßnahme geprüft werden.

ZK	ZW \geq	ZW $<$	Farbe
1	1,0	1,5	Blau
2	1,5	2,0	Dunkelgrün
3	2,0	2,5	
4	2,5	3,0	Hellgrün
5	3,0	3,5	
6	3,5	4,0	Gelb
7	4,0	4,5	
8	4,5		Rot

Tab. 3-1: Zustandsklassen nach der [ZTV ZEB-StB, 2006]

Über den IT-ZEB Server, auf welchem die aufbereiteten ZEB-Daten zur Verfügung gestellt wurden, konnten sowohl die Ergebnistabellen als auch die Online-Visualisierung herangezogen werden. Durch die Kombination aus den Bildansichten, Profilsichten und Ergebnistabellen lassen sich viele Erkenntnisse aus den ZEB-Daten ableiten. Der Aufbau der Navigation durch die Online-Visualisierung ist in Bild 3-1 abgebildet.

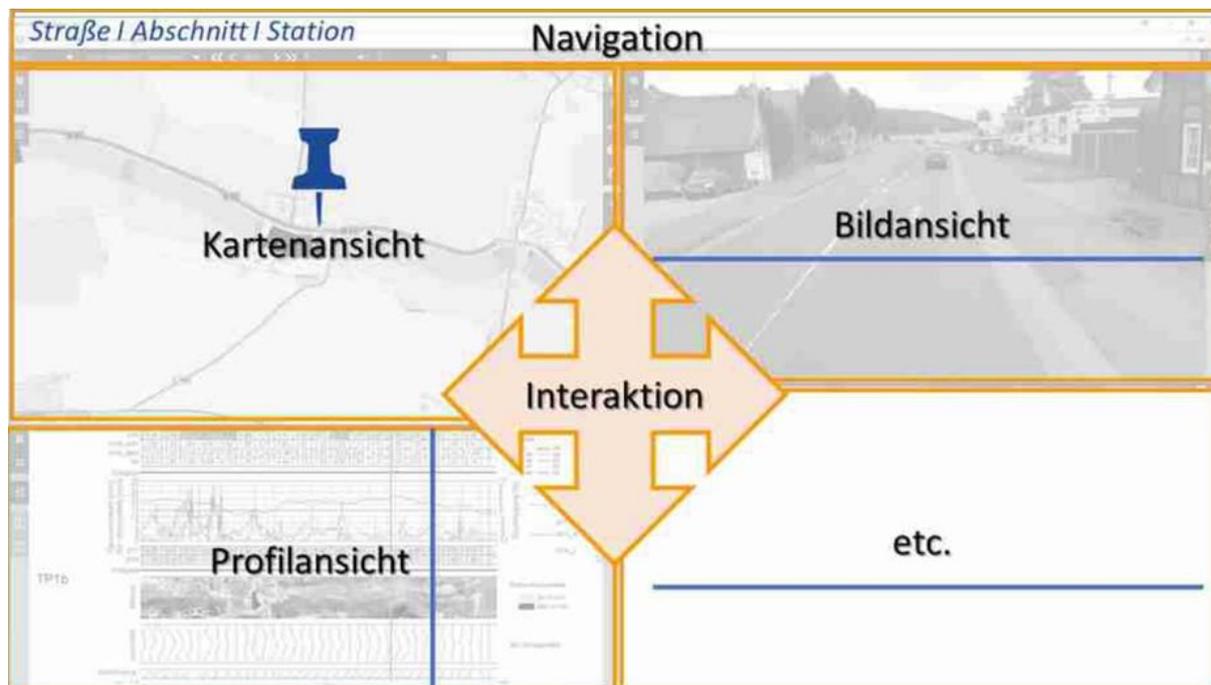


Bild 3-1: Interaktion der Visualisierungen [HELLER Ingenieurgesellschaft mbH, 2018]

3.1 Ergebnisse der ZEB-Auswertung

Die ausgewählten Strecken der ZEB-Daten wurden mit Daten der SKM-Datenbank abgeglichen und anschließend die gewonnenen Informationen in tabellarischer Form wie in Tab. 3-2 zusammengefasst. Hinweise zu den einzelnen Abkürzungen der Datenbanken und der tabellarischen Auswertung sind Tab. 3-3 zu entnehmen. Zusätzlich wurden die passenden Oberflächenbilder und Zustandswerte der einzelnen Abschnitte abgespeichert. Ein Beispiel für mögliche Zustandsprofile und das dazugehörige Bild der Frontkamera eines Messfahrzeuges sind in Bild 3-2 dargestellt.

Bundesland	Klasse	Nummer	vNK_A	nNK_A	VST_A	vNK_E
XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
nNK_E	BST_E	von_BKM	bis_BKM	Fahrtrichtung	Asphaltmischgut	Datum der Prüfung
XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XX.XX.XX

Tab. 3-2: Aufbau der tabellarischen Auswertung

Feldname	Erläuterung
Nummer	Straßennummer
vNK_i	Von Netzknoten (A – Anfang, E - Ende)
nNK_i	Nach Netzknoten (A – Anfang, E - Ende)
VST_A	Von Station Anfang [m]
BST_E	Bis Station Ende [m]
von_BKM	Von Baukilometer
bis_BKM	Bis Baukilometer
Fahrtrichtung	Von Ort A nach Ort B, AS - Anschlussstelle
Prüfung-Datum	Datum der Abnahmeprüfung

Tab. 3-3: Hinweise zu den Abkürzungen der Datenbanken



Bild 3-2: Beispielhafte Zustandsprofile und Bild der Frontkamera eines Messfahrzeuges

Insgesamt konnten auf diese Weise 27 Strecken durch die Übereinstimmung aus den ZEB-Daten und der vorliegenden SKM-Datenbank ermittelt werden (Tab. 3-4). Die Strecken decken einige Mischgutsorten ab und spiegeln sowohl gute als auch schlechte Zustandswerte hinsichtlich der Spurrinnentiefe wider.

Bundesland	Straßentyp	Nummer	ZEB-Klasse - ZWSPT	Aufbau	Prüfdatum
Hessen	Bundesstraße	278	1-2	AC 8 DS	30.10.2013
Rheinland-Pfalz	Bundesstraße	262	2	AC 8 DS	15.11.2011
Baden-Württemberg	Bundesstraße	313	2	AC 8 DS	22.04.2013
Baden-Württemberg	Bundesstraße	313	2	AC 8 DS	22.04.2013
Baden-Württemberg	Bundesstraße	28	2	AC 11 DS	16.10.2013
Baden-Württemberg	Bundesstraße	465	2	AC 11 DS	17.10.2013
Baden-Württemberg	Bundesstraße	27	2	AC 11 DS	23.06.2014
Baden-Württemberg	Bundesstraße	312	2	AC 11 DS	23.04.2013
Baden-Württemberg	Bundesstraße	465	1	AC 11 DS	23.04.2013
Rheinland-Pfalz	Bundesstraße	256	3	AC 11 DS	04.11.2013
Rheinland-Pfalz	Bundesstraße	256	2	AC 11 DS	17.05.2013
Nordrhein-Westfalen	Bundesstraße	288	2-3	MA 11 S	20.09.2006
Nordrhein-Westfalen	Autobahn	44	1	MA 11 S	11.02.2008
Nordrhein-Westfalen	Autobahn	42	4-5	MA 11 S	26.04.2008
Nordrhein-Westfalen	Autobahn	42	1-3	MA 11 S	26.04.2008
Nordrhein-Westfalen	Autobahn	3	2	MA 11 S	30.03.2008
Hessen	Bundesstraße	62	2	SMA 8 S	12.04.2012
Rheinland-Pfalz	Bundesstraße	51	1-3	SMA 8 S	27.10.2010
Hessen	Bundesstraße	3	1	SMA 8 S	10.10.2013
Hessen	Bundesstraße	457	2	SMA 8 S	20.02.2014
Hessen	Bundesstraße	255	2	SMA 8 S	21.06.2013
Hessen	Bundesstraße	429	2	SMA 8 S	28.06.2013
Rheinland-Pfalz	Bundesstraße	50	2	SMA 11 S	16.06.2011
Hessen	Bundesstraße	27	3-4	SMA 11 S	20.03.2012
Hessen	Bundesstraße	62	1-2	SMA 11 S	31.03.2012
Hessen	Bundesstraße	249	1-2	SMA 11 S	18.06.2012
Rheinland-Pfalz	Bundesstraße	51	2	SMA 11 S	12.11.2013

Tab. 3-4: Streckenabschnitte mit Übereinstimmungen aus ZEB-Daten und SKM-Datenbank

3.2 Auswahl der Praxisstrecken

Wie bereits in Kapitel 2.2.3 beschrieben, erwies es sich als schwierig, eine Freigabe zur Entnahme von Bohrkernen aus den ausgewählten Praxisstrecken zu bekommen. Überwiegend war die Begründung, dass keine Löcher und somit Schäden in eine noch gut funktionierende Strecke gebohrt werden sollen. Die hohe Anzahl an erforderlichen Bohrkernen bekräftigten diese Aussagen. Somit konnte die Spurrinnentiefe nicht mehr das maßgebende Kriterium bei der Suche nach geeigneten Strecken darstellen und die in Tab. 3-4 ermittelten Strecken konnten **nicht** zur Bohrkernentnahme herangezogen werden. Daraufhin wurden Strecken angefragt, auf denen zeitnah eine Baumaßnahme (Deckensanierung) durchgeführt werden konnte. Dort war es um ein Vielfaches einfacher eine Freigabe zur Bohrkernentnahme zu bekommen, da auch die Anzahl der Bohrkernkerne keine Rolle spielte.

Tab. 3-5 zeigt die zehn Praxisstrecken, die im Rahmen dieses Projektes beprobt wurden.

Bundesland	Straßentyp	Nummer/Straße	Verortung	Baujahr
Berlin	Autobahn	10	km 77,39-81,95	k.A.
Rheinland-Pfalz	Bundesstraße	51	VNK 5704041 NNK 5704047	2016
Nordrhein-Westfalen	Bundesstraße	57	-	k.A.
Nordrhein-Westfalen	Bundesstraße	54	Abs. 150,1	k.A.
Nordrhein-Westfalen	Bundesstraße	54	Abs. 158,0	k.A.
Nordrhein-Westfalen	-	Hüllerstraße	-	k.A.
Rheinland-Pfalz	Bundesstraße	50	km 0,950 -1,010	k.A.
Nordrhein-Westfalen	-	Hahnerbergerstr. -	-	2018
Nordrhein-Westfalen	Bundesstraße	226	Station 0+400 (links)	k.A.
Nordrhein-Westfalen	Landesstraße	459	zw. 3+342 bis 4+725	k.A.

Tab. 3-5: Festgelegte Praxisstrecken

4 Ergebnisse und Auswertung der Verformungsuntersuchungen

4.1 Ergebnisse und Auswertung der im Labor hergestellten Asphaltmischgutvarianten

Die in der Methodik (Kapitel 2.2) vorgestellten Asphaltmischgutkonzepte wurden hinsichtlich des Verformungswiderstandes anhand von Einaxialen Druck-Schwellversuchen an Bohrkernen sowie MPK's, Dynamischen Stempelindringversuchen mit und ohne Stützring, sowie Dynamischen Stempelindringversuchen an Gussasphalten untersucht. Eine detaillierte Darstellung der an den verschiedenen Varianten durchgeführten Prüfungen ist in Tab. 2-12 bis Tab. 2-14 dargestellt. Eine Gesamtübersicht der Einzelmessergebnisse ist dem Anhang zu entnehmen (Tab. A-1 und Tab. A-2).

Aus den Asphaltmischgutkonzepten wurden Asphaltplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät entsprechend [TP Asphalt-StB, Teil 33] hergestellt. Zur Herstellung der Asphaltplatten wurden die durch die Erstprüfungen ermittelten Rohdichten des Asphaltes und der Hohlraumgehalt herangezogen. Anschließend wurden die für die unterschiedlichen Prüfungen benötigten Prüfkörper aus den Platten herausgebohrt und auf die nach den Technischen Prüfvorschriften vorgeschriebenen Höhen planparallel gesägt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Einaxialen Druck-Schwellversuche sind als Impulskriechkurven in Bild 4-1 bis Bild 4-7 dargestellt. Die Ergebnisse basieren auf der Mittelung der Ergebnisse aus der nach der Technischen Prüfvorschrift [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1] erforderlichen Dreifachbestimmung. Angaben zum verwendeten Bindemittel, der Gesteinsart und Sieblinie sind in Tab. 2-2 zusammengefasst. Bild 4-1 bis Bild 4-4 zeigen die Ergebnisse der im Labor hergestellten Asphaltbetonvarianten.

In den folgenden Abbildungen stellen die durchgezogenen Linien die Impulskriechkurven der Bohrkern aus Asphaltplatten und die gestrichelten Linien die Impulskriechkurven der Marshall-Probekörper dar.

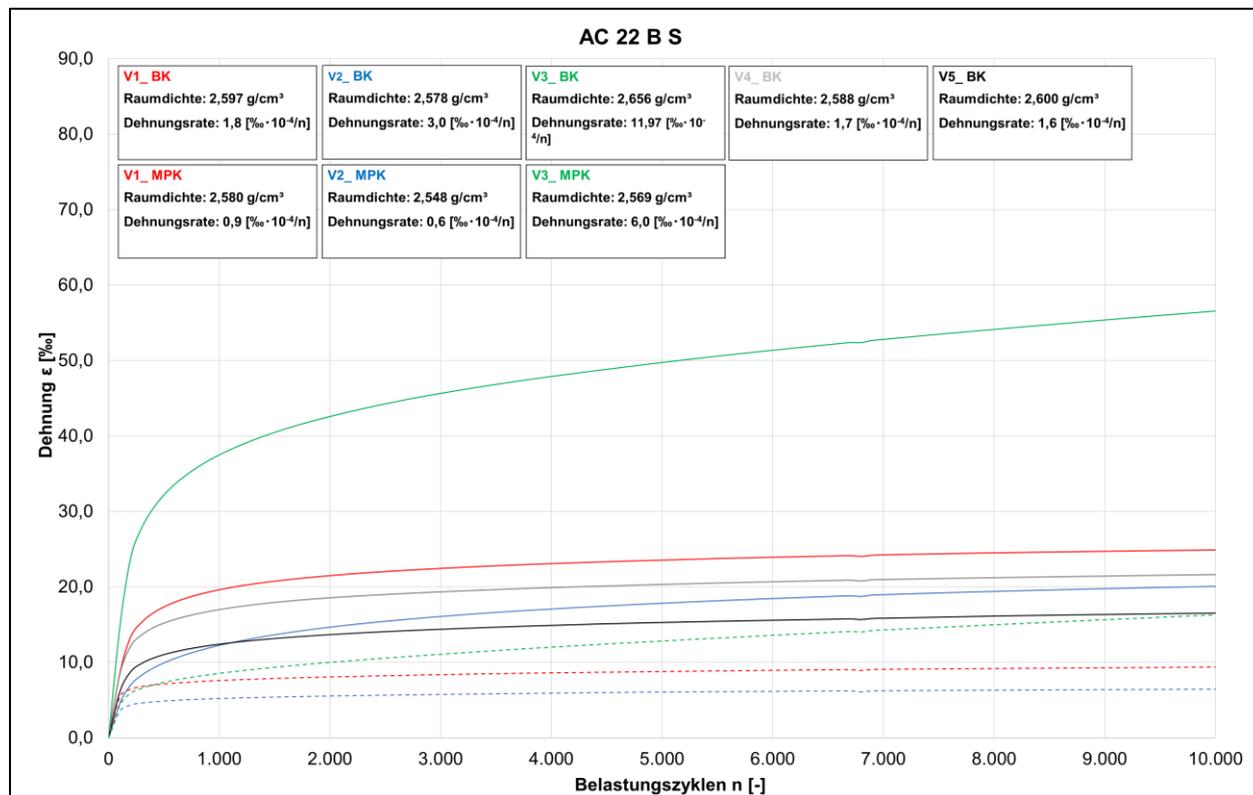


Bild 4-1: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten AC 22 B S

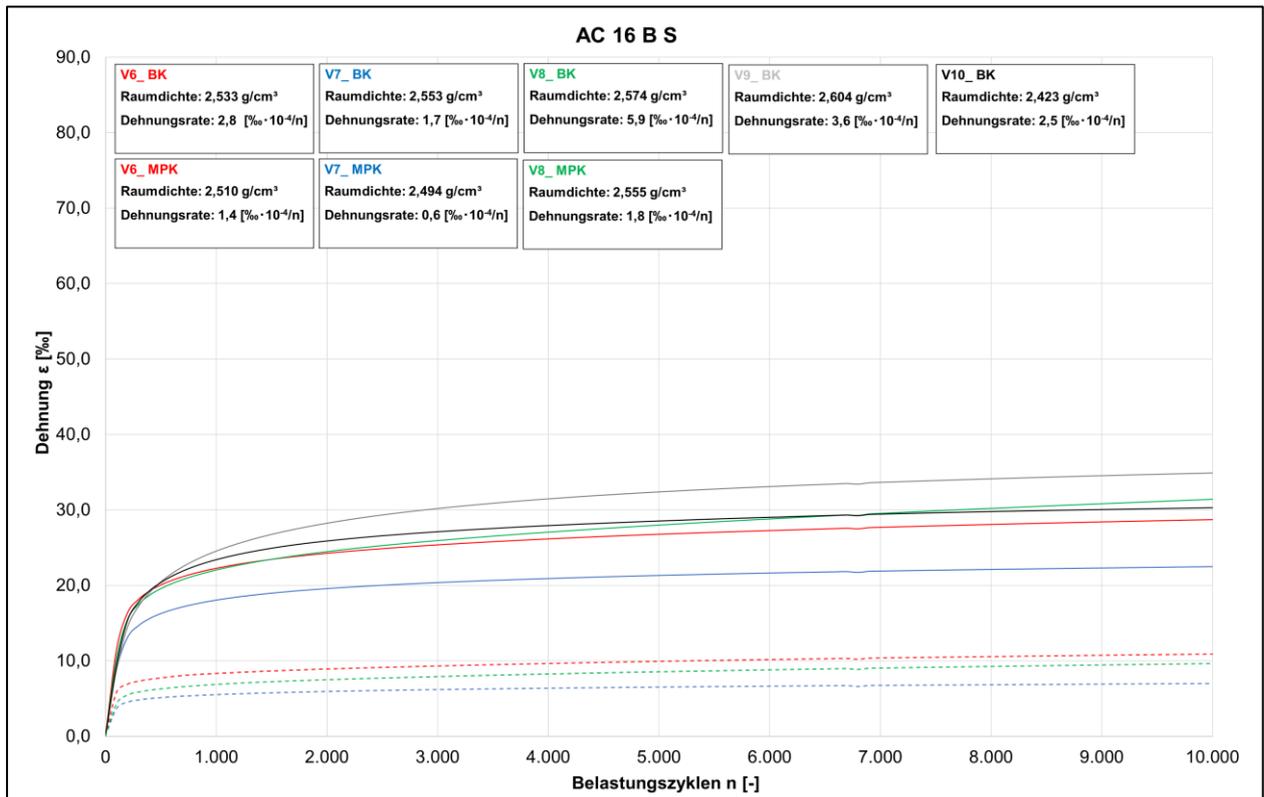


Bild 4-2: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten AC 16 B S

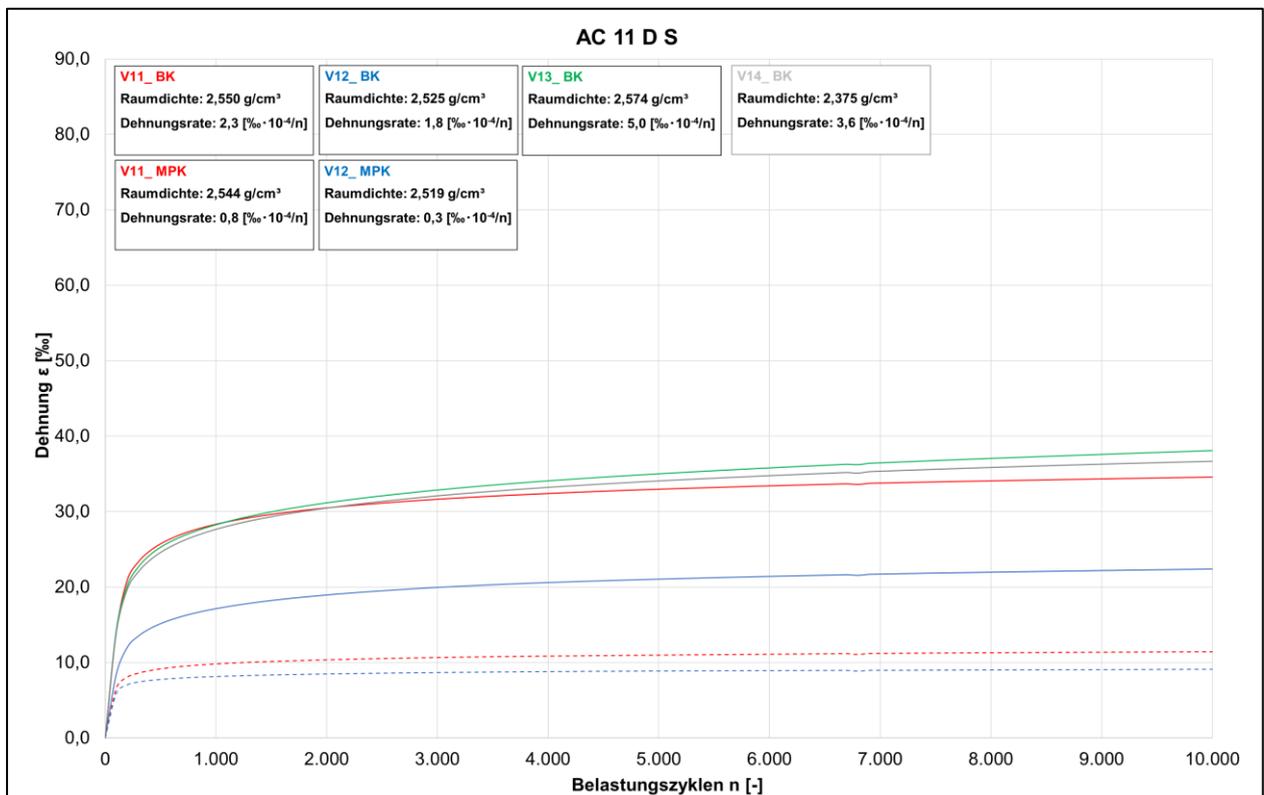


Bild 4-3: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten AC 11 D S

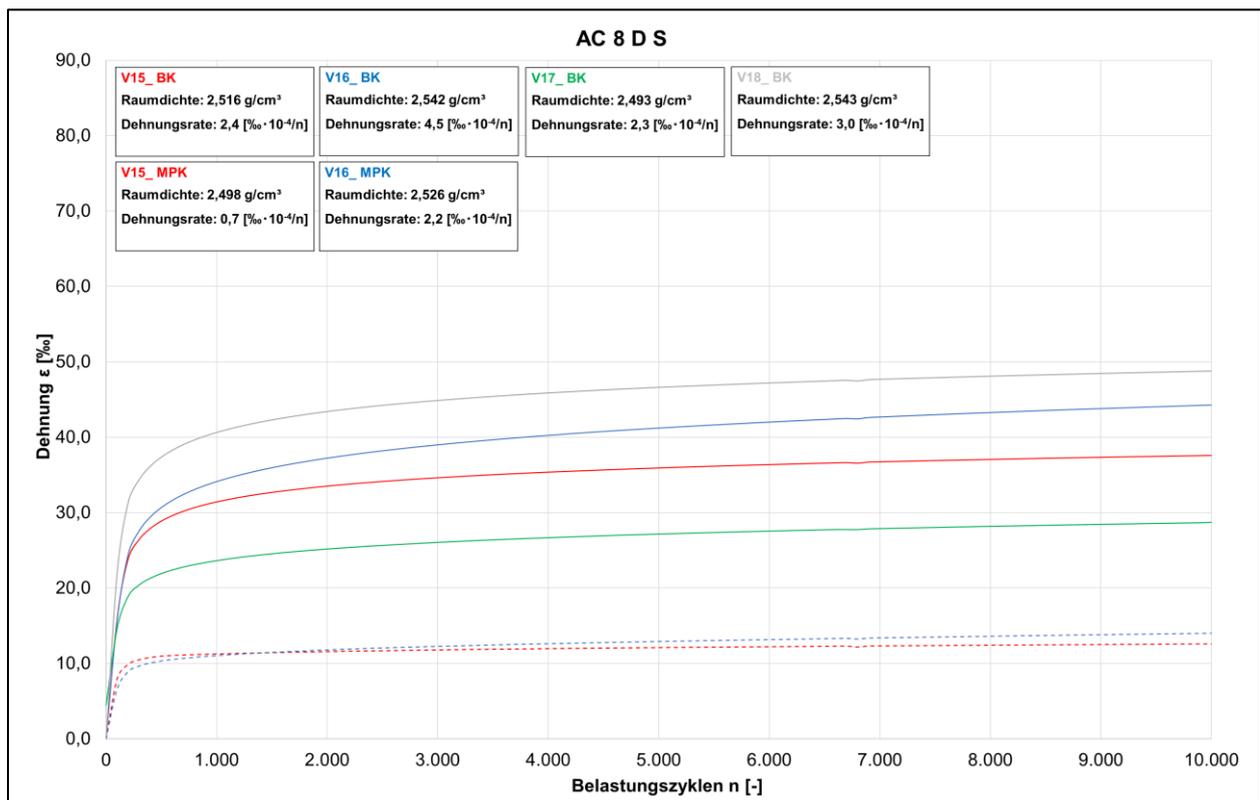


Bild 4-4: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten AC 8 D S

Bild 4-1 zeigt die Impulskriechkurven der Asphaltbinderschichtvarianten mit einem Größtkorn von 22 mm. Es wird deutlich, dass die Dehnungsraten nach 10.000 Belastungszyklen auf einem niedrigen Niveau liegen. Nur Variante 3, welche mit einem Straßenbaubitumen hergestellt wurde, weist im Vergleich erhöhte Dehnungswerte auf.

Wie in Bild 4-2 zu erkennen ist, liegen die Dehnungen der Asphaltbinderschichtvarianten (AC 16 B S) nach 10.000 Belastungszyklen für die Varianten aus den WSV-Platten (V6_BK bis V10_BK) auf einem vergleichbaren Niveau. Die höchsten Dehnungswerte und Dehnungsrate weist Variante 10 auf. Dies ist die einzige Variante, die mit Gesteinsart G3 (Moräne) hergestellt wurde. Die Dehnungen der MPK-Varianten liegen deutlich unter denen der Prüfkörper aus WSV-Platten. Für alle Varianten ist ein starker Anstieg der Dehnungen zu Versuchsbeginn festzustellen.

Bei den Varianten der Asphaltdeckschicht (AC 11 D S) liegen die Dehnung der Varianten V11, V13 und V14 auf einem ähnlichen Niveau bei 38 ‰. Die Variante V12 weist einen erkennbaren besseren Verformungswiderstand auf. Dies ist die Variante, die mit einem anderen, härteren Bindemittel (10/40-65 A) hergestellt wurde. Das bei den Probekörpern aus WSV-Platten unterschiedliche Niveau spiegelt sich auch in den Ergebnissen der MPK wider. Auch hier weist die Variante mit dem härteren Bindemittel (V12_MPK) eine geringere Dehnung auf.

Wie anhand der in Bild 4-4 dargestellten Resultate zu erkennen ist, weisen die Asphaltdeckschichtvarianten der Asphaltmischgutart AC 8 D S zum Teil etwas höhere Dehnungen auf als die Varianten des AC 11 D S. Die Dehnungen liegen in einem Bereich von 28 ‰ und 48 ‰. Zu erkennen ist, dass die Variante, die sich an der oberen Sieblinie orientiert (V17) mit der geringsten Raumdichte den höchsten Verformungswiderstand aufweist, während die Variante der unteren Sieblinie (V16) deutlich schlechtere Verformungswerte aufzeigt. Wie zu erwarten, liegt die Variante V15 (mittlere Sieblinie) genau dazwischen. Die mit einem Straßenbaubitumen hergestellte Variante V16 weist die höchste, zwischen Belastungszyklus 9.800 und 10.000, ermittelte Dehnungsrate auf.

Die folgenden Abbildungen (Bild 4-5 bis Bild 4-7) zeigen die ermittelten Impulskriechkurven der im Labor hergestellten Splittmastixvarianten.

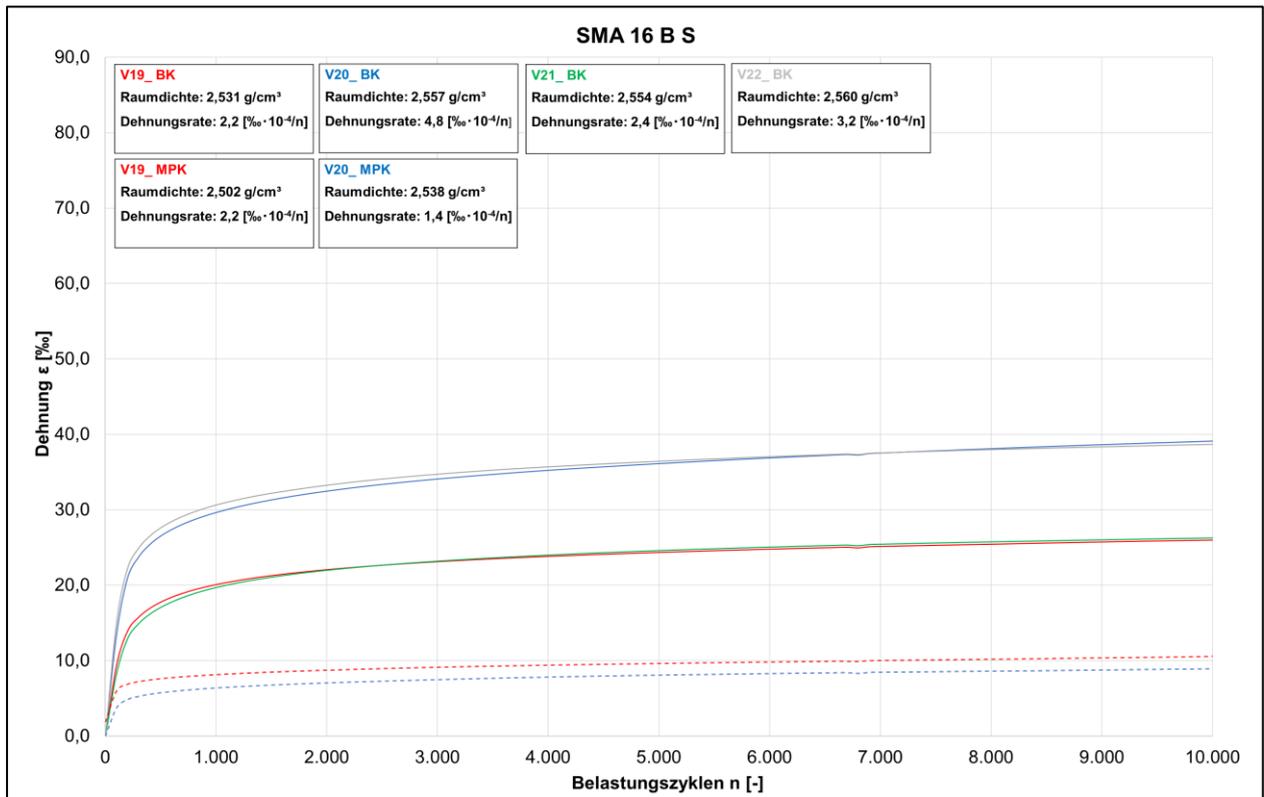


Bild 4-5: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten SMA 16 B S

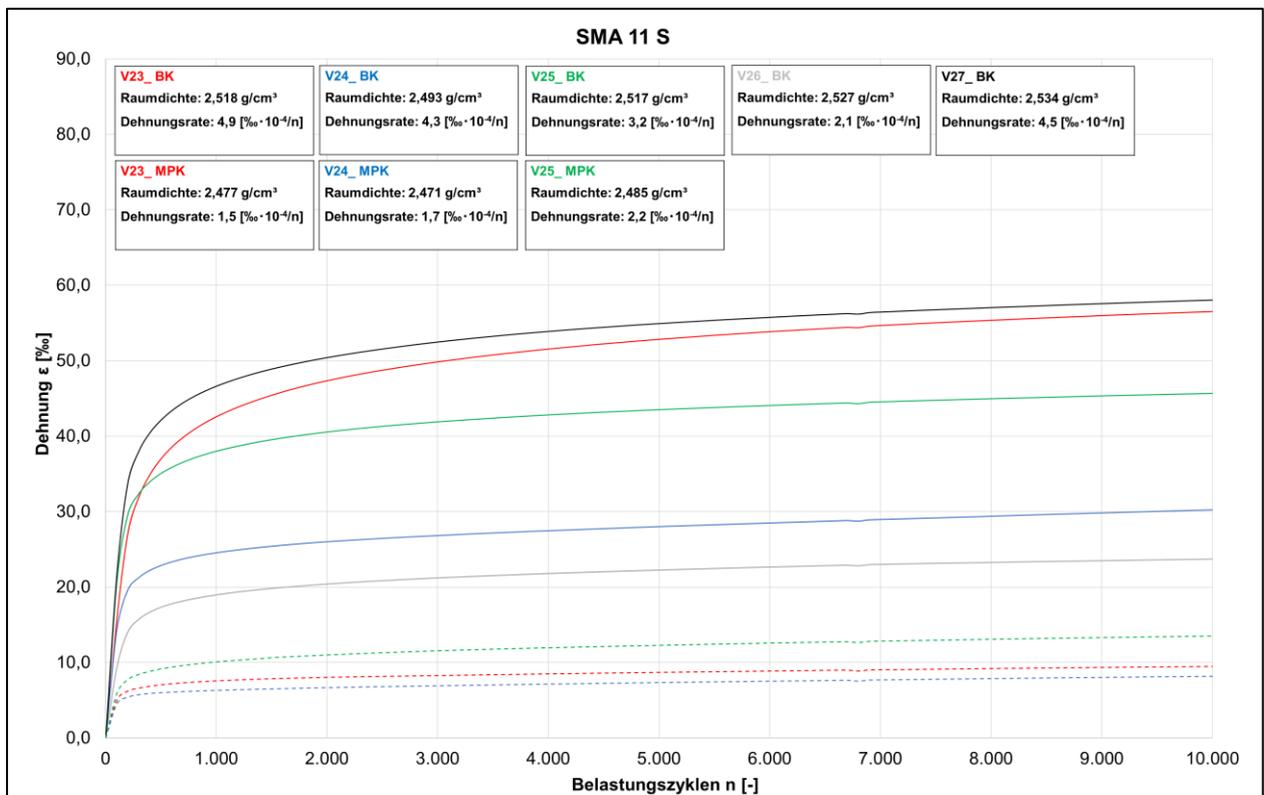


Bild 4-6: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten SMA 11 S

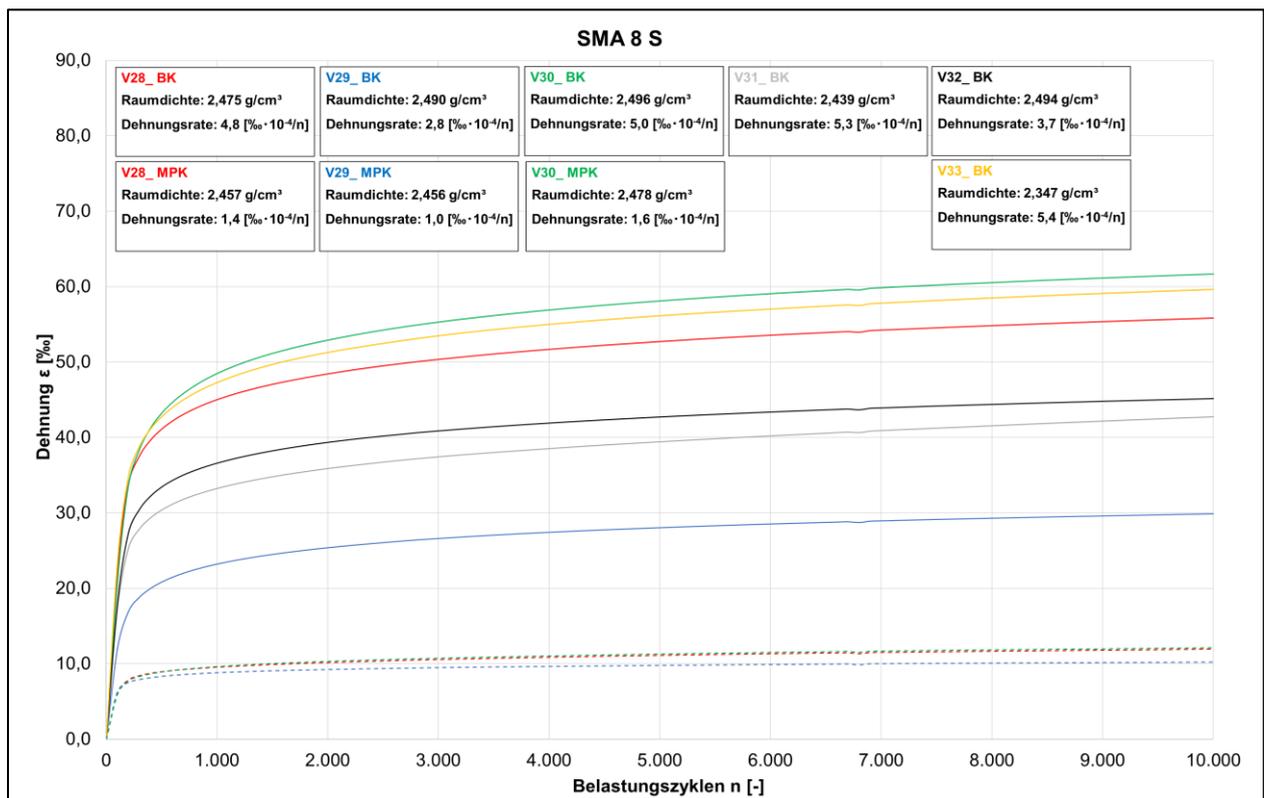


Bild 4-7: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten SMA 8 S

Die Impulskriechkurven der Binderschichtvarianten aus Splittmastixasphalt V19 und V21 (Bild 4-5) liegen auf einem fast identischen Niveau. Gleiches ist auch für die Varianten V20 und V22 zu erkennen, die allerdings schlechtere Verformungswerte aufweisen. Alle Varianten wurden mit der gleichen Gesteinskörnung und Sieblinie hergestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass die Unterschiede in den Ergebnissen auf die verschiedenen Bindemittelsorten zurückzuführen sind. Die Ergebnisse der MPK bestätigen die Tendenz der aus WSV-Platten hergestellten Bohrkerns allerdings nicht. Hier weist Variante V19 etwas schlechtere Dehnungswerte und eine höhere Dehnungsrate auf.

Eine größere Spanne ist in den Ergebnissen der Prüfkörper aus WSV-Platten für die Mischgutart SMA 11 S zu erkennen. Dort liegen die Dehnungen zwischen 23 ‰ und 68 ‰. Den größten Verformungswiderstand weist Variante V26 auf, die sich an der unteren Sieblinie orientiert. Es ist also ein gegenteiliger Trend als bei den Varianten V16 und V17 zu erkennen, bei denen die Variante, die entsprechend der oberen Sieblinie hergestellt wurde, einen besseren Verformungswiderstand aufwies. Auch die Variante V24 weist geringere Dehnungen auf. Die Dehnungsrate zu Ende der Belastung liegt aber auf gleichem Niveau wie die der Variante V23, die über die gesamte Belastungsdauer deutlich höhere Dehnungen aufweist. Der Unterschied ist im Wesentlichen durch die Dehnungen zu Beginn der Belastung verursacht. Die Variante mit dem weicheren Bindemittel (V24) weist dort deutlich geringere Dehnungswerte auf.

Ähnliche Aussagen können auch für die Ergebnisse der SMA 8 S-Varianten getroffen werden (Bild 4-7). Variante V29 weist den größten Verformungswiderstand auf. Dies ist die einzige Variante, die mit einem anderen, weicheren Bindemittel hergestellt wurde. Die Dehnungsrate liegt hier ebenfalls auf einem niedrigeren Niveau. Die schlechtesten Verformungswerte weist ebenfalls die Variante auf, die sich an der oberen Sieblinie orientiert (V30). Die Ergebnisse der MPK liegen auf einem vergleichbaren Niveau.

Zusammenfassend sind die minimalen und maximalen Dehnungsraten der jeweiligen Asphaltmischgutart in Bild 4-8 dargestellt. In blau sind die Dehnungsraten der Marshall-Probekörper gekennzeichnet. Schwarz zeigt die Dehnungsraten der aus WSV-Platten hergestellten Prüfkörper. Bild 4-9 zeigt einen Überblick der Dehnungsraten der einzelnen Varianten unter Angabe des Faktors (Quotient) zwischen Probekörpern aus WSV-Platten und Marshall-Probekörpern (grau).

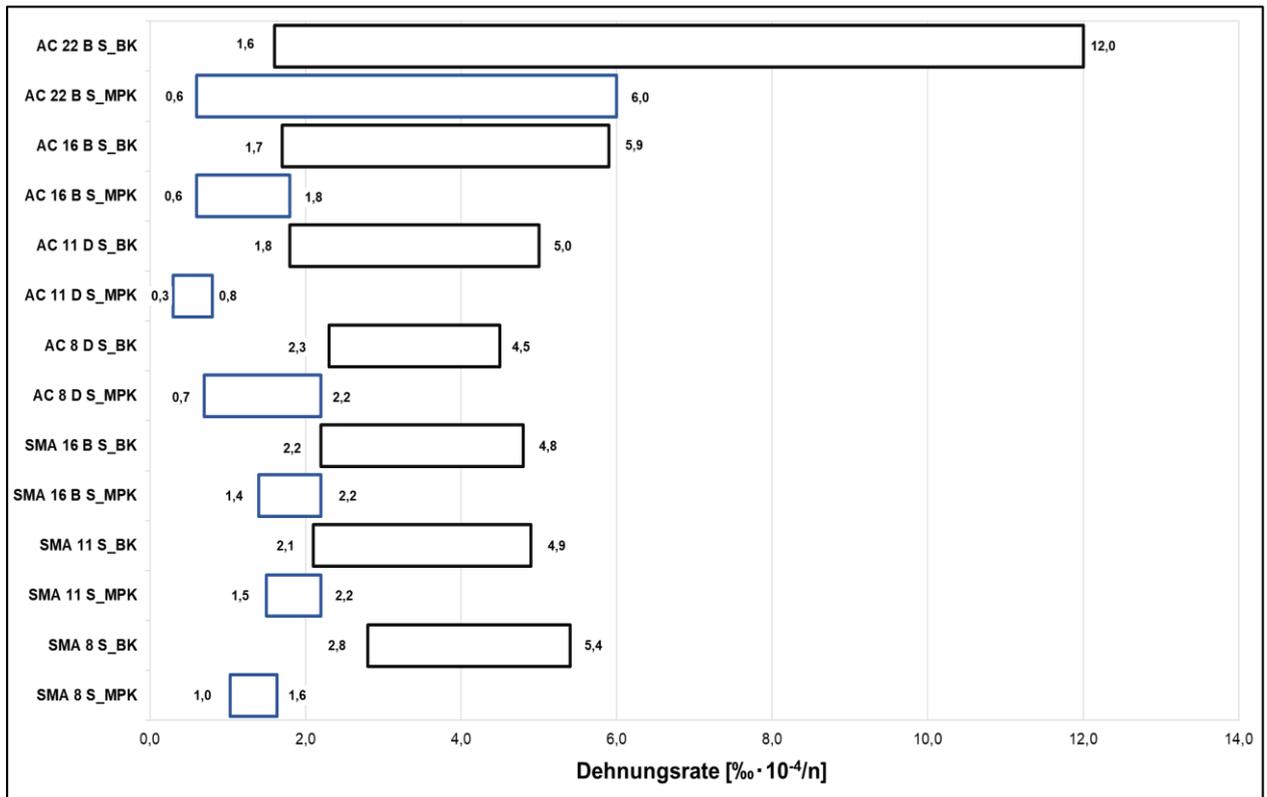


Bild 4-8: Minimale und Maximale mittlere Dehnungsraten Einaxialer Druck-Schwellversuch – Laborvarianten

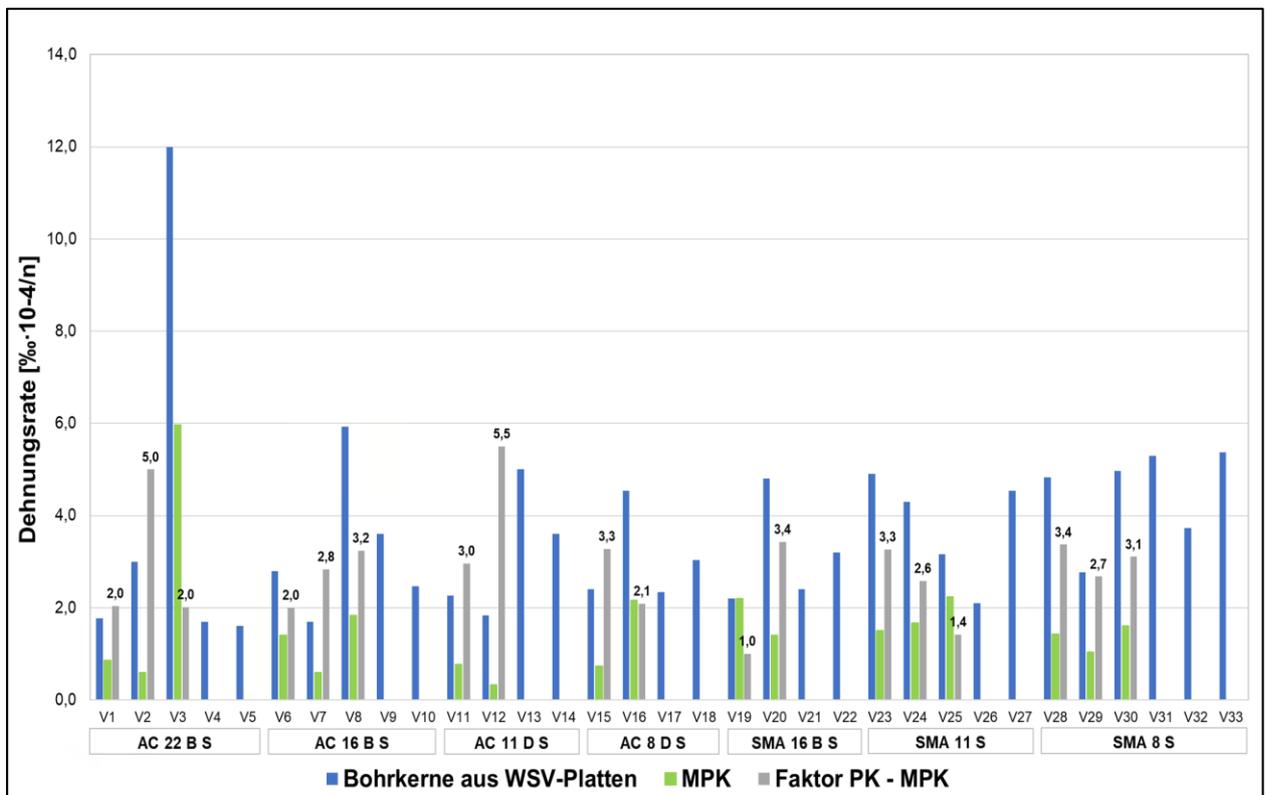


Bild 4-9: Dehnungsraten der im Labor hergestellten Probekörper

Die Spannweite der Mittelwerte gegenüber der nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1] festgelegten kritischen Spannweite sind im Diagramm in Bild 4-10 grafisch dargestellt. Lediglich der Mittelwert der Varianten AC 22 B S (V1 bis V5) zeigt eine Spannweite oberhalb der kritischen Spannweite und damit nach der Verfahrensgenauigkeit der [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1] für Einzelmesswerte eine zu große Abweichung. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen der einzelnen Varianten ist dies jedoch bei einer Mittelwertbetrachtung eine zu erwartende Abweichung und kann nicht zweifelsfrei, als Messfehler interpretiert werden.

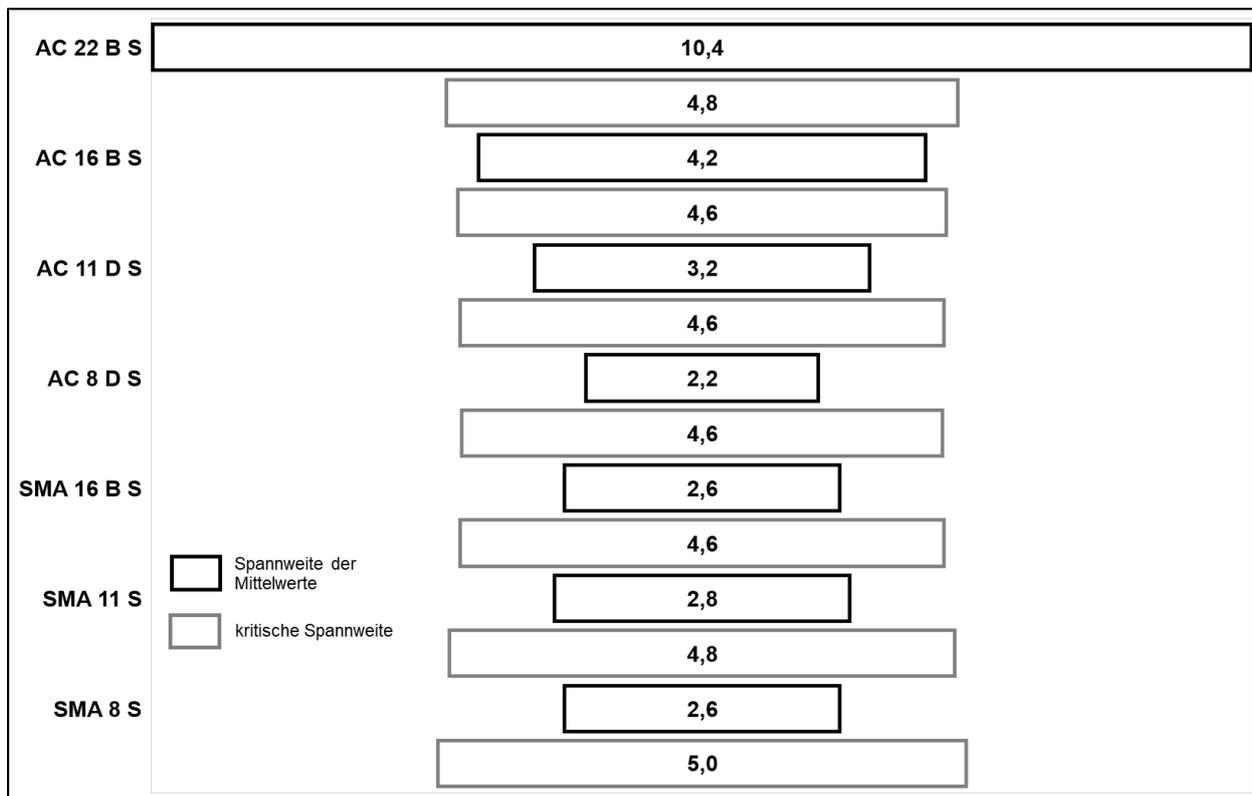


Bild 4-10: Spannweite der Mittelwerte gegenüber der kritischen Spannweite - Laborvarianten

Um fundierte Aussagen für einen Bewertungshintergrund treffen zu können, werden die Daten statistisch betrachtet und ausgewertet. Die statistische Bewertung der DSV-Ergebnisse erfolgt anhand von Box-Whisker-Plots hinsichtlich des Wertes für die Dehnungsrate. Die Boxplots für die Dehnungsraten der aus WSV-Platten hergestellten Bohrkerne sind nachfolgend in Bild 4-11 dargestellt. Zwei Varianten weisen vergleichsweise erhöhte Dehnungsraten auf. Bei diesen Varianten (V3+V8) wurde ein Straßenbaubitumen (30/45) verwendet, was die Erwartung eines höheren Wertes für die Dehnungsrate zulässt. Aufgrund der geringen Datenbasis, Erfahrungen aus der Praxis und des Fehlens weiterer Varianten mit Straßenbaubitumen wird davon ausgegangen, dass es sich um keinen Ausreißer handelt, auch wenn dies durch die statistische Auswertung deklariert wurde. Aus diesem Grund werden die Werte in der weiteren Auswertung belassen. Die Einzeldarstellung der Boxplots und detaillierten Tabellen für jede Asphaltmischgutsorte sind im Anhang B (Bild B-1 bis Bild B-4 und Tab. B-1) dargestellt.

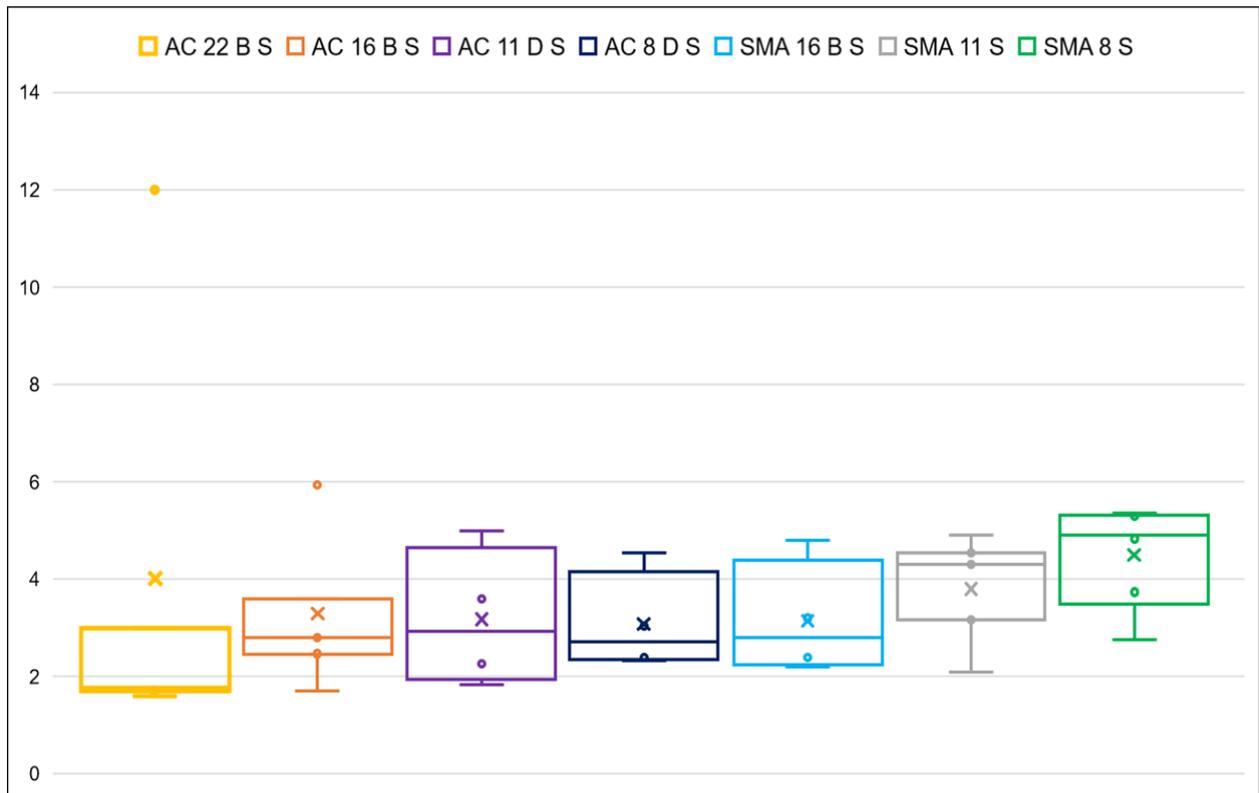


Bild 4-11: Box-Plots über die Dehnungsraten der Bohrkern- Laborvarianten

Die Werte für die Dehnungsrate der Marshall-Probekörper weisen keine Ausreißer auf. Hier liegt allerdings auch ein sehr geringer Stichprobenumfang zugrunde. Die Betrachtung der Dehnungsraten der MPK zielt im Rahmen dieses Forschungsprojektes darauf ab, eventuelle Korrelation zwischen den Dehnungsraten von Bohrkernen und Marshall-Probekörpern zu detektieren. Eine Verfahrenspräzision für die Durchführung von Einaxialen Druck-Schwellversuchen am MPK liegt bereits vor. Eine tabellarische Übersicht der wichtigsten statistischen Kennwerte findet sich in Anhang B in Tab. B-2.

Tab. 4-1 zeigt die Korrelationsmatrix der Ergebnisse der Laborvarianten. Dazu wurden auch die mittels DSR ermittelten rheologischen Parameter Phasenwinkel (PW) und komplexer Schermodul (G^*) verglichen. Betrachtet werden die Werte bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz und 0,01 Hz und einer Prüftemperatur von 50°C. Die niedrigen Frequenzen sollen die Einwirkungen des Schwerverkehrs simulieren, die Temperatur entspricht der des Einaxialen Druckschwellversuchs. Eine Zusammenfassung in Tabellenform ist in Tab. 4-2 zu finden. Die angegebenen Werte werden immer mit dem Korrelationskoeffizienten R^2 angegeben. Zwischen den Dehnungsraten an BK und MPK kann ein starker linearer Zusammenhang ($R^2=0,9$) festgestellt werden. Die Korrelation zwischen den Dehnungen ist geringer, aber es ist immer noch ein mittlerer linearer Zusammenhang erkennbar.

angegeben in R^2	Dehnung BK	Dehnungsrate BK	Dehnung MPK	Dehnungsrate MPK	PW 50 °C f = 1,59 Hz	G* (50 °C) f = 1,59 Hz	PW 50 °C f = 0,01 Hz	G* (50 °C) f = 0,01 Hz
Dehnung BK	1,0	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4
Dehnungsrate BK	0,4	1,0	0,3	0,8	0,3	0,03	0,3	0,1
Dehnung MPK	0,4	0,3	1,0	0,5	0,4	0,2	0,3	0,3
Dehnungsrate MPK	0,3	0,8	0,5	1,0	0,2	0,02	0,3	0,1
Phasenwinkel 50 °C f = 1,59 Hz	0,3	0,3	0,4	0,2	1,0	0,4	0,8	0,6
G* (50 °C) f = 1,59 Hz	0,3	0,03	0,2	0,02	0,4	1,0	0,1	0,9
Phasenwinkel 50 °C f = 0,01 Hz	0,2	0,3	0,3	0,3	0,8	0,1	1,0	0,2
G* (50 °C) f = 0,01 Hz	0,4	0,1	0,3	0,09	0,6	0,9	0,2	1,0

Tab. 4-1: Korrelationsmatrix der Verformungskennwerte der Laborvarianten und Bindemittleigenschaften

Bindemittel	1,59 Hz		0,01 Hz	
	Phasenwinkel (50 °C)	G* (50 °C)	Phasenwinkel (50 °C)	G* (50 °C)
[-]	[°]	[Pa]	[°]	[Pa]
30/45	79,8	38.258	87,9	322
50/70	77,9	15.848	85,7	147
10/40-65 A	62,7	73.337	71,4	1.896
25/55-55 A	73,0	19.902	75,9	302
45/80-65 A	60,2	27.661	61,5	733
PmB 10/25 VL	72,1	100.527	72,035	1.910
PmB 25/45 VL	64,7	49.407	65,1	1.413

Tab. 4-2: Phasenwinkel und komplexer Schermodul der verwendeten Bindemittel

Des Weiteren wurden die Dehnungsraten unter Berücksichtigung verschiedener Bindemittelsorten analysiert, um mögliche signifikante Unterschiede zu identifizieren. Die minimalen und maximalen Dehnungsraten, gegliedert nach Bindemittelsorte, sind in Bild 4-12 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Varianten mit Straßenbaubitumen tendenziell höhere Dehnungsraten aufweisen. Jedoch basiert diese Feststellung auf einer sehr geringen Datenbasis, wodurch sie als nicht ausreichend validiert angesehen werden sollte. Teilweise wurde lediglich eine Variante mit einem spezifischen Bindemittel (Straßenbaubitumen) hergestellt. Grundsätzlich ist dieser Zusammenhang aber plausibel. Obwohl sie aus Gründen der Vollständigkeit in der Grafik aufgeführt sind, werden sie nicht in die Interpretation der Daten mit einbezogen.

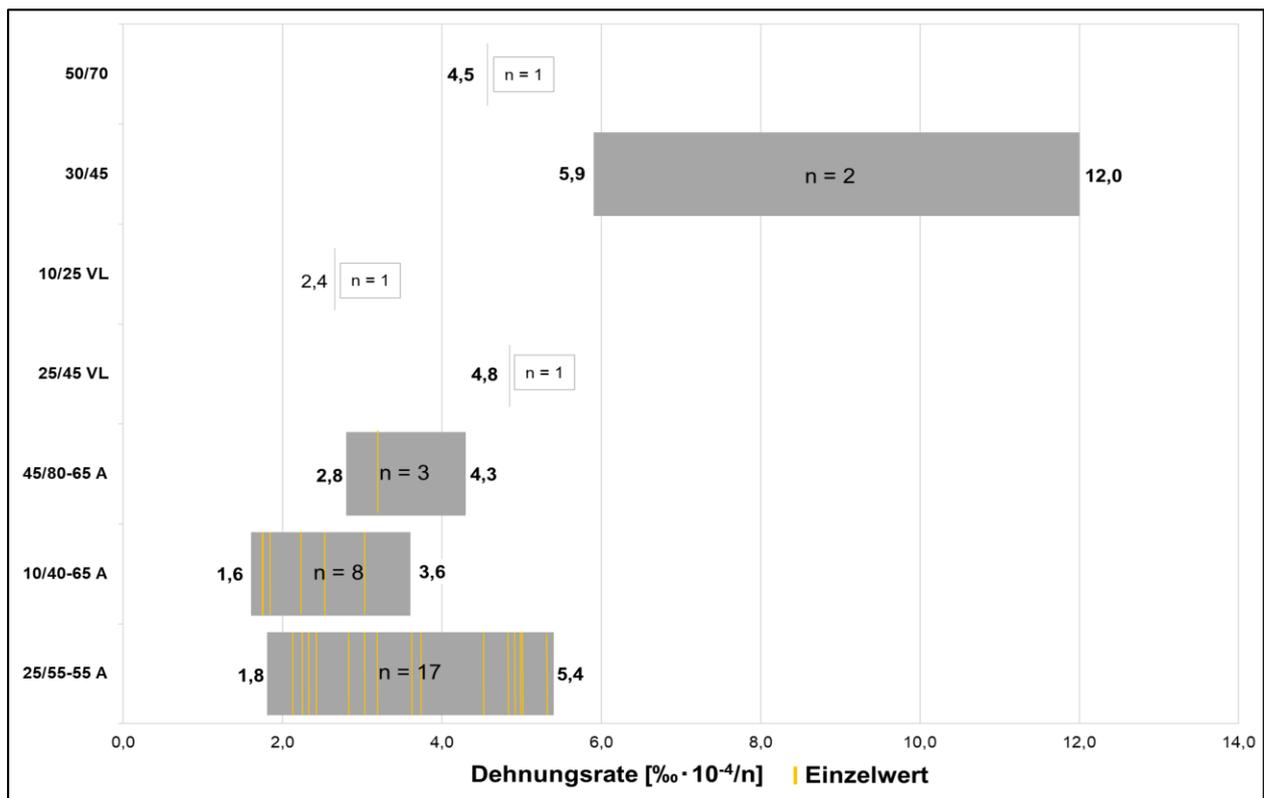


Bild 4-12: Minimale und Maximale Dehnungsrate je nach Bindemittelsorte

Darüber hinaus wurden alle Varianten mit der in [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] beschriebenen Methode untersucht und ein Teil der Varianten mit der nicht in der TP beschriebenen Alternative (mit Stützring). Die Ergebnisse der Walzasphaltvarianten sind in (Bild 4-13 bis Bild 4-19) abgebildet. Eine Übersicht der Einzelmessergebnisse ist im Anhang aufgeführt (Tab. A-3 bis Tab. A-5).

Die Ergebnisse der Varianten mit Stützring wurden immer mit einer gestrichelten Linie dargestellt, die Varianten ohne Stützring mit einer durchgezogenen Linie.

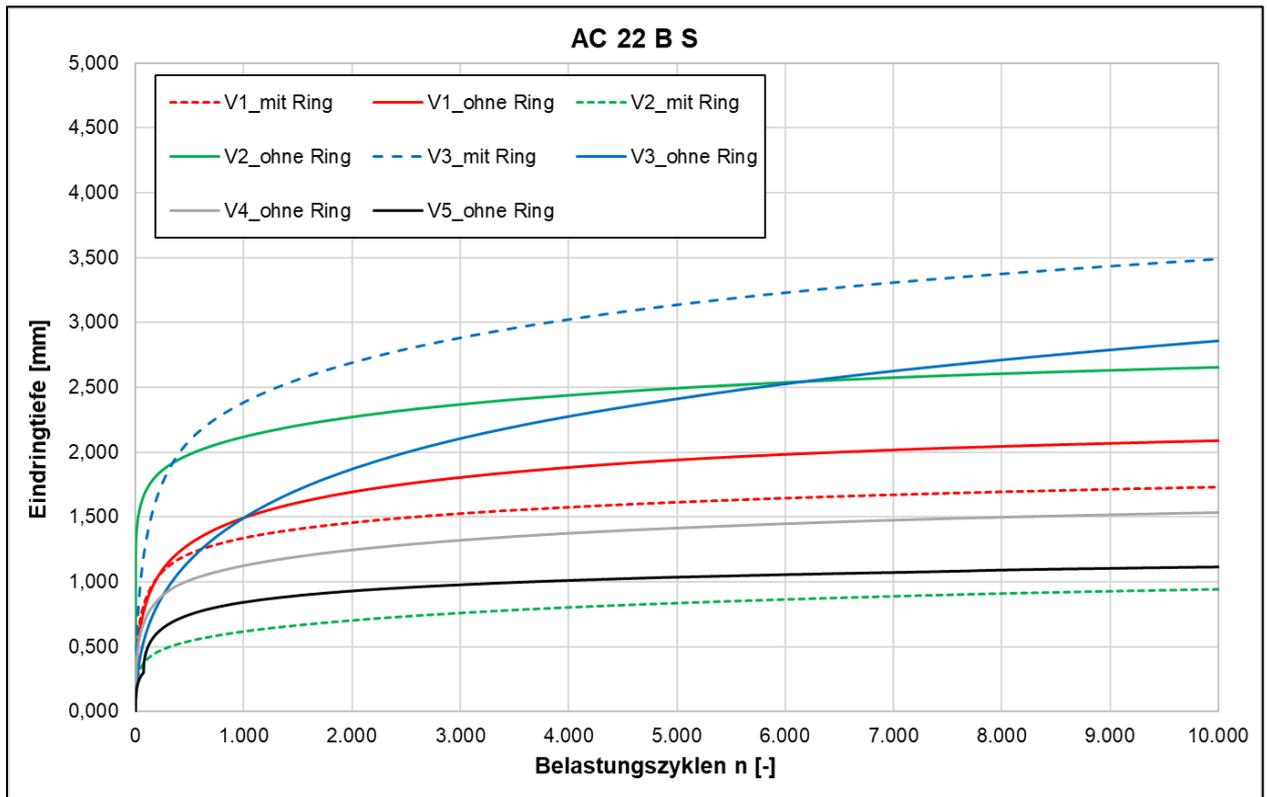


Bild 4-13: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf AC 22 B S

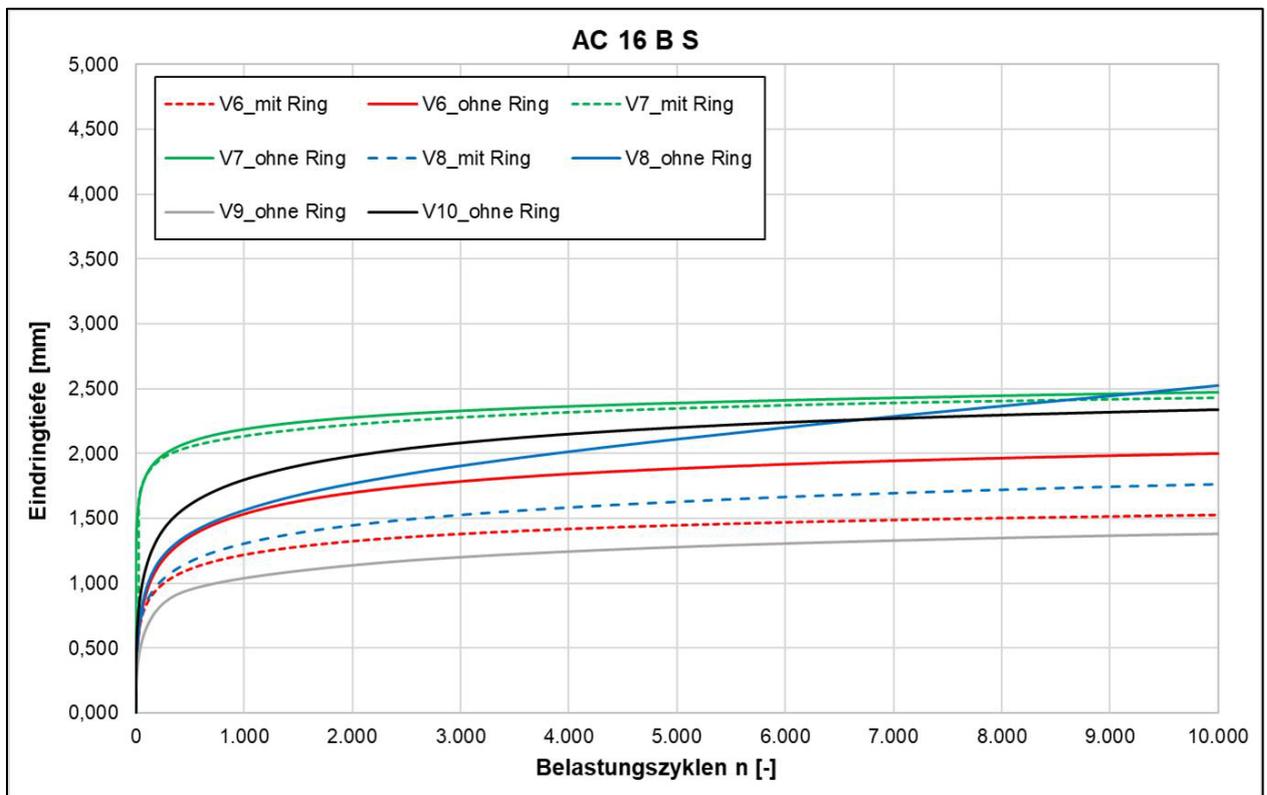


Bild 4-14: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf AC 16 B S

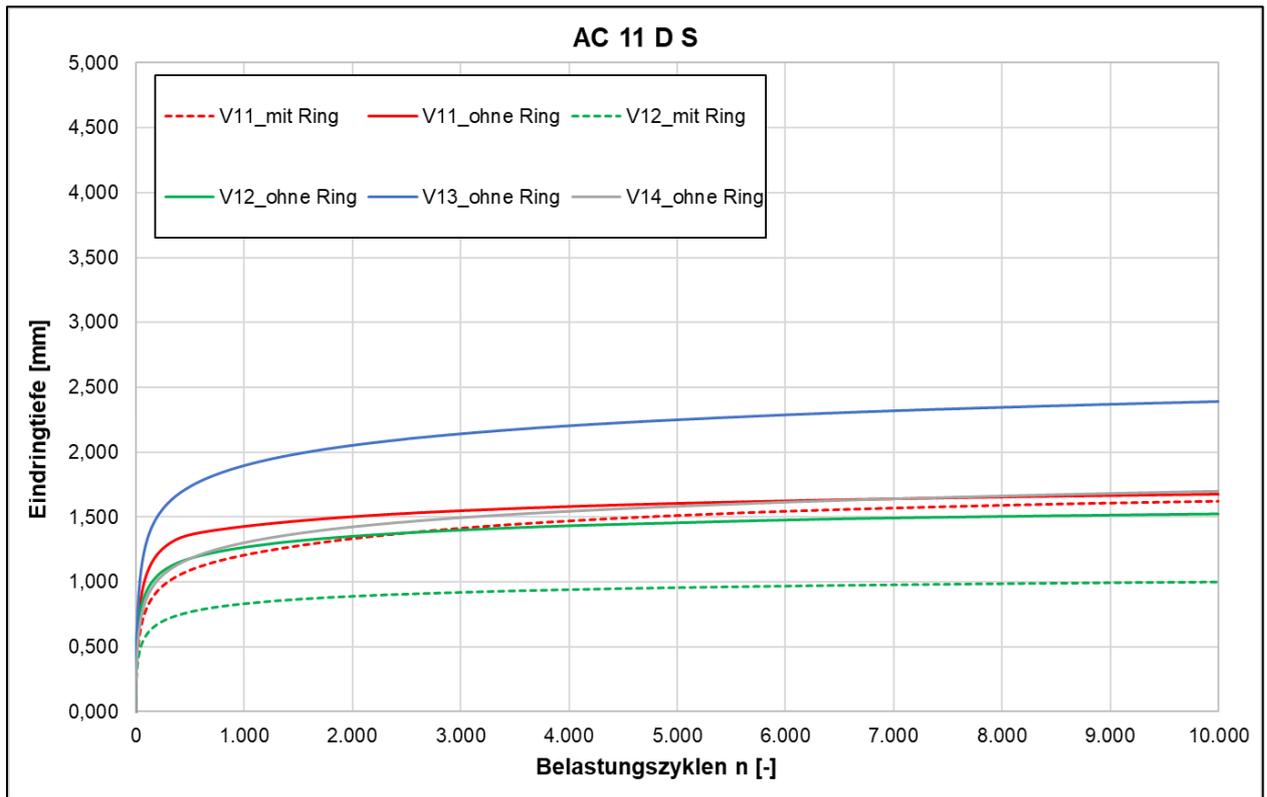


Bild 4-15: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf AC 11 D S

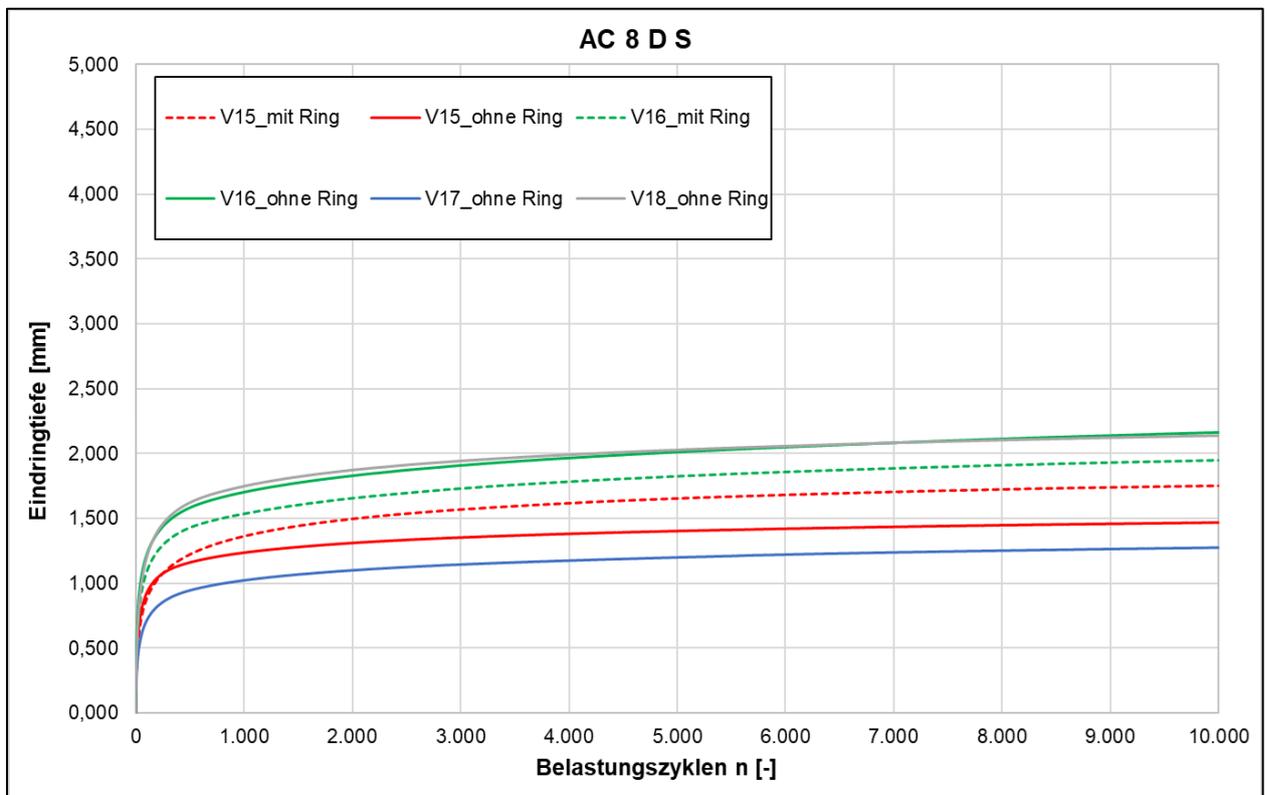


Bild 4-16: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf AC 8 D S

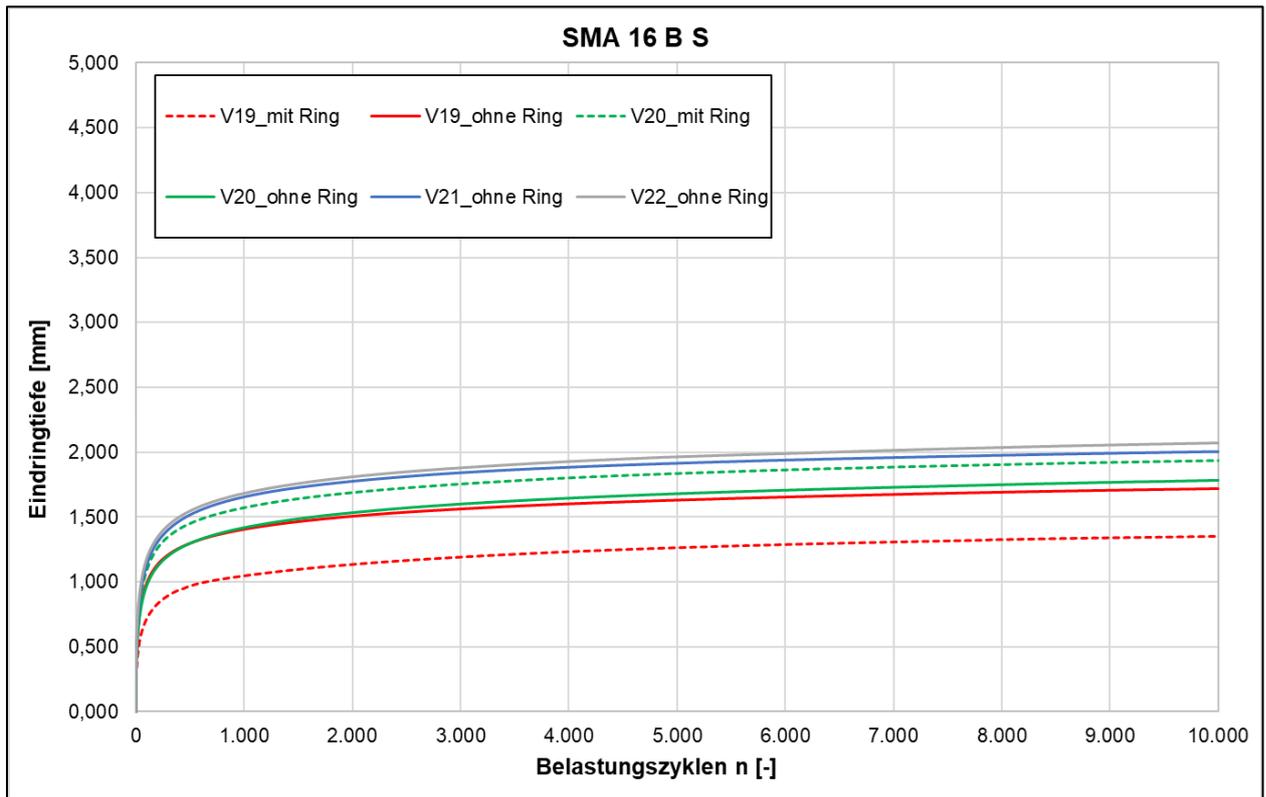


Bild 4-17: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempelindringversuch - Verformungsverlauf SMA 16 B S

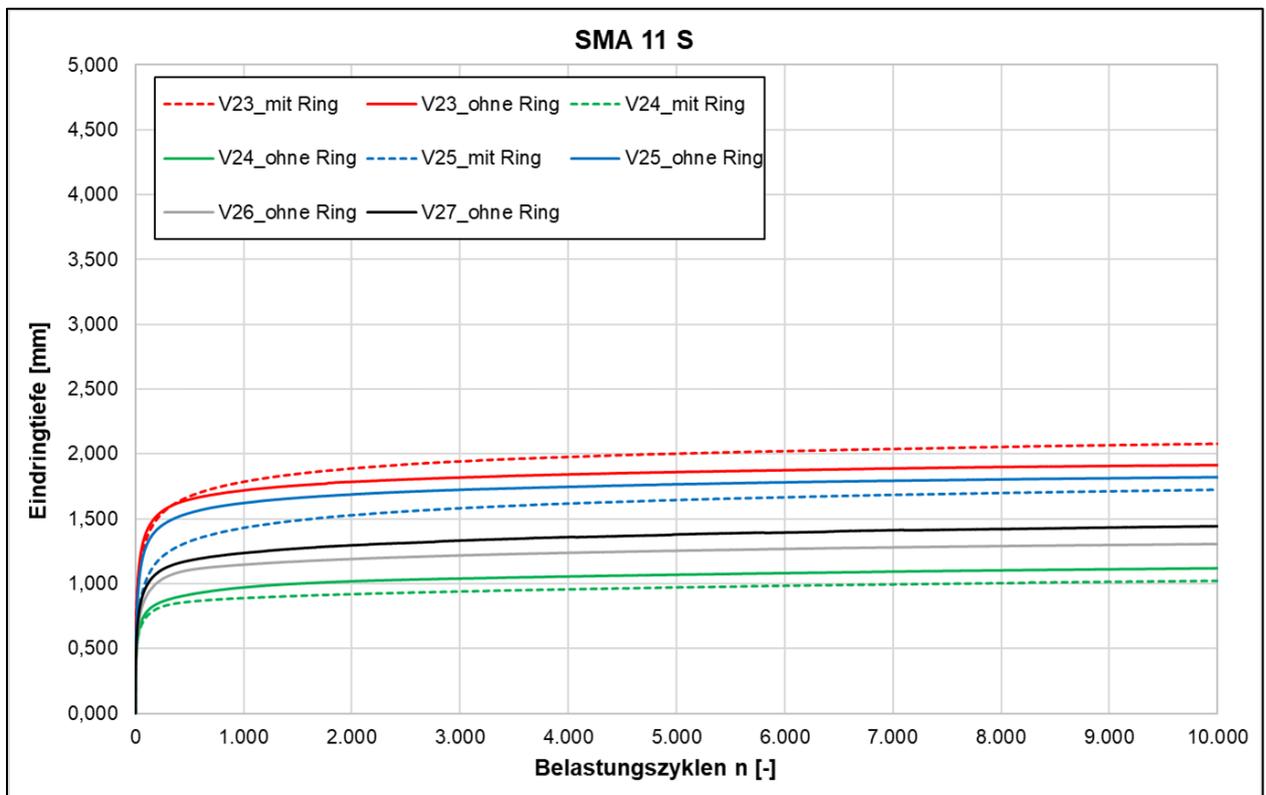


Bild 4-18: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempelindringversuch - Verformungsverlauf SMA 11 S

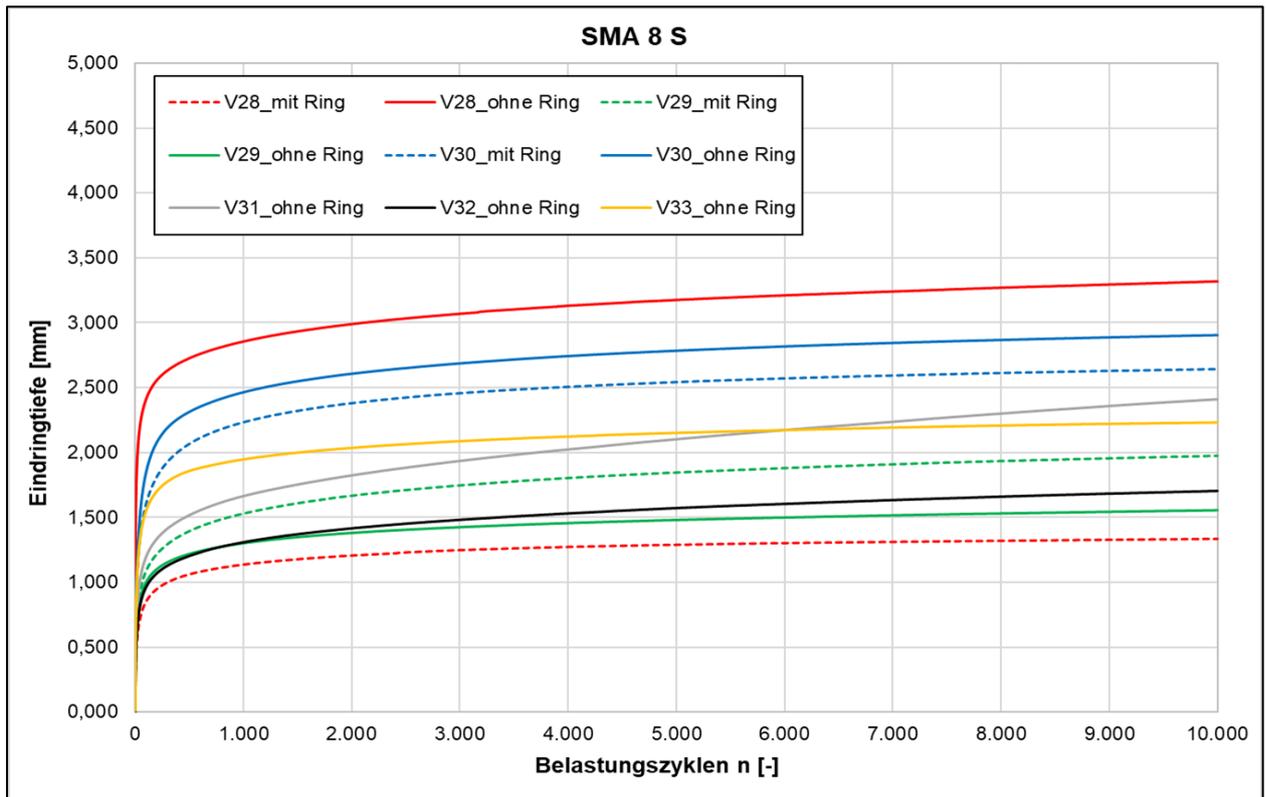


Bild 4-19: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempelindringversuch - Verformungsverlauf SMA 8 S

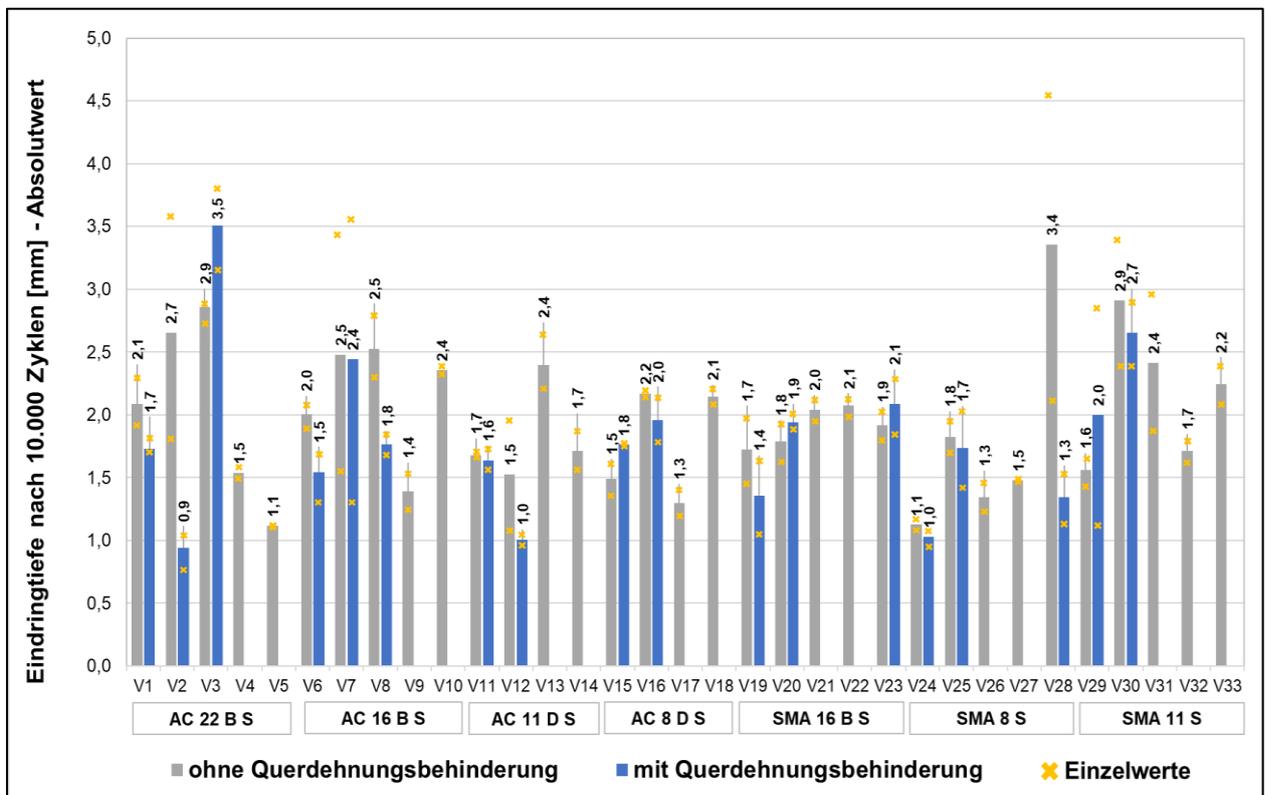


Bild 4-20: Dyn. Stempelindringtiefen der Laborvarianten (Zusammenfassung)

Die Ergebnisse zeigen, dass keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden kann, dass die Eindringtiefe durch eine zusätzliche Querdehnungsbehinderung (Stützring) geringer gehalten werden kann. Einige Varianten (V3, V15, V20, V23, V29) weisen eine höhere Eindringtiefe auf, wenn der Probekörper mit zusätzlicher Querdehnungsbehinderung geprüft wurde. Die Differenzen zwischen der Eindringtiefe mit und ohne Stützring sind insgesamt aber relativ gering. Generell erreicht keine Variante das Abbruchkriterium von einer Eindringtiefe von 5 mm.

Mit einer weiteren Betrachtung wurde die Korrelation zwischen den Dehnungsraten und den Eindringtiefen und ein Vergleich der Ergebnisse im Einaxialen Druck-Schwellversuch mit den Ergebnissen des dynamischen Stempeleindringversuchs durchgeführt (Bild 4-21). Es wird deutlich, dass eine Korrelation zwischen den Dehnungsraten und den Eindringtiefen nicht erkennbar ist. Zwischen den beiden Prüfverfahren (mit und ohne Stützring) scheint ebenso kein systematischer Zusammenhang zu bestehen.

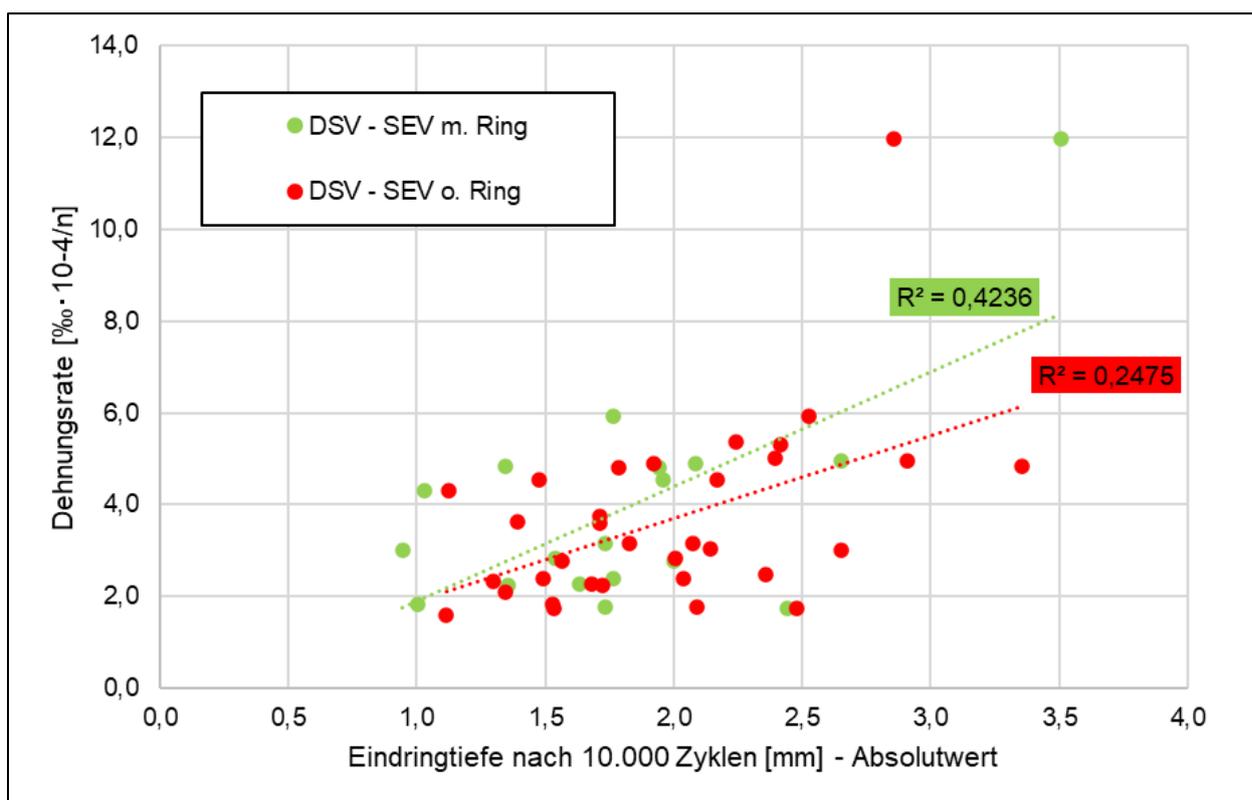


Bild 4-21: Korrelation Dehnungsrate und dyn. Stempeleindringtiefe

Für die Bewertung des Verformungsverhaltens von Gussasphalt nach den [TP Asphalt-StB Teil 25 A1] gibt es bereits einen Vorschlag für einen Bewertungshintergrund, der im Rahmen dieses Forschungsprojektes kritisch überprüft werden soll. Die Ergebnisse der Untersuchungen an den sechs Gussasphaltrezepturen sind in Bild 4-22 grafisch dargestellt.

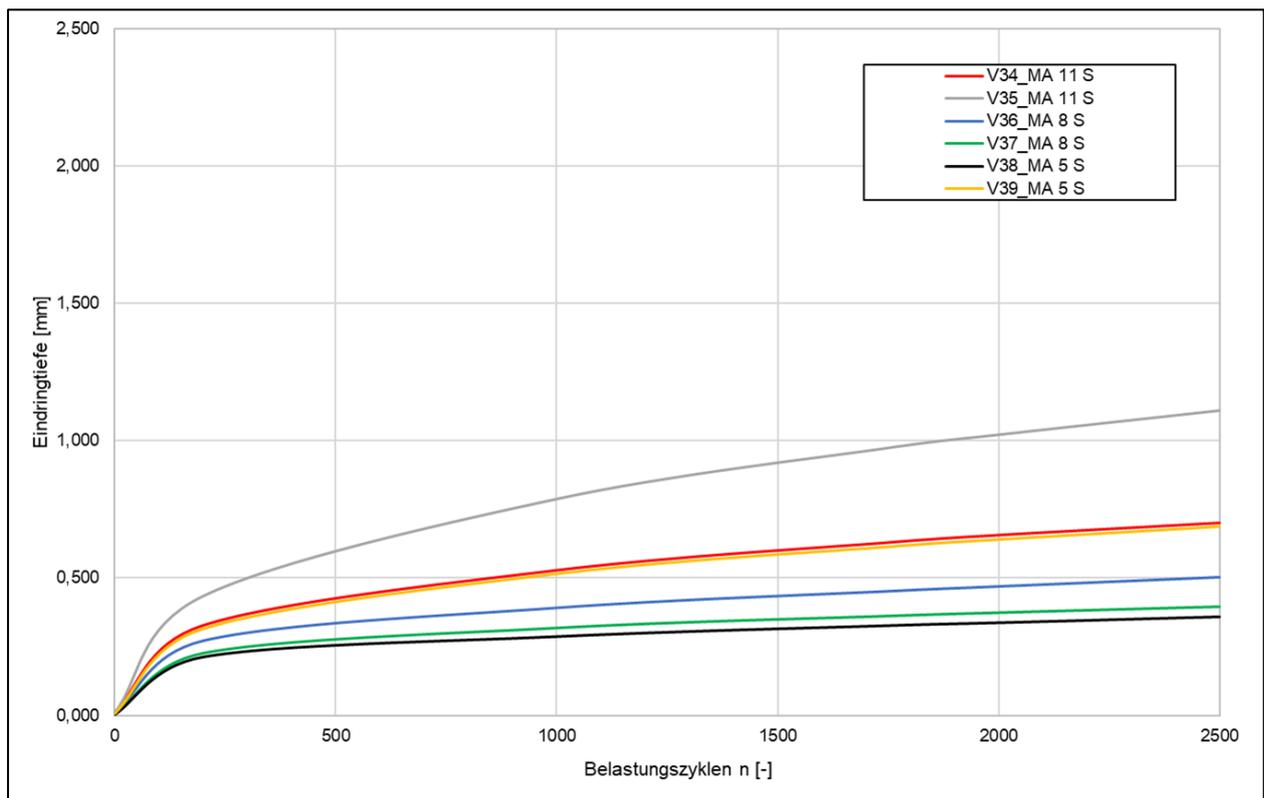


Bild 4-22: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf der Gussasphaltvarianten

Bild 4-23 zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung getrennt für die Sorten MA 5 S, MA 8 S und MA 11 S. Es zeigt sich keine, wie in [Radenberg et. al, 2017] erwartete Abhängigkeit vom Größtkorn. Die mittleren dynamischen Eindringtiefen (Median) der drei Sorten liegen zwischen 0,4 und 0,9 mm.

Zur Bewertung der dynamischen Stempeleindringtiefe nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 A1] lagen jeweils zwei Datensätze für Gussasphalte MA 5 S, MA 8 S und MA 11 S vor, was eine stark verkleinerte Datengrundlage zu [Radenberg et. al, 2017] darstellt. Trotzdem werden auf Basis dieser Datenlage die in der Tab. 4-3 aufgeführten Erfahrungswerte abgeleitet und empfohlen. Gegenüber den bisher genannten Erfahrungswerten können die Maximalwerte etwas abgesenkt werden. Es ist zu beachten, dass dies anhand von zwei Datensätzen nicht ausreichend validiert werden kann.

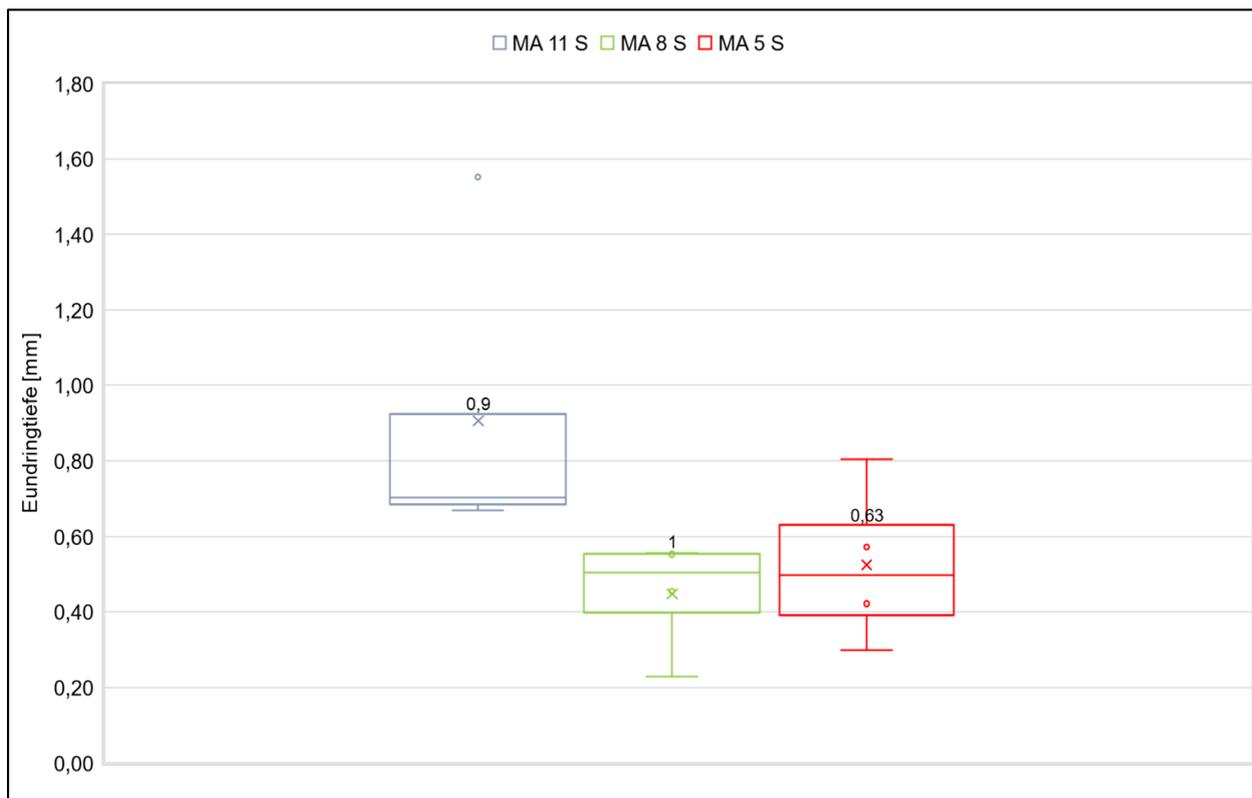


Bild 4-23: Statistische Betrachtung der Gussasphaltvarianten

Asphaltsorte	Minimalwert der Stempel Eindringtiefe [mm]	Maximalwert der Stempel Eindringtiefe [mm]
MA 5 S	0,4	0,7
MA 8 S	0,4	0,5
MA 11 S	0,7	1,1

Tab. 4-3: Erfahrungswerte für die Stempel Eindringtiefe [mm] nach 2.500 LW

4.1.1 BAST-Mischgutvarianten

Zur Erweiterung der Messdatengrundlage wurden vom Auftraggeber sechs weitere Asphaltmischgüter zur Verfügung gestellt. Aufgrund der teilweise sehr geringen Asphaltmischgutmengen konnten nicht alle vorgesehenen Prüfungen durchgeführt werden. Eine Übersicht der Einzelmessungen in tabellarischer Form ist dem Anhang (Tab. A-6/Tab. A-7) zu entnehmen. Eine Übersicht der minimalen und maximalen Dehnungsraten der Einzelwerte aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch ist in Bild 4-24 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Varianten SMA 8 und AC 22 B S eine deutlich höhere Spannweite der drei Einzelwerte zeigen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass diese beiden Varianten Wendepunkte aufweisen. Sie werden daher für die weitere Betrachtung zur Festlegung von Anforderungswerten für die Dehnungsrate ausgeschlossen. Aufgrund der geringen Asphaltmischgutmenge konnten keine weiteren Probekörper zur Validierung der beiden verbleibenden Einzelergebnisse hergestellt werden.

Die Ergebnisse des dynamischen Stempel Eindringversuchs können dem Diagramm in Bild 4-25 entnommen werden. Zwischen den Ergebnissen mit und ohne Querdehnungsbehinderung ist auch bei diesen Ergebnissen kein eindeutiger Trend erkennbar.

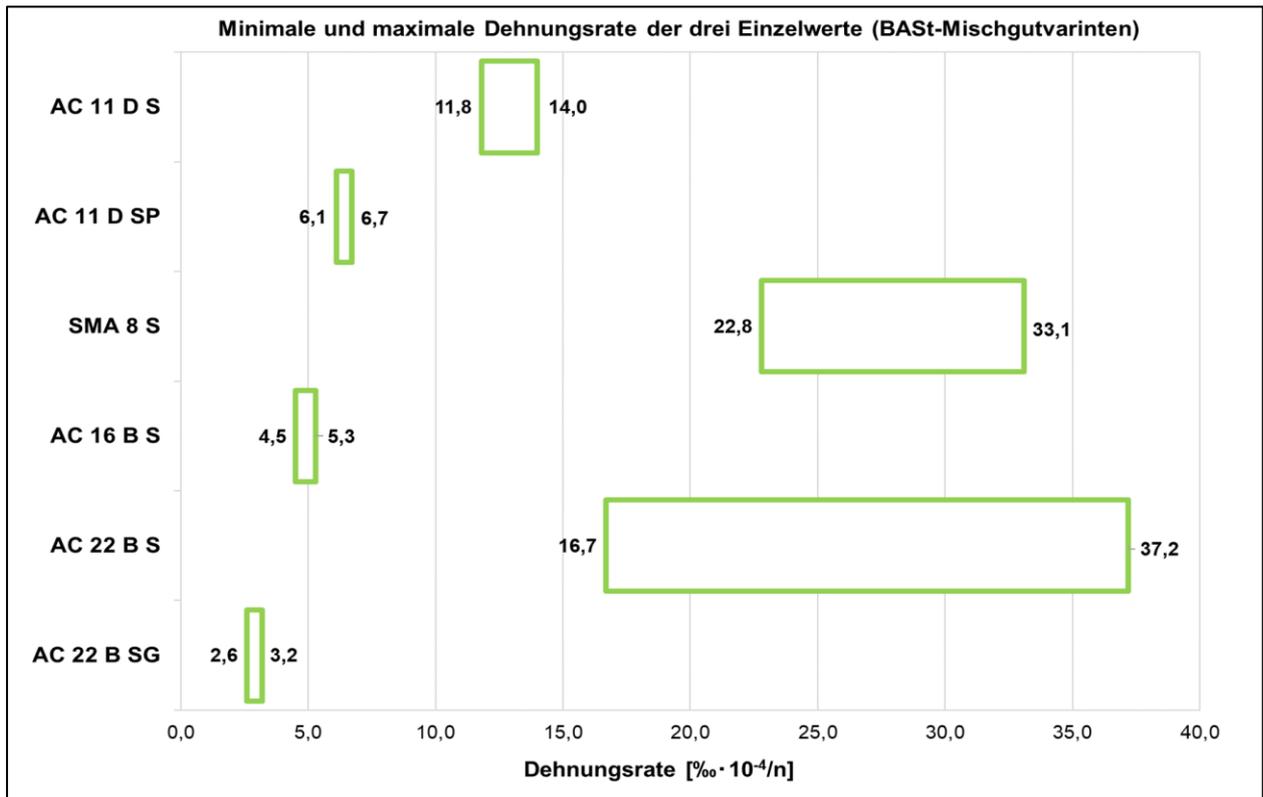


Bild 4-24: Minimale und maximale Dehnungsraten (BAST-Mischgutvarianten)

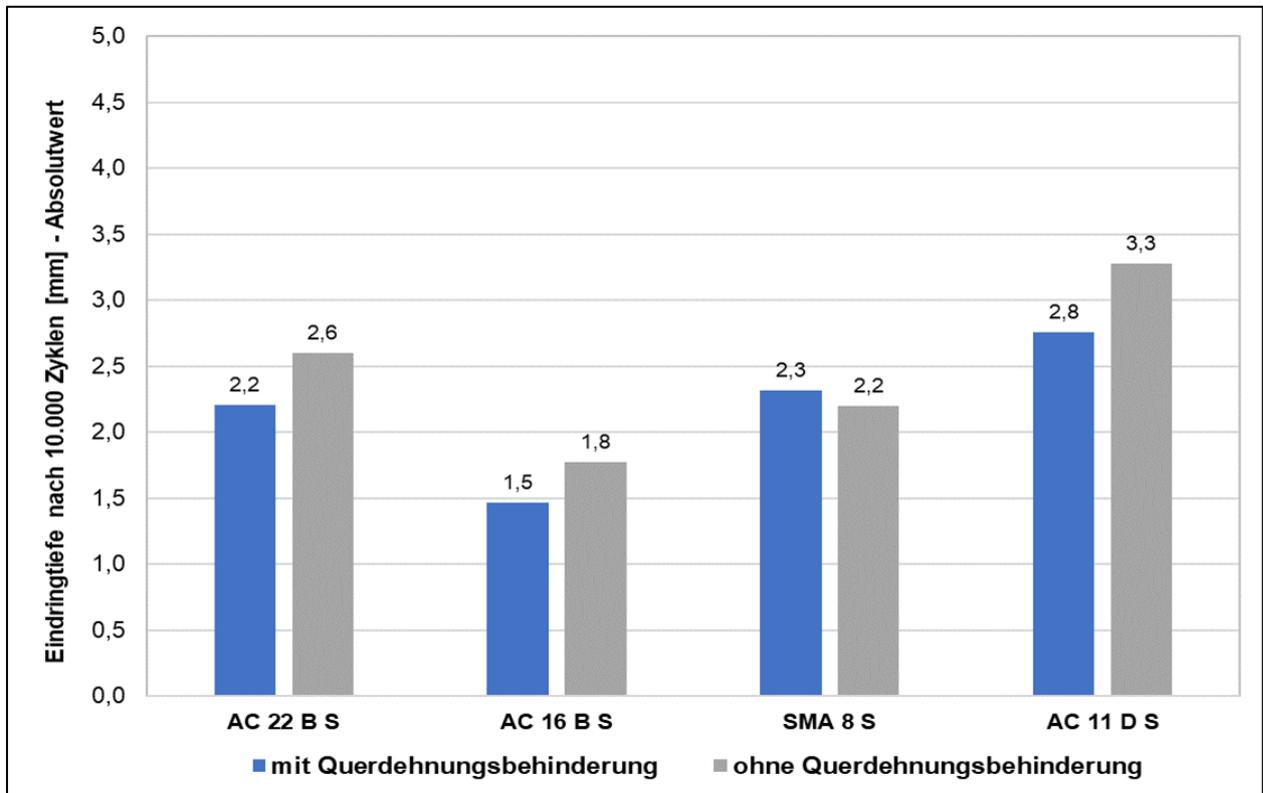


Bild 4-25: Ergebnisse dynamischer Stempleindringversuch (BAST-Mischgutvarianten)

4.1.2 Untersuchungen zum Verformungswiderstand bei höchsten Beanspruchungen

Zur Auswahl der Varianten für die Untersuchungen zum Verformungswiderstand bei höchsten Beanspruchungen stellt Bild 4-26 die Ergebnisse der im Labor hergestellten SMA-Varianten im Einaxialen Druck-Schwellversuch dar.

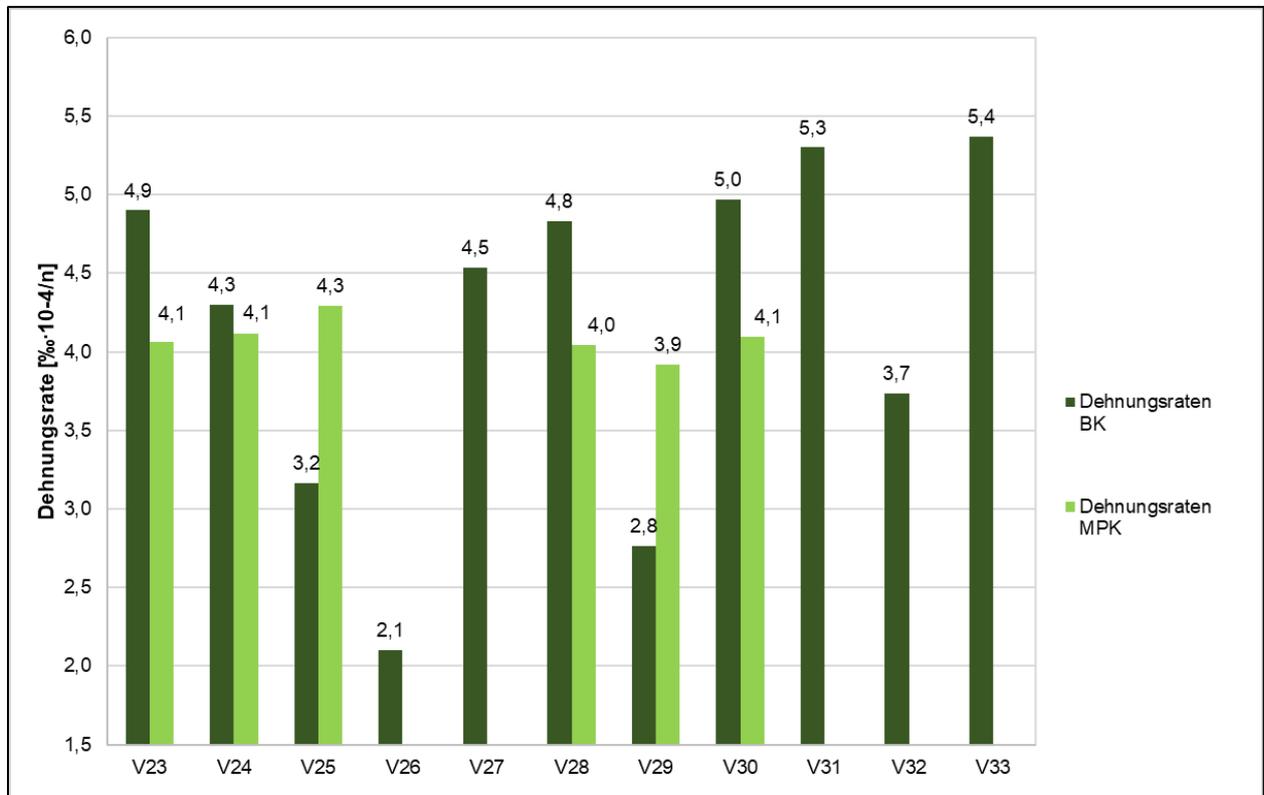


Bild 4-26: Ergebnisse Einaxialer Druck-Schwellversuch SMA-Varianten

Anhand dieser Ergebnisse wurden für die weiteren Untersuchungen bei geänderten Prüfrandbedingungen im Rahmen des Sonderprogramms AS 3A die Varianten V25 und V26 ausgewählt. Beide Varianten weisen einen hohen Verformungswiderstand auf und lassen sich aufgrund der identischen Gesteinsart und gleichem Bindemittel gut vergleichen. Einziger Unterschied ist die Korngrößenverteilung. V25 orientiert sich an der oberen Siebliniengrenze, während die Sieblinie von V26 eher an der unteren Sieblinie liegt. Durch die Versuche bei abgeänderten Rahmenbedingungen soll gezeigt werden, ob sich die beiden Varianten bei höheren Temperaturen besser differenzieren lassen. Weitere Erkenntnisse soll die zusätzliche Untersuchung der Varianten V28 und V30 bringen. Diese Varianten weisen Dehnungsraten auf einem sehr ähnlichen Niveau, sowohl für die Untersuchung an den aus WSV-Platten hergestellten Bohrkernen als auch den Marshall-Probekörpern, auf. Unterschiede sind hier wieder nur in der Sieblinie auszumachen. Eine genaue Übersicht ist der Tab. 2-2 zu entnehmen.

Die Impulskriechkurven der Dreifachbestimmungen je Temperatur und Variante der Untersuchungen zum modifizierten Druckschwellversuch sind dem Anhang zu entnehmen (Bild A-1 bis Bild A-12).

Bild 4-27 zeigt die Impulskriechkurven der gemittelten Werte der Dehnungen für die Varianten V25 und V26. Es ist zu erkennen, dass die Varianten im ersten Regime (Standard) einen zu erwartenden Verlauf aufweisen. Einzig bei Variante V26 (65°C) ist schon zu Beginn des Versuchs ein Wendepunkt zu erkennen. In den beiden folgenden Regimen (Dauer Lastzyklus 4,0 sec. bzw. 10 sec.) kann für die Varianten ein deutlicher Unterschied erkannt werden. Die Probekörper der Variante V25 weisen bis zum Versuchsende keine Wendepunkte auf, während die Probekörper der Variante V26 bis hin zur Gefügezerstörung (60 °C und 65 °C) geprüft wurden. Die wichtigsten Dehnungswerte zum Ende des jeweiligen Regimes sind in Tab. 4-4 zusammengefasst.

Es lässt sich feststellen, dass die Varianten im ersten Regime (Standard) Verläufe simultan der Voruntersuchungen aufweisen. Dort liegen die Werte für die Dehnungen der Variante V26 unter denen der Variante V25. Dies ist hier bei den weiterführenden Ergebnissen ebenfalls zu erkennen. Bei steigender Temperatur und verlängerte Lastdauer verhält sich die Variante V25 deutlich verformungsbeständiger als die Variante V26. Eine Differenzierung der Varianten bei abgeänderten Randbedingung ist hier eindeutig möglich.

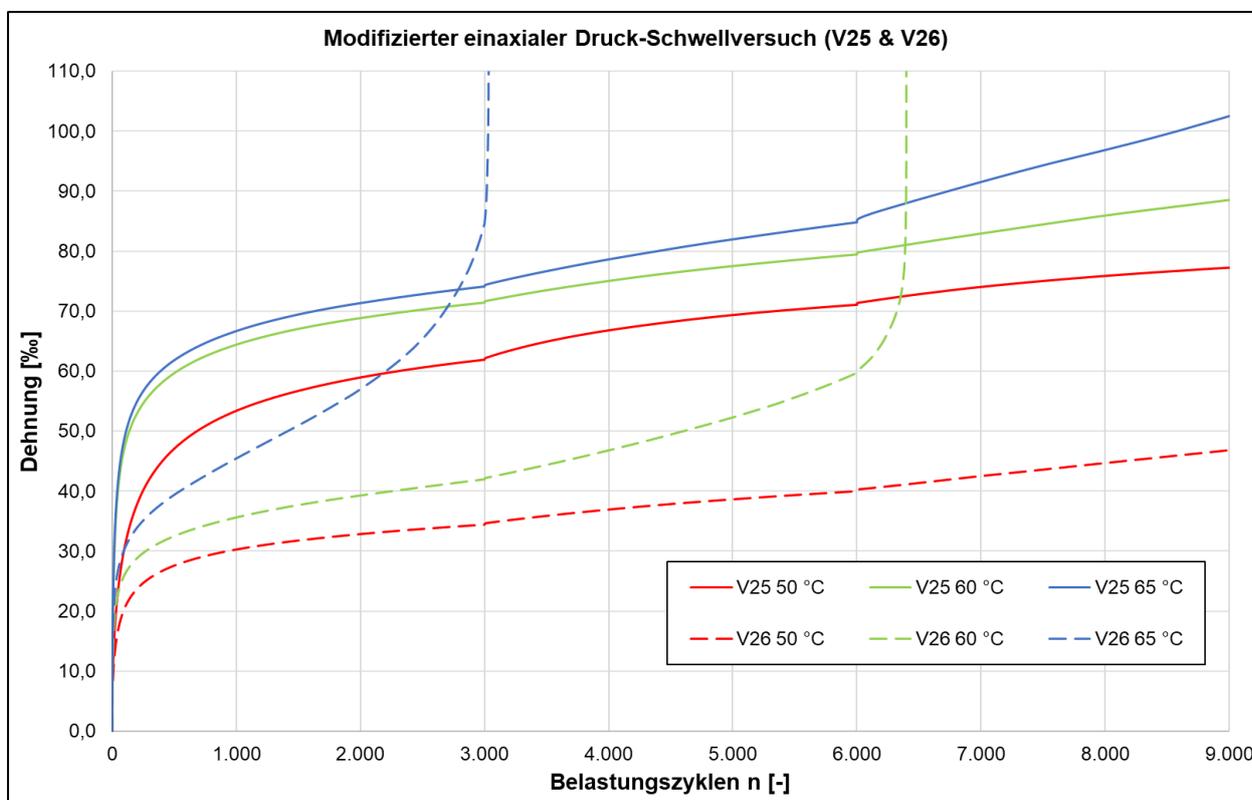


Bild 4-27: Impulskriechkurven Sonderprogramm AS 3A - Varianten V25/V26 (MW)

Zusätzliche Untersuchungen wurden an den Varianten V28 und V30 durchgeführt, aufgrund ihrer nahezu identischen Verformungswerte in den Voruntersuchungen. Auch unter Höchstbeanspruchung zeigt sich ein ähnliches Niveau bei beiden Varianten, wie aus den Impulskriechkurven in Bild 4-28 hervorgeht. Zu erwähnen ist, dass im Gegensatz zu den Varianten V25 und V26 beide Varianten nur im letzten Regime bei einer Temperatur von 65 °C eine fortschreitende volumendilatante Gefügezerstörung aufweisen. Diese Beobachtung wurde bei allen sechs Proben gemacht. Eine Unterscheidung der Varianten bei höheren Temperaturen und längeren Belastungszeiten ist in diesem Fall nicht möglich. Die Unterschiede in den Sieblinien liegen auch in diesem Fall nur in der Zusammensetzung des Mischguts, wobei sich die Variante V28 an der mittleren und V30 an der oberen Sieblinie orientiert.

Variante V26 zeigte in den ersten Versuchen einen deutlich schlechteren Verformungswiderstand bei erhöhten Temperaturen und orientiert sich an der unteren Sieblinie. Dies legt nahe, dass Mischgutzusammensetzungen, die sich eher an der mittleren oder oberen Sieblinie orientieren, einen höheren Verformungswiderstand aufweisen als Varianten, die sich an der unteren Sieblinie orientieren.

Die Ergebnisse dieser Versuche haben ergeben, dass die Erhöhung der Prüftemperatur auf 60 °C oder 65 °C eine weitergehende Differenzierung von Mischgutvarianten mit hohem Verformungswiderstand ermöglicht. Auch die Lastfrequenz (längere Lasteinwirkungsdauer) zeigt einen aber eher geringeren Effekt auf die Dehnung und die Dehnungsrate.

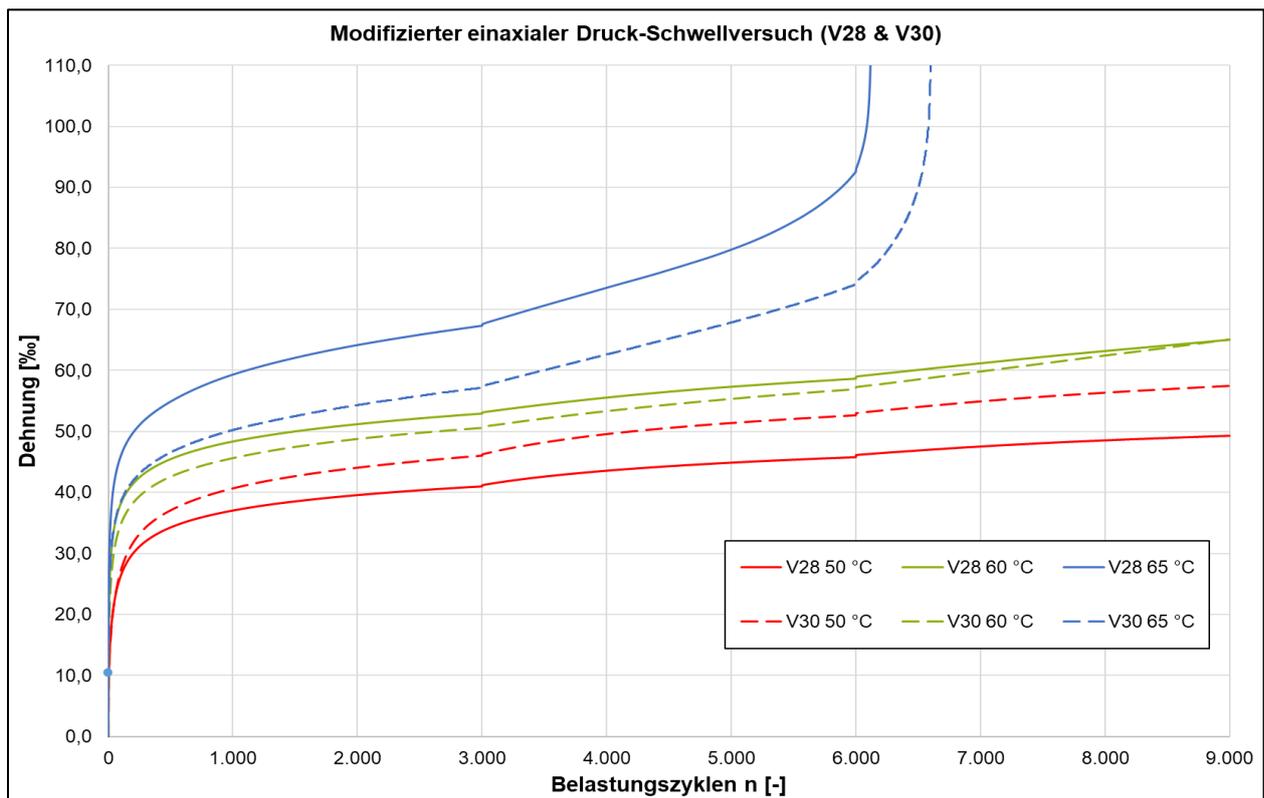


Bild 4-28: Impulskriechkurven Sonderprogramm AS 3A - Varianten V28/V30 (MW)

		Regime 1		Regime 2		Regime 3	
		Dehnung [‰]	Dehnungsrate [‰·10 ⁻⁴ /n]	Dehnung [‰]	Dehnungsrate [‰·10 ⁻⁴ /n]	Dehnung [‰]	Dehnungsrate [‰·10 ⁻⁴ /n]
V25	50 °C	61,19	23,6	70,04	36,2	75,7	10,2
	60 °C	72,09	22,0	80,19	41,7	89,4	26,1
	65 °C	74,80	24,7	85,60	80,1	103,5	60,9
V26	50 °C	34,54	13,5	40,13	30,7	47,0	21,8
	60 °C	42,16	25,4	-	-	-	-
	65 °C	84,90	-	-	-	-	-
V28	50 °C	41,20	11,9	46,01	30,0	49,54	7,0
	60 °C	53,45	15,1	59,23	35,1	65,67	19,2
	65 °C	68,22	29,1	93,78	605,8	-	-
V30	50 °C	50,82	20,8	58,94	37,6	64,65	12,8
	60 °C	50,97	15,7	57,3	37,1	65,57	26,6
	65 °C	57,72	26,4	74,81	145,1	-	-

Tab. 4-4: maßgebende Dehnungswerte Varianten Sonderprogramm AS 3A (Mittelwerte)

4.2 Ergebnisse und Auswertung der Praxisstrecken

Die in den folgenden Unterkapiteln (4.2.1 bis 4.2.9) grafisch dargestellten Ergebnisse sind zusammengefasst in tabellarischer Form dem Anhang zu entnehmen. Die gesammelten Ergebnisse dienen der Überprüfung der Größenordnungen der im Labor ermittelten Verformungen.

4.2.1 Berliner Ring A10 – Strecke A

Der ausgewählte Straßenabschnitt auf der A10 repräsentiert einen Straßenoberbau mit hohen Verformungen. Bei der Bohrkernentnahme zeigte sich dann, dass dies mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit aufgrund einer SAMI-Schicht zwischen der Binderschicht und der darunterliegenden alten Betonbefestigung (s. Bild 4-29, links) liegt. Die SAMI-Schicht und die hohe Steifigkeit der Betonbefestigung (hohe deviatorische, verformungsrelevante Spannungen) führen zu einem verformungsanfälligen Oberbau. Die starke Verklebung der SAMI-Schicht mit der Unterlage hat zudem dazu geführt, dass keine Bohrkern mit einem Durchmesser von 200 mm entnommen werden konnten. Es konnte auch nicht bis unter den Beton gebohrt werden, da das Bindemittel der SAMI-Schicht den Zwischenraum zwischen Bohrkronen und Bohrkernmantelfläche verklebte. Aus diesem Grund wurden bei dieser Praxisstrecke nur BK mit einem Durchmesser von 150 mm entnommen und aus diesen die 100 mm BK für die Einaxialen Druck-Schwellversuche im Labor herausgebohrt. Für die Stempelleitungsversuche wurde das Material aus mehreren Bohrkernen im Labor schonend erwärmt und mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät Asphaltplatten entsprechend [TP Asphalt-StB, Teil 33] mit den Verdichtungseigenschaften (Hohlraumgehalt) und der mittleren Höhe, die an den Bohrkernen ermittelt wurden, hergestellt. Das Material reichte für zwei Platten aus, sodass bei dieser Praxisstrecke nur der dynamische Stempelleitungsversuch ohne seitliche Begrenzung durchgeführt wurde. Zusätzlich wurden jedoch auch MPK hergestellt und der DSV am MPK und BK durchgeführt. An der Entnahmestelle konnten Spurrinnentiefen von 2,5 cm bis 3,8 cm gemessen werden.



Bild 4-29: Fotos der BK-Entnahme A10, links: BK mit SAMI-Schicht, Mitte: Spurrinne, rechts: Wasser in der Spurrinne

Die Schichtdicken der am 31.5.2022 entnommenen Bohrkern des Berliner Ringes auf der A10 sind in Tab. 4-5 zusammengefasst. Die Fotos der Bohrkern sind im Anhang Bild A-13 und Bild A-14 zu sehen.

Bohrkernnummer	Zuordnung zu den Versuchen	Dicke Asphaltdeckschicht [cm]	Dicke Asphaltbinderschicht [cm]	Besonderheiten
1	Systemprobekörper DSV (DS+BS)	4,0	6,3	
2		3,9	6,4	
3	Systemprobekörper DSV (DS+BS)	4,0	6,2	
4		3,8	6,4	
5	Systemprobekörper DSV (DS+BS)	4,0	6,2	
6		4,0	6,1	
7		4,2	6,2	
8		4,2	6,5	
9		4,2	6,2	geringe Abplatzungen bei der Entnahme an der Deckschicht
10		4,3	6,0	
11		4,3	5,5	Abplatzungen bei der Entnahme
12	Probekörper DSV (BS)	4,2	6,2	
13		4,3	6,5	
14		4,3	6,4	
15		3,5	4,8	Aus der Spurrinne entnommen
16		3,4	4,8	
17		3,6	4,9	
18		3,1	4,7	

Tab. 4-5: Schichtdicken der Bohrkern Berliner Ring A10

Die Bohrkern 1, 3 und 6 wurden aufgrund der vergleichsweise geringen Dicken der Asphaltbinderschicht aber der gleichen Dicke der Asphaltdeckschicht als Systemprobekörper für den Einaxialen Druck-Schwellversuch am BK ausgewählt. Die Bohrkern wurden auf eine Gesamtdicke von 60 mm gesägt und geschliffen, wobei die Dicke der Asphaltdeckschicht so wenig wie möglich verringert wurde. Die Bohrkern 12, 13 und 14 wurden für Einaxiale Druck-Schwellversuche an der Asphaltbinderschicht ausgewählt, da hier die Asphaltdeckschicht bei der Entnahme gestört wurde und die Binderschicht eine vergleichsweise hohe Dicke aufweist und die Probekörper so auf eine Dicke von 60 mm geschliffen werden konnten. Aus dem verbliebenen Material der Asphaltdeckschicht und Asphaltbinderschicht wurden Walzsektor-Verdichter-Platten hergestellt, um Probekörper für die Durchführung des dynamischen Stempeleindringversuches zu gewinnen und MPK für den Einaxialen Druck-Schwellversuch herzustellen. Die Platten wurden weggesteuert hergestellt, um über die Einwaage und Höhe zur Praxis vergleichbare volumetrische Bedingungen zu schaffen. Auffällig war dabei, dass der Verdichter nur sehr geringe Kräfte (8 kN) im Vergleich zur üblichen Verdichtung nach [TP Asphalt-StB, Teil 33] (Höchstlast 19,5 kN bei der Hauptverdichtung) aufbringen musste, um die erforderliche Höhe zu erzielen. Zudem wurde ein Teil des Materials extrahiert, um die Bindemittleigenschaften und die Korngrößenverteilung zu ermitteln. Der Bindemittelgehalt der Asphaltdeckschicht betrug 5,9 M.-% und der der Asphaltbinderschicht 6,7 M.-% (vermutlich durch aufgestiegenes Bindemittel aus der SAMI-Schicht verursacht). Die Korngrößenverteilung ist Tab. 4-6 zu entnehmen und in Tab. 4-7 sind die Raumdichten, die Asphaltrohndichte und die Hohlraumgehalte zusammengefasst.

Kornklasse [mm]	Siebdurchgang [M.-%]	
	Asphaltdeckschicht	Asphaltbinderschicht
Füller < 0,063	13,0	12,3
0,125	13,8	14,0
2,0	28,8	31,9
5,6	40,6	42,2
8,0	60,9	53,9
11,2	94,8	74,3
16,0	100,0	99,0
22,0	-	100,0

Tab. 4-6: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht Berliner Ring A10

Probe	Raumdichte [g/cm ³]	Asphaltrohddichte [g/cm ³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
BK 1 Asphaltdeckschicht	2,381	2,440	2,4
BK 2 Asphaltdeckschicht	2,388		2,1
BK 3 Asphaltdeckschicht	2,366		3,0
BK 12 Asphaltbinderschicht	2,422	2,470	1,9
BK 13 Asphaltbinderschicht	2,426		1,8
BK 14 Asphaltbinderschicht	2,435		1,4
BK 1 Deck- und Binderschicht (Systemprüfung)	2,399	-	-
BK 3 Deck- und Binderschicht (Systemprüfung)	2,407	-	-
BK 6 Deck- und Binderschicht (Systemprüfung)	2,406	-	-

Tab. 4-7: Raumdichten der Bohrkerne sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten Berliner Ring A10

Ergebnisse Verformungsuntersuchungen

Die Bestimmung des Verformungsverhaltens der Asphaltdeckschicht und der Asphaltbinderschicht mithilfe des Einaxialen Druck-Schwellversuchs an den Ausbauproben hat die in Bild 4-30 bis Bild 4-31 dargestellten Ergebnisse ergeben.

Eine tabellarische Auflistung der wesentlichen Verformungskennwerte ist Tab. 4-8 zu entnehmen. Die angegebenen Werte basieren auf der Mittelung der Ergebnisse aus der Dreifachbestimmung nach der Technischen Prüfvorschrift.

	ϵ_n	$\epsilon^*_{9.800-10.000}$	Spannweite der Einzelmesswerte	kritische Spannweite
	[‰]	[‰*10 ⁻⁴ /n]		
Deckschicht + Binderschicht	85,3	43,2	39,7	17,0
Binderschicht	85,5	23,7	16,8	11,0

Tab. 4-8: Ergebnisse Einaxialer Druck-Schwellversuch A10 Berliner Ring

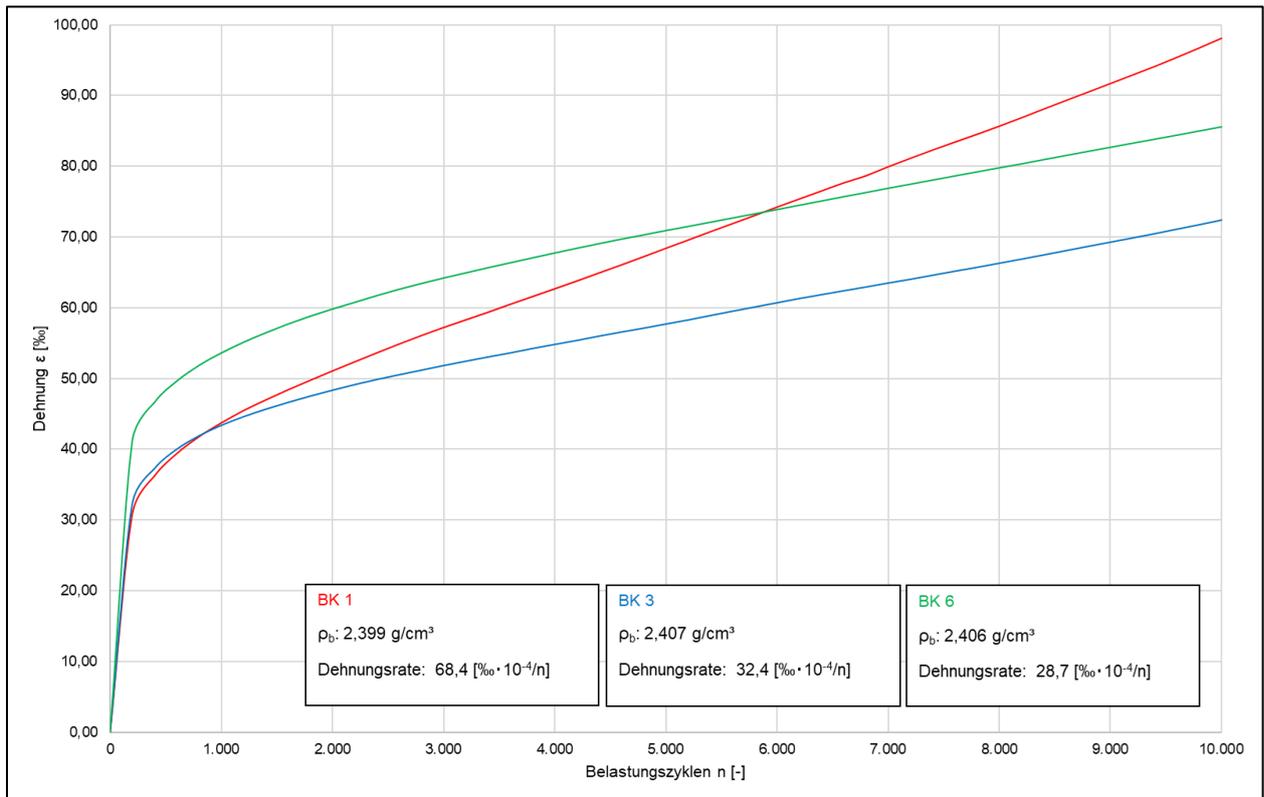


Bild 4-30: Bleibende Verformungen im Einaxialen Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Systemprobekörper DS+BS A10 Berliner Ring

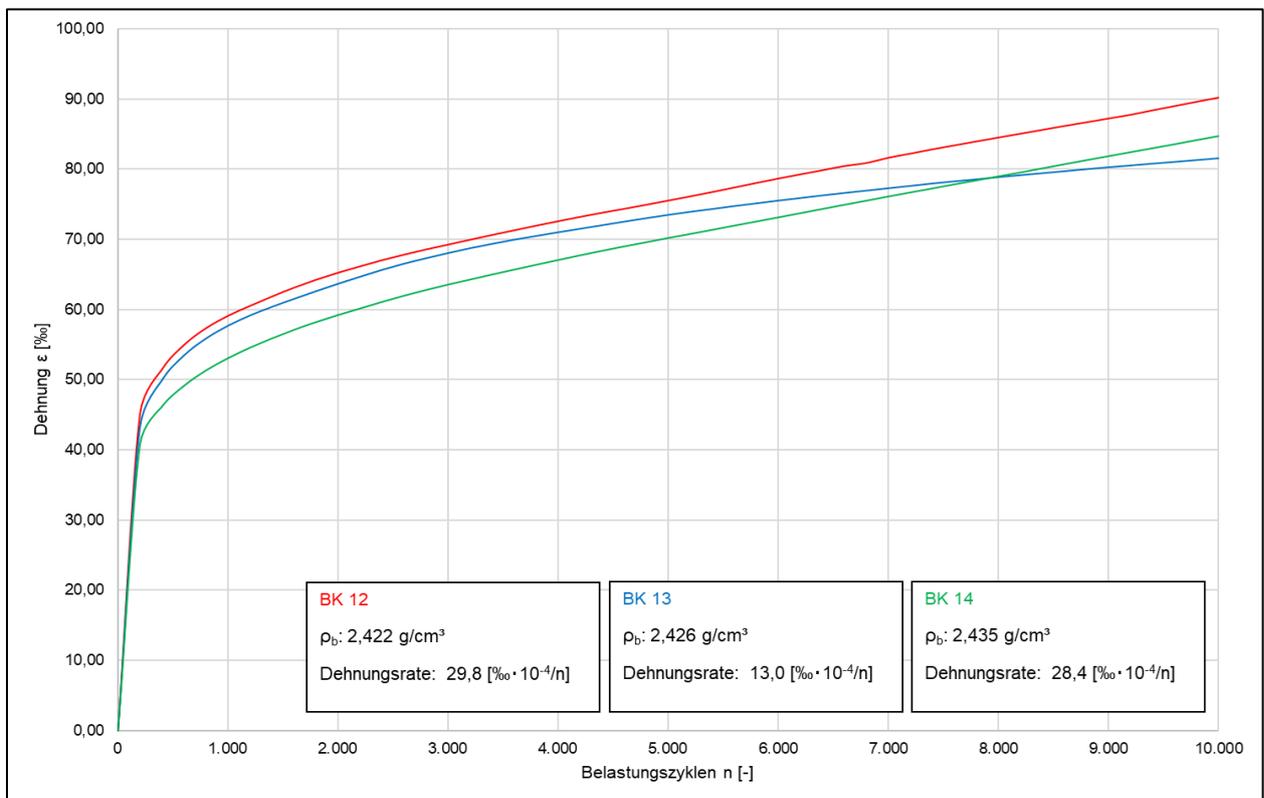


Bild 4-31: Bleibende Verformungen im Einaxialen Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Binderschicht A10 Berliner Ring

Wie in Bild 4-30 zu erkennen ist, weisen zwei Bohrkern der Systemprobekörper aus Deck- und Binderschicht eine lineare Verformungszunahme auf. Die Ausbauproben aus der Binderschicht (Bild 4-31) zeigen ähnliche Dehnung auf, haben aber eine geringe Dehnungsrate nach 10.000 Belastungszyklen. Sowohl bei den Systemprobekörpern als auch den Bohrkernen der Asphaltbinderschicht ist eine zu große Spannweite der Einzelmesswerte festzustellen. Die kritische Spannweite nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] wird in beiden Fällen überschritten. Aufgrund der beschränkten Anzahl von Ausbauproben im Rahmen der Untersuchung der Praxisstrecken ist die Prüfung eines weiteren Bohrkerns nicht möglich gewesen.

Die Bestimmung des Verformungsverhaltens der Asphaltdeckschicht wurde zusätzlich mit dem Dynamischen Stempelleindringversuch, mit und ohne Querdehnungsbehinderung, durchgeführt. Die Prüfungen der Bohrkern fand an der tatsächlichen Dicke der Schicht statt. Die Ergebnisse sind in grafischer Form in Bild 4-32 dargestellt.

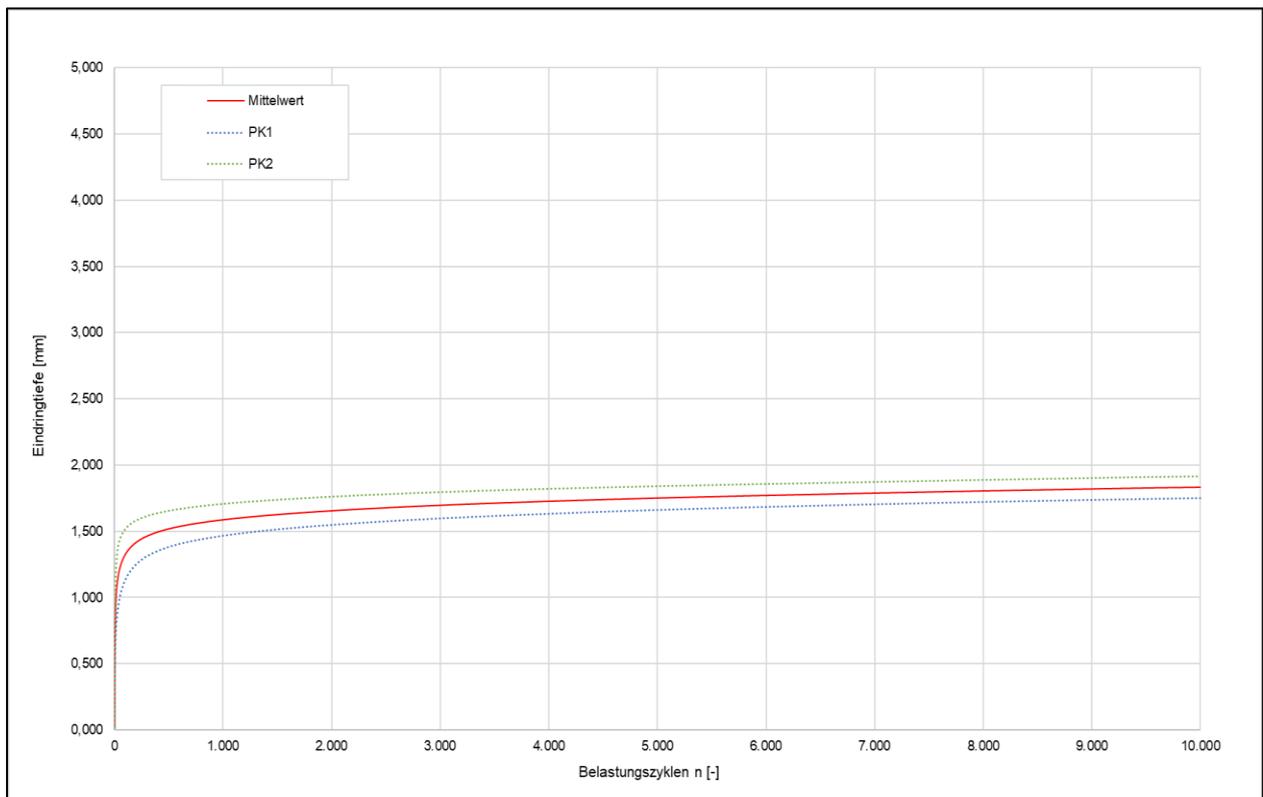


Bild 4-32: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempelleindringversuch - Verformungsverlauf A10 Berliner Ring

Die dynamische Eindringtiefe, als Mittelwert aus zwei Einzelwerten, beträgt nach 10.000 Belastungszyklen 1,837 mm. Das Abbruchkriterium von 5 mm und die nach Prüfvorschrift geforderte kritische Spannweite, die mit 30 % vom Mittelwert anzunehmen ist, werden nicht überschritten.

4.2.2 B51 Olzheim – Strecke B

In den Jahren 2016 und 2017 wurde im Rahmen einer grundhaften Erneuerung der Bundesstraße 51 im Bereich Olzheim/Brühlborn (Station 2+758 bis Station 5+834) u.a. eine Asphaltdecke, bestehend aus einem Asphaltbinder AC 16 B S und einer Splittmastixdeckschicht SMA 8 S eingebaut. Für die Asphaltdecke wurden zwei unterschiedliche Varianten verwendet. An den Entnahmestellen ES 1 und ES 2 wurde ein Additive zur Verbesserung der Verdichtbarkeit eingesetzt und an der Entnahmestelle ES 3 erfolgte ein Einbau ohne Additiv und ansonsten gleicher Zusammensetzung. Im Rahmen des Ortstermins wurden Bohrkern zur Bestimmung des Verformungsverhaltens an allen drei Stellen (ES1 bis ES3) entnommen. Für die Entnahmestellen wurden Bereiche ausgewählt, an denen bisher keine nennenswerte Verkehrsbelastung auftrat (zwischen oder neben den Radrollspuren). Die Schichtdicken der Bohrkern und die zugehörigen Raumdichten sind in Tab. 4-9 aufgelistet. Die Bilder der Bohrkern können dem Anhang entnommen werden.

	Probe	Ø [mm]	Dicke Deckschicht [cm]	Dicke Binderschicht [cm]	Raumdichte [g/cm ³]	
					Deckschicht	Binderschicht
ES 1	1-1	100	3,3	8,5	2,496	2,623
	1-2		3,5	8,5	2,494	2,632
	1-3		3,5	8,6	2,488	2,621
	1-4	200	3,4	8,5	2,428	2,671
	1-5		3,4	8,6	2,418	2,671
ES 2	2-1	100	3,1	8,5	2,537	2,629
	2-2		3,2	8,5	2,543	2,616
	2-3		3,2	8,5	2,549	2,619
	2-4	200	3,3	8,3	2,456	2,699
	2-5		3,2	8,4	2,436	2,709
ES 3	3-1	100	3,2	8,0	2,580	2,665
	3-2		3,2	7,9	2,569	2,605
	3-3		3,3	8,1	2,569	2,640
	3-4	200	3,3	8,0	2,514	2,672
	3-5		3,3	8,0	2,520	2,675

Tab. 4-9: Schichtdicken und Raumdichten der entnommenen Bohrkern Olzheim B51

Die Ergebnisse der Extraktion zur Bestimmung der Bindemittleigenschaften und Korngrößenverteilung sind in Tab. 4-10 aufgeführt.

Kornklasse [mm]	Siebdurchgang [M.-%]					
	Asphaltdeckschicht			Asphaltbinderschicht		
	ES 1	ES 2	ES 3	ES 1	ES 2	ES 3
Füller < 0,063	10,7	11,2	10,6	6,7	6,7	7,5
0,125	12,6	13,4	12,1	8,0	7,9	8,9
2,0	28,6	29,0	27,6	25,7	28,9	34,8
5,6	57,3	59,7	55,2	48,7	51,0	55,6
8,0	94,7	95,3	95,	61,9	63,2	66,6
11,2	100,0	100,0	100,0	77,3	78,5	82,0
16,0		-		99,1	98,6	99,2
22,4		-		100,0	100,0	100,0
Bindemittelgehalt [M.-%]	7,4	7,5	7,2	4,8	4,9	5,0

Tab. 4-10: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten (ES1 bis ES3) B51

Die Messung der Spurrinntiefen an den drei Entnahmestellen ergab Werte von 4,5 bis 7,8 mm (ES1), 3,7 bis 6,0 mm (ES2) und 2,4 bis 4,4 mm (ES3).

Die Zustandswerte für die Spurrinntiefe aus den ZEB-Daten von 2019 ergeben sich zu 2,62 für die erste, 2,35 für die zweite und 1,9 für die dritte Entnahmestelle. Damit wiesen zum Zeitpunkt der ZEB alle Streckenabschnitte einen guten bis sehr guten Streckenzustand auf.

Ergebnisse der Verformungsuntersuchungen

Die Ergebnisse der Verformungsuntersuchungen sind in Bild 4-33 bis Bild 4-35 dargestellt. Die Diagramme zeigen die mittleren Verläufe der Dreifachbestimmungen im Einaxialen Druck-Schwellversuch und der Doppelbestimmungen im dynamischen Stempeleindringversuch, der jeweils nur ohne seitlichen Stützring durchgeführt wurde. Die Ausbauproben an ES 1 und 2 weisen eine starke Verformung zu Beginn des Versuches auf und ähnlich hohe Dehnungsraten im Wendepunkt. Bei allen additivierten Deckschicht-Probekörpern (ES1 und ES2) konnte eine beginnende und zum Teil vollständige Gefügezerstörung beobachtet werden (siehe Anhang; Bild A-18). Die Dehnungsraten des Referenzabschnittes dagegen sind sowohl für die Asphaltdeck- als auch die Asphaltbinderschicht weitaus geringer und liegen auf gleichem Niveau bei ungefähr $5 \text{‰} \cdot 10^4/n$. Es liegt kein Wendepunkt vor und eine fortschreitende Gefügezerstörung konnte während der Messung nicht festgestellt werden. Die Untersuchungen mittels des dynamischen Stempeleindringversuches wurden – entsprechend der Technischen Prüfvorschrift - an der tatsächlichen Schichtdicke der Deckschicht durchgeführt. Die Eindringtiefe für die ersten beiden Entnahmestellen steigt zu Beginn des Versuchs deutlich an und erhöht sich zum Versuchsende auf einen Absolutwert von 3,3 mm und 3,4 mm. Die dynamische Eindringtiefe der Referenzstrecke ist deutlich geringer. Bei allen Varianten liegt die Eindringtiefe unterhalb des Abbruchkriteriums von 5 mm nach 10.000 Belastungszyklen und kann somit direkt abgelesen werden.

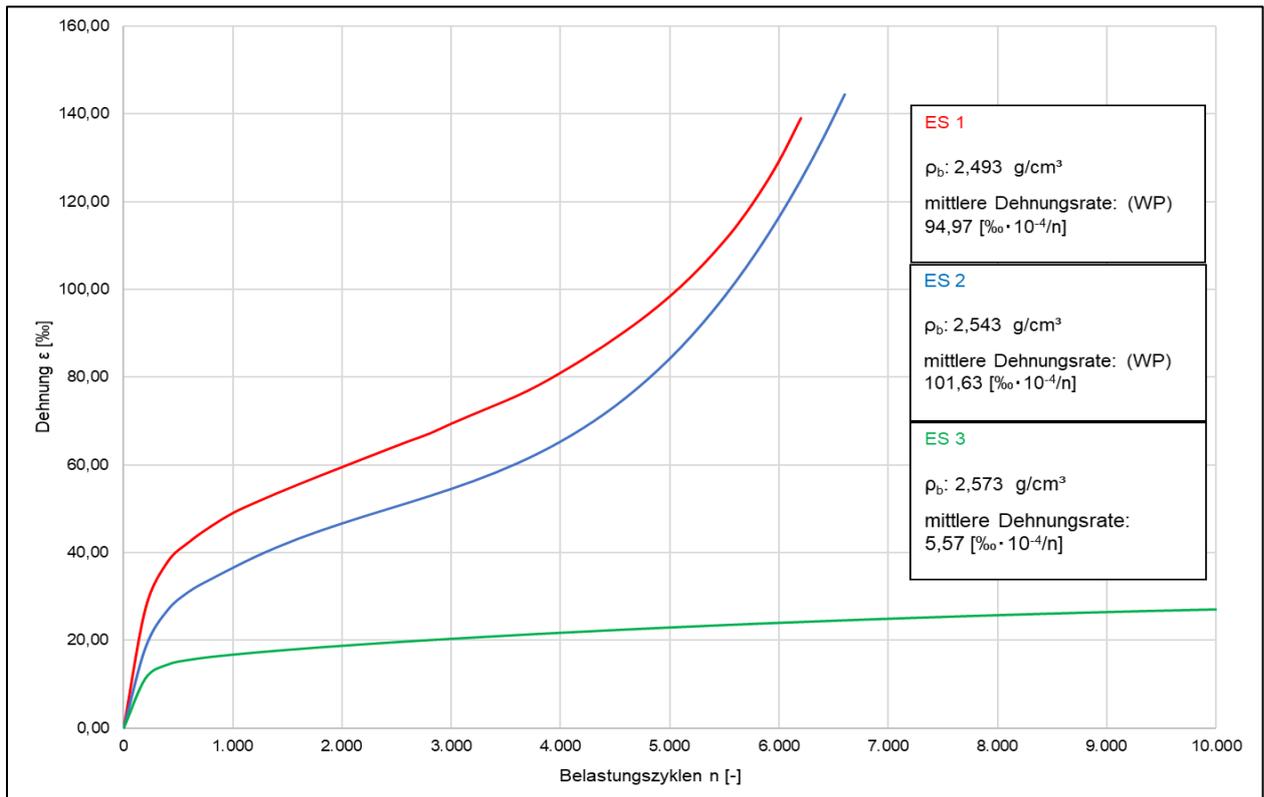


Bild 4-33: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Deckschicht B51 Olzheim

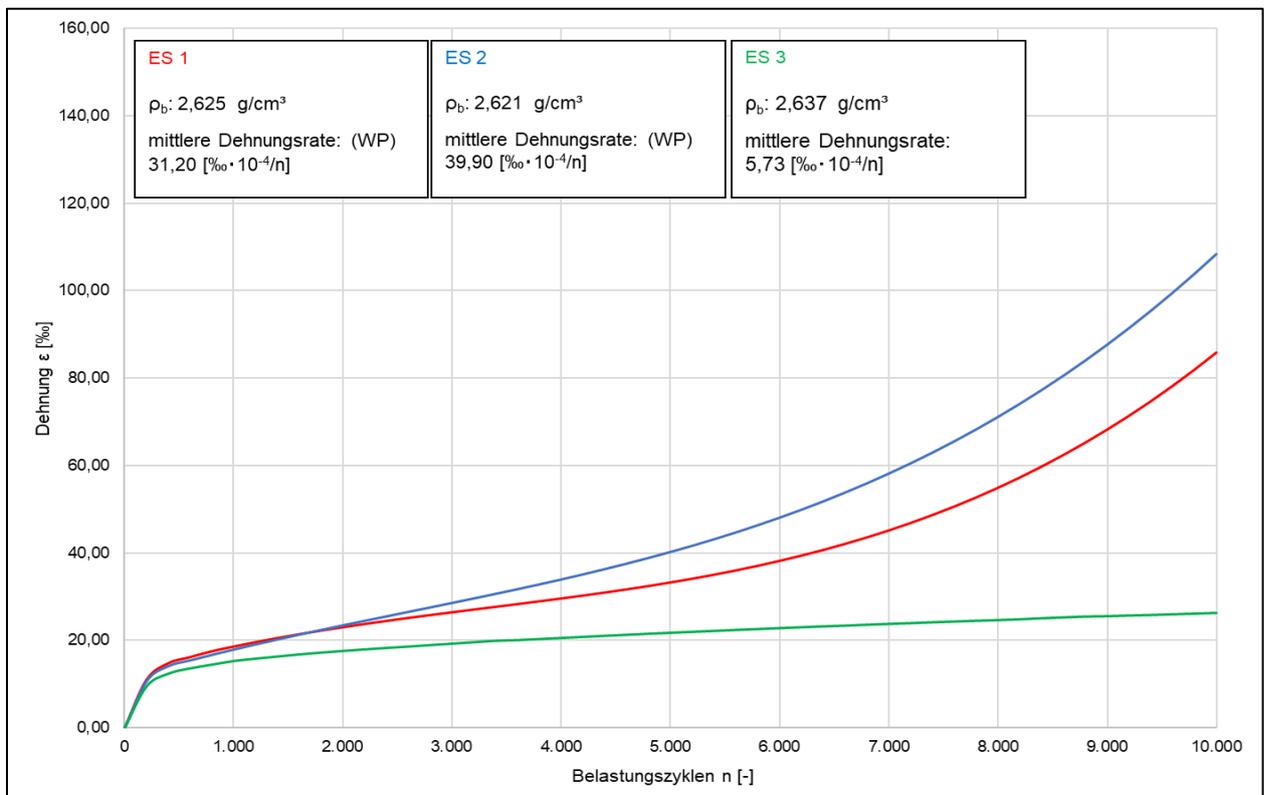


Bild 4-34: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Binderschicht B51 Olzheim

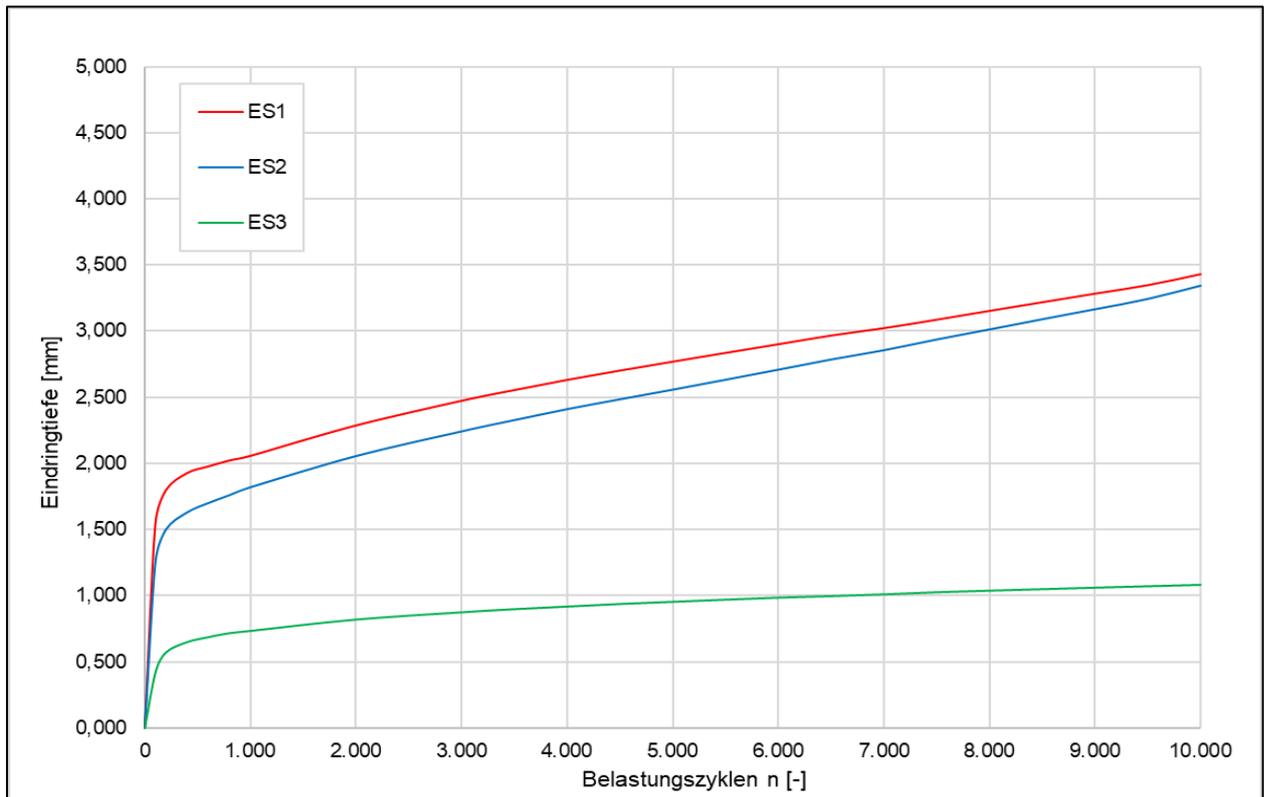


Bild 4-35: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempel Eindringversuch - Verformungsverlauf B51 Olzheim

Für die Beprobung der B51 in Olzheim wurde nur eine maximale Entnahme von fünf Bohrkernen je Entnahmestelle genehmigt. Daher reduzierte sich die Herstellung der MPKs auf einen Probekörper pro Entnahmestelle. Die Durchführung einer Dreifachbestimmung mit dem Einaxialen Druck-Schwellversuch für die Marshall-Probekörper war für diese Praxisstrecke somit nicht ausführbar. Die Ergebnisse der Einzelmessung sind in Bild 4-36 dargestellt.

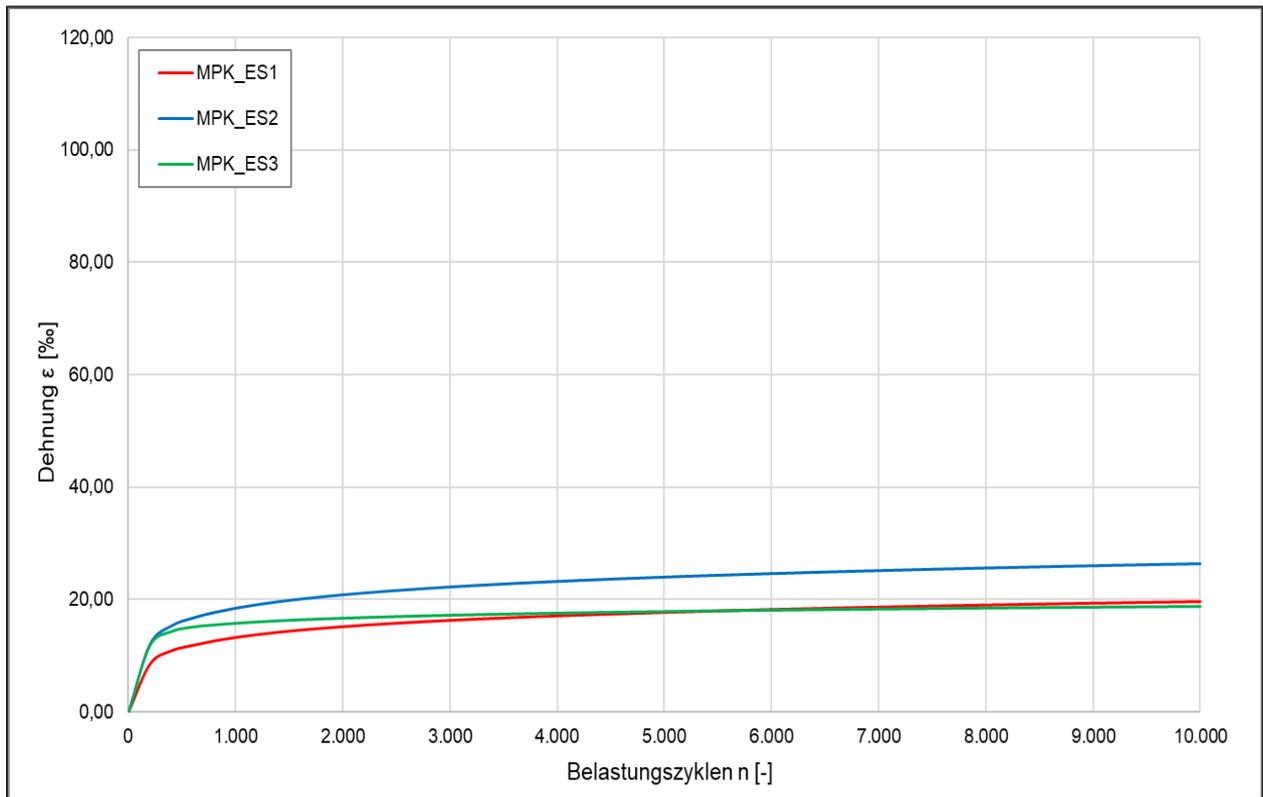


Bild 4-36: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Deckschicht (MPK) B51 Olzheim

4.2.3 B54 Münster / Ochtrup – Strecke C und D

Ein weiterer Straßenabschnitt, bei der die Asphaltdeck- und die Asphaltbinderschicht untersucht werden konnten, lag auf der B54 bei Ochtrup (nahe Münster). Die erste Entnahmestelle (ES1) befindet sich in Fahrtrichtung Steinfurt bei Abschnitt 150,1 und weist eine SMA 8 S Deckschicht und eine AC 16 B S Binderschicht auf. Die bundesweite Zustandserfassung und -bewertung 2019 ergab für den betrachteten Abschnitt einen Zustandswert für die Spurrinntiefe von 2,07 und somit einen guten Straßenzustand. Dies bestätigt auch die Sichtung des Streckenabschnittes im Jahr 2023. Dort konnten keine signifikanten Spurrinntiefen gemessen werden. Die zweite Entnahmestelle (ES2) befindet sich ebenfalls in Fahrtrichtung Steinfurt in Abschnitt 158,0. Dort wurde eine Splittmastixdeckschicht (SMA 11 S) und eine Asphaltbinderschicht (AC 22 B S) beprobt. Auch hier konnten ebenfalls keine Spurrinnen identifiziert werden. Der Zustandswert der Spurrinntiefe aus den ZEB-Daten beträgt 1,65 und weist damit auf einen sehr guten Straßenzustand hin. Die Raumdichten, die Asphaltrohdichten und die Hohlraumgehalte der geprüften Bohrkerns sind Tab. 4-11 zu entnehmen. Die Extraktion des Asphaltmischgutes ergab die in Tab. 4-12 zusammengestellten Ergebnisse.

		Probe	Ø [mm]	Höhe [mm]	Raum-dichte [g/cm³]	Asphalt-rohdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
ES 1	Deckschicht	1	200	32,2	2,460	2,517	2,3
		2		36,1	2,471		1,8
		3		33,7	2,448		2,7
		4		34,2	2,461		2,2
		5		32,4	2,447		2,8
		6		33,5	2,450		2,7
	(Systemprobekörper) DS+BS	1-6	100	61,3	2,366	-	-
		1-7		61,4	2,372		-
		1-8		61,2	2,360		-
	Binderschicht	1-1	100	-	2,316	2,451	5,5
		1-2		-	2,322		5,3
		1-3		-	2,319		5,4
ES 2	Deckschicht	1	200	37,7	2,691	2,701	0,4
		2		37,1	2,691		0,4
		3		36,4	2,700		0,1
		4		35,5	2,697		0,2
		5		39,6	2,692		0,3
		6		34,9	2,696		0,2
	(Systemprobekörper) DS+BS	2-6	100	60,7	2,611	-	-
		2-7		61,0	2,619		-
		2-8		61,0	2,616		-
	Binderschicht	2-3	100	-	2,530	2,570	1,6
		2-4		-	2,533		1,4
		2-5		-	2,520		2,0

Tab. 4-11: Raumdichten der Bohrkerns sowie Asphaltrohdichte und Hohlraumgehalte der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten B54 Münster/Ochtrup

Kornklasse [mm]	Siebdurchgang [M.-%]			
	Asphaltdeckschicht		Asphaltbinderschicht	
	ES 1	ES 2	ES 1	ES 2
Füller < 0,063	12,6	10,2	9,5	8,7
0,125	14,4	11,4	10,9	11,3
2,0	28,8	30,0	28,5	35,5
5,6	53,8	47,6	47,9	46,6
8,0	94,1	67,8	59,5	56,5
11,2	100,0	98,7	75,4	67,9
16,0	-	100,0	99,0	82,6
22,4	-	-	100,0	99,2
31,5	-	-	-	100,0
Bindemittelgehalt [M.-%]	7,24	6,59	5,73	4,33

Tab. 4-12: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B54 Münster/Ochtrup

Ergebnisse der Verformungsuntersuchungen

Die aus dem Einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Ergebnisse ergaben, jeweils für die Dreifachbestimmungen, verträgliche Werte. Die kritische Spannweite wurde bei keiner Variante überschritten. Die in Bild 4-37 dargestellten Verläufe der Impulskriechkurven fassen somit die gemittelten Werte der Dreifachbestimmungen zusammen. Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind dem Anhang zu entnehmen. Die Asphaltbinderschicht (AC 16 B S) an ES1 weist einen eher geringen Verformungswiderstand auf, während die Binderschicht an ES2 (AC 22 B S) durch einen hohen Verformungswiderstand gekennzeichnet ist. Das Niveau der Dehnung und Dehnungsrate der Asphaltdeckschicht aus der zweiten Entnahmestelle (SMA 11 S) liegt deutlich unter dem der Asphaltdeckschicht aus Entnahmestelle 1 (SMA 8 S).

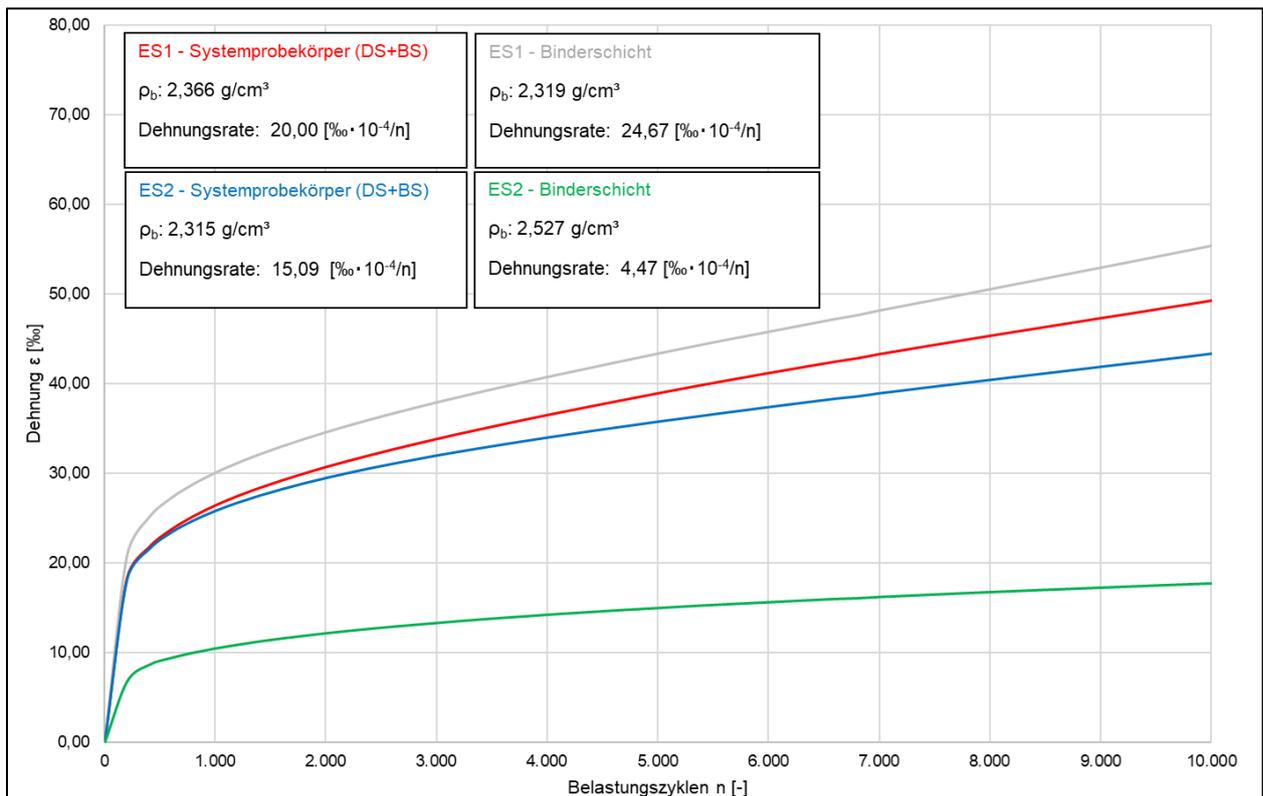


Bild 4-37: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Bohrkern B54 Münster/Ochtrup

Zur weitergehenden Untersuchung wurden aus den Asphaltmischgütern Marshall-Probekörper im Labor hergestellt. Die wichtigsten Kenndaten können der Tab. 4-13 entnommen werden. Die Ergebnisse der Verformungsuntersuchungen an den MPK sind im Diagramm in Bild 4-38 grafisch dargestellt. Analog zu den Ergebnissen der Bohrkerns weist der Marshall-Probekörper der Binderschicht ES2 die geringsten Verformungswerte auf, während beide Deckschichten einen geringeren Verformungswiderstand als die Binderschicht der ersten Entnahmestelle dokumentieren.

Die Eindringtiefe, gemessen durch den dynamischen Stempelversuch, liegt für alle vier betrachteten Varianten auf einem ähnlichen Niveau (Bild 4-39). Es wird deutlich, dass die Versuche mit Stützring eine minimal geringere Eindringtiefe vorweisen.

MPK		Probe	Höhe [mm] (ungeschliffen)	Raumdichte [g/cm ³]	Asphalt- rohdichte [g/cm ³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
ES 1	Deckschicht	1-1	63,4	2,455	2,517	2,4
		1-2	63,1	2,455		2,5
		1-3	63,8	2,463		2,2
	Binderschicht	1-1	69,0	2,312	2,451	5,7
		1-2	66,7	2,326		5,1
		1-3	68,1	2,330		5,0
ES 2	Deckschicht	2-3	60,9	2,700	2,701	0,1
		2-4	60,7	2,694		0,3
		2-5	61,4	2,678		0,8
	Binderschicht	2-1	64,8	2,463	2,570	4,2
		2-2	65,2	2,460		4,3
		2-3	65,5	2,462		4,2

Tab. 4-13: Raumdichten der Marshall-Probekörper aus Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtmaterial B54 Münster/Ochtrup

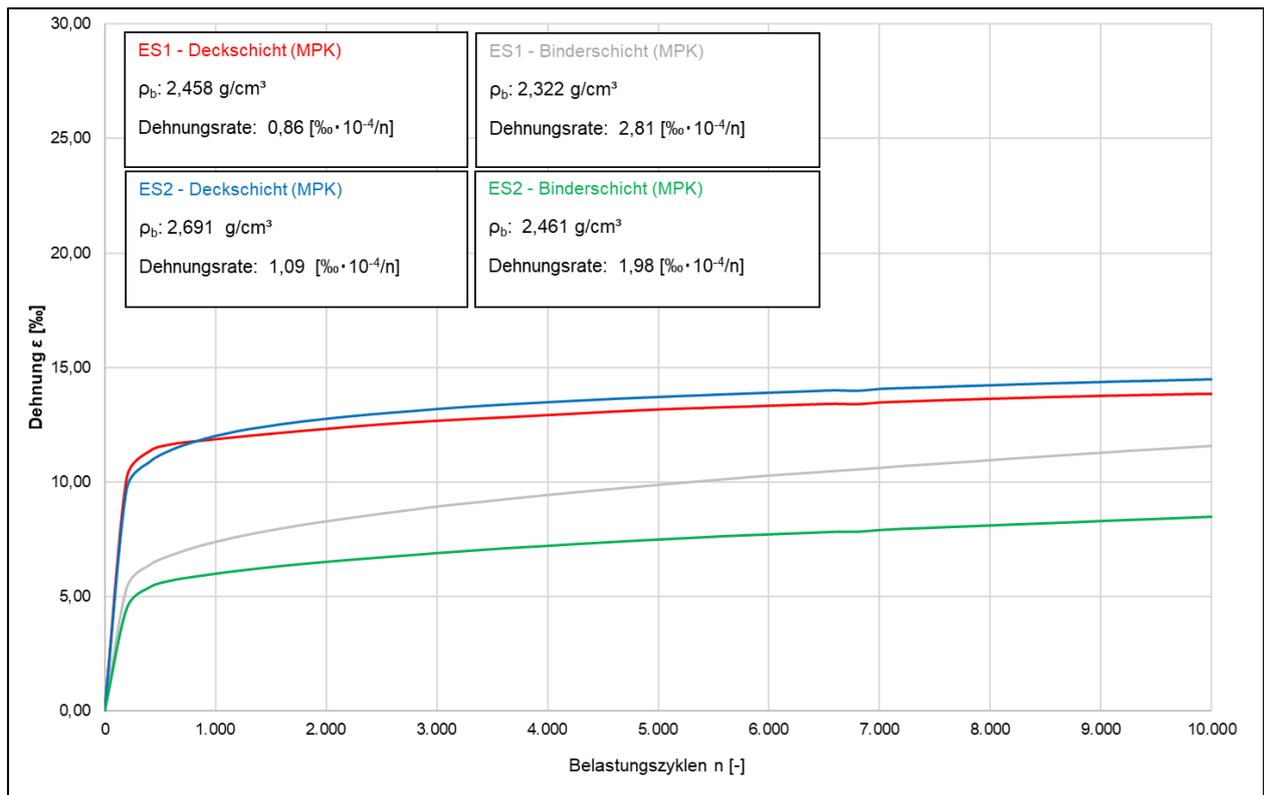


Bild 4-38: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven MPK B54 Münster/Ochtrup (Mittelwerte)

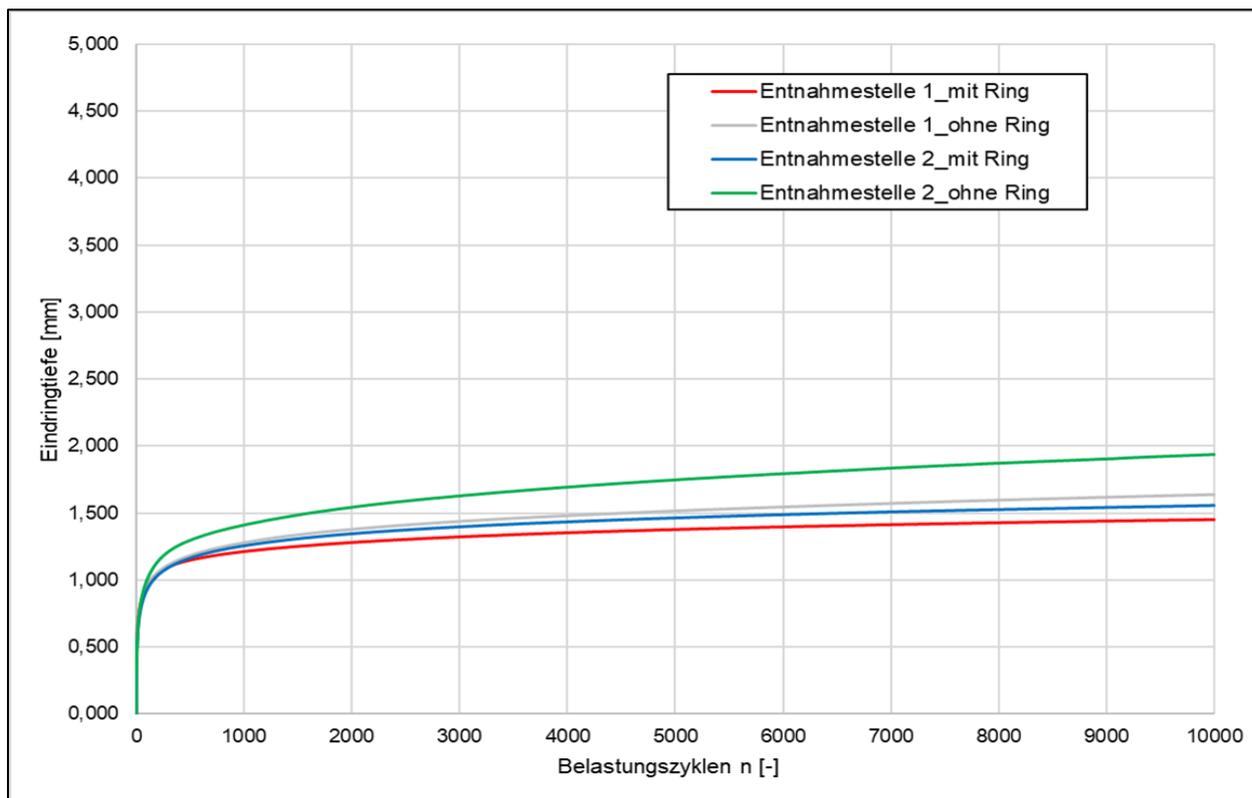


Bild 4-39: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempelleindringversuch - Verformungsverlauf B54 Münster/Ochtrup

4.2.4 B50 Hunsrück – Strecke E

Im Juni 2023 erfolgte die Bohrkernentnahme auf der B50 zwischen Niedersohren und Kirchberg (Hunsrück). Die Entnahmestelle befindet sich zwischen Streckenkilometer 0,950 und 1,010. Bei der Deckschicht handelt es sich um einen Splittmastixasphalt (SMA 8 S). Die Binderschicht besteht aus einem AC 16 B S. An der betrachteten Stelle konnten Spurrinntiefen von 0 mm bis maximal 5 mm festgestellt werden. Laut ZEB-Daten liegt der Streckenabschnitt mit einem Zustandswert für die Spurrinntiefe von 1,7 im Bereich eines guten Straßenzustandes. Die Bilder der Entnahmestelle und Bohrkerns können dem Anhang entnommen werden (Bild A-19). Die Korngrößenverteilung der beiden Asphalt-schichten, ermittelt durch Siebung des Mischguts nach Extraktion, kann Tab. 4-14 entnommen werden. Weitere Kennwerte der Bohrkerns und der Schichten der Bohrkerns sind in Tab. 4-15 aufgeführt.

Kornklasse [mm]	Siebdurchgang [M.-%]	
	Asphaltdeckschicht	Asphaltbinderschicht
Füller < 0,063	12,4	7,2
0,125	14,7	9,8
2,0	28,2	30,3
5,6	61,0	47,3
8,0	96,0	61,3
11,2	99,9	100,0
16,0	100,0	-
Bindemittelgehalt [M.-%]	7,6	5,3

Tab. 4-14: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B50 Hunsrück

	Probe	Ø [mm]	Höhe [mm]	Raumdichte [g/cm³]	Asphalt- rohddichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
(Systemprobekörper) DS+BS	1	100	61,4	2,361	-	-
	2		62,2	2,362		-
	3		61,9	2,361		-
Binderschicht	1	100	61,4	2,407	2,447	1,7
	2		61,1	2,403		1,8
	3		60,4	2,400		1,9
Deckschicht	1	200	33,1	2,338	2,391	2,2
	2		34,7	2,319		3,0
	4		32,4	2,325		2,8
	5		32,7	2,330		2,6
Deckschicht (MPK)	4	101,6	60,2	2,342		2,1
	5		60,1	2,338		2,2
	6		60,2	2,347	1,9	

Tab. 4-15: Raumdichten der Bohrkerns sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der verschiedenen Schichten B50 Hunsrück

Die Ergebnisse der Untersuchungen mittels Einaxialem Druck-Schwellversuch nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] sind dem Bild 4-40 zu entnehmen. Dargestellt sind die Impulskriechkurven der untersuchten Bohrkerns als Systemprobekörper (Deck- und Binderschicht), die Bohrkerns der Asphaltbinderschicht und die aus dem Deckschichtmaterial hergestellten Marshall-Probekörper. Dehnungen und Dehnungsraten werden als gemittelte Werte aus der Dreifachbestimmung dargestellt. Die Dehnungsrate der Systemprobekörper aus Deck- und Binderschicht weist die höchsten Werte auf, während die Dehnungsrate der Binderschicht auf einem mittleren Niveau liegt und die Marshall-Probekörper die geringsten Dehnungsraten zeigten. Die Bestimmung des Verformungsverhaltens der Asphaltdeckschicht wurde zusätzlich mit dem Dynamischen Stempeleindringversuch durchgeführt. Die Ergebnisse sind in grafischer Form in Bild 4-41 dargestellt. Die Variante mit Querdehnungsbehinderung weist eine Eindringtiefe von 1,06 mm nach 10.000 Belastungszyklen auf. Die Eindringtiefe der Variante ohne Querdehnungsbehinderung liegt bei 1,70 mm.

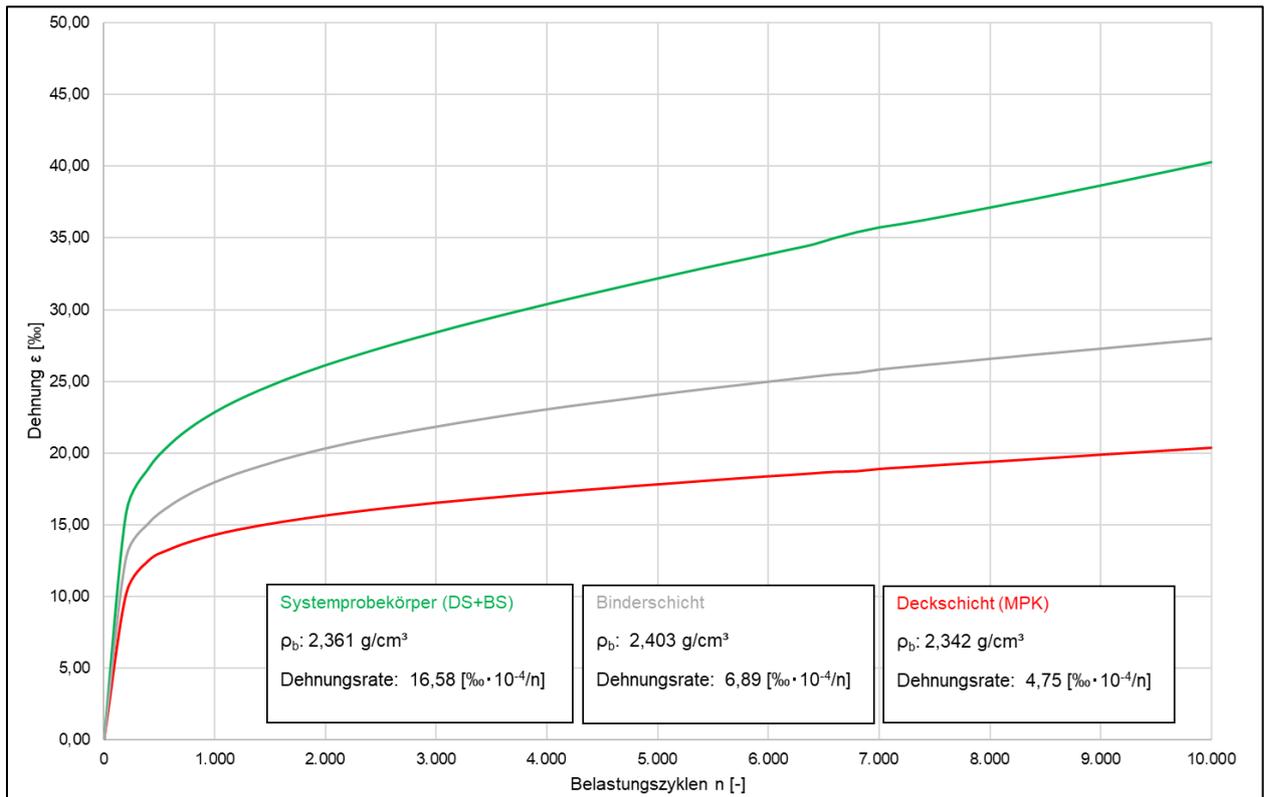


Bild 4-40: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven B50 Hunsrück (Mittelwerte)

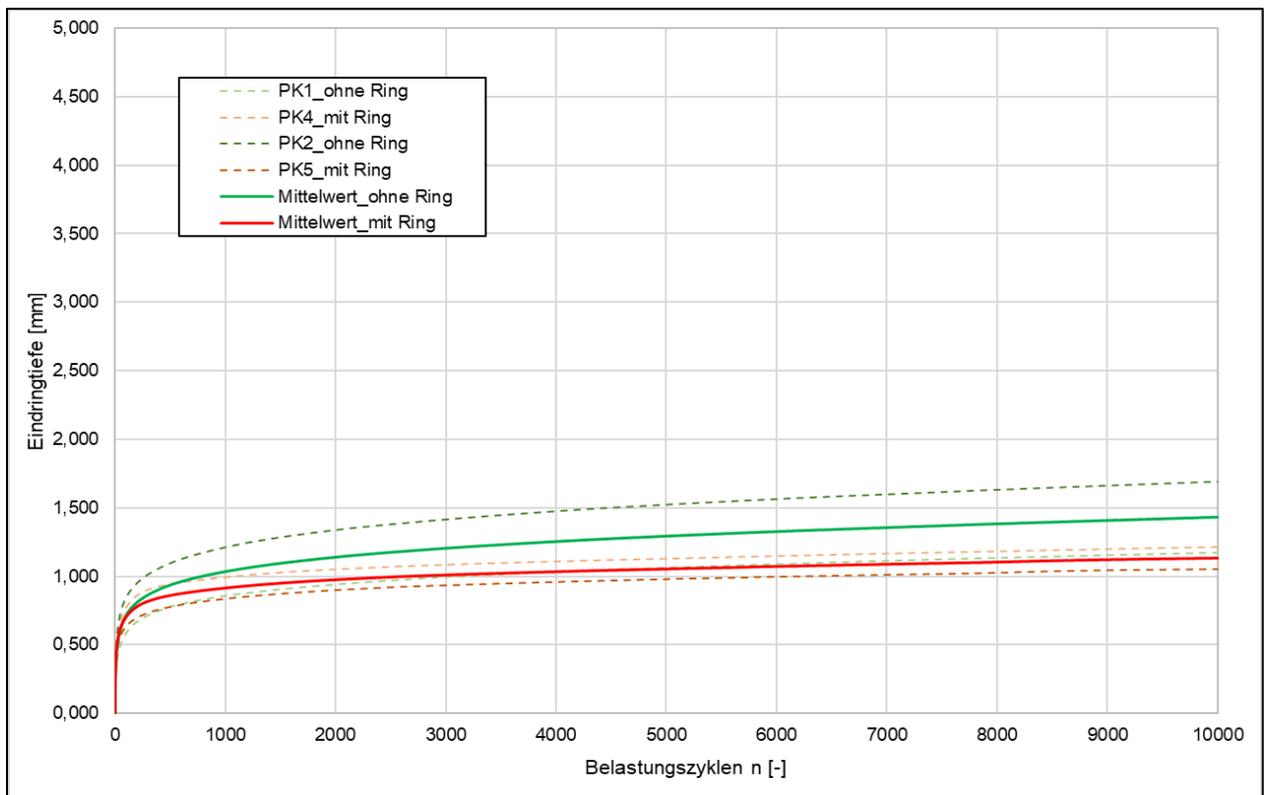


Bild 4-41: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempleindringversuch - Verformungsverlauf B50 Hunsrück

4.2.5 B226 Witten – Strecke F

Im Rahmen einer Deckenerneuerung konnte im Juni 2023 ein Streckenabschnitt auf der B226 beprobt werden. Die Entnahmestelle befand sich auf der B226 in Witten bei Station 0+400 in Stationierungsrichtung links. An dieser Stelle besteht die Deckschicht aus einem SMA 8 S und die Binderschicht aus einem AC 22 B S. Der Zustandswert für die Spurrinntiefe aus den ZEB-Daten ergibt sich zu 2,12. An der Entnahmestelle konnten jedoch keine Spurrinntiefen gemessen werden. Insgesamt wurden sieben Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm und fünf Bohrkern mit einem Durchmesser von 200 mm entnommen. Die nicht für die Verformungsuntersuchungen genutzten Bohrkern wurden gesägt und die Mischgüter der Deck- und Binderschicht extrahiert. Die Ergebnisse der Extraktion sind in Tab. 4-16 zusammengefasst. Der Bindemittelgehalt der Asphaltdeckschicht betrug 7,1 M.-% und der der Asphaltbinderschicht 3,9 M.-%.

Kornklasse [mm]	Siebdurchgang [M.-%]	
	Asphaltdeckschicht	Asphaltbinderschicht
Füller < 0,063	12,5	5,7
0,125	14,2	6,9
2,0	30,3	25,2
5,6	54,3	35,8
8,0	95,4	45,1
11,2	100,0	55,8
16,0	-	71,3
22,4	-	96,1
31,5	-	100,0

Tab. 4-16: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B226 Witten

	Probe	Ø [mm]	Höhe [mm]	Raumdichte [g/cm³]	Asphaltrohddichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
(Systemprobekörper) DS+BS	1	100	60	2,307	-	-
	2		60	2,301		-
	3		60,3	2,307		-
Binderschicht	1	100	60	2,378	2,512	5,3
	2		59,7	2,350		6,4
	3		59,9	2,380		5,2
Deckschicht	1	200	35,9	2,326	2,436	4,5
	2		34,2	2,345		3,7
	3		37,4	2,339		4,0
	4		34,8	2,345		3,7
Deckschicht (MPK)	1	101,6	60,1	2,354		1,4
	2		60,2	2,352		1,2
	3		60,0	2,348		1,4

Tab. 4-17: Raumdichten der Bohrkern sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der verschiedenen Schichten B226 Witten

Tab. 4-17 fasst die Höhen, Raumdichten und Hohlraumgehalte der Probekörper zusammen. Die Asphaltrohddichte der jeweiligen Schicht ist ebenfalls angegeben. Die geringe Höhe der Probekörper mit einem Durchmesser von 200 mm ergibt sich aus der tatsächlichen Schichtdicke der Deckschicht. Die Bestimmung des Verformungsverhaltens der Asphaltdeckschicht und der Asphaltbinderschicht hat die in Bild 4-42 dargestellten Ergebnisse ergeben.

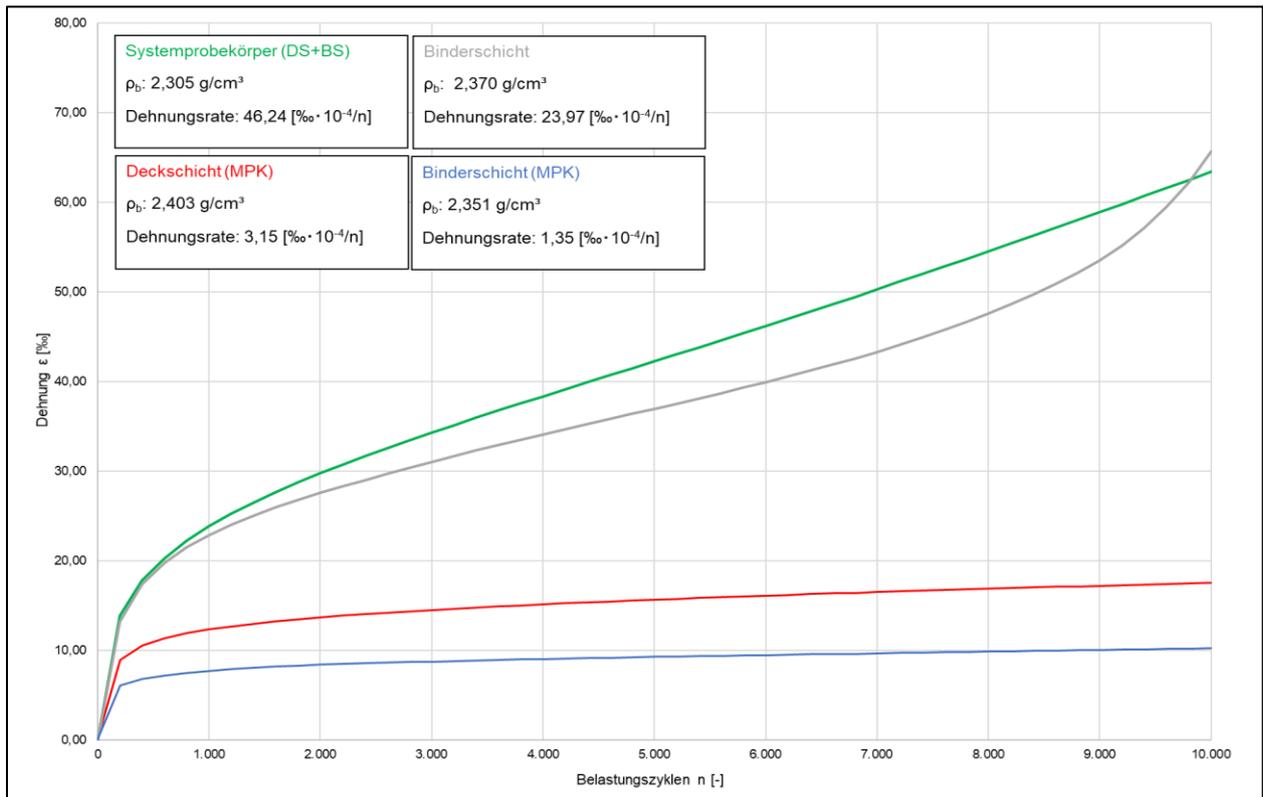


Bild 4-42: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven B226 Witten

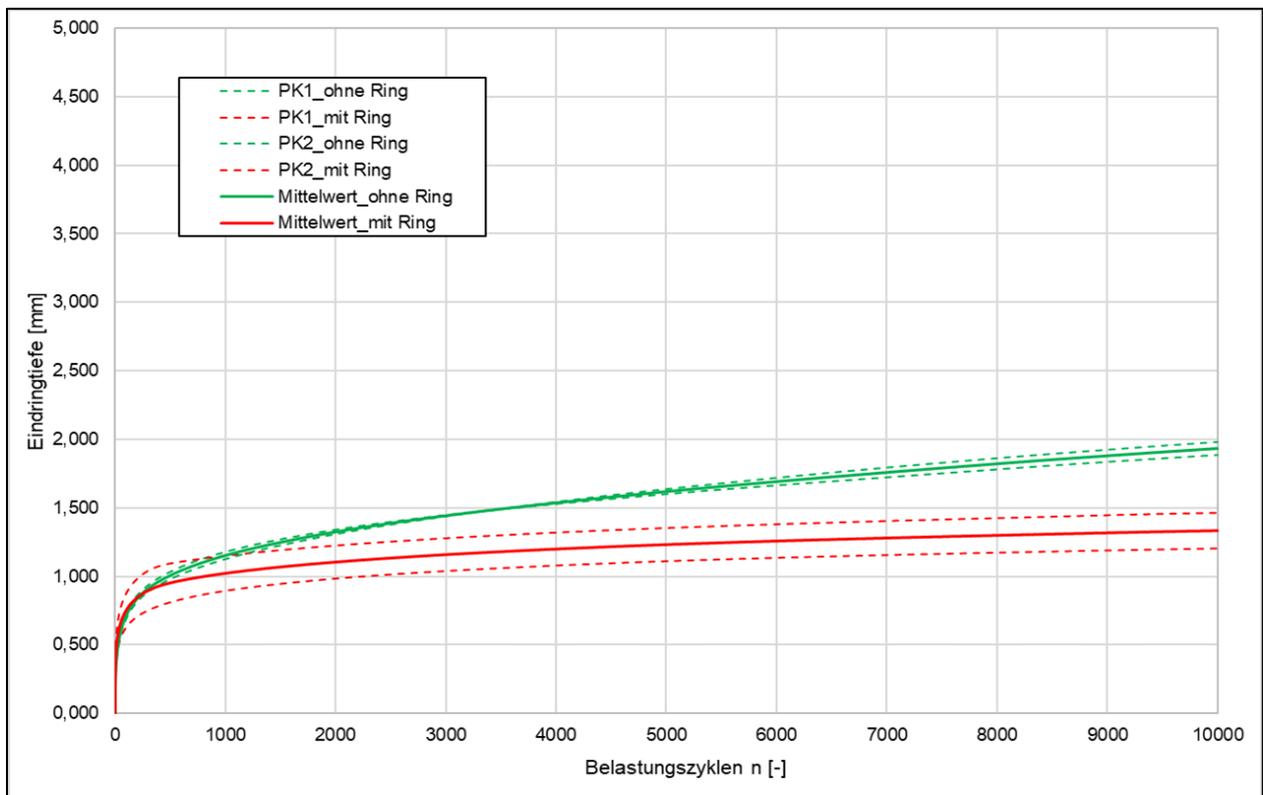


Bild 4-43: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempel Eindringversuch - Verformungsverlauf B226 Witten

Die Impulskriechkurven zeigen für die Untersuchungen an den Marshall-Probekörpern typische Verläufe. Die Varianten der Systemprobekörper weisen linear ansteigende Impulskriechkurven auf. Die Ergebnisse der Dreifachbestimmung von Deckschicht und Binderschicht (BK) sind nicht verträglich. Die tabellarische Darstellung der Ergebnisse der Einzeluntersuchungen können dem Anhang entnommen werden.

Die Bestimmung des Verformungsverhaltens der Asphaltdeckschicht wurde zusätzlich mit dem Dynamischen Stempeleindringversuch durchgeführt (Bild 4-43). Die mittlere Eindringtiefe für die Varianten mit Stützring liegt bei 1,30 mm, für die Varianten ohne Stützring bei 1,94 mm.

4.2.6 Hüllerstraße Gelsenkirchen – Strecke G

Mit der Hüllerstraße in Gelsenkirchen konnte eine weitere Strecke zur Beprobung akquiriert werden. Die Asphaltdeckschicht bestand in diesem Fall aus einem Asphaltbeton (AC 8 D S). Die Entnahme der Bohrkern erfolgte kurz vor einer Einmündung (ES1) und im Bereich einer Abbiegung (ES2). Insgesamt konnten so alle nötigen Bohrkern für die Untersuchung mit den unterschiedlichen Prüfmethode gewonnen werden. An der Entnahmestelle ES1 wurden zusätzlich Bohrkern mit einem Durchmesser von 200 mm entnommen, um das Verformungsverhalten mit dem dynamischen Stempeleindringversuch an der tatsächlichen Schichtdicke zu untersuchen. An beiden Entnahmestellen konnten keine Spurrinnentiefen detektiert werden. Für die Innerortsstraße liegen keine ZEB-Daten vor. Bilder der Entnahmestelle und der Bohrkern können dem Anhang entnommen werden (Bild A-20). Die Extraktion der Asphaltmischgüter ergab die in Tab. 4-18 zusammengefassten Korngrößenverteilungen. Der Bindemittelgehalt liegt für die Deckschicht aus ES1 bei 6,3 M.-%, für die Deckschicht aus ES2 bei 6,4 M.-% und für die Binderschicht bei 4,3 M.-%. Eine Betrachtung der Korngrößenverteilung ergab für die beiden Decksichten eine Zuordnung in die Asphaltmischgüterart AC 8 D S (möglicherweise auch AC 8 D N oder AC 8 D L). Die Binderschicht besteht mit hoher Wahrscheinlichkeit aus einem AC 22 B S.

Kornklasse [mm]	Siebdurchgang [M.-%]		
	Asphaltdeckschicht ES1	Asphaltdeckschicht ES2	Asphaltbinderschicht ES2
Füller < 0,063	11,3	9,2	5,0
0,125	13,6	10,6	6,0
2,0	50,4	45,6	33,6
5,6	79,8	81,8	47,5
8,0	99,3	99,8	58,4
11,2	99,9	99,9	72,1
16,0	100,0	100,0	92,5
22,4	-	-	98,7
31,5	-	-	100,0

Tab. 4-18: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht Hüllerstraße Gelsenkirchen

Die Asphaltrohichte der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten sowie die Probekörperhöhen, Raumdichten und Hohlraumgehalte der untersuchten Probekörper sind in Tab. 4-19 dargestellt. Die Hohlraumgehalte der Deckschicht aus Entnahmestelle ES2 und die der MPK weisen einen sehr geringen Hohlraumgehalt auf, der den Anforderungen der [TL Asphalt-StB 07/13] nicht entspricht. Die geringen Hohlraumgehalte können allerdings auch ein Hinweis darauf sein, dass hier ein AC 8 D N/L eingebaut wurde.

	Probe	Ø [mm]	Höhe [mm]	Raumdichte [g/cm³]	Asphalt- rohdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
(Systemprobekörper) DS(ES2) + BS	1	100	61,5	2,469	-	-
	2		61,9	2,440		-
	3		62,2	2,430		-
Binderschicht (ES2)	4	100	61,0	2,377	2,523	5,8
	5		60,8	2,363		6,3
	6		60,6	2,345		7,0
Deckschicht (ES2)	1	200	37,6	2,493	2,515	0,9
	2		35,7	2,500		0,6
	3		27,1	2,494		0,8
	4		32,2	2,496		0,8
Deckschicht (ES2) (MPK)	1	101,6	59,7	2,490	2,523	1,0
	2		58,9	2,488		1,1
	3		59,1	2,494		0,9
Binderschicht (ES2) (MPK)	1	101,6	60,7	2,400	2,523	4,9
	2		60,9	2,396		5,0
	3		60,7	2,406		4,6
Deckschicht (ES1)	1	200	31,5	2,438	2,449	3,1
	2		26,7	2,445		2,8
	3		27,5	2,441		2,9
	4		34,5	2,433		3,3
Deckschicht (ES1) (MPK)	1	101,6	60,6	2,430	2,449	0,8
	2		60,7	2,433		0,6
	3		60,8	2,431		0,7

Tab. 4-19: Raumdichten der Bohrkerns sowie Asphaltrohdichte und Hohlraumgehalte der verschiedenen Schichten Hüllerstraße

Ergebnisse der Verformungsuntersuchungen

Die anhand des Einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Impulskriechkurven zur Darstellung der Verformungskennwerte können dem Bild 4-44 und Bild 4-45 entnommen werden. Die Probekörper aus ES2 (Bild 4-44) weisen bis auf eine Ausnahme Wendepunkte und eine vollständige Gefügezerstörung auf. Die Prüfung der Systemprobekörper aus Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht erreichten in jeder Einzelprüfung den Wendepunkt bereits bei 700 bis 800 Lastzyklen. Ein ähnliches Verhalten konnte auch bei den Varianten der Binderschicht festgestellt werden. Die ermittelten Werte der Dreifachbestimmung sind in diesem Fall nicht verträglich. Die kritische Spannweite wird um ein Vielfaches überschritten. Die aus dem Deck- und Binderschichtmischgut hergestellten MPK weisen ebenfalls schlechte Verformungswerte auf. Die Dehnungsraten der Deckschichtvariante weisen eine zu hohe Spannweite auf. Aufgrund der begrenzten Anzahl an entnommenen Bohrkernen ist eine weitere Untersuchung und Herstellung von Probekörpern nicht möglich.

Da an Entnahmestelle ES1 ausschließlich Bohrkerns mit einem Durchmesser von 200 mm entnommen wurden, konnten auch nur aus diesem Mischgut der Deckschicht MPKs hergestellt und mittels Einaxialen Druck-Schwellversuch untersucht werden. Die Dehnungen und Dehnungsraten liegen auf einem ähnlichen, für MPK höherem Niveau und weisen im Gegensatz zur Entnahmestelle ES2 keine Wendepunkte auf.

Die Asphaltdeckschichten beider Entnahmestellen wurden ebenfalls mit dem dynamischen Stempelversuch untersucht. Die Ergebnisse stellt das Diagramm in Bild 4-46 grafisch dar. Die Deckschicht

aus Entnahmestelle ES1 zeigt für beide Varianten (mit und ohne Querdehnungsbehinderung) ähnliche dynamische Eindringtiefen von bis zu 2,5 mm auf. Drei von vier Probekörpern der Varianten aus Entnahmestelle ES2 weisen Eindringtiefen von bis zu 4,9 mm und einen anschließenden unplausiblen starken Abfall der Eindringtiefen auf. Eine Erklärung dafür konnte nicht gefunden werden. Ursache ist vermutlich ein Fehler in der Prüfmaschine (interner Abbruch). Die Ergebnisse können für die weitere Betrachtung demnach nicht mit einbezogen werden. Eine tabellarische Auflistung der wesentlichen Verformungskennwerte ist der Tab. 4-20 zu entnehmen.

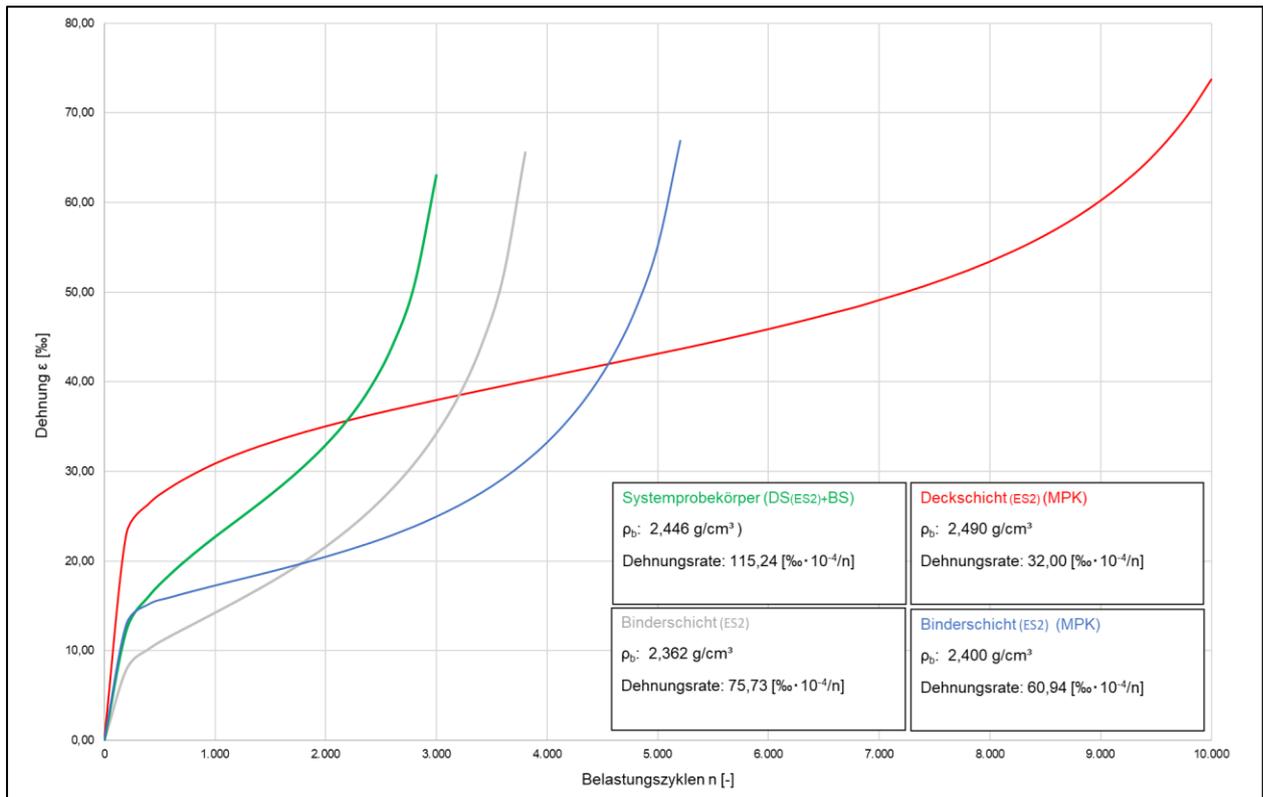


Bild 4-44: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Hüllerstraße Gelsenkirchen ES2

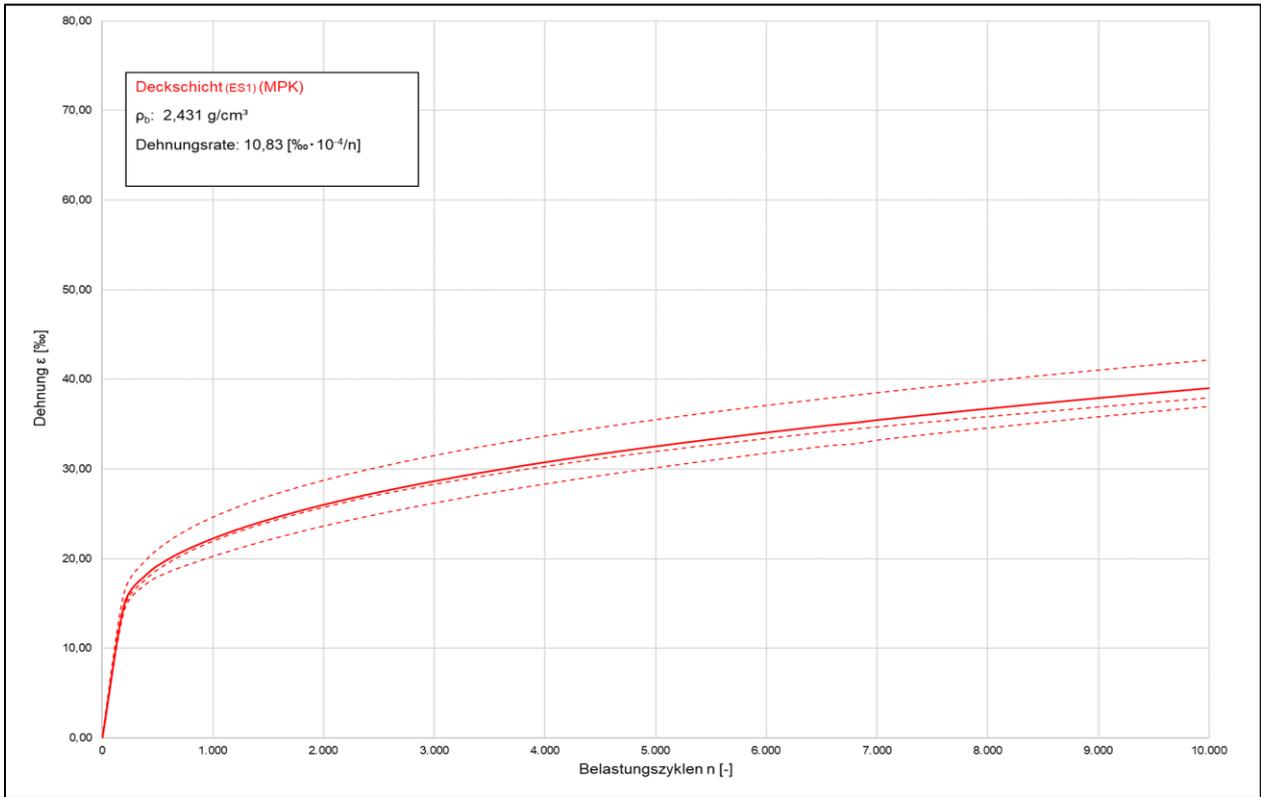


Bild 4-45: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Hüllerstraße Gelsenkirchen ES1

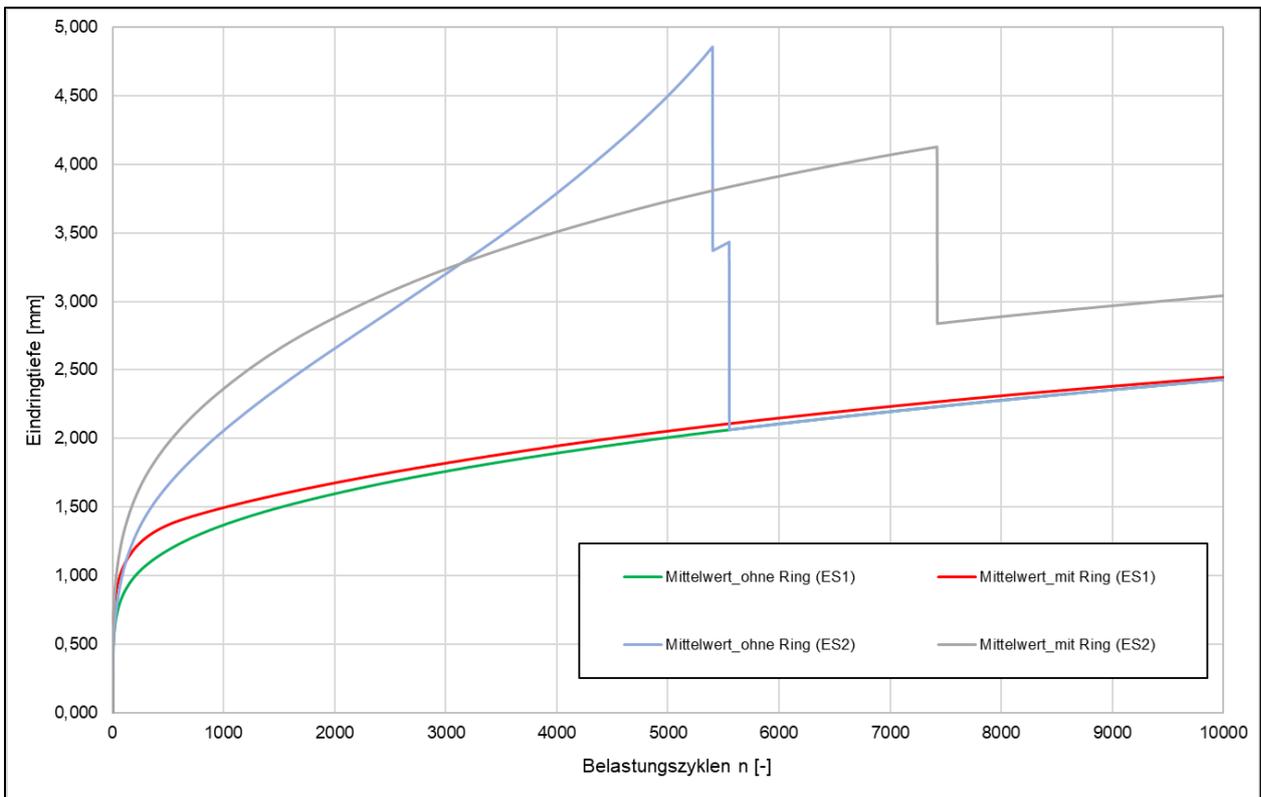


Bild 4-46: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempel Eindringversuch - Verformungsverlauf Hüllerstraße Gelsenkirchen

		ES1		ES2	
		mit Ring	ohne Ring	mit Ring	ohne Ring
P1	ϵ_n [mm]	2,535	2,540	4,220	4,911
P2		2,380	2,332	3,569	4,920
MW		2,458	2,436	3,895	4,916
P1	ET _{dyn} [%]	79,88	94,99	133,38	137,73
P2		68,41	84,47	131,29	152,26
MW		74,14	89,73	132,33	145,15

Tab. 4-20: Ergebnisse der Dynamischen Stempelleidringversuche Hüllerstraße Gelsenkirchen

4.2.7 Hahnerberger Straße Wuppertal – Strecke H

Im Juli 2023 konnten auf der Hahnerberger Straße in Wuppertal weitere Bohrkerne entnommen werden. Dort wurde im Jahre 2018 eine Asphaltdeckschicht, bestehend aus einem AC 11 D S, eingebaut. Als Bindemittel wurde ein 25/55-55 A verwendet, die verwendete Gesteinskörnung war ein Diabas. Die Stelle, die im Rahmen dieses Projektes beprobt wurde, liegt auf einer vielbefahrenen Straße direkt hinter einer Bushaltestelle. Es kann demnach von höheren verformungsrelevanten Verkehrsbelastungen ausgegangen werden. Spurrinnen konnte auf diesem Abschnitt allerdings nicht festgestellt werden. Eine Veranschaulichung der Straßenoberfläche sowie Bilder der Bohrkerne sind dem Anhang zu entnehmen (Bild A-21). Zu erkennen ist, dass die 2018 eingebaute Deckschicht vermutlich auf eine ältere schon vorhandene Deckschicht gebaut wurde. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass die Bohrkerne (\varnothing 200 mm) eine Binderschicht unterhalb der doppelten Decke aufweisen, während die Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm nur eine Asphalttragschicht unter den Deckschichten hatten. Die Bohrkerne wurden an zwei Stellen mit nur einem geringen Abstand entnommen. Tab. 4-21 stellt die Korngrößenverteilungen der verschiedenen Schichten dar. Ein deutlicher Unterschied der beiden Deckschichten ist im Anteil der Gesteinskörnung der Kornklasse 2 mm zu erkennen.

Kornklasse [mm]	Siebdurchgang [M.-%]		
	Asphaltdeckschicht (De1)	Asphaltdeckschicht (De2)	Asphaltbinderschicht
Füller < 0,063	8,7	9,5	5,0
0,125	10,3	11,9	6,4
2,0	45,3	57,8	41,3
5,6	72,0	73,8	55,8
8,0	84,7	87,5	66,7
11,2	99,3	97,1	81,7
16,0	100,0	100,0	94,7
22,4	-	-	99,2
31,5	-	-	100,0
Bindemittel- Gehalt [M.-%]	6,4	6,5	5,1

Tab. 4-21: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht Hahnerberger Straße Wuppertal

Eine zusammenfassende Darstellung der in situ entnommenen und anschließend gesägten Bohrkerne und der aus dem Mischgut labortechnisch hergestellten MPK zeigt Tab. 4-22. Die Asphaltrohddichte, die Raumddichte und der Hohlraumgehalt der Probekörper sind ebenso aufgeführt.

	Probe	Ø [mm]	Höhe [mm]	Raumdichte [g/cm³]	Asphaltrohddichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
(Systemprobekörper) (De1+De2+(TS))	1	100	60,1	2,482	-	-
	5		60,8	2,467		-
	6		60,4	2,475		-
Deckschicht (De1)	1-2	200	41,2	2,494	2,632	5,2
	1-4		41,8	2,517		4,4
	1-5		40,5	2,527		4,0
	1-6		39,2	2,520		4,2
Deckschicht (De1) (MPK)	1	101,6	60,8	2,573		2,3
	2		60,5	2,574		2,2
	3		60,8	2,566		2,5
Deckschicht (De2)	2-1	200	33,1	2,461	2,483	0,9
	2-3		28,6	2,469		0,5
	2-4		27,8	2,474		0,4
	2-5		29,7	2,475		0,3
Deckschicht (De2) (MPK)	1	101,6	60,5	2,455		1,1
	2		60,5	2,451		1,3
	3		60,5	2,466		0,7
Binderschicht	4	100	51,7	2,400	2,492	3,7
	5		51,1	2,393		4,0
	6		49,4	2,400		3,7
Binderschicht (MPK)	1	101,6	60,2	2,372		4,8
	2		60,1	2,399		3,7
	3		60,1	2,383		4,4

Tab. 4-22: Raumdichten, Hohlraumgehalte und Rohdichte der Bohrkern und Marshall-Probekörper Hahnerberger Straße, Wuppertal

Ergebnisse der Verformungsuntersuchungen

Die Ergebnisse der Einaxialen Druck-Schwell- und dynamischen Stempelindringversuche sind in Bild 4-47 und Bild 4-48 dargestellt. Um die Asphaltbinderschicht mit dem Einaxialen Druck-Schwellversuch untersuchen zu können, wurden aus den Bohrkernen mit 200 mm Durchmesser Probekörper mit einem Durchmesser von 100 mm gebohrt. Die Probekörper weisen allerdings Schichtdicken von 49 bis 51 mm auf, die nicht den nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] geforderten 60 mm entsprechen.

Die dargestellten Impulskriechkurven zeigen für die Varianten der kombinierten Deckschicht Wendepunkte im Bereich von 1.000 bis 2.000 Lastzyklen. Die Dehnungsrate liegt im Mittel auf einem sehr hohen Niveau. Zwei der drei Probekörper zeigten eine vollständige Gefügezerstörung auf. Ähnliche Beobachtungen können bei den MPK der Deckschicht 2 beobachtet werden. Die Marshall Probekörper der Deckschicht 1 und Binderschicht weisen anfänglich hohe Dehnungen (Konsolidierung) auf, die bis zum Ende der Belastung auf einem ähnlichen Niveau bleiben.

Die dynamischen Eindringtiefen (mit und ohne Querdehnungsbehinderung) erreichen das Abbruchkriterium von 5 mm nicht. Einzig die Einzelmesswerte der Variante Decke 2_mit Ring überschreiten die zulässige Spannweite.

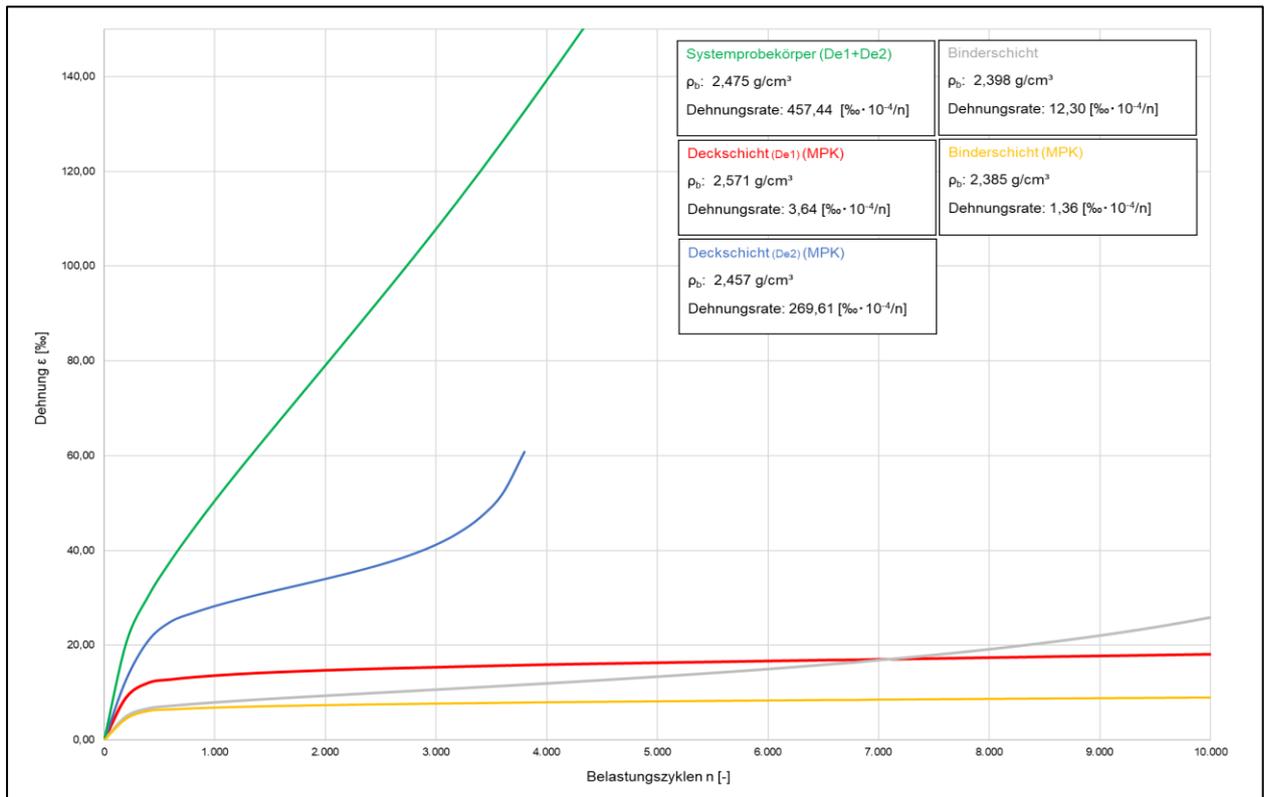


Bild 4-47: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Hahnerberger Straße, Wuppertal

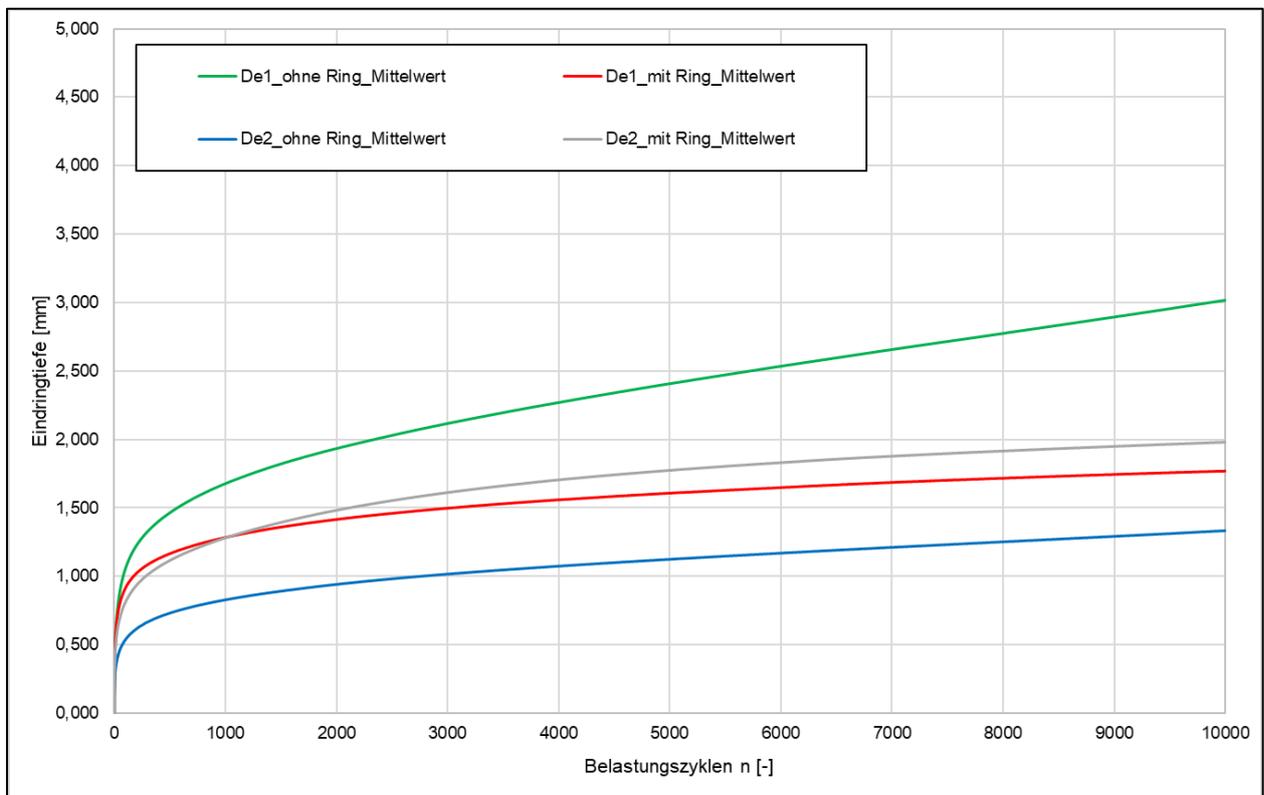


Bild 4-48: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempleindringversuch - Verformungsverlauf Hahnerberger Straße, Wuppertal

4.2.8 L459 (Wertherbrucher Straße) Hamminkeln/Rees – Strecke I

Im Rahmen einer Deckensanierung auf der L459 (Wertherbrucher Straße) zwischen Station 3+342 und 4+725 wurden im November 2023 weitere Bohrkern zur Untersuchung des Verformungsverhaltens beschafft. Insgesamt wurden sieben Bohrkern mit einem Durchmesser von 200 mm und acht Bohrkern mit einem Durchmesser von 100 mm entnommen. Die Schichtdicken der entnommenen Bohrkern sind der Tab. 4-23 zu entnehmen. Unter der Asphaltdecke aus Asphaltbinder- und Asphalttragschicht befand sich eine weitere, ältere Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht, die für die folgenden Untersuchungen allerdings nicht mit einbezogen wurden. Bilder der Bohrkern sind im Anhang in Bild A-22 zu sehen. An der Entnahmestelle wurden Spurrinntiefen von 1 mm in der Nähe der Bordsteinkante und 2 mm in der Nähe zur Fahrbahnmittle hin gemessen.

Bohrkernnummer	Ø 100 mm		Ø 200 mm	
	Dicke Deckschicht [cm]	Dicke Binderschicht [cm]	Dicke Deckschicht [cm]	Dicke Binderschicht [cm]
1	3,5	3,0	3,3	3,1
2	3,5	2,8	3,4	2,9
3	3,2	3,3	3,4	3,1
4	3,3	3,5	3,3	3,0
5	3,2	4,8	3,5	2,9
6	3,4	2,9	3,3	3,0
7	3,4	2,9	3,4	3,0
8	3,2	3,2	-	-

Tab. 4-23: Schichtdicken L459 Hamminkeln

Die Untersuchung des aus den zusätzlich gewonnenen Bohrkern extrahierten Materials ergab die in Tab. 4-24 dargestellte Korngrößenverteilung. Der Bindemittelgehalt der Asphaltdeckschicht betrug 6,2 M.-%. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Decke aus einem Asphaltbeton AC 11 D S hergestellt wurde.

Kornklasse [mm]	Asphaltdeckschicht	
	Siebdurchgang [M.-%]	Asphaltrohndichte [g/cm³]
Füller < 0,063	7,5	2,528
0,125	9,2	
2,0	40,6	
5,6	69,1	
8,0	83,6	
11,2	98,8	
16,0	100,0	
22,0	-	
Bindemittel-Gehalt [M.-%]	6,2	

Tab. 4-24: Korngrößenverteilung der Asphaltdeckschicht und Asphaltrohndichte L459, Hamminkeln

	Nr.	Ø [mm]	Höhe [mm]	Raumdichte [g/cm³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
(Systemprobekörper) DS + BS	1	100	61,9	2,533	-
	2		62,2	2,548	-
	3		61,7	2,551	-
	4		62,3	2,547	-
	5		62,0	2,531	-
	6		62,4	2,542	-
	7		62,3	2,539	-
	8		61,4	2,552	-
Deckschicht	1	200	31,5	2,514	0,6
	2		32,9	2,510	0,7
	3		29,5	2,516	0,5
	4		31,3	2,520	0,3
	5		29,5	2,518	0,4
	6		32,2	2,513	0,6
	7		28,5	2,511	0,7
Deckschicht (MPK)	1	101,6	60,1	2,494	1,3
	2		60,1	2,497	1,2
	3		60,1	2,497	1,2

Tab. 4-25: Raumdichten und Hohlraumgehalt der Bohrkern L459, Hamminkeln

Die Abmessungen der entnommenen Bohrkern und der anschließend im Labor hergestellten MPK sowie die zugehörigen Raumdichten sind in Tab. 4-25 zusammengefasst. Auffallend sind die geringen Hohlraumgehalte der Bohrkern, wobei auch die Hohlraumgehalte der MPK auf einem geringen Niveau liegen, was auf hohlraumarmes Mischgutkonzept hindeutet. Die für die Verformungsuntersuchungen verwendeten Bohrkern sind durch eine abweichend formatierte Schrift hervorgehoben. Aufgrund einer unzureichenden Schichtdicke der oberen Asphaltbinderschicht für den Einaxialen Druck-Schwellversuch wurden die Untersuchungen der L459 nur an der Asphaltdeckschicht durchgeführt.

Die Ergebnisse der Verformungsuntersuchungen sind in Bild 4-49 und Bild 4-50 als Impulskriechkurven dargestellt. Die Varianten der Systemprobekörper im Einaxialen Druck-Schwellversuch weisen allesamt einen Wendepunkt und starke Verformung zu Beginn der Prüfung auf. Ähnliches kann auch bei den MPK des Deckschichtmaterials festgestellt werden. Dort ist ebenfalls eine starke Verformung zu Beginn des Versuchs festzustellen. Ein Wendepunkt wird nicht erreicht und die Dehnungsrate bleibt anschließend über die Versuchsdauer von 10.000 Belastungszyklen auf einem konstanten Niveau. Für beide Varianten sind die Werte der Dreifachbestimmungen nicht miteinander verträglich. Die Eindringtiefen hingegen, bestimmt durch den dynamischen Stempel Eindringversuch, liegen innerhalb der Doppelbestimmung auf einem gleichen Niveau. Die Werte können als verträglich angesehen werden, da die kritische Spannweite mit 30 % vom Mittelwert nicht überschritten wird. Die Belastungskurve der Variante mit Querdehnungsbehinderung weist leicht erhöhte Eindringtiefen auf, was für einen Einfluss der durch den Ring simulierten erhöhten seitlichen Stützeinwirkung spricht. Eine tabellarische Auflistung aller Ergebnisse ist dem Anhang zu entnehmen.

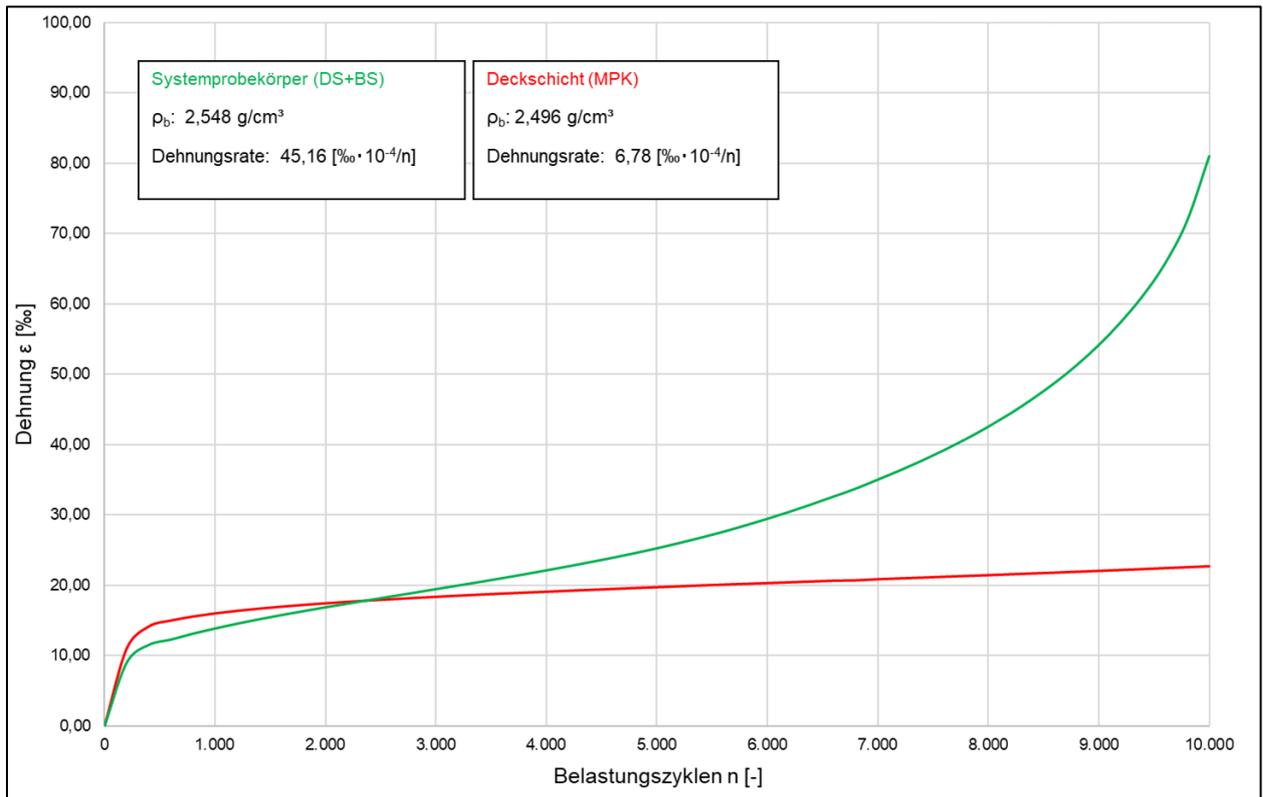


Bild 4-49: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven L459 Hamminkeln

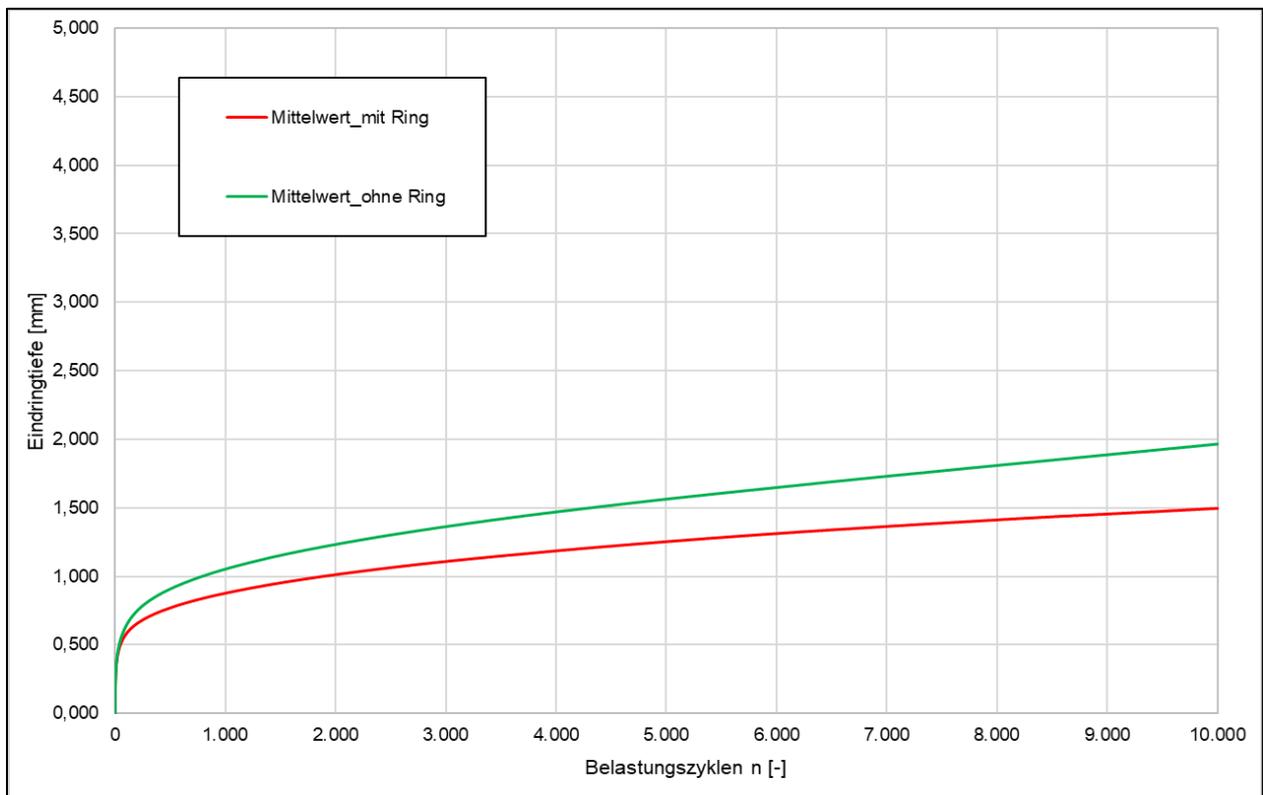


Bild 4-50: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempleindringversuch - Verformungsverlauf L459 Hamminkeln

4.2.9 B57 Aachen – Strecke J

Eine weitere Praxisstrecke konnte mit der B57 in Aachen beprobt werden. Die Entnahmestelle, bestehend aus einer Gussasphaltdeckschicht, befand sich auf der Krefelder Straße zwischen Prager Ring und der Straße Stangenhäuschen. Es konnten sehr tiefe Spurrinnen von bis zu 3,5 cm gemessen werden (s. Bild 4-51).



Bild 4-51: Spurrinntiefen B57 Aachen

Die Schichtdicken der entnommenen Bohrkerns sind in Tab. 4-26 zusammengefasst. Die Bohrkerns mit der Nummer 1-1 bis 1-6 wurden direkt in der Fahrspur entnommen, die Bohrkerns 2-1 bis 2-6 außerhalb der Fahrspur. Die deutlich geringeren Schichtdicken der Gussasphaltdeckschicht in der Radrollspur deuten darauf hin, dass die starken Verformungen im Wesentlichen durch Verdrückungen in der Gussasphaltdeckschicht entstanden sind.

Bohrkernnummer	Dicke Deckschicht [cm]	Dicke Binderschicht [cm]
1-1	2,6	9,3
1-2	2,7	8,5
1-3	2,7	8,5
1-4	2,6	8,5
1-5	2,6	8,5
1-6	2,6	8,5
2-1	4,5	8,7
2-2	4,5	9,0
2-3	4,3	9,4
2-4	4,2	9,1
2-5	4,3	8,7
2-6	4,1	9,0

Tab. 4-26: Schichtdicken Bohrkerns B57 Aachen

Neben der Gussasphaltdeckschicht wurde auch die Asphaltbinderschicht für weitere Untersuchungen genutzt. Aus den Bohrkerns mit 200 mm Durchmesser wurden Bohrkerns mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 60 cm gebohrt. Zudem wurde ein Teil des Materials extrahiert, um die Bindemittleigenschaften und die Korngrößenverteilung zu ermitteln. Der Bindemittelgehalt der Asphaltdeckschicht betrug 5,9 M.-% und der Bindemittelgehalt der Asphaltbinderschicht 6,7 M.-%. Diese Werte passen allerdings nicht zu einer Gussasphaltdeckschicht. Auch der BM-Gehalt der Binderschicht weist eher auf

eine alte Asphaltdecke hin. Die Korngrößenverteilung ist in Tab. 4-27 aufgeführt und in Tab. 4-28 sind die Raumdichten, die Asphaltrohndichte und die Hohlraumgehalte zusammengefasst.

Kornklasse [mm]	Siebdurchgang [M.-%]			
	Decke ES1	Decke ES2	Binder ES1	Binder ES2
Füller < 0,063	19,6	20,6	4,7	4,4
0,125	24,7	26,2	6,4	6,0
2,0	54,7	57,0	28,	30,0
5,6	72,7	73,9	35,2	37,3
8,0	89,3	89,8	47,5	48,4
11,2	98,2	98,8	58,8	63,6
16,0	100,0	100,0	84,5	83,4
22,0	-		100,0	100,0
BM-Gehalt [M.-%]	5,9		6,7	

Tab. 4-27: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B57 Aachen

Probe		PK-Höhe	Raumdicke [g/cm ³]	Asphaltrohndichte [g/cm ³]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
1-2	Deckschicht	25,3	2,466	2,467	0,0
1-3		27,3	2,465		0,1
1-4		23,3	2,451		0,7
2-1		45,3	2,452	2,461	0,4
2-3		41,6	2,448		0,5
2-4		40,0	2,455		0,3
1-3	Binderschicht	61,4	2,624	2,700	2,8
1-4		60,8	2,633		2,5
1-5		60,7	2,639		2,3
2-3		60,3	2,560	2,675	4,3
2-4		60,8	2,558		4,4
2-5		61,0	2,564		4,2

Tab. 4-28: Raumdichten der Bohrkerne sowie Asphaltrohndichte und Hohlraumgehalte der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B57 Aachen

Ergebnisse der Verformungsuntersuchungen

An der Gussasphaltdeckschicht wurde für die Untersuchungen der Verformung ausschließlich der dynamische Stempel Eindringversuche durchgeführt. Die dynamische Eindringtiefe wird bei 2.500 Belastungszyklen angegeben. Bild 4-52 zeigt die bleibenden Verformungen der Gussasphaltdeckschicht der B57. Da ausreichend Bohrkerne gewonnen werden konnten, sind hier, entgegen der Prüfvorschrift, drei Probekörper untersucht worden. Es wird deutlich, dass alle Probekörper aus Entnahmestelle ES2, außerhalb der Fahrspur, das Abbruchkriterium von 5 mm vor Ende der Belastungsdauer erreichen. Die Probekörper, die aus der Fahrspur entnommen wurden, weisen geringere Eindringtiefen auf und erreichen das Abbruchkriterium nicht. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Entnahmestelle ES1 bereits starke Verformungen aufweist, die zu einer deutlichen Reduzierung der Schichtdicke der Gussasphaltdeckschicht geführt hat.

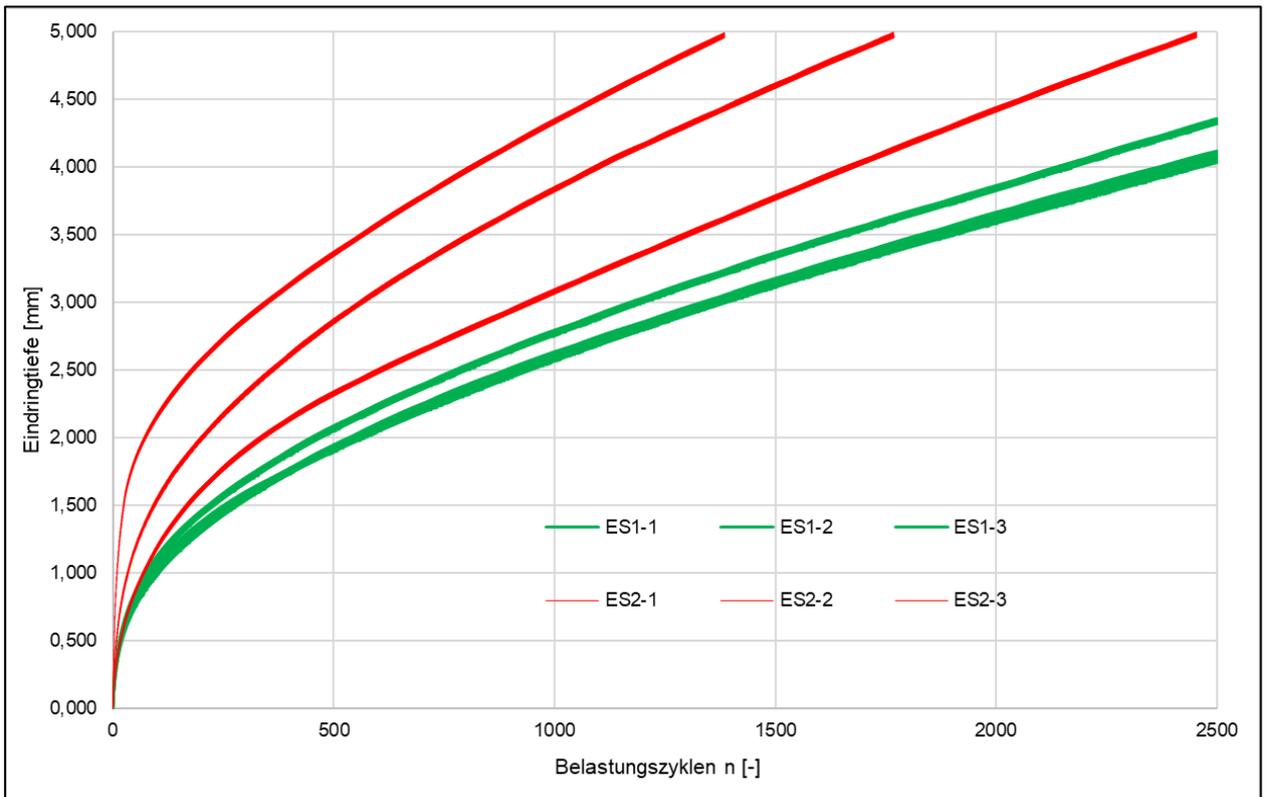


Bild 4-52: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempel Eindringversuch - Verformungsverlauf B57 Aachen

In Bild 4-53 sind die mit dem Einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Impulskriechkurven dargestellt. Die Bohrkern der Asphaltbinderschichten weisen bereits nach wenigen Belastungszyklen starke Verformungen auf, wie der Darstellung der Impulskriechkurven in Bild 4-53 zu entnehmen ist. Des Weiteren weisen alle Probekörper Wendepunkte und eine vollständige Gefügezerstörung auf.

Aufgrund der sehr starken Verformungen der Bohrkern wurde auf die Ermittlung der Dehnungsraten im Wendepunkt der Impulskriechkurven verzichtet.

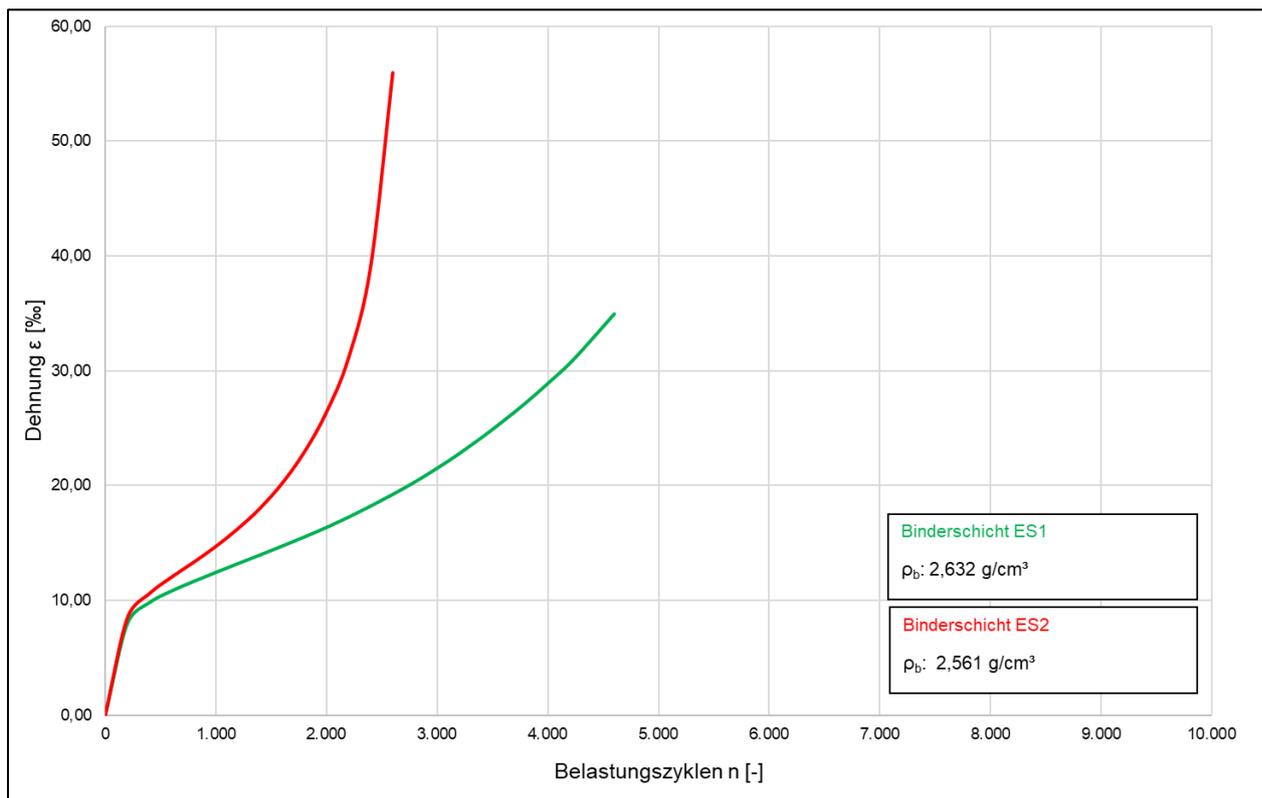


Bild 4-53: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven B57 Aachen

4.2.10 Zusammenfassende Auswertung der Untersuchungen der Praxisstrecken

Die im Einaxialen Druckschwellversuch ermittelten minimalen und maximalen Dehnungsraten sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. (Bild 4-54 bis Bild 4-57) Es handelt sich jeweils um die Mittelwerte der Dreifachbestimmungen. Aufgrund der teilweise nicht ausreichenden Anzahl an Bohrkernen war es nicht möglich, für alle Schichten die Untersuchungen gemäß Prüfvorschrift durchzuführen bzw. konnten aufgrund zu geringer Mischgutmengen keine oder nicht genügend MPK für eine Dreifachbestimmung hergestellt werden. Obwohl ein Großteil der Varianten Wendepunkte aufwies, wurden diese in der ersten Auswertung ebenfalls berücksichtigt. Eine Übersicht der Ergebnisse in tabellarischer Form kann dem Anhang A entnommen werden (Tab. A-8).

Für die Auswertung der Ergebnisse der Systemprobekörper wurde der Mittelwert der Dehnungsrate der Strecke H herausgenommen. Dieser beträgt 457,4. Die drei Einzelwerte sind in diesem Fall verträglich, der Straßenaufbau (De1, De2, BS) weicht jedoch stark von den anderen Praxisstrecken ab und wird daher nicht weiter berücksichtigt.

Es kann keine eindeutige Aussage darüber getroffen werden, ob eine Asphaltart bessere oder schlechtere Verformungseigenschaften aufweist. Es wird deutlich, dass der AC 16 B S teilweise verformungsbeständiger ist als der AC 22 B S. Der SMA 8 S weist Dehnungsraten bis zu einem Wert von 101 [$\% \cdot 10^{-4}/n$] auf. Diese Obergrenze wird durch zwei Praxisstrecken bestimmt, die mit einem Additiv hergestellt wurden, so dass dort ein möglicher Einfluss dieser Zusatzstoffe betrachtet werden muss. Nimmt man diese Strecke aus der Betrachtung heraus, reduziert sich der Maximalwert auf 20 [$\% \cdot 10^{-4}/n$]. Ähnlich verhält es sich mit den Strecken, deren Werte den kritischen Bereich überschreiten und somit nach der Verfahrensgenauigkeit nicht tolerierbar sind. Bild 4-58 zeigt die „korrigierten“ Daten in einem Diagramm. Eine rein statistische Betrachtung ist hier nicht sinnvoll, da die Streuungen der Werte sehr groß sind und innerhalb der jeweiligen Asphaltart Schwankungen in der Zusammensetzung (Bindemittel und Gestein) und der Liegedauer sehr wahrscheinlich sind und für diese Streuungen verantwortlich sein können. Es wird deutlich, dass bis auf die Dehnungsraten der Sorte AC 8 alle Werte stark reduziert sind, wobei für zwei Sorten keine verwertbaren Daten mehr angegeben werden können (AC 11 D S und SMA 16 B S).

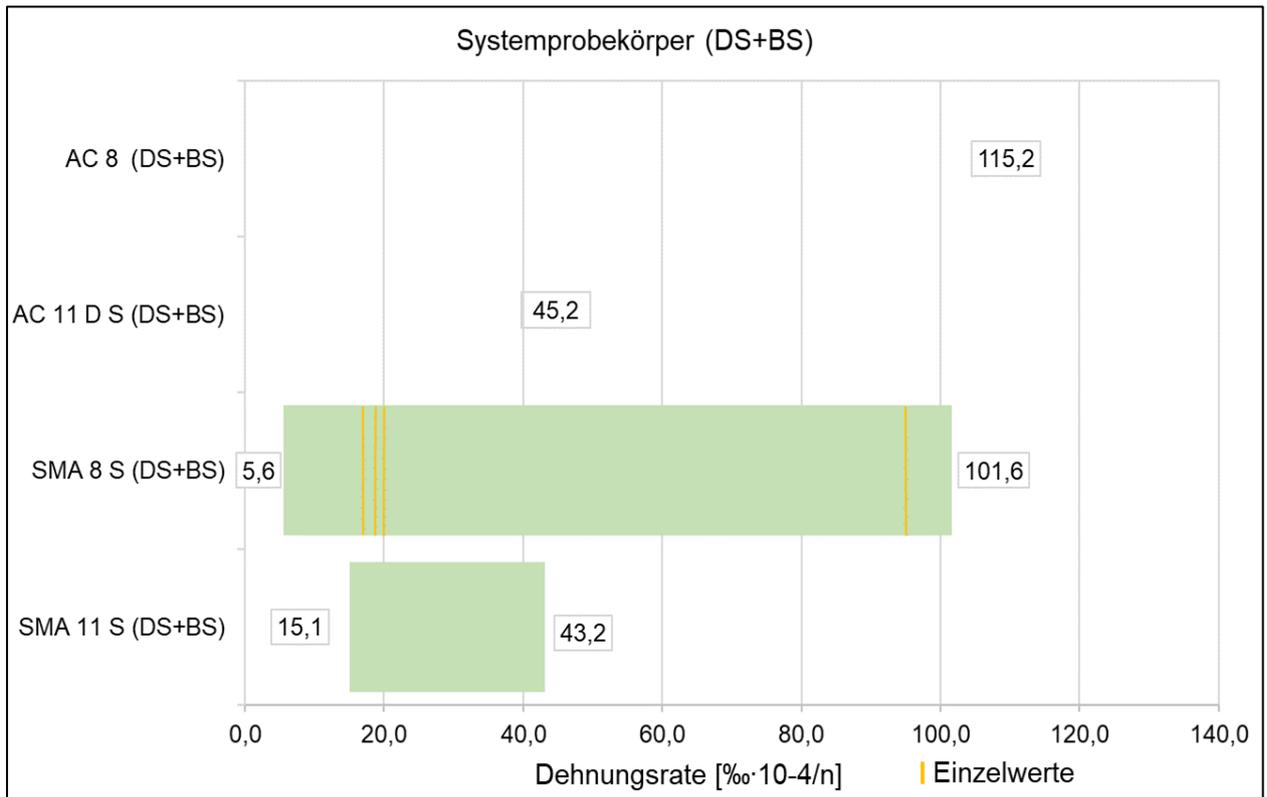


Bild 4-54: Dehnungsraten Probekörper Praxisstrecken - Systemprobekörper (DS+BS)

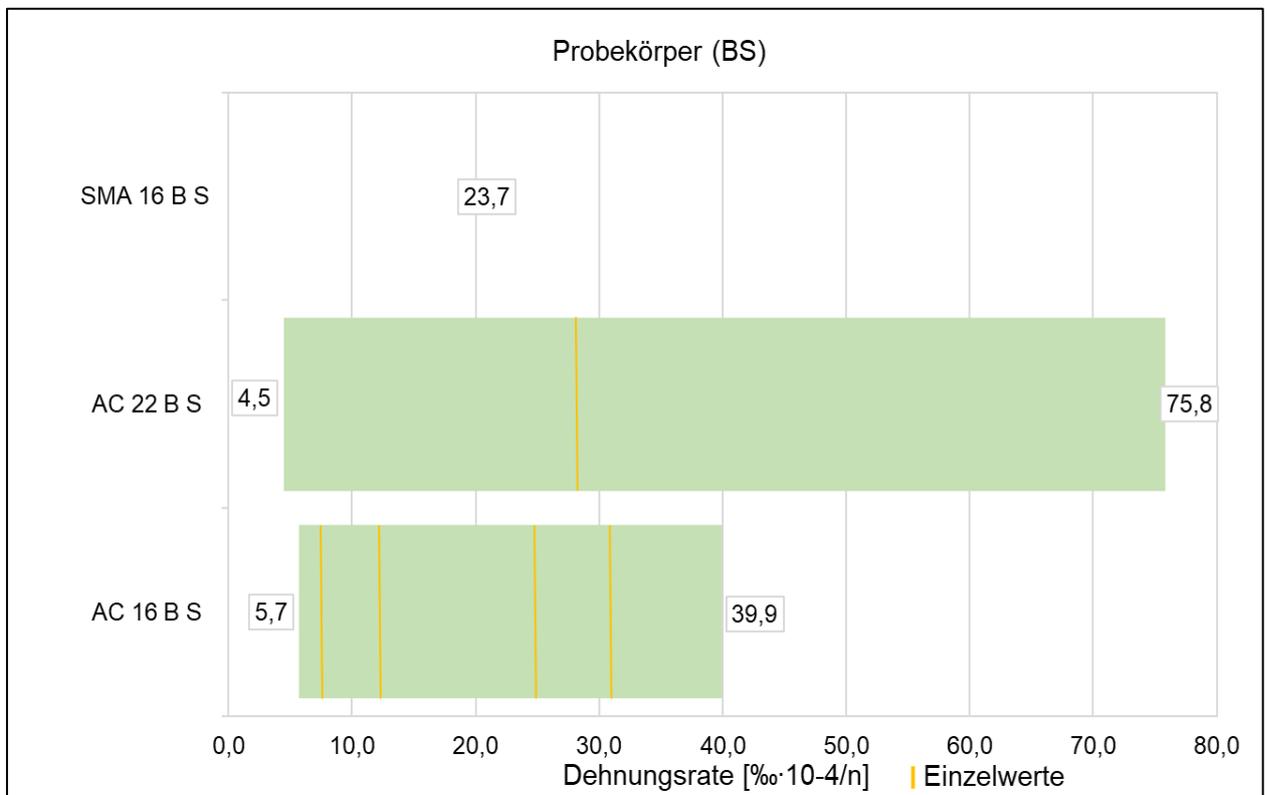


Bild 4-55: Dehnungsraten Probekörper Praxisstrecken - Probekörper (BS)

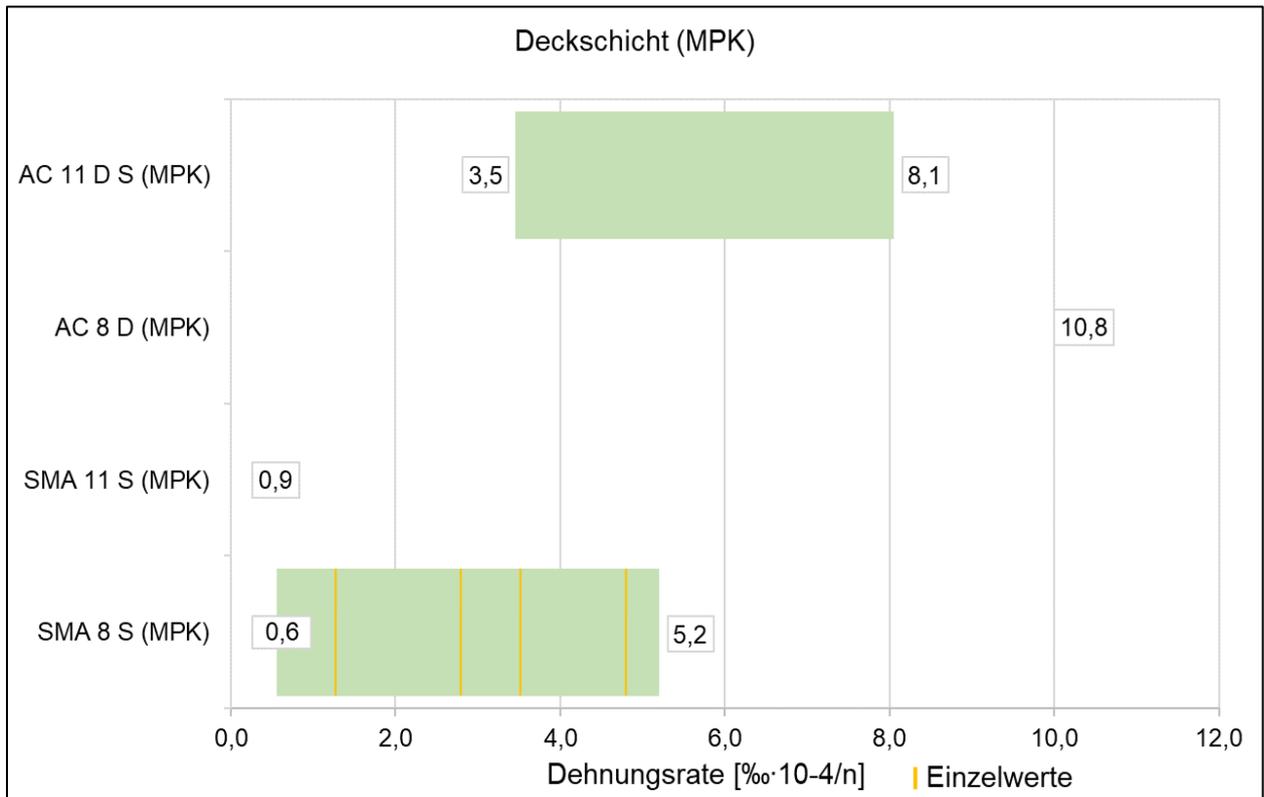


Bild 4-56: Dehnungsraten Probekörper Praxisstrecken - Marshall-Probekörper (DS)

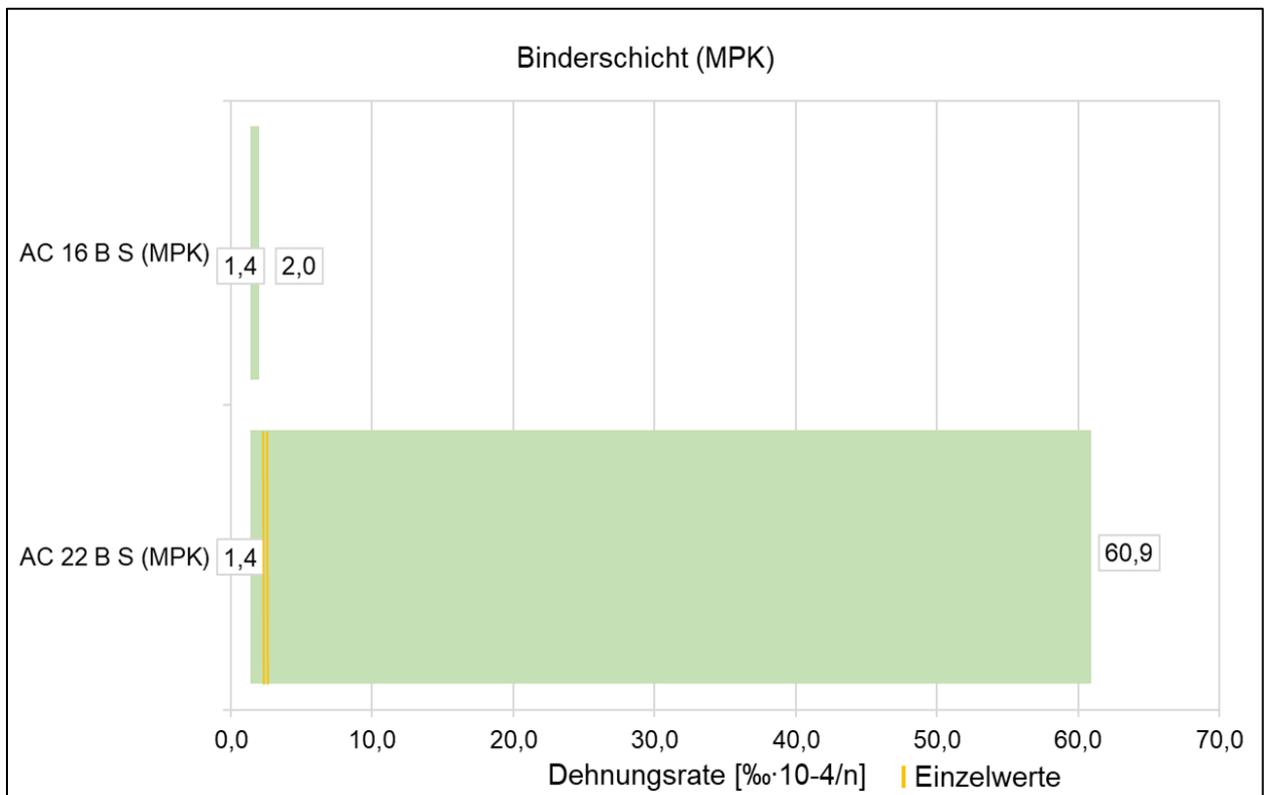


Bild 4-57: Dehnungsraten Probekörper Praxisstrecken - Marshall-Probekörper (BS)

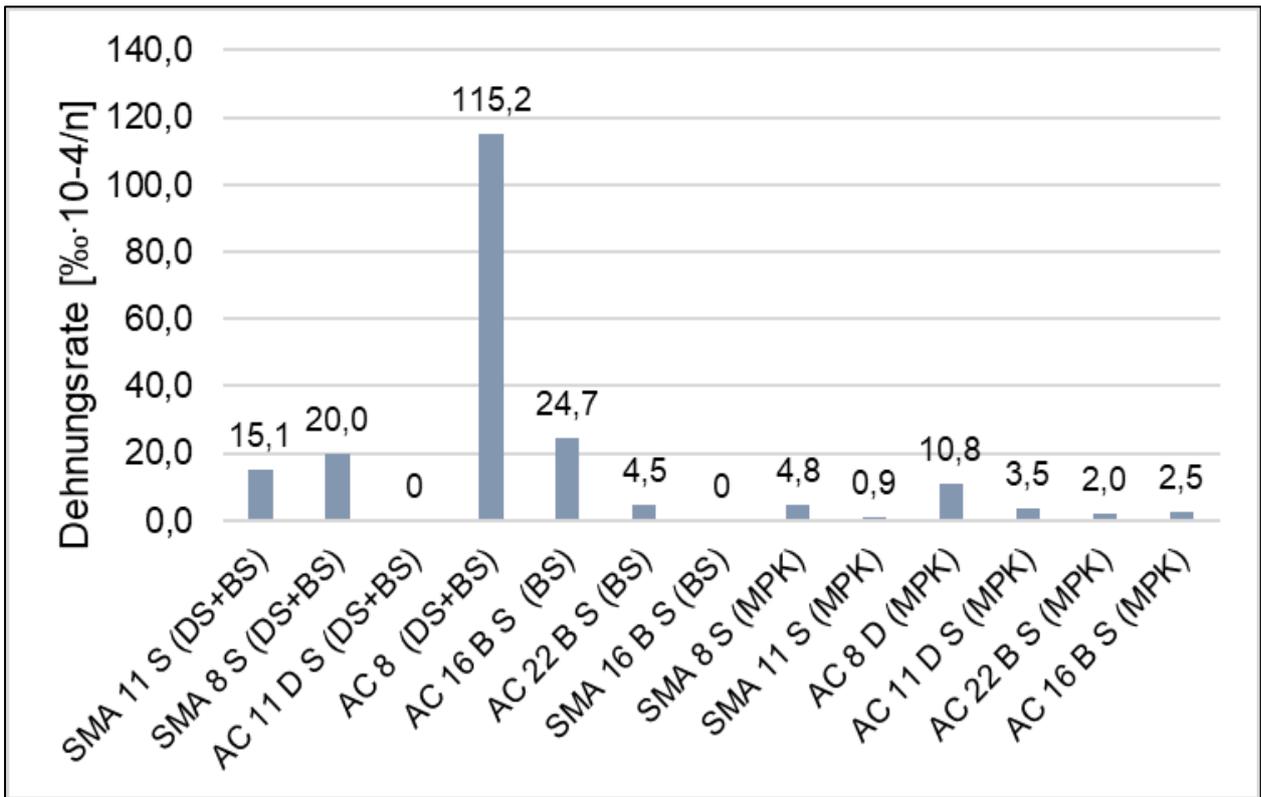


Bild 4-58: Verträgliche Ergebnisse DSV - Dehnungsrate je Asphaltart der Praxisstrecken

Bild 4-59 zeigt die Ergebnisse des dyn. SEV zusammengefasst jeweils mit (rot) und ohne (blau) Stützring.

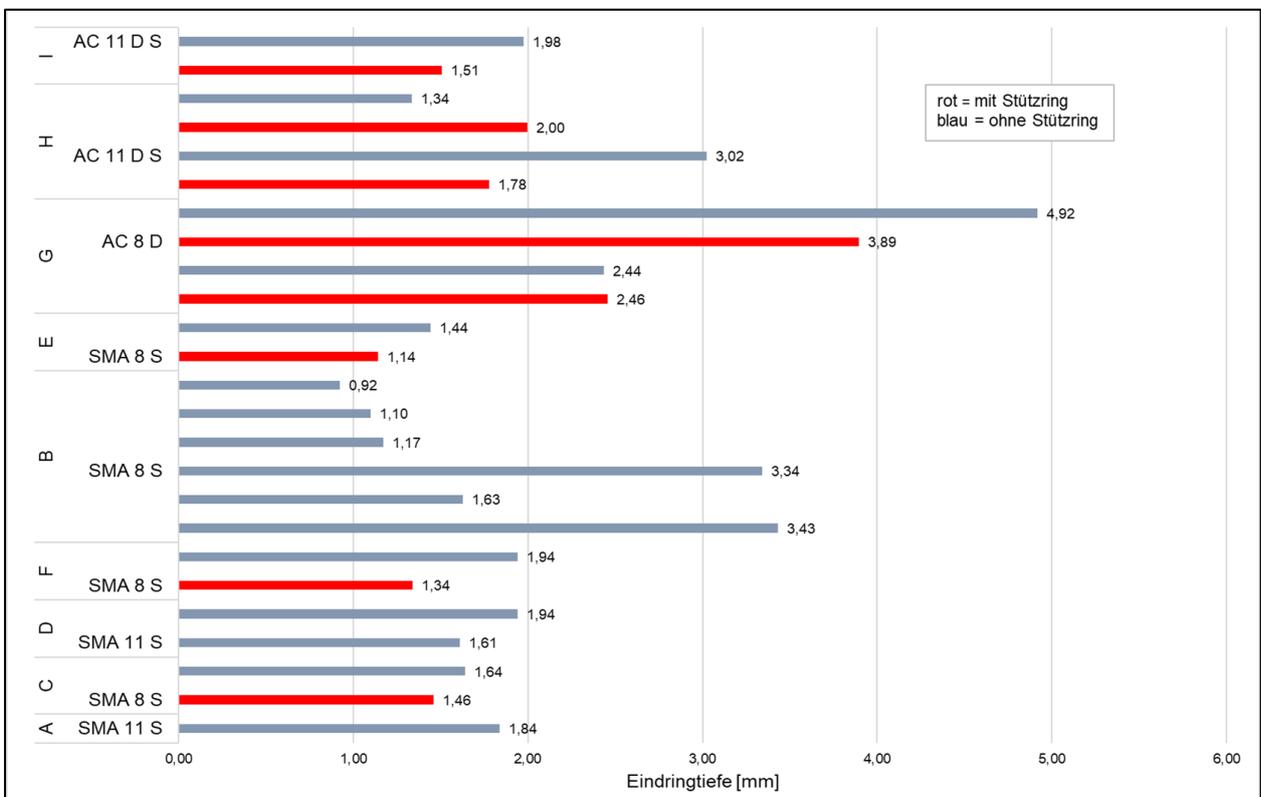


Bild 4-59: Ergebnisse dynamischer SEV der Praxisstrecken

Bild 4-60 zeigt die Korrelation zwischen der im Einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Dehnungsrate und dem im Rahmen der Zustandserfassung und -bewertung ermitteltem Zustandswert für die Spurrinnentiefe. Es kann ein mittlerer linearer Zusammenhang festgestellt werden. Aussage zum Zustandswert können nicht für alle Praxisstrecken getroffen werden, da die ZEB nicht auf allen Straßen durchgeführt wird. Aufgrund der sehr geringen Datenlage ist der statistische Zusammenhang nicht belegbar. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass der Zustandswerte je 100 m- Abschnitt ermittelt wird und somit an jeder Stelle (auch den Entnahmestellen) abweichen kann und unterschiedliche Belastungen einwirken.

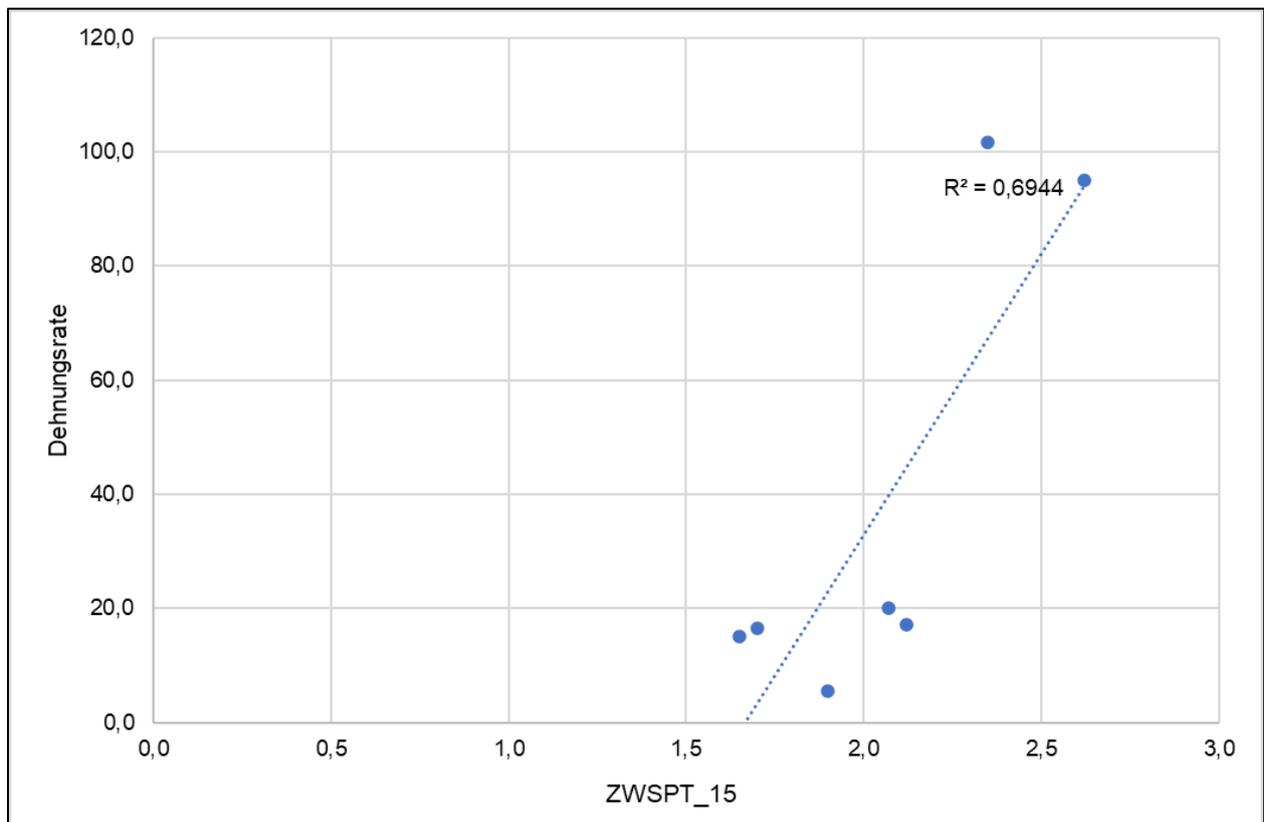


Bild 4-60: Zusammenhang Zustandswert Spurrinnentiefe und Dehnungsrate

4.3 Ergebnisse und Auswertung von Bestandsdaten

Zur Sammlung und Auswertung von Daten zu Verformungsprüfungen an Asphalten aus Erstprüfungen und zur Schaffung einer breiteren Datenbasis wurden Asphaltmischguthersteller und Prüflabore angeschrieben, um uns die dort generierten Daten zur Verfügung zu stellen. Alle zur Verfügung gestellten Datensätze mit fehlenden Angaben zur Asphaltart oder zum Bindemittel oder mit einem Abbruchkriterium von 40 ‰ wurden aus der weiteren Betrachtung eliminiert. Letztendlich wurden 120 Datensätze (jeweils gemittelt aus den Dreifachbestimmungen) ausgewertet. Bild 4-61 bis Bild 4-67 zeigen eine Übersicht der 120 Datensätze unter Angabe der Dehnungen (Balken) und der zugehörigen Dehnungsrate am Versuchsende (grün markiert). Eine Zusammenfassung der wichtigsten Verformungskennwerte in tabellarischer Form ist dem Anhang zu entnehmen (Tab. A-10 und Tab. A-11).

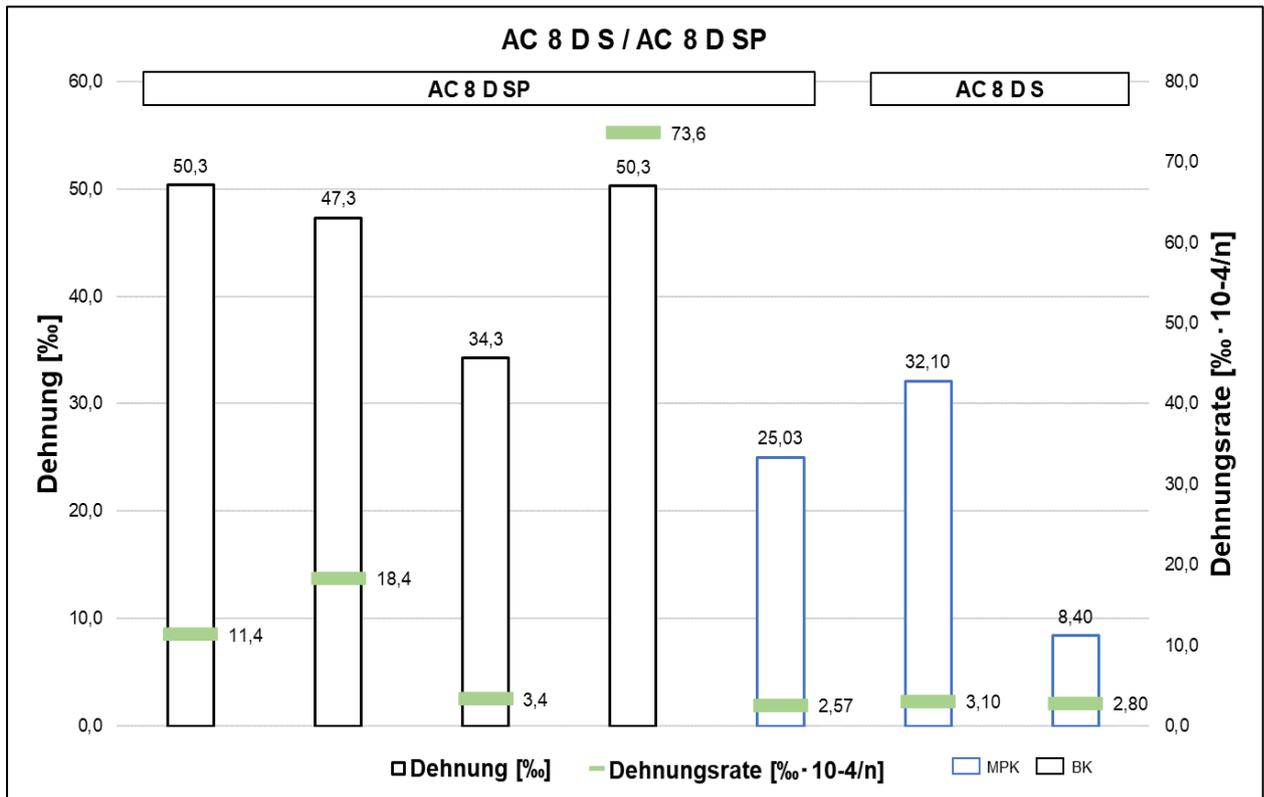


Bild 4-61: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den Bestandsdaten AC 8 D SP/AC 8 D S

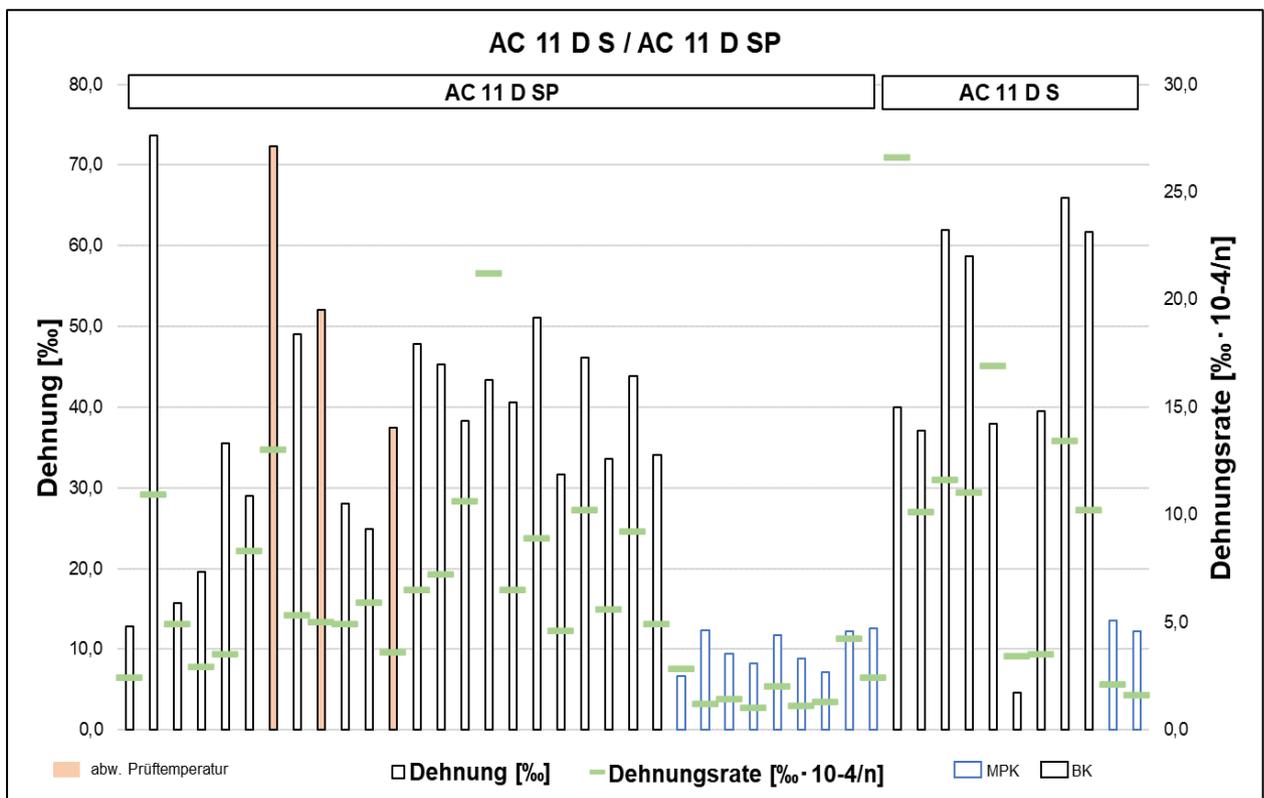


Bild 4-62: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den Bestandsdaten AC 11 D SP/AC 11 D S

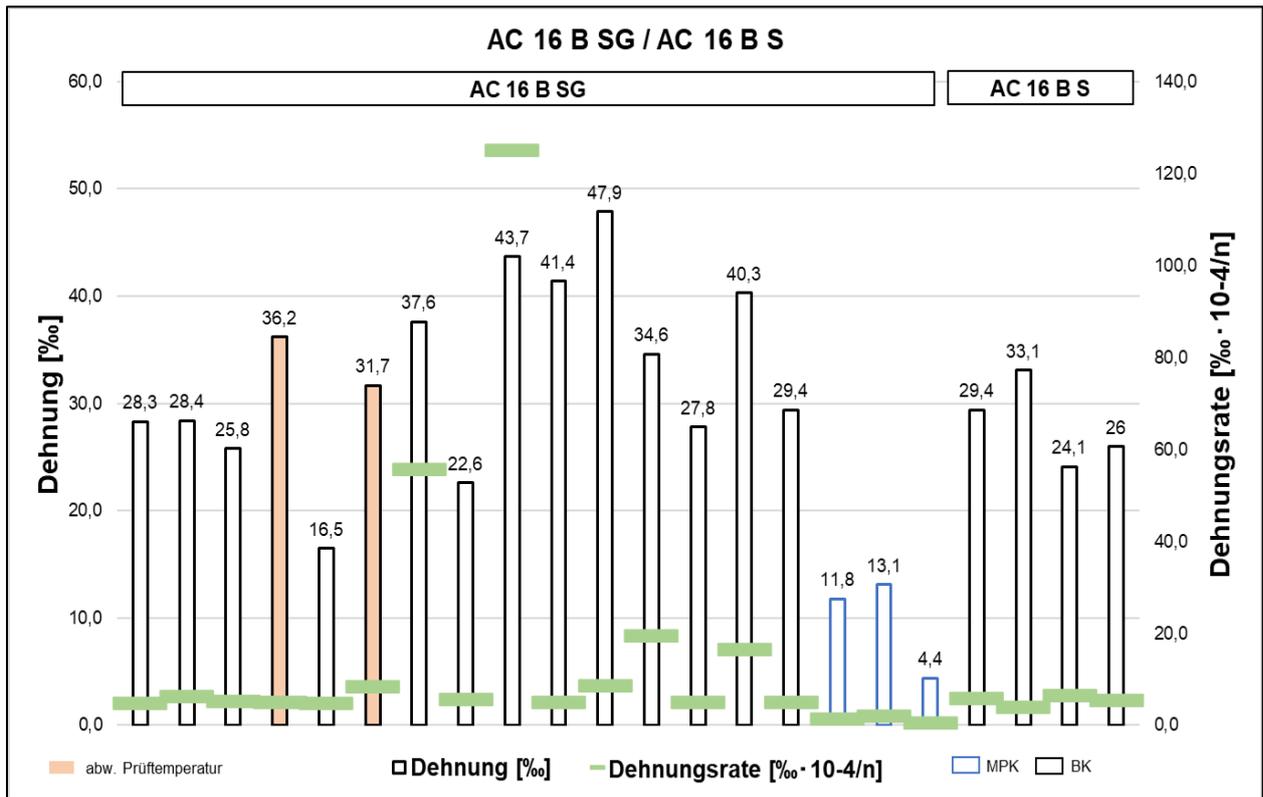


Bild 4-63: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den Bestandsdaten AC 16 B SG/AC 16 B S

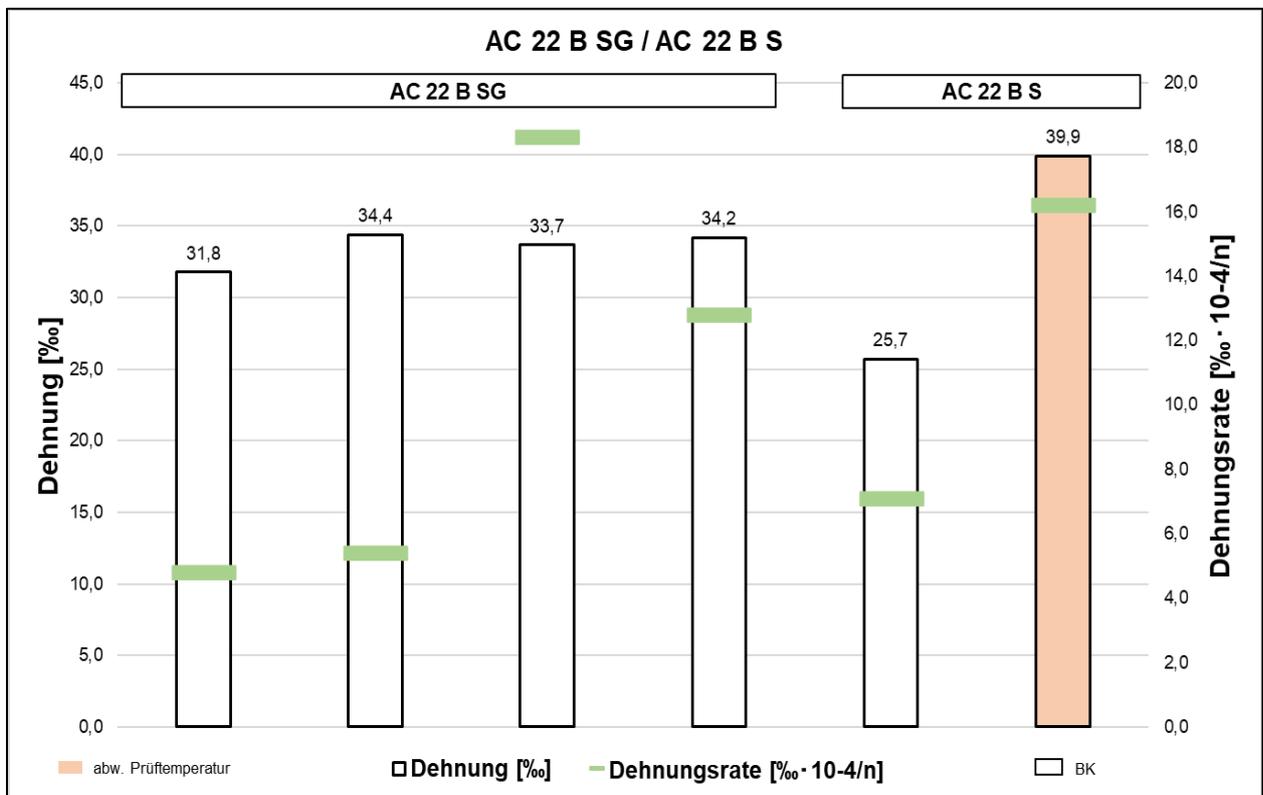


Bild 4-64: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den Bestandsdaten AC 22 B SG/AC 22 B S

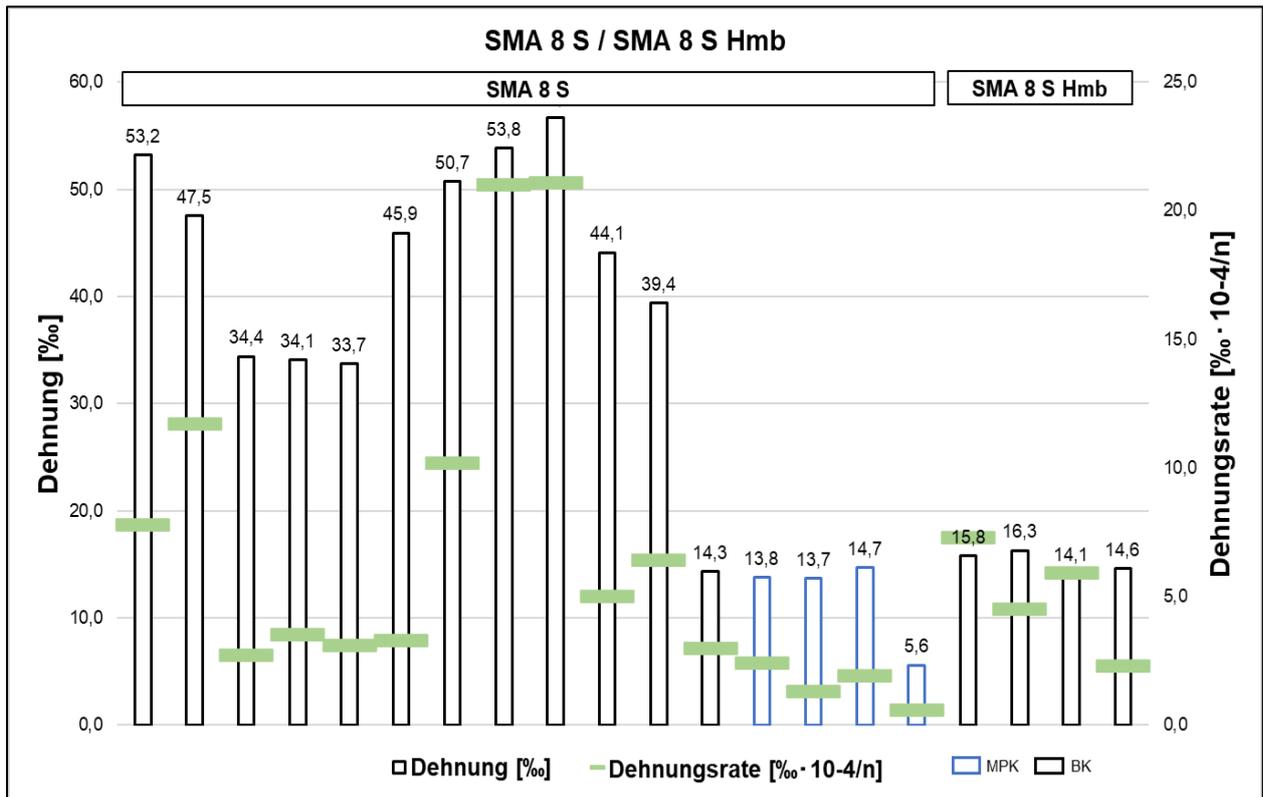


Bild 4-65: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den Bestandsdaten SMA 8 S

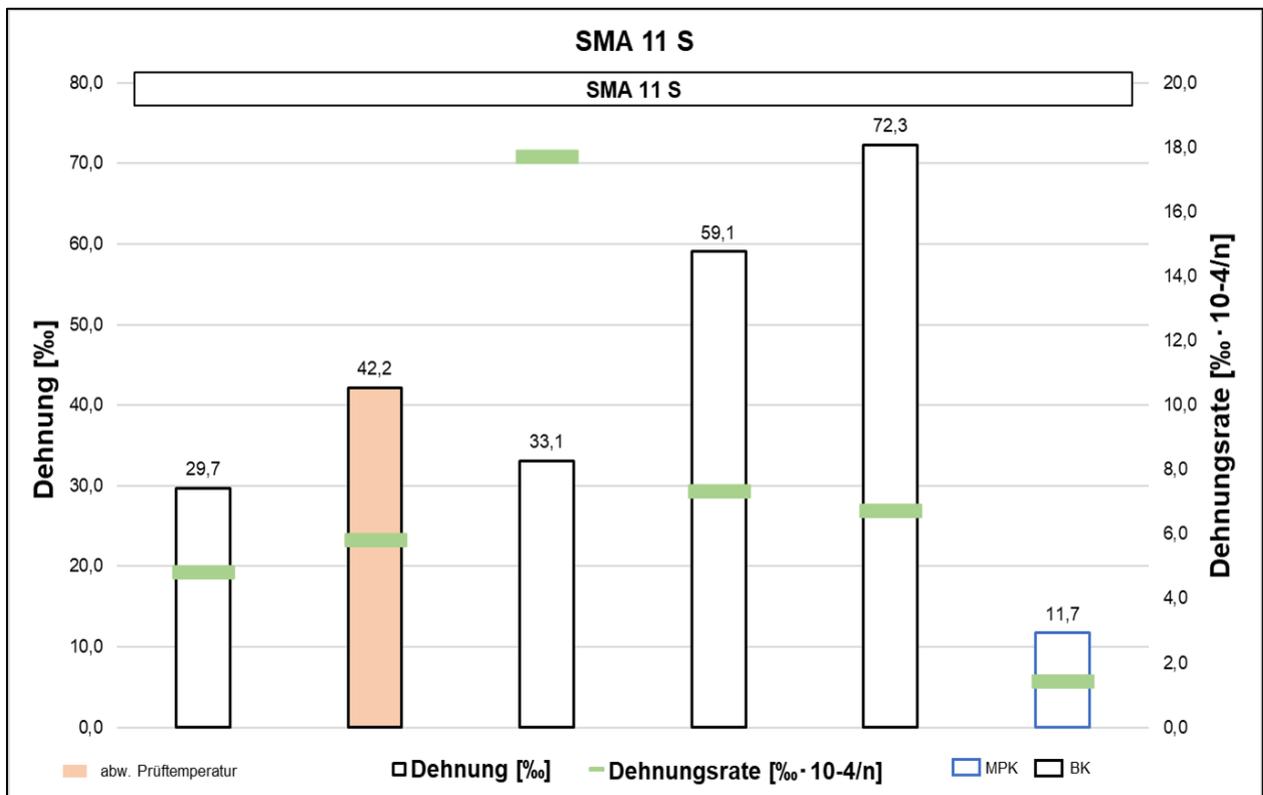


Bild 4-66: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den Bestandsdaten SMA 11 S

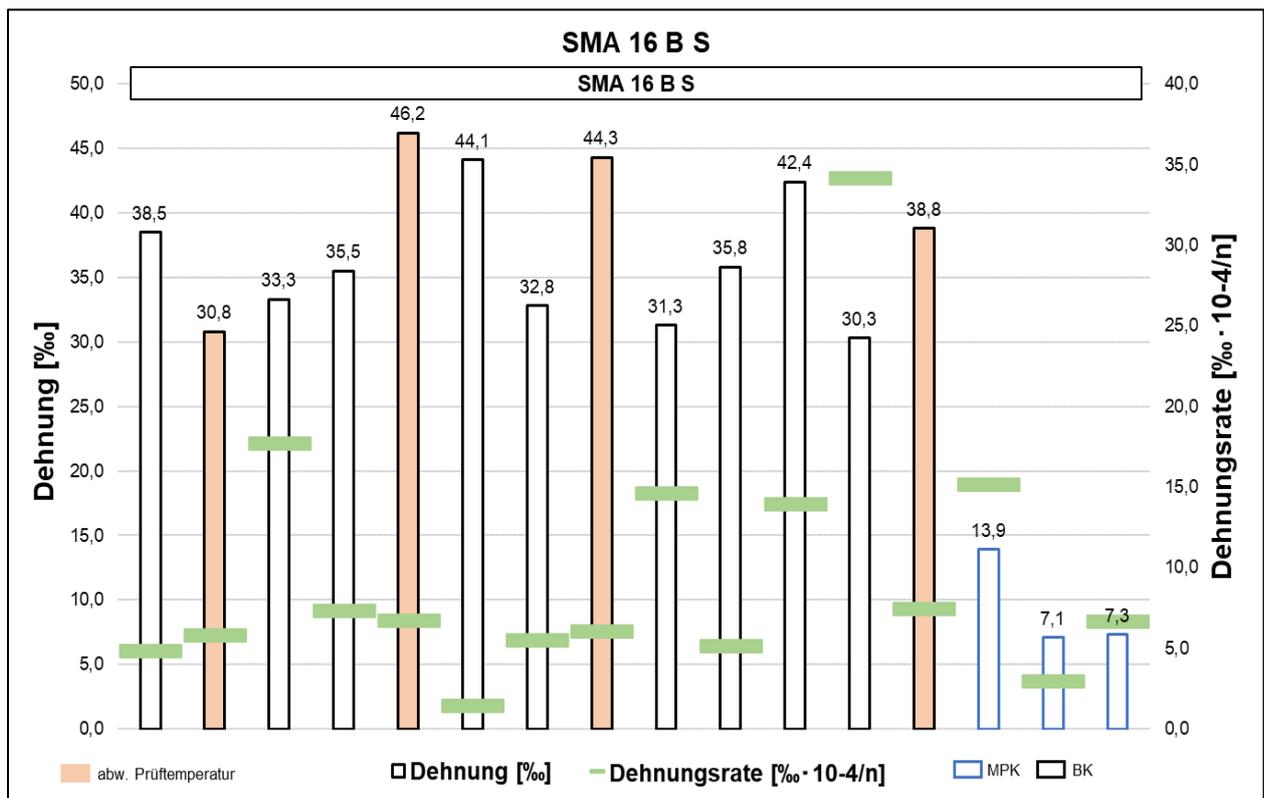


Bild 4-67: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den Bestandsdaten SMA 16 B S

Zusätzlich wurden die Ergebnisse des Ringversuchs (FE07.0310_2020_EGB) in die Betrachtung einbezogen. Hierbei handelt es sich jedoch nur um Ergebnisse der Versuchsreihen, die im Labor der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt wurden. Weitere Ergebnisse lagen zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Berichtes nicht vor. Eine tabellarische Übersicht der Ergebnisse findet sich im Anhang. Die Daten sind nicht Bestandteil der statistischen Auswertung der Bestandsdaten in Kapitel 4.3.1, sondern fließen in der zusammenfassenden Auswertung in die externen Daten mit ein.

4.3.1 Statistische Auswertung der Bestandsdaten

Um auf Basis fundierter Daten Zielwerte aussprechen zu können, wurden die erhobenen Daten zunächst statistisch ausgewertet und daraus resultierende Ausreißer von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Bild 4-68 zeigt die statistische Auswertung mittels Boxplots. Alle Werte über 65,0 [‰ · 10⁻⁴/n] sind in dieser Grafik aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt. Die Boxplots in Einzeldarstellung können dem Anhang B (Bild B-5 bis Bild B-9) entnommen werden. Die wichtigsten statistischen Kenndaten in tabellarischer Form sind ebenfalls im Anhang (Tab. B- 3) aufgeführt. Es ist zu beachten, dass die Ausreißer eindeutig den Varianten zuzuordnen sind, die einen Wendepunkt aufweisen. Aufgrund von zu geringen Datenmengen konnten einige Asphaltarten nicht statistisch ausgewertet werden.

Nach Bereinigung von Ausreißern verbleiben 110 Datensätze für die weitere Betrachtung. Die sich daraus ergebenden minimalen und maximalen Werte für die Dehnungsrate sind in Bild 4-69 dargestellt. Der resultierende Maximalwert für die Dehnungsrate der Asphaltart AC 11 D S (BK) beträgt in diesem Fall 16,9 [‰ · 10⁻⁴/n]. Alle Probekörper dieses Datensatzes weisen jedoch Wendepunkte auf, so dass dieser Wert für die weitere Betrachtung ausgeschlossen wurde und sich der Maximalwert der Dehnungsrate auf 13,4 [‰ · 10⁻⁴/n] reduzierte. Zusätzlich wurden die beiden niedrigsten Werte für diese Asphaltart nicht eliminiert, obwohl sie rechnerisch als Ausreißer gekennzeichnet wurden. Niedrige Dehnungsraten sprechen für einen besonders verformungsbeständigen Asphalt und sind daher für die weitere Betrachtung durchaus interessant. Alle Daten weisen maximale Dehnungsraten ≤ 21,1 [‰ · 10⁻⁴/n] auf.

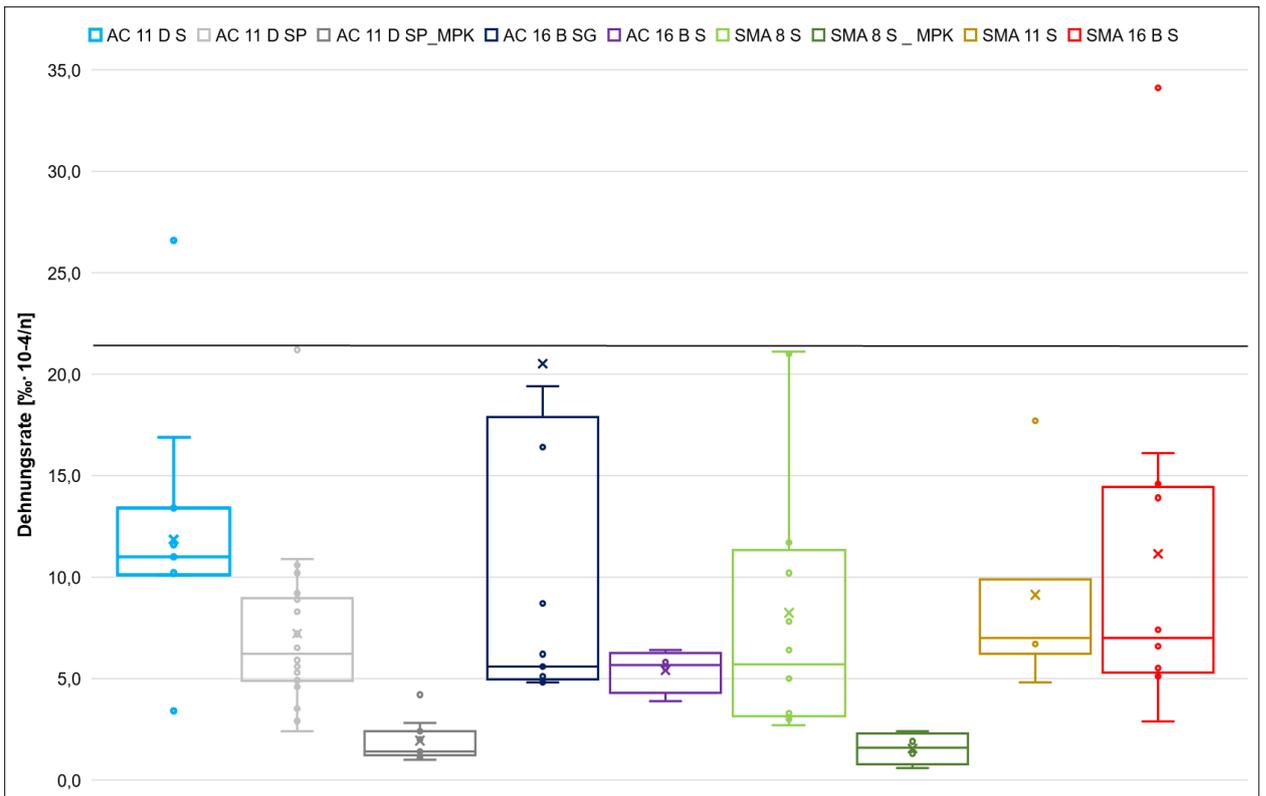


Bild 4-68: Statistische Auswertung der Dehnungsraten aus Bestandsdaten je nach Asphaltart

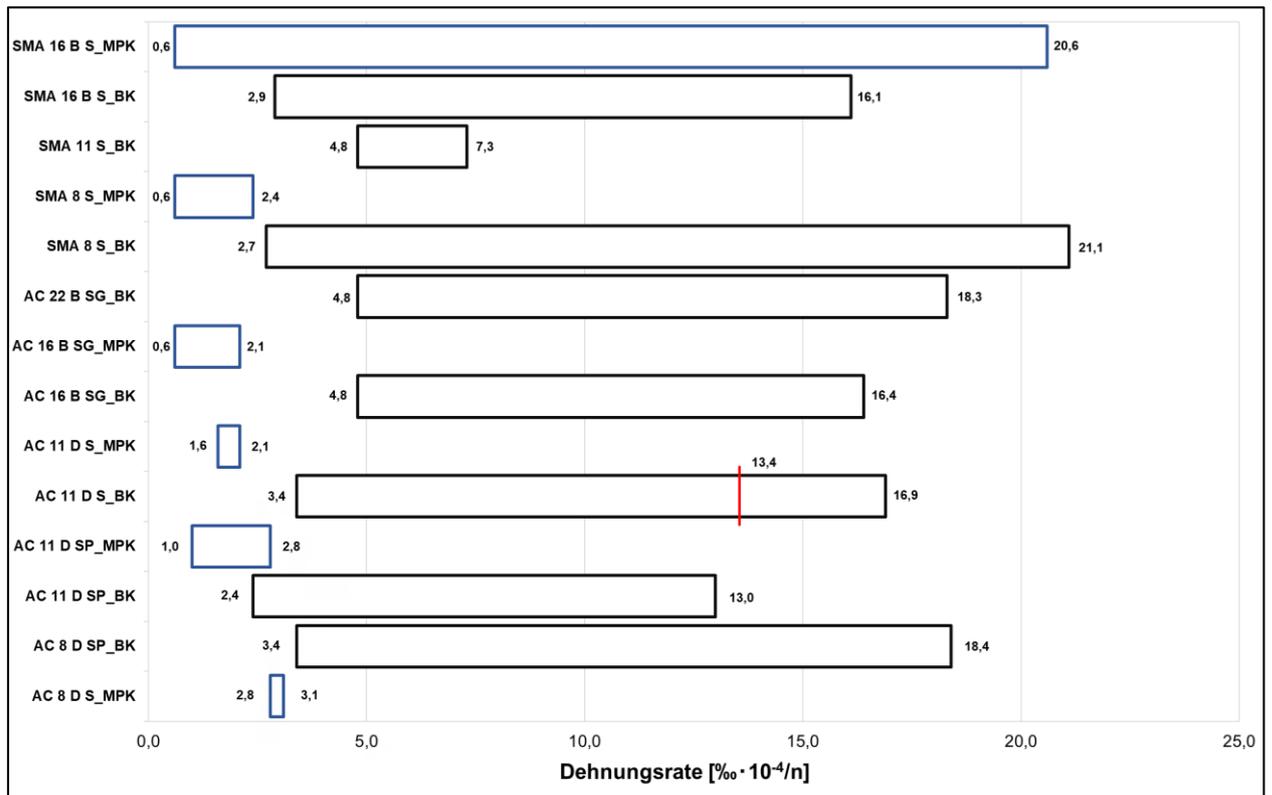


Bild 4-69: Minimale und maximale Dehnungsraten Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestandsdaten

4.4 Zusammenfassende Auswertung aller erhobenen Daten

Zusammenfassend wurden die Dehnungsraten der im Labor hergestellten Proben, der Proben aus dem von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bereitgestellten Mischgut, die Dehnungsraten aus Bestandsdaten und die Ergebnisse des Ringversuchs an RUB gemeinsam betrachtet. Damit ergab sich eine größere Datenbasis für die einzelnen Asphaltmischgutsorten. Zu diesem Zweck wurden die Daten zunächst mithilfe von Box-Whisker-Plots erneut statistisch ausgewertet, um eine weitere Analyse ohne Berücksichtigung von sich neu ergebenden Ausreißern durchzuführen. Nach statistischer Prüfung, Eliminierung der Ausreißer und Anpassung der maximalen Dehnungsrate der Variante AC 11 D S verbleiben noch 118 Datensätze von Probekörpern aus WSV-Platten zur anschließenden Auswertung. Die wichtigsten statistischen Kenndaten in tabellarischer Form sind dem Anhang B zu entnehmen (Tab. B-4).

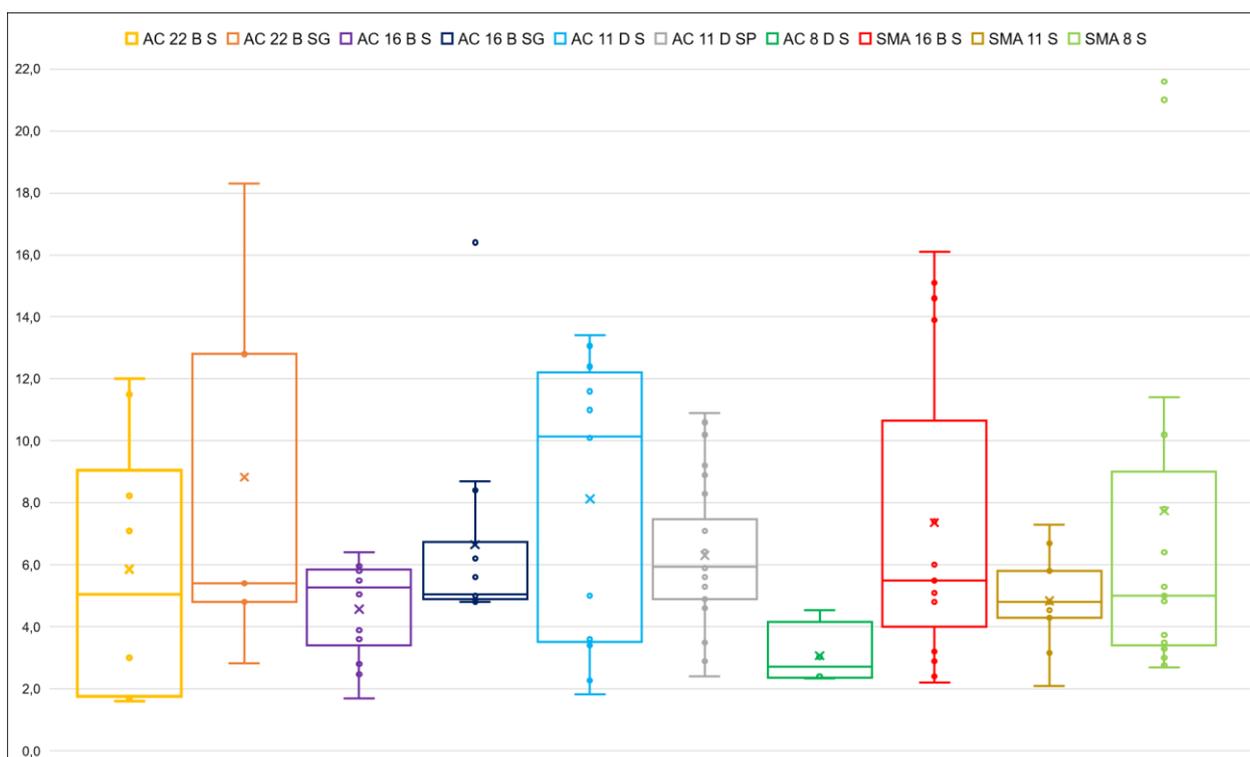


Bild 4-70: Statistische Auswertung der Dehnungsraten aller erhobenen Daten

Bei Asphaltuntersuchungen wird üblicherweise davon ausgegangen, dass die Versuchsdaten einer Normalverteilung folgen, wenn statistische Methoden angewendet werden. Sollte die Normalverteilung nicht erfüllt sein, müssten alternative statistische Maße verwendet werden, die unabhängig von der Verteilung sind. Wie in Bild 4-71 ersichtlich ist, weisen die Daten jedoch keine Normalverteilung auf, sondern sind linksschief verteilt. Selbst nach Transformation der Dehnungsrate in logarithmierte Werte (Bild 4-72) ist keine Normalverteilung zu erkennen. Dies könnte auf die große Bandbreite an unterschiedlichen Zusammensetzungen (Bitumenart, Zusätze, Sieblinie) zurückzuführen sein, die sich auf die Kenngröße Dehnungsrate auswirken können. Für die weitere Betrachtung wird die Dehnungsrate demnach weiterhin nicht logarithmiert angegeben.

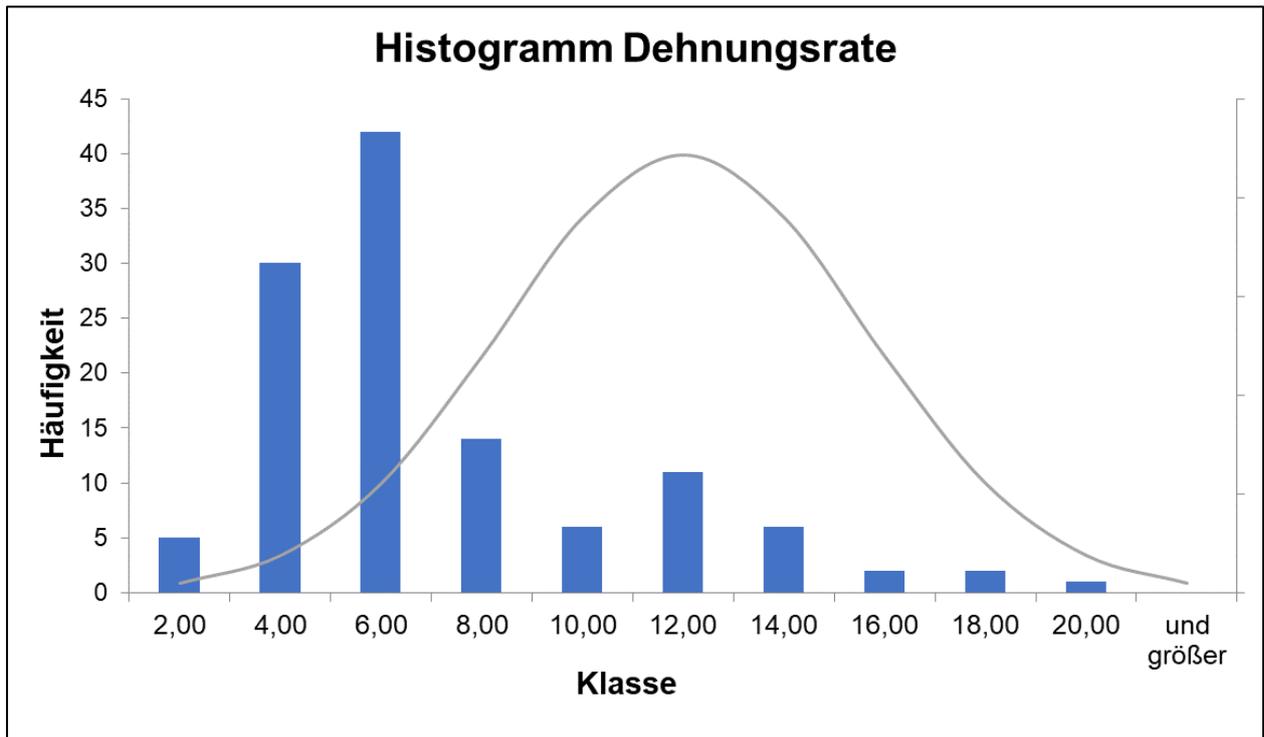


Bild 4-71: Histogramm Dehnungsraten aller erhobenen Daten

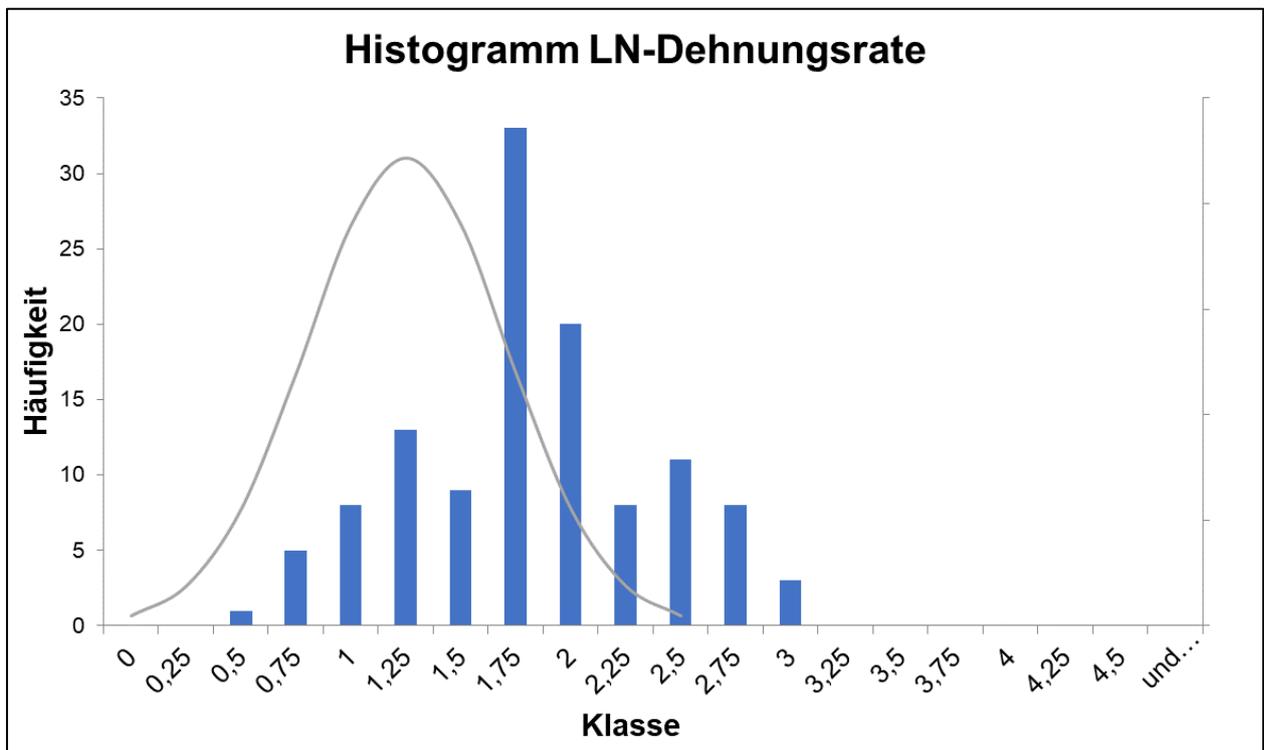


Bild 4-72: Histogramm LN-Dehnungsraten aller erhobenen Daten

Zunächst wurde eine detaillierte Analyse der Daten durchgeführt, wobei eine Unterteilung nach Asphaltorten und Herkunft der Daten erfolgte. Dieser Ansatz wurde gewählt, um potenzielle Unterschiede zwischen den Asphaltorten zu identifizieren und zu charakterisieren. Dazu wurden die minimalen und maximalen

Dehnungsraten je nach Asphaltart dargestellt. (Bild 4-73) Die Ergebnisse der Analyse zeigen keine eindeutige Tendenz über sämtliche untersuchten Asphaltarten hinweg. Dennoch fiel auf, dass bei einigen Varianten der Asphaltbinderschicht tendenziell höhere Dehnungsraten festgestellt wurden. Diese Beobachtung deutet darauf hin, dass bestimmte Eigenschaften der Binderschicht möglicherweise eine Rolle bei der Verformungsbeständigkeit spielen kann. Es ist jedoch zu beachten, dass die Datengrundlage für einige Asphaltarten sehr begrenzt ist, was die Aussagekraft der Ergebnisse einschränkt.

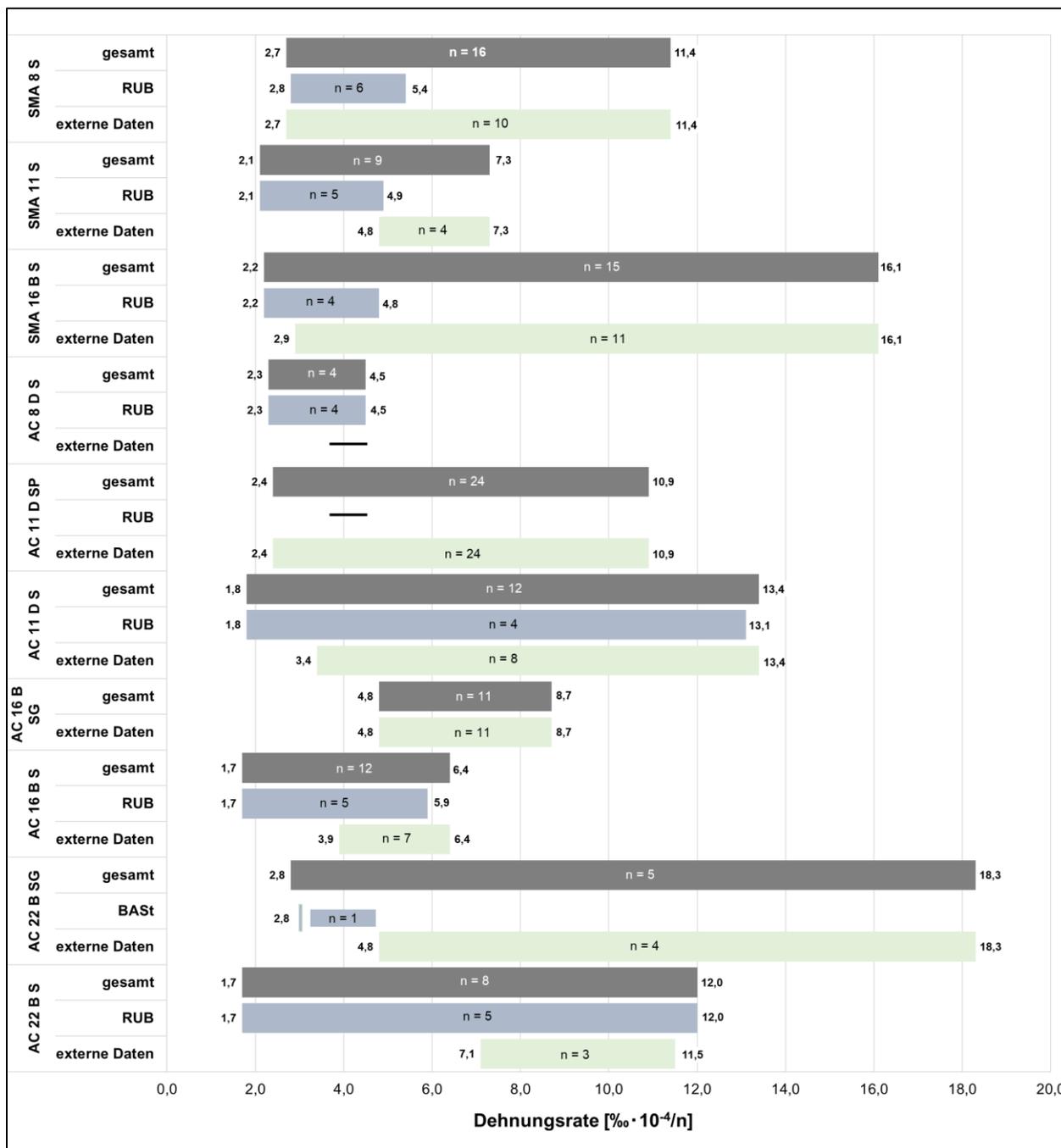


Bild 4-73: Minimale und maximale Dehnungsrate getrennt nach Asphaltart und Ursprung der Daten

Da die Asphaltmischgutvarianten mit unterschiedlichen Bindemitteln hergestellt wurden, sollte auch der Einfluss des Bindemittels berücksichtigt werden, so dass eine Trennung nur nach Asphaltarten zu ungenau erscheint. Daher wurde zunächst eine reine Betrachtung der Spannweite der Dehnungsrate differen-

ziert nach den jeweiligen Bindemittelsorten durchgeführt. Wie bei den Laborvarianten aus dem Untersuchungsprogramm zu erkennen ist, weisen die Asphaltbinderschichtvarianten mit Straßenbaubitumen erhöhte Dehnungsraten auf, wobei diese Aussagen aufgrund der geringen Datenlage nicht validiert werden konnten. Ein verbessertes Gebrauchsverhalten bei hohen Temperaturen wird den polymermodifizierten Bitumen und auch den mit viskositätsveränderten Zusätzen versehenen Bitumen zugesagt. Die Unterteilung allein nach der Bindemittelsorte soll daher eine erste Tendenz ermöglichen, ob modifizierte Bitumen möglicherweise geringere Dehnungsraten aufweisen. Allerdings wird dies überlagert durch sehr unterschiedliche Mischgutzusammensetzungen (SMA- und AC-Konzepte), die ein eindeutige Aussage sehr schwierig machen.

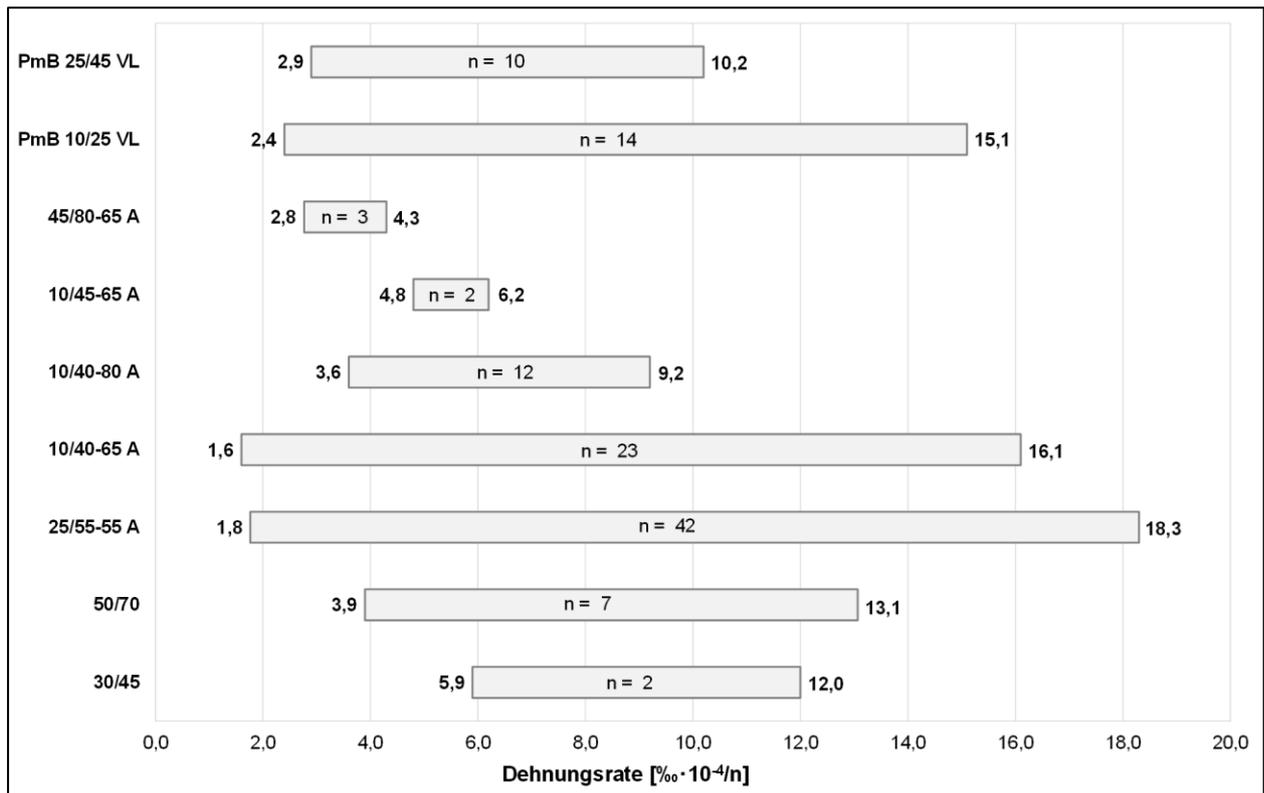


Bild 4-74: Minimale und maximale Dehnungsrate je nach Bindemittelsorte

Bild 4-74 zeigt die Verteilung der Dehnungsrate für die einzelnen Bindemittelsorten. Es ist nicht zu erkennen, dass die Varianten mit Straßenbaubitumen Tendenzen zu höheren Dehnungsraten aufweisen. Somit kann ein alleiniger Einfluss des Bindemittels ausgeschlossen werden und es bedarf einer weiteren Betrachtung in Abhängigkeit von der Bindemittelsorte in Kombination mit der Asphaltart/-sorte.

Auch hier ist besonders auf die geringe Datenbasis hinzuweisen. Je mehr Daten für eine Bindemittelsorte vorliegen, desto größer ist die sich ergebende Spanne. Für einige Sorten liegen nur zwei bis drei Datensätze vor. Dies lässt keine gesicherten Aussagen zu. Insgesamt liegen dem obigen Diagramm nur 115 Datensätze zugrunde. Für die Bindemittelsorte 25/35 VL liegt nur ein Datensatz mit einem Dehnungsratenwert von 13,4 vor. Dieser ist nicht aufgeführt.

Die Dehnungsraten in Abhängigkeit von der Asphaltart und dem verwendeten Bindemittel können der folgenden Tabelle (Tab. 4-29) entnommen werden. Eine grafische Darstellung der Spannweiten für die verschiedenen Varianten stellt Bild 4-75 dar. Eine detaillierte Veranschaulichung ist im Anhang (Bild A-23 bis Bild A-27) aufgeführt. Die Ergebnisse können nur eine erste Tendenz für Anforderungswerte an die Dehnungsrate geben. Obwohl eine Vielzahl von Varianten zur Verfügung steht, die auch einen großen Teil der in den TL Asphalt-StB aufgeführten Mischgutzusammensetzungen abdecken, ist die Datenbasis für eine Einzelbetrachtung unter Berücksichtigung der Bindemittelart und -sorte zu gering.

Asphaltsorte	Bindemittel	Anzahl	Mittelwert Dehnungsrate	Maximalwert Dehnungsrate
AC 22 B S	PmB 10/25 VL	1	7,1	-
	30/45	1	12	-
	25/55-55 A	3	7,2	11,5
	10/40-65 A	3	2,1	3,0
AC 22 B SG	25/55-55 A (RC)	1	2,8	-
	25/55-55 A	2	15,6	18,3
	PmB 25/45 VL	2	5,1	5,4
AC 16 B S	25/55-55 A	6	5,3	6,4
	10/40-65 A	4	3,4	5,8
	30/45	1	5,9	-
	50/70	1	3,9	-
AC 16 B SG	10/45-65 A	3	5,3	6,2
	10/40-80 A	4	5,8	8,4
	25/55-55 LT	2	6,9	8,7
	25/45 VL	1	5,6	-
	PmB 10/25 VL	1	4,9	-
AC 11 D S	10/40-65 A	1	1,8	-
	25/35 VL	1	1,4	-
	25/55-55 A	3	3,6	5,0
	50/70	5	12,1	13,1
	PmB 25/45 VL	2	10,2	10,2
AC 11 D SP	10/40-65 A	9	6,4	10,6
	10/40-80 VL	6	6,2	9,2
	25/55-55 A	6	7,0	10,9
	PmB 10/25 VL	2	3,9	4,9
	PmB 25/45 VL	1	6,5	-
AC 8 D S	25/55-55 A	3	2,6	3,0
	50/70	1	4,5	-
SMA 16 B S	10/40-65 A	5	8,7	16,1
	45/80-65 A	1	3,2	-
	PmB 10/25 VL	7	8,0	15,1
	PmB 25/45 VL	2	3,9	4,8
SMA 11 S	10/40-80 VL	2	5,3	5,8
	25/55-55 A	4	3,7	4,9
	45/80-65 A	1	4,3	-
	PmB 10/25 VL	2	7,0	7,3
SMA 8 S	25/55-55 A	12	5,7	11,4
	45/80-65 A	1	2,8	-
	PmB 10/25 VL	1	6,4	-
	PmB 25/45 VL	2	3,2	3,3

Tab. 4-29: Mittel- und Maximalwerte der Dehnungsraten unterteilt in Asphalt- und Bindemittelsorte

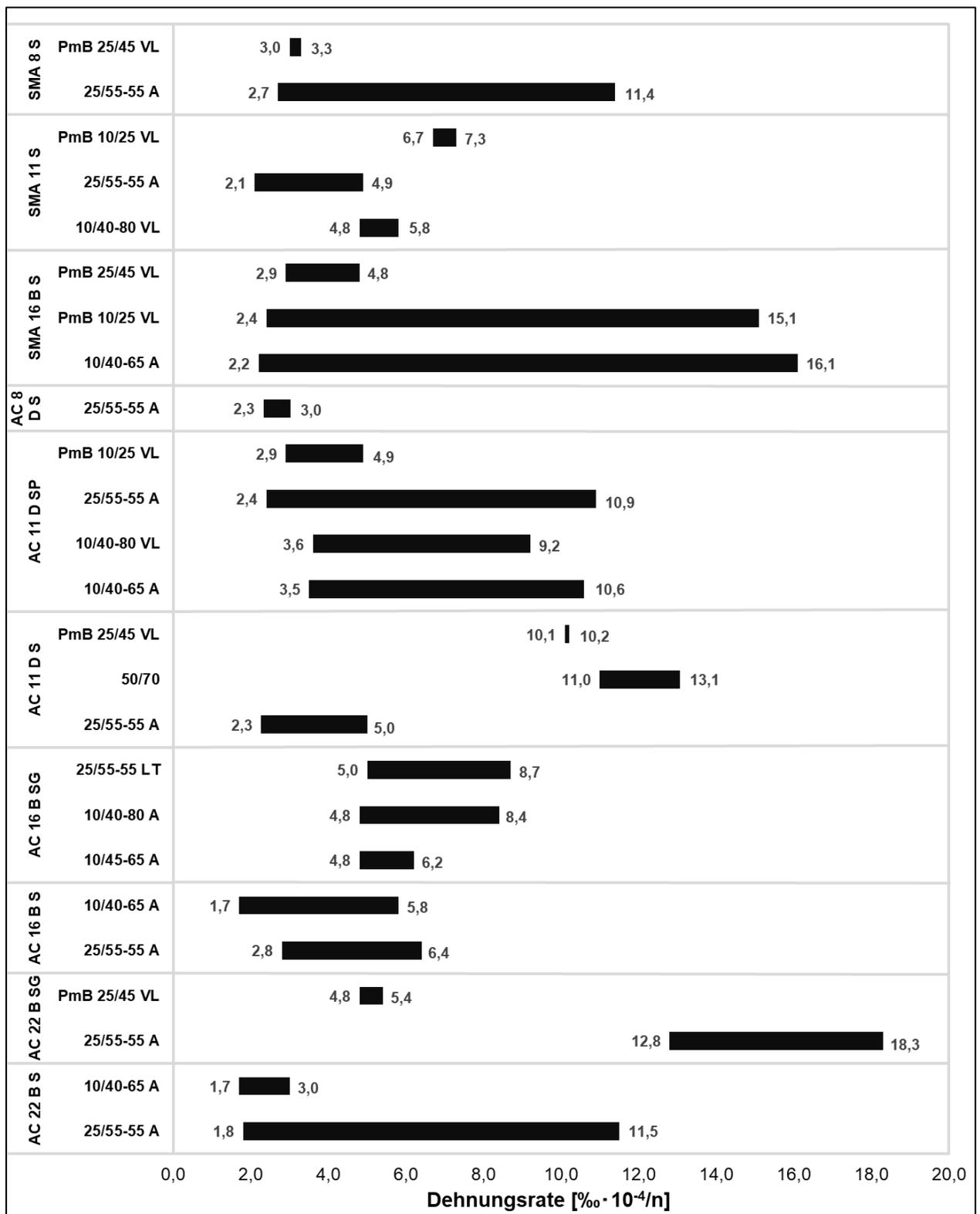


Bild 4-75: Minimal- und Maximalwert der Dehnungsraten unterteilt in Asphalt- und Bindemittelsorte

Nach [Karcher, 2005] ist die Steifigkeit am Marshall-Probekörper um den Faktor 2 bis 3 höher als an Bohrkernen aus WSV-Platten und auch weitere Untersuchungen ergaben, dass die Dehnungsraten am MPK geringer sind als an BK aus Asphaltplatten. Die Auswertungen ergaben ein Verhältnis der Dehnungen (Umrechnungsfaktor), das je nach Asphaltart deutlich zwischen 1,8 und 5,3 schwankte (siehe Tab. 1-5).

Diese Ergebnisse wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens überprüft. In Tab. 4-30 sind die wichtigsten Dehnungskennwerte und der Umrechnungsfaktor von MPK auf BK aufgeführt. In Bild 4-76 sind die Ergebnisse zusätzlich grafisch dargestellt. Die vorliegenden Ergebnisse basieren ausschließlich auf den Untersuchungen der RUB. Für beide Varianten (MPK und BK) können identische Asphaltmischgutzusammensetzung vorausgesetzt werden, so dass die Ergebnisse gut miteinander verglichen werden können. Betrachtet werden die Mittelwerte der Dreifachbestimmungen. Für die Dehnungsrate liegt der Faktor zwischen 1,0 und 5,5 und für die Dehnung zwischen 2,4 und 5,9, dies entspricht in etwa den Ergebnissen der Vergleichsuntersuchungen von [Plachkova-Dzhurova.; Milch, 2020].

	Asphaltart	Bindemittelart	Dehnungsrate [‰*10 ⁻⁴ /n]			Dehnung [‰]			Belastungszyklen	
			MPK	WSV	Faktor r WSP- MPK	MPK	WSV	Faktor r WSP- MPK	MPK	WSV
1	AC 22 B S	25/55-55 A	0,9	1,8	2,0	10,1	24,9	2,5	10.000	10.000
		10/40-65 A	0,6	3,0	5,0	6,03	20,1	3,3	10.000	10.000
			5,3	23,7	4,4	126	30,4	2,4	WP	WP
		30/45	6,0	12,0	2,0	16,3	56,6	3,5	10.000	10.000
2	AC 16 B S	25/55-55 A	1,4	2,80	2,0	10,9	28,8	2,6	10.000	10.000
			1,3	5,1	3,9	7,8	26,7	3,4	10.000	10.000
		10/40-65 A	0,6	1,70	2,8	7,0	22,5	3,2	10.000	10.000
		30/45	1,8	5,93	3,2	9,6	31,5	3,3	10.000	10.000
3	AC 11 D S	50/70	6,9	13,1	1,9	20,8	63,3	3,0	10.000	10.000
		25/55-55 A	0,8	2,3	3,0	8,5	34,6	4,1	10.000	10.000
		10/40-65 A	0,3	1,8	5,5	9,1	22,4	2,4	10.000	10.000
4	AC 8 D S	25/55-55 A	0,7	2,4	3,3	12,6	37,6	3,0	10.000	10.000
		50/70	2,2	4,5	2,1	14,1	44,3	3,1	10.000	10.000
5	SMA 16 B S	10/40-65 A	2,2	2,2	1,0	10,6	26,0	2,5	10.000	10.000
		PmB 15/45 VL	1,4	4,8	3,4	8,9	39,1	4,4	10.000	10.000
6	SMA 11 S	25/55-55 A	1,5	4,9	3,3	9,5	56,5	5,9	10.000	10.000
			2,2	3,2	1,4	13,5	45,7	3,4	10.000	10.000
		45/80-65 A	1,7	4,3	2,6	8,2	30,2	3,7	10.000	10.000
7	SMA 8 S	45/80-65 A	1,0	2,8	2,7	10,2	29,9	2,9	10.000	10.000
		25/55-55 A	1,4	4,8	3,4	12,0	55,8	4,7	10.000	10.000
			1,6	5,0	3,1	12,1	61,7	5,1	10.000	10.000
			8,9	26,9	3,0	22,1	72,5	3,3	WP	WP
8	AC 11 D SP	10/40/65 A	1,3	6,4	5,1	9,9	49,6	5,0	10.000	10.000
9	AC 22 B SG	25/55-55 A	0,6	2,8	4,7	6,6	27,9	4,2	10.000	10.000

Tab. 4-30: Verhältnis BK zu MPK (Umrechnungsfaktor) - Laborvarianten

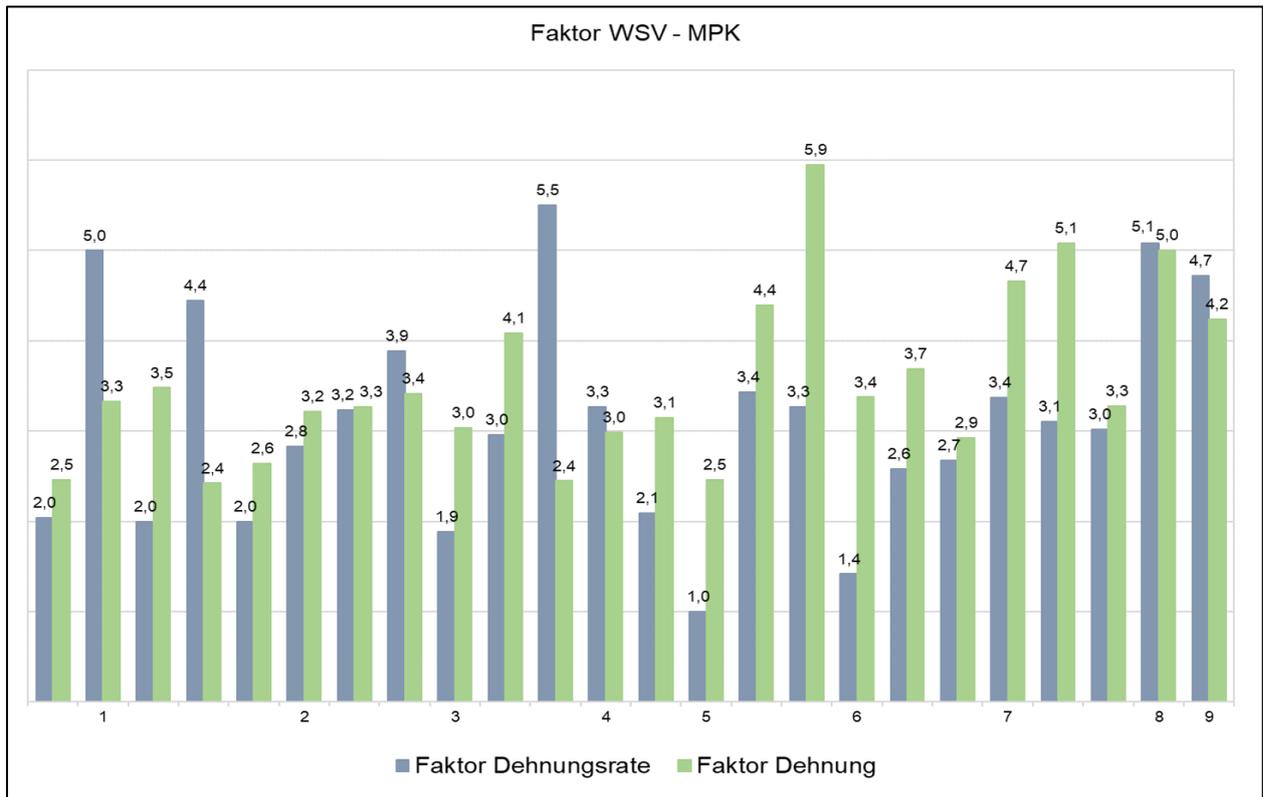


Bild 4-76: Verhältnis BK zu MPK (Umrechnungsfaktor) - Laborvarianten

Zusätzlich wurden aus allen gesammelten Daten die Mittelwerte der Dehnungsraten, unabhängig vom Bindemitteltyp, an MPK und BK ermittelt und das Verhältnis der beiden Werte bestimmt. Die Ergebnisse können dem Diagramm in Bild 4-77 entnommen werden.

Der Umrechnungsfaktor liegt zwischen 1,2 und 4,2 und ist damit ähnlich zu den bisher bekannten Faktoren. Lediglich das Verhältnis der Asphaltart AC 22 B SG liegt mit 14,7 deutlich über den anderen Werten. Ursächlich hierfür ist eine sehr kleine Dehnungsrate von 0,6 $[\% \cdot 10^{-4}/n]$ am Marshall-Probekörper. Daher sollte dieser Umrechnungsfaktor aus der Betrachtung herausgenommen werden.

Insgesamt kann anhand der Ergebnisse die Aussage bestätigt werden, dass in allen Fällen die Dehnungsraten an Bohrkernen aus Asphaltplatten höher sind als an MPK und die schlagende Verdichtung von MPK einen deutlich höheren Verformungswiderstand erzeugt als praxisnah verdichtete Probekörper.

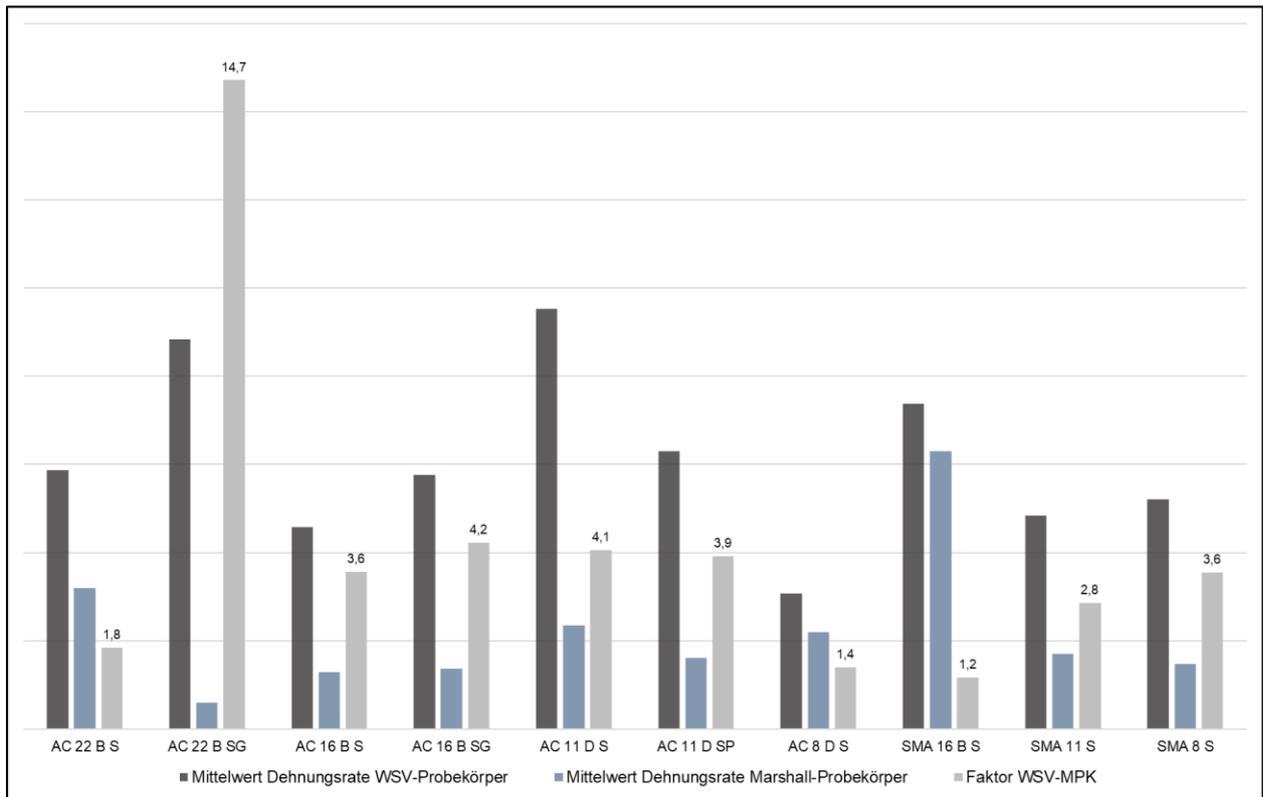


Bild 4-77: Verhältnis Dehnungsrate MPK zu BK aller erhobenen Daten

4.4.1 Bezug zu den Dehnungsraten in situ

Insgesamt wurden zehn Praxisstrecken ausgewählt, von denen Bohrkern entnommen wurden, um die Ergebnisse der im Labor hergestellten Asphaltkonzepte zu validieren

Die graphische Darstellung in Bild 4-78 zeigt den Vergleich der Dehnungsraten zwischen Bohrkernen aus Praxisstrecken und aller im Labor hergestellten Prüfkörper. Dazu wurden die Mittelwerte der Dreifachbestimmungen gebildet und anschließend verglichen. Es wurden sowohl die maximalen Dehnungsraten aller Proben aus den Praxisstrecken als auch die "korrigierten" Daten, die den Einfluss der vorhandenen Verfahrensgenauigkeit berücksichtigen, betrachtet. Es wurde festgestellt, dass die Dehnungsraten der im Labor hergestellten Probekörper deutlich niedriger sind. Zusätzlich ist anzumerken, dass ebenso ein erheblicher Unterschied zwischen den Dehnungsraten in situ und den Dehnungsraten von Probekörpern aus WSV-Platten besteht.

Die Probekörper aus AC 22 B S (MPK), weisen als einzige MPK-Variante Wendepunkte auf. Bei Betrachtung der "korrigierten" Daten zeigt sich nur bei der AC 8 D-Variante ein signifikant höherer Mittelwert, was möglicherweise auf eine geringere Anzahl von Messungen zurückzuführen ist. Es fehlen jedoch Informationen über den Aufbau, die Liegedauer und die genaue Beanspruchung des entsprechenden Abschnitts, um diese Ergebnisse vernünftig einordnen zu können. Bei der Binderschicht scheint die AC-Variante mit einem Größtkorn von 22 mm verformungsbeständiger zu sein. Auch hier liegt nur eine Dreifachbestimmung vor, was eine fundierte Aussage aufgrund der begrenzten Datenmenge erschwert. Im Vergleich zum Labormaßstab zeigen sich teilweise verformungsstabilere Bohrkern aus AC 16 B S. Eine Validierung der Dehnungswerte der im Labor hergestellten Probekörper anhand der Dehnungswerte der Probekörper aus den Praxisstrecken gestaltet sich aufgrund der geringen Datenbasis als schwierig. Auch kann keine Korrelation zwischen den Dehnungsraten der Praxisstrecken und der Dehnungsraten der Laborvarianten hergestellt werden (s. Bild 4-79).

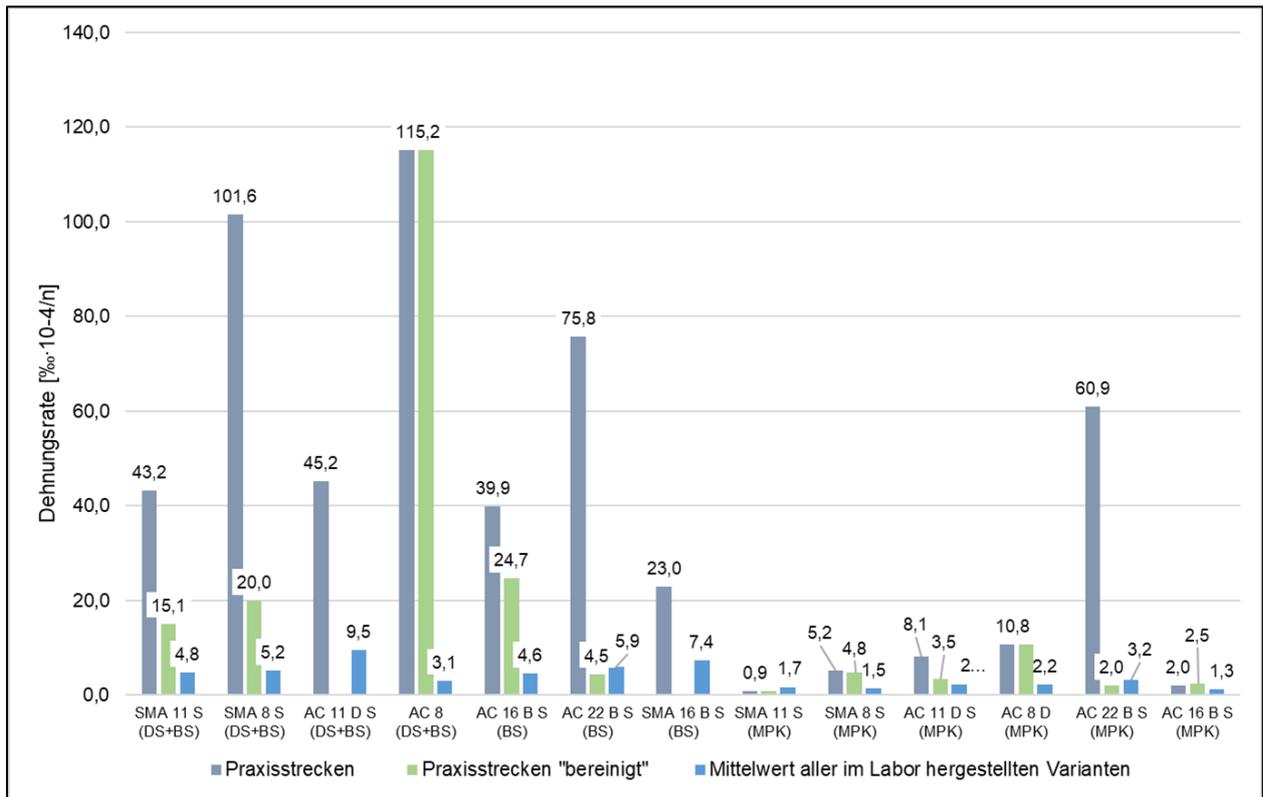


Bild 4-78: Vergleich der Mittelwerte der Dehnungsraten in situ gegenüber aller erhobenen, im Labor hergestellten Varianten

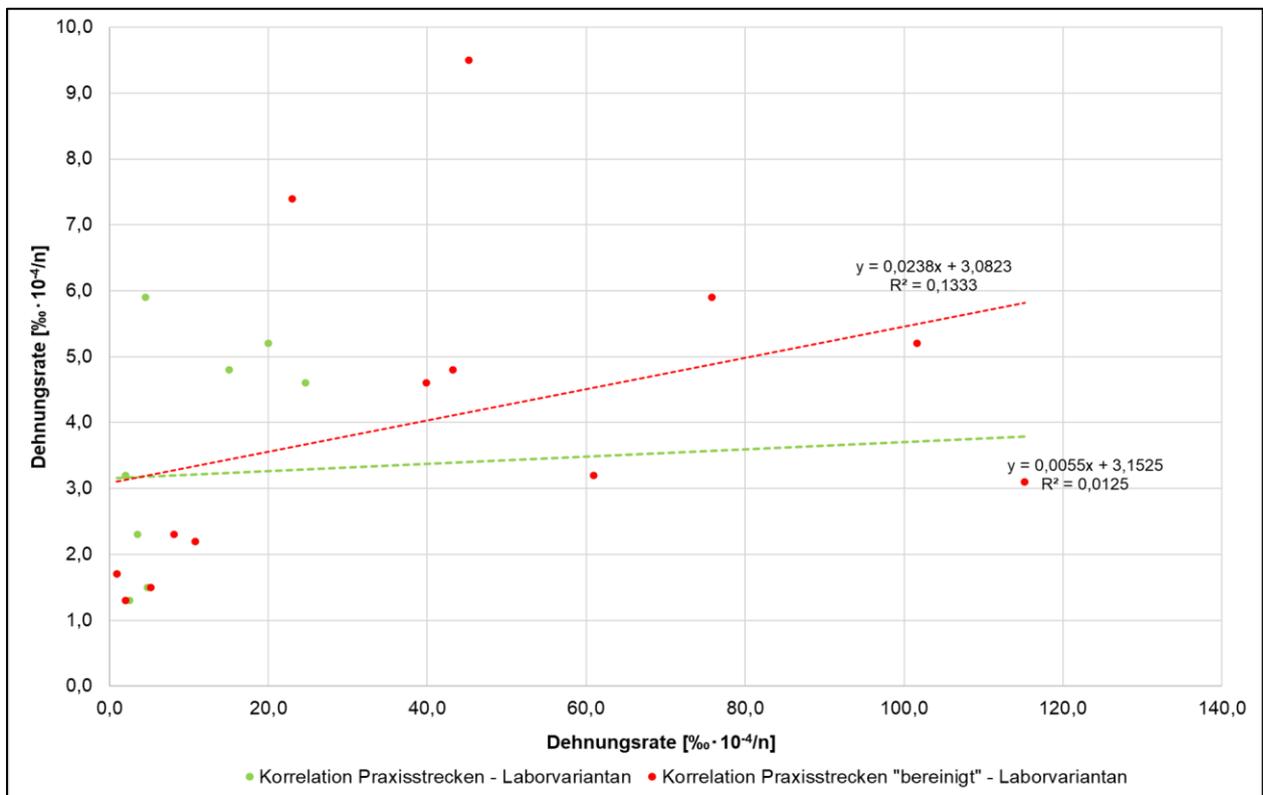


Bild 4-79: Korrelationen zwischen den Dehnungsraten in situ und der Laborvarianten

4.5 Zielwerte für den Verformungswiderstand von Walzasphalten sowie Verfahrenspräzision

Nach der Änderung der [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1], die nun die Verwendung praxisingerechter, walzverdichteter Probekörper für Prüfungen vorsieht, und mit der Überarbeitung des Technischen Regelwerks (TL Asphalt-StB und ZTV Asphalt-StB), bei der diese Prüfvorschrift zur Beschreibung des Verformungswiderstands zur Standardmethode werden soll, konzentrierte sich das Projekt darauf, einen belastbaren Bewertungshintergrund für diese Prüfmethode zu schaffen. Aus den Auswertungen der erhobenen Daten und identifizierten Zusammenhängen kann ein Vorschlag für Zielwerte für den Verformungswiderstand anhand der Dehnungsrate abgeleitet werden. Es wird folgender allgemeiner Zielwert vorgeschlagen, welcher für alle Walzasphalte gelten sollte und im Rahmen der Erstprüfungsuntersuchungen an im Labor hergestellten Prüfkörpern nachzuweisen ist.

$$\epsilon_i^* \leq 12 [\% \cdot 10^{-4}/n]$$

Dabei ist zu beachten, dass nach den bisherigen Erfahrungen die Prüfungen an walzsektorverdichtetem Mischgut das im Labor hergestellt meist geringere Dehnungsraten aufweisen als Proben, die an Probeplatten aus großtechnisch hergestelltem Mischgut gewonnen wurden. Der vorgeschlagene Zielwert sollte aber auch dann eingehalten werden, wenn Proben mit Mischgut aus der großtechnischen Produktion verwendet wurden. Abgeleitet wurde der Vorschlag des Zielwertes aus dem 90 % - Quantil. Bild 4-80 zeigt den Box-Whisker-Plot für die Dehnungsraten aller Walzasphaltsorten. Als oberer Zielwert (Ende der Box) wurde in diesem Fall der 90% - Quantilwert gewählt. Dieser Wert liegt bei 11,6 [%*10⁻⁴/n]. Daraus wird der allgemeine ganzzahlige Zielwert von 12 [%*10⁻⁴/n] abgeleitet.

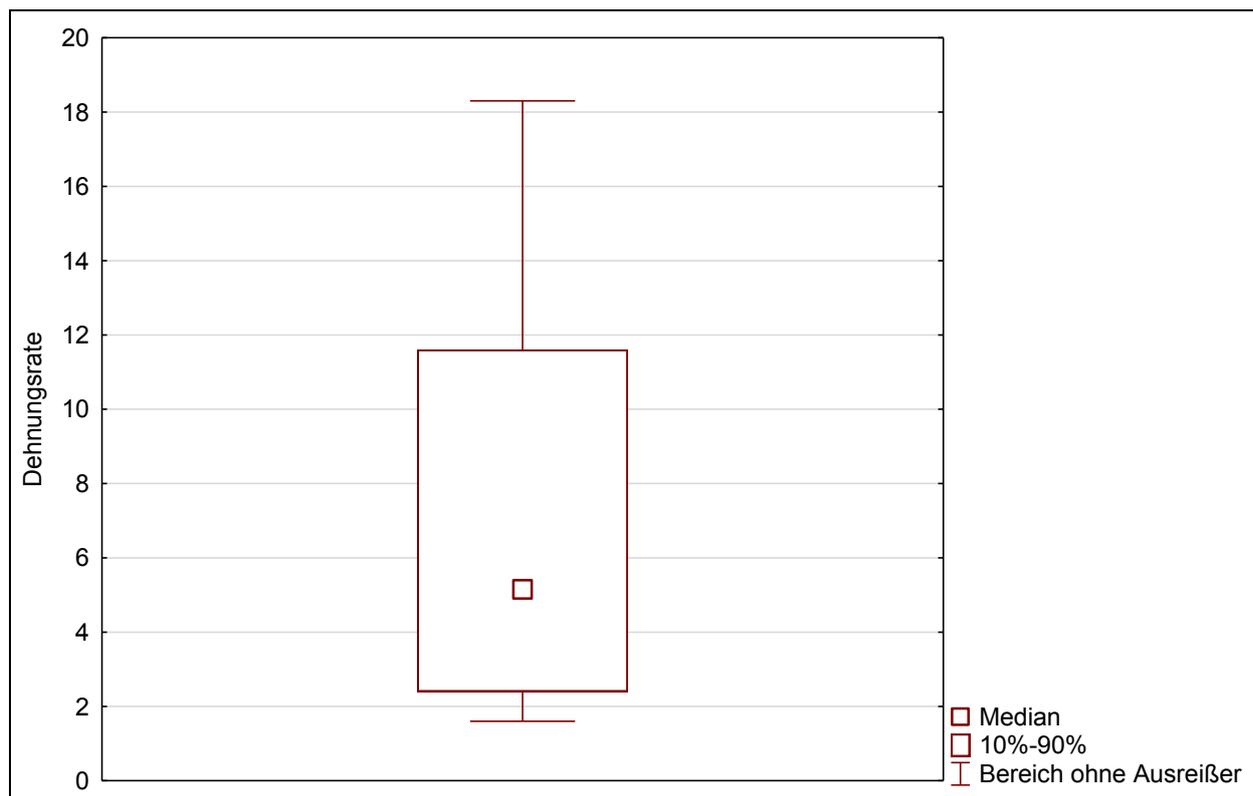


Bild 4-80: Anforderung an die Dehnungsrate

Auch wenn keine klaren Unterschiede in den maximalen Dehnungsraten der jeweiligen Asphaltsorte zu erkennen sind (Bild 4-75) wurde für die sechs Hauptsorten ebenfalls der 90 %-Quantilwert berechnet. Diese sind in Tab. 4-31 aufgeführt. Demnach weisen die Sorten AC 22 B und SMA 16 B einen höheren maximalen Wert auf, als der vorgeschlagene Zielwert. Da es sich bei diesen beiden Mischgutsorten um Varianten für sehr hohe Verkehrsbeanspruchungen handelt, wird eine Aufweitung des Zielwertes als nicht sinnvoll

angesehen. Sollten im Rahmen der Erstprüfung Dehnungsraten von über 12 [‰*10⁻⁴/n] auftreten, dann muss eine weitere Optimierung der Mischgutzusammensetzung erfolgen.

Generell ist anzumerken, dass diese Werte und damit auch der vorgeschlagene Zielwert teilweise auf recht geringe Datenmengen basieren (z.B. für den AC 8). Eine weitere statistische Absicherung durch größere Datenmengen wäre hier anzustreben.

	90-% Quantil-Wert je Asphaltart
alle Werte	11,6
AC 22 B	12,6
AC 16 B	6,4
AC 11	12,0
AC 8	4,1
SMA 16 B	14,9
SMA 11	6,8
SMA 8	9,0

Tab. 4-31: Anforderungen an die Dehnungsrate je nach Asphaltart

Darüber hinaus sollte ein schärferer Zielwert für besonders hohe verformungswirksame Beanspruchungen (Bk100) in Betracht gezogen werden. Hier kommen dann nur noch SMA-Varianten vor, die mit einem modifizierten Bindemittel versehen werden. Hierfür wird folgender Zielwert

$$\epsilon_i^* \leq 6 \text{ [‰} \cdot 10^{-4} / \text{n]}$$

vorgeschlagen.

Der Wert ergibt sich durch Betrachtung der Boxplots für in Bild 4-81. Hier wurde der obere Zielwert anhand des 75 %-Quantilwertes bestimmt, da für Asphaltarten, die einer hohen Beanspruchung ausgesetzt sind, eine engmaschigere Betrachtung sinnvoll ist.

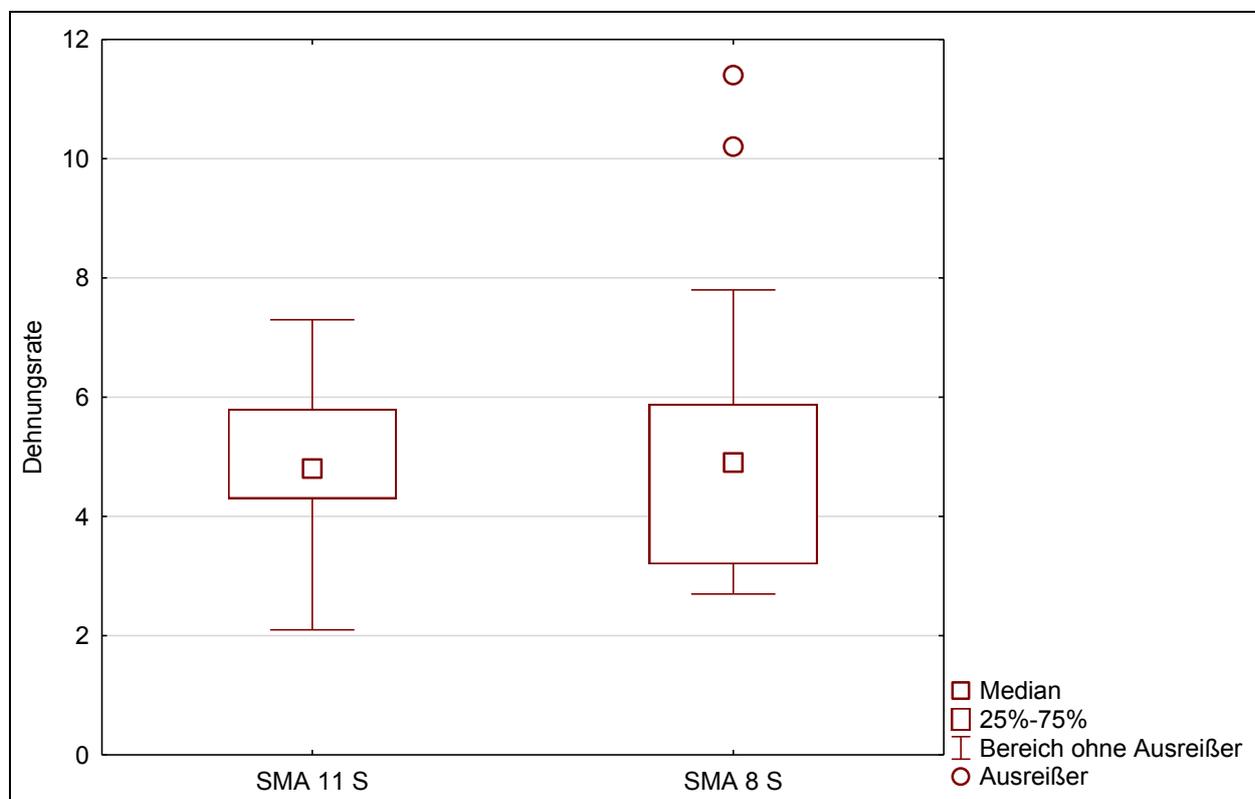


Bild 4-81: Anforderung an die Dehnungsrate für hohe verformungswirksame Beanspruchungen (SMA)

Darüber hinaus gibt es noch besondere Fälle (z.B. B-Zahl größer als 200). Für diese Fälle sollte über eine Erweiterung der Prüfrandbedingungen nachgedacht werden (höhere Temperaturen und/oder längere Lasteinwirkung). Erste Tastversuche wurden im Rahmen des Projektes durchgeführt, die allerdings noch keine hinreichenden Erkenntnisse geliefert haben (zu geringe Anzahl an Prüfungen).

Zudem wird darauf hingewiesen, dass die vorgeschlagenen Zielwerte ausschließlich im Rahmen der Erstprüfungen Anwendung finden sollten. Als Zielwerte für Untersuchungen im Rahmen der Kontrollprüfungen (Bohrkerne aus der Straße oder walzsektorverdichtete Platten aus Kontrollmischgut) sind diese Werte nicht geeignet.

Verfahrenspräzision

Die kritische Spannweite für eine bestimmte Prüfbedingung errechnet sich aus dem Produkt der entsprechenden Standardabweichungen und dem Faktor $W_P(n)$. Dieser Faktor wird durch die Anzahl der zugrunde liegenden Messwerte und eine vorgegebene statistische Sicherheit bestimmt. Er wird so gewählt, dass unter normalen Prüfbedingungen und unter Berücksichtigung der statistischen Bedingungen die normgerechte Spannweite einer Messreihe im Mittel nur in 5 von 100 Fällen überschritten wird. Die statistische Sicherheit beträgt somit 95 % [M stat. Ausw., Teil 1, 2000].

Um eine Verfahrenspräzision zu definieren, wurden alle Daten für BK aus Asphaltplatten berücksichtigt, für die eine Angabe zu den drei Einzelmesswerten vorlag.

Bei der vorliegenden Auswertung wurde ausschließlich auf die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse geachtet, wobei jedes zusätzliche Wertepaar die Aussagekraft erhöht. Das bedeutet, dass auch Ausreißer, die zuvor aus den Betrachtungen ausgeschlossen wurden, in die weitere Auswertung einbezogen wurden.

Zur Überprüfung der Verfahrensgenauigkeit nach dem FGSV-Merkblatt [M stat. Ausw., Teil 1, 2000] wurde mit der Standardabweichung und dem Faktor $W_P(n)$ die kritische Spannweite nach obiger Formel berechnet. Der Faktor ergibt sich aus dem Merkblatt zu 3,31 und basiert auf der Anzahl der Einzelwerte, wobei in diesem Fall immer drei Einzelergebnisse zugrunde liegen.

Das Diagramm in Bild 4-82 zeigt die maximale Spannweite von drei Einzelwerten und die jeweils mithilfe der Formel berechnete kritische Spannweite. Es ist zu erkennen, dass kein Wert die kritische Spannweite überschreitet, obwohl auch Datensätze mit Wendepunkten innerhalb der drei Einzelmessungen berücksichtigt wurden, die einen großen wertmäßigen Unterschied aufweisen. Im Allgemeinen sind die ermittelten kritischen Spannweiten vergleichsweise groß. Diese Beobachtung kann jedoch typisch für dynamische Prüfverfahren sein, da mit zunehmender Komplexität eines Prüfverfahrens die Unschärfe der Aussage zunimmt [Karcher].

Hinzu kommt, dass sich Asphaltmischgut sehr inhomogen verhält bzw. die Zusammensetzung der einzelnen Probekörper hinsichtlich Korngrößenverteilung und Anteil des Größtkorns sehr unterschiedlich sein kann. Auch die Herstellung und Lagerung der Probekörper kann ggf. zu Prüfstreuungen führen.

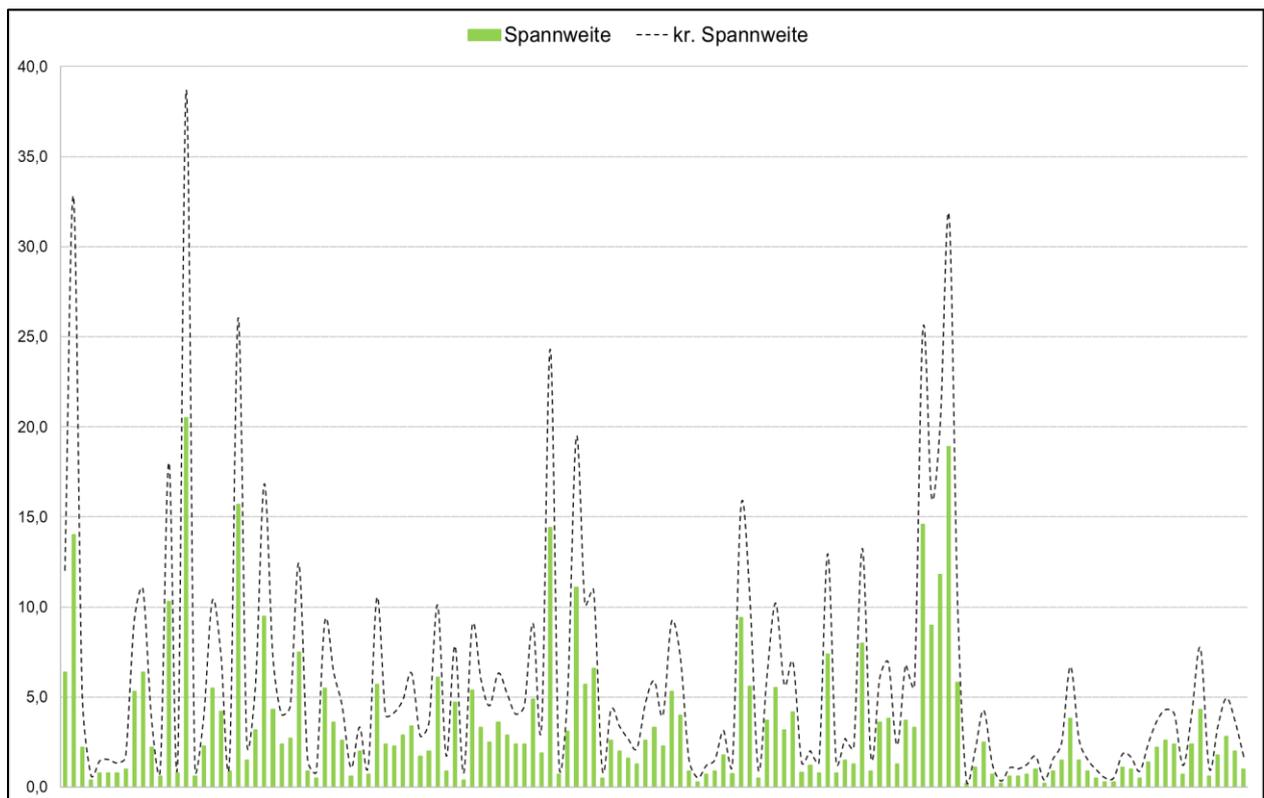


Bild 4-82: Gegenüberstellung der Spannweite zur kritischen Spannweite aller erhobenen Daten nach [M stat. Ausw., Teil 1, 2000]

Die vorliegende Analyse zeigt, dass die prozentualen Abweichungen der Standardabweichungen von den Mittelwerten der Dehnungsraten überwiegend Werte über 20 % aufweisen. Dies kann hauptsächlich auf die inhärente Unschärfe eines dynamischen Prüfverfahrens und die Heterogenität der Probekörper zurückgeführt werden, die zu relativ großen Spannweiten der Ergebnisse pro Probekörper führen. Dies wiederum kann zu erheblichen Abweichungen in der Standardabweichung bzw. Streuung der Daten führen, wodurch die Eignung des in [M stat. Ausw., Teil 1, 2000] beschriebenen Verfahrens zur Festlegung einer kritischen Spannweite in Frage gestellt wird. Die Festlegung einer maximalen prozentualen Abweichung von beispielsweise 20 % würde dazu führen, dass insgesamt 48 % der betrachteten Datensätze als nicht verträglich angesehen werden müssten. Daher wurde anschließend eine Überprüfung der vorhandenen Verfahrensgenauigkeit nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] durchgeführt. Hierbei wurden die maximalen Spannweiten von jeweils drei Einzelwerten einer Versuchsreihe auf der Ordinate gegen die Mittelwerte der drei Einzelwerte auf der Abszisse aufgetragen (Bild 4-83). Um eine Abschätzung über die Nutzung der vorhandenen Verfahrenspräzision zu erhalten, wurde zusätzlich eine aus der Formel für die gültige kritische Spannweite berechnete Grenzlinie in das Diagramm eingezeichnet. Des Weiteren wurde eine Grenzlinie eingezogen, die ungefähr 95 % der Ergebnisse der kritischen Spannweite von Einzelwerten da einschließt. Es ist ersichtlich, dass nahezu alle der 137 Datensätze unterhalb dieser Linie liegen. Dies bestätigt die Annahme, dass die kritische Spannweite von Einzelwerten gemäß [M stat. Ausw., Teil 1, 2000] zu ungenau zu sein scheint. Bei Betrachtung der Grenzlinie für die gültige kritische Spannweite nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1] mit der Formel $d = 0,31x + 3,6$ ist zu erkennen, dass ein Großteil der Datensätze von der Linie umfasst wird. Lediglich acht Datensätze liegen über oder auf der Grenzlinie. Davon sind fünf Datensätze (rote Dreiecke) Varianten, die innerhalb der drei Einzelmessungen Wendepunkte aufweisen und somit eine große kritische Spannweite haben. Insgesamt liegen circa 95 % der Datensätze unterhalb dieser Grenzlinie. Eine weitere Verkleinerung der kritischen Spannweite ist jedoch nicht empfehlenswert, da dies zu einer deutlich erhöhten Anzahl von inkonsistenten Werten führt. Die gültige Verfahrenspräzision, die anhand von Marshall-Probekörpern erarbeitet wurde, kann somit für die Prüfung von Bohrkernen aus WSV-Platten übernommen werden. Die Streuung der Daten für Marshall-Proben ist daher ähnlich wie bei Bohrkernen aus WSV-Platten, obwohl diese tendenziell höhere Dehnungsraten aufweisen.

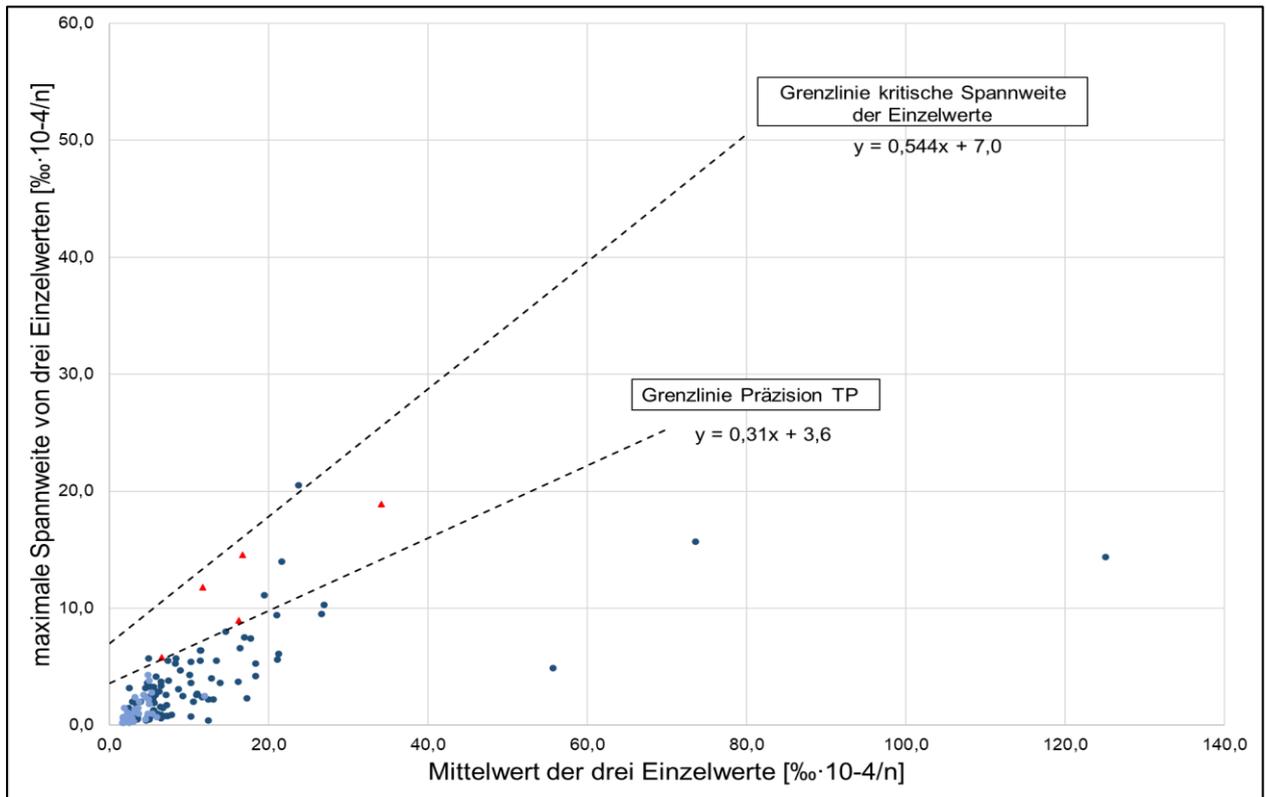


Bild 4-83: Zusammenhang zwischen der Spannweite von drei Einzelergebnissen und deren Mittelwert

5 Zusammenfassung und Ausblick

Um den Verformungswiderstand von Asphalt bereits im Vorfeld abschätzen zu können, wird der Einaxiale Druck-Schwellversuch durchgeführt. Das Prüfverfahren ist Teil der Prüfvorschrift [TP Asphalt-StB- Teil 25 B1]. Im Rahmen der Überarbeitung des Technischen Regelwerkes wird zukünftig dieses Prüfverfahren zur Beschreibung des Verformungswiderstandes Anwendung finden. Um praxisgerechte und besser differenzierbare Aussagen zum Verformungswiderstand treffen zu können, werden Bohrkern aus Asphaltprobeplatten geprüft. Der bisher geltende Bewertungshintergrund basiert dagegen auf Untersuchungen am MPK. Ein weiteres Prüfverfahren und eine interessante Alternative für Walzasphalte stellt der dynamische Stempel Eindringversuch nach [TP Asphalt-StB Teil A] dar. Im Rahmen dieses Projektes sollte der Einfluss einer Querdehnungsbehinderung durch Anbringen eines Stützringes während der Prüfung untersucht werden, um ggf. in eine Überarbeitung der TP vorzunehmen. Hintergrund hierbei ist die eventuell bessere Abbildung der Praxisbedingungen, da die Querausdehnung behindert wird (Triaxialbedingungen). Für die Prüfung an Gussasphalten gibt es bereits einen Vorschlag für einen Bewertungshintergrund, der mit den Ergebnissen dieses Projektes überprüft und ggf. angepasst werden soll.

Zur Schaffung eines Bewertungshintergrundes wurden Laboruntersuchungen an 44 bzw. 45 verschiedenen Asphaltmischgutvarianten durchgeführt. Diese 45 Varianten enthalten sechs Gussasphalte und sechs weitere Walzasphaltgemische, die von der BASt zur Verfügung gestellt wurden. Zusätzlich wurden zehn Praxisstrecken ausgewählt, aus denen Bohrkern entnommen wurden, um die Ergebnisse der im Labor hergestellten Asphaltkonzepte zu validieren. Um eine größere Datenbasis zu schaffen, wurden weitere Daten von externen Asphaltmischgutproduzenten gesammelt und in die Betrachtung mit einbezogen.

Die Untersuchungen der Walzasphaltvarianten sowohl an Bohrkernen aus WSV-Platten als auch vergleichend an MPK bestätigen erneut die Aussage, dass die MPK verformungsbeständiger sind als die BK aus Asphaltplatten, was eine Überprüfung des Bewertungshintergrundes verdeutlicht. Die Betrachtung der Daten zeigt, dass die Zielwerte an die Dehnungsrate nicht in Abhängigkeit von der Asphaltart und den verwendeten Bindemitteln festgelegt werden können. Die Daten überschneiden sich zu deutlich. Letztendlich wird ein Zielwert für die Dehnungsrate bei Prüfungen im Rahmen der Erstprüfung von $12 [\% \cdot 10^{-4}/n]$ der für alle Walzasphaltvarianten vorgeschlagen. Ein schärferer Zielwert ($\epsilon^* \leq 6 [\% \cdot 10^{-4}/n]$) sollte in Betracht gezogen werden, wenn hohe verformungswirksame Beanspruchungen (z.B. Bk100) auftreten. Für besondere Fälle (z.B. B-Zahl größer als 200) sollten die Prüfrandbedingungen erweitert werden. Hierfür kann mit Abschluss des Forschungsprojektes noch kein Zielwert vorgeschlagen werden.

Die angegebenen Zielwerte sollten ausschließlich für Prüfungen mit dem Einaxialen Druckschwellversuch im Rahmen der Erstprüfung angewendet werden. Dies schließt sowohl im Labor hergestellte Mischgüter als auch Mischgüter aus einer Mischanlage ein, welche nach bisherigem Kenntnisstand verformungsanfälliger sind. Die extern erhobenen Daten decken beide Fälle der Mischgutherstellung ab, so dass die Datenbasis als hinreichend belastbar angesehen werden kann.

Zur Validierung und als Bezug zu Strecken in situ sollten zehn Praxisstrecken anhand ihrer ZEB-Daten ausgewählt und beprobt werden. Dafür sollten die Werte für die Spurrinnentiefe entweder besonders gut oder besonders schlecht sein. Es wurden Strecken ausgewählt, bei denen es aber zu keiner Bohrkernentnahme kam, da auf den Strecken entweder keine Bohrkern entnommen werden durften oder sich keine Ansprechpartner ermittelt werden konnten. Daraufhin wurden Strecken angefragt, auf denen zeitnah eine Baumaßnahme (Deckensanierung) durchgeführt werden sollte, um Bohrkern zu entnehmen. Die Spurrinnentiefe galt dabei aber nicht mehr als maßgebendes Kriterium und auch Information über die Liegedauer und die Zusammensetzung konnten aufgrund fehlender Unterlagen nicht zusammengetragen werden. Die Untersuchungen zeigen, dass auch bei den Ausbauproben keine Tendenz für die Dehnungsrate getrennt nach Asphaltmischgut festgestellt werden kann. Es wird jedoch deutlich, dass die Dehnungsrate zwischen den Ausbauproben und den Laborproben aus WSV-Platten geringer ist als zwischen den Ausbauproben und den MPK, was wiederum die Notwendigkeit einer praxisgerechteren Umsetzung des Einaxialen Druck-Schwellversuches verdeutlicht.

Die gültige Verfahrenspräzision wurde anhand der generierten Ergebnisse überprüft und kann für die Untersuchungen an Bohrkernen aus WSV-Platten übernommen werden.

Um die in der Praxis durch den Straßenaufbau begrenzte Querdehnung im Labormaßstab besser nachbilden zu können, wurde bei der Prüfung der dynamischen Stempeleindringtiefe von Walzasphalten ein Stützring berücksichtigt. Die vergleichenden Untersuchungen mit und ohne Stützring ergaben keine eindeutige Tendenz in Bezug auf die Änderung der Stempeleindringtiefe. Daraus lässt sich schließen, dass ein seitlicher Stützring nicht zwingend erforderlich ist und das Verfahren nicht angepasst werden muss.

Das Verformungsverhalten von Gussasphalt wird ausschließlich mittels des dynamischen Stempeleindringversuchs (SEV) beschrieben. Zusätzliche Varianten wurden untersucht, um den bestehenden Bewertungshintergrund zu unterstützen. Dabei konnten die Grenzwerte der maximalen Stempeleindringtiefen reduziert werden. Es sei jedoch anzumerken, dass aufgrund der begrenzten Datenlage die vorgeschlagene Änderung der oberen Zielwerte noch weiter abgesichert werden sollte.

Abschließend ist anzumerken, dass die vorliegenden Untersuchungen lediglich einen ersten Einblick in die Verformungseigenschaften der verschiedenen Asphaltvarianten bieten. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die beobachteten Unterschiede genauer zu charakterisieren und potenzielle Einflussfaktoren (z.B. Bindemittelart und -sorte) auf die Dehnungsrate zu identifizieren.

Obwohl dieses Forschungsprojekt alle gängigen Varianten gemäß TL Asphalt-StB abdeckt, fehlt es an einer ausreichenden Datenbasis. Die Einbeziehung externer Daten erweitert diese zwar deutlich, jedoch liegen weiterhin für einzelne Asphaltarten noch zu wenige Daten vor, um statistisch belastbare Aussagen zu treffen. Dies ist besonders vor dem Hintergrund der Vielzahl der möglichen Bindemittelvarianten zu sehen. Der Unterschied zwischen Straßenbaubitumen und Polymermodifiziertem Bindemittel kann aufgrund der Datenmenge hier kaum bis gar nicht aufgegriffen werden. Allerdings ist zu erwarten, dass der Nachweis des Verformungswiderstandes in Zukunft fast ausschließlich an Mischgutvarianten mit PmB erfolgen wird.

Im Rahmen des Vorhabens wurden erste Versuche für hohe verformungswirksame Beanspruchungen durchgeführt, die in der Regel durch schmale Fahrstreifen, einen hohen Anteil langsam fahrenden Schwerverkehrs und eine starke Erwärmung der Asphaltoberfläche während der Bauphase (Baustellenverkehrsführung) hervorgerufen werden. Von Interesse war dabei die Differenzierung von Varianten unter veränderten Randbedingungen, die unter den Standard-Prüfbedingungen einen ähnlichen Verformungswiderstand aufweisen. Dazu wurden vier Varianten erneut getestet und erhöhten Temperaturen und verlängerten Belastungsimpulsen ausgesetzt. Dabei zeigten sich Unterschiede zwischen den Varianten mit unterschiedlichen Sieblinien. Die an der oberen Sieblinie orientierten wiesen einen höheren Verformungswiderstand auf als die an der unteren Sieblinie orientierten. Bei einer Prüftemperatur von 65°C kam es bei allen PK zu einer fortschreitenden volumendilatanten Gefügezerstörung. Möglicherweise ist daher eine Prüftemperatur von 60 °C als ausreichend anzusehen.

Literatur

Vorschriften und Merkblätter

[EN 12697-22]

EN 12697-22: Asphalt - Prüfverfahren für Heiasphalt - Teil 22: Spurbildungstest, 2020

[ETV-StB-BW, Teil 3, 2020]

Ergänzungen zu den Technischen Vertragsbedingungen Im Straßenbau Baden-Württemberg ETV-StB-BW, Teil 3 (Asphalt), Ausgabe 03.12.2020

[M stat. Ausw.1, 2000]

Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen – Teil 1: Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren. FGSV Verlag, Köln. 2000.

[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 Verkehrs-wesen, Köln, 2013

[TP Asphalt-StB, Teil 22]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 22: Spurbildungsversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2013

[TP Asphalt-StB, Teil 25 A1]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 A1: Dynamischer Stempeleindringversuch an Gussasphalt bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2020

[TP Asphalt-StB, Teil 25 A2]:

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 A1: Dynamischer Stempeleindringversuch an Walzasphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2010

[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 2022

[TP Asphalt-StB, Teil 33]:

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

[ZTV ZEB-StB, 2006]

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen – ZTV ZEB-StB, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln, Ausgabe 2006, korrigierter und geänderter Nachdruck 2018,

[ZTV/St HmB 09, 2022]

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Straßenbauarbeiten in Hamburg, (ZTV/St-Hmb.09), Fassung 02/22

Literaturquellen

[Arand et. al, 1996]:

Arand, W.; v. d. Decken, St.: Schlussbericht zum FA Pilotphase Qualitätssicherung in der Querschnittsforschung Qualitätsplanung im Asphaltbau – behandelt am Beispiel des Verformungswiderstandes, Bundesministerium für Wirtschaft, AiF Forschungsauftrag Nr. Q27, Braunschweig 1996

[Backhaus et al., 2023]

Klaus Backhaus, Bernd Erichson, Sonja Gensler, Rolf Weiber, Thomas Weiber (2016): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 17. Aufl.: Springer Gabler

[Gilbers, 2022]

Gilbers, M.: Einfluss variierender Prüfrandbedingungen auf den Verformungswiderstand bei dynamischer Belastung, Masterarbeit, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, 2022, unveröffentlicht

[HELLER Ingenieurgesellschaft mbH, 2018]

[Karcher 2005]

Karcher, C.: Prognose und Bewertung des Verformungsverhalten von Asphalten mit dem Druckschwellversuch am Beispiel des Splittmastixasphaltes, Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Heft 54, Karlsruhe 2005

[KUCKARTZ et al., 2013]

Kuckartz, U.; Rädiker, S.; Ebert, T.; Schehl, J.: Statistik. Eine verständliche Einführung. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer VS. 2013

[Mollenhauer; Wistuba, 2016]

Mollenhauer, K, Wistuba, M. P.: Influence of asphalt compaction procedure on 3D deformation properties, International Journal of Pavement Engineering, Volume 17, 2016

[Plachkova-Dzhurova, P.; Milch, J., 2020]

Plachkova-Dzhurova, P.; Milch, J.: DSV – Wohin geht die Reise?, asphalt, Heft 8, Stein-Verlag, Baden-Baden, 2020

[Radenberg et al.; 2016]

Radenberg, M.; Twer, D.; Louis, H.-P.; Buscham, B.: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten – Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens, Schlussbericht zum FE 07.0254/2011/ERB, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 170, Fachverlag NW, Bremen, 2016

[Radenberg et al., 2017]

Radenberg, Martin; Flottmann, Nina; Drewes, Bianca; König, Markus; Hilfert, Thomas (2017): Datentechnische Erfassung und Auswertung von Prüfdaten und Erfahrungssammlung. Schlussbericht zum FE 29.0327/2013/BAS (BAS-Schriftenreihe S 140).

[Renken, 2001]:

Vergleich der mechanischen Eigenschaften von mittels Walz-Sektor-Verdichtungsgerät und Lamellen-Verdichtungsgerät hergestellten Asphaltprobestplatten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 821, BMVBW, Bonn, 2001

[Schellenberg, Schellenberg, 2008]

Schellenberg, K., Schellenberg, P.: Die Wärmestandfestigkeit von Asphalt. Der Druckschwellversuch seit 25 Jahren in der Bewährung, Straße und Autobahn, Kirschbaum Verlag, Vol. 9, 2008

[Solaimanian et al., 2003]

Solaimanian, M.; Harvey, J.; Tahmoressi, M.; Tandon, V.: Test Methods to Predict Moisture Sensitivity for Hot-Mix Asphalt Pavements, Moisture Sensitivity of Asphalt Pavements: A National Seminar, 2003

[Steinauer; Scharnigg, 2007]

Steinauer, B.; Scharnigg, K.: Vergleich der Prüfverfahren zur Ansprache der Verformungseigenschaften von Asphalt, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 959, BMVBS, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2007

[WEIß, 2007]

Weiß, C.: Datenanalyse und Modellierung mit STATISTICA. München: Oldenbourg Verlag München Wien.

[Wellner et. al, 2007]:

Wellner, F.; Leutner, R.; Lorenzl, H.; Oeser, M.; Schindler, K.; et al.: Schlussbericht zum FA Nachhaltiger Straßenbau – Bemessungsmodell zur Förderung der Innovations- und Wettbewerbsfähigkeit kleinerer und mittlerer Straßenbauunternehmen BMVBW Forschungsvorhaben Nr. 19 W 3055A; Verbundprojekt Dresden Braunschweig 2007

[Wellner, 2018]:

Wellner, F.: Schlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 18472 BR „Entwicklung von Asphalten für zukünftige schwerste Verkehrsbelastungen, Technische Universität Dresden – Institut für Straßenbauwesen und Straßenbau, Deutsches Asphaltinstitut e. V. (DAI), Dresden, 2018

[Wistuba; Isailović, 2018]:

Wistuba, M.P., Isailovic, I.: Performance-orientierte Asphaltspezifikation - Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes, Bericht zum Forschungsprojekt FE 84.0106/2009. Technische Universität Braunschweig, Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen - Strassenbau (S), Heft S 115, Bergisch Gladbach, 2018

Bilder

- Bild 1-1: Theoretischer Spurrinnenverlauf im Stripping Test [Radenberg et al., 2016] nach [Solaimanian et al., 2003]
- Bild 1-2: Prinzip des Spannungsverlaufs während einer Impulsbelastung links und die Prüfrandbedingungen des dynamischen Stempel Eindringversuches an Walzasphalten nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 A2] rechts
- Bild 1-3: Dynamischer Stempel Eindringversuch mit Stützring [Wistuba; Isailović, 2018]
- Bild 1-4: Ergebnisse der Finite-Element-Analyse: Stempel Eindringversuch mit und ohne Verwendung eines Stützringes (Farblegende: Grün bis Blau = Druck, Gelb bis Rot = Zug; Achtung: veränderliche Werteskala) [Wistuba; Isailović, 2018]
- Bild 1-5: Vergleich der Impulskriechkurven mit und ohne Stützring der Asphaltmischgutsorten AC 32 T N (links) und S (rechts) [Wistuba; Isailović, 2018]
- Bild 1-6: Typische Impulskriechkurven für Walzasphalte links: mit Wendepunkt, rechts: ohne Wendepunkt
- Bild 1-7: Nomogramm zur Spurrinnenprognose aus Einaxialen Druck-Schwellversuchen [Karcher, 2005]
- Bild 1-8: Statistische Auswertung der dynamischen Eindringtiefen an Gussasphalten [Radenberg et al., 2017]
- Bild 2-1: Fließdiagramm zum Forschungsvorhaben FE 07.0308/2020/EGB
- Bild 2-2: Fließdiagramm zur Vorgehensweise für die Streckenfindung
- Bild 2-3: Blackdiagramm der verwendeten Bindemittel
- Bild 2-4: Blackdiagramm der verwendeten Bindemittel (BASt-Varianten)
- Bild 2-5: Sieblinien der verschiedenen Asphaltdeckschichtvarianten
- Bild 2-6: Sieblinien der verschiedenen Asphaltbinderschichtvarianten
- Bild 2-7: Prüfmetho denrandbedingungen und fiktives Prüfergebnis für die Bestimmung des Verformungswiderstandes von Asphalt en bei höchsten Beanspruchungen
- Bild 3-1: Interaktion der Visualisierungen [HELLER Ingenieurgesellschaft mbH, 2018]
- Bild 3-2: Beispielhafte Zustandsprofile und Bild der Frontkamera eines Messfahrzeuges
- Bild 4-1: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten AC 22 B S
- Bild 4-2: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten AC 16 B S
- Bild 4-3: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten AC 11 D S
- Bild 4-4: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten AC 8 D S
- Bild 4-5: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten SMA 16 B S
- Bild 4-6: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten SMA 11 S
- Bild 4-7: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Laborvarianten SMA 8 S.

Bild 4-8: Minimale und Maximale mittlere Dehnungsraten Einaxialer Druck-Schwellversuch – Laborvarianten

Bild 4-9: Dehnungsraten der im Labor hergestellten Probekörper

Bild 4-10: Spannweite der Mittelwerte gegenüber der kritischen Spannweite - Laborvarianten

Bild 4-11: Box-Plots über die Dehnungsraten der Bohrkerne - Laborvarianten

Bild 4-12: Minimale und Maximale Dehnungsrate je nach Bindemittelsorte

Bild 4-13: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf AC 22 B S

Bild 4-14: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf AC 16 B S

Bild 4-15: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf AC 11 D S

Bild 4-16: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf AC 8 D S

Bild 4-17: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf SMA 16 B S

Bild 4-18: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf SMA 11 S

Bild 4-19: Bleibende Verformungen im Dyn. Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf SMA 8 S

Bild 4-20: Dyn. Stempeleindringtiefen der Laborvarianten (Zusammenfassung)

Bild 4-21: Korrelation Dehnungsrate und dyn. Stempeleindringtiefe

Bild 4-22: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf der Gussasphaltvarianten

Bild 4-23: Statistische Betrachtung der Gussasphaltvarianten

Bild 4-24: Minimale und maximale Dehnungsraten (BAST-Mischgutvarianten)

Bild 4-25: Ergebnisse dynamischer Stempeleindringversuch (BAST-Mischgutvarianten)

Bild 4-26: Ergebnisse Einaxialer Druck-Schwellversuch SMA-Varianten

Bild 4-27: Impulskriechkurven Sonderprogramm AS 3A - Varianten V25/V26 (MW)

Bild 4-28: Impulskriechkurven Sonderprogramm AS 3A - Varianten V28/V30 (MW)

Bild 4-29: Fotos der BK-Entnahme A10, links: BK mit SAMI-Schicht, Mitte: Spurrinne, rechts: Wasser in der Spurrinne

Bild 4-30: Bleibende Verformungen im Einaxialen Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Systemprobekörper DS+BS A10 Berliner Ring

Bild 4-31: Bleibende Verformungen im Einaxialen Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Binderschicht A10 Berliner Ring

Bild 4-32: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf A10 Berliner Ring

Bild 4-33: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Deckschicht B51 Olzheim

Bild 4-34: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Binderschicht B51 Olzheim

Bild 4-35: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf B51 Olzheim

Bild 4-36: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Deckschicht (MPK) B51 Olzheim

Bild 4-37: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Bohrkerne B54 Münster/Ochtrup

Bild 4-38: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven MPK B54 Münster/Ochtrup (Mittelwerte)

Bild 4-39: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf
B54 Münster/Ochtrup

Bild 4-40: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven B50 Hunsrück
(Mittelwerte)

Bild 4-41: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf
B50 Hunsrück

Bild 4-42: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven B226 Witten

Bild 4-43: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf
B226 Witten

Bild 4-44: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Hüllerstraße
Gelsenkirchen ES2

Bild 4-45: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Hüllerstraße
Gelsenkirchen ES1

Bild 4-46: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf
Hüllerstraße Gelsenkirchen

Bild 4-47: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven Hahnerberger
Straße, Wuppertal

Bild 4-48: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf
Hahnerberger Straße, Wuppertal

Bild 4-49: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven L459 Hamminkeln

Bild 4-50: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf
L459 Hamminkeln

Bild 4-51: Spurrinntiefen B57 Aachen

Bild 4-52: Bleibende Verformungen im Dynamischen Stempeleindringversuch - Verformungsverlauf
B57 Aachen

Bild 4-53: Bleibende Verformungen im Druck-Schwellversuch - Impulskriechkurven B57 Aachen

Bild 4-54: Dehnungsraten Probekörper Praxisstrecken - Systemprobekörper (DS+BS)

Bild 4-55: Dehnungsraten Probekörper Praxisstrecken - Probekörper (BS)

Bild 4-56: Dehnungsraten Probekörper Praxisstrecken - Marshall-Probekörper (DS)

Bild 4-57: Dehnungsraten Probekörper Praxisstrecken - Marshall-Probekörper (BS)

Bild 4-58: Verträgliche Ergebnisse DSV - Dehnungsrate je Asphaltort der Praxisstrecken

Bild 4-59: Ergebnisse dynamischer SEV der Praxisstrecken

Bild 4-60: Zusammenhang Zustandswert Spurrinntiefe und Dehnungsrate

Bild 4-61: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den
Bestandsdaten AC 8 D SP/AC 8 D S

Bild 4-62: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den
Bestandsdaten AC 11 D SP/AC 11 D S

Bild 4-63: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den
Bestandsdaten AC 16 B SG/AC 16 B S

Bild 4-64: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den
Bestandsdaten AC 22 B SG/AC 22 B S

Bild 4-65: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den
Bestandsdaten SMA 8 S

Bild 4-66: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den
Bestandsdaten SMA 11 S

Bild 4-67: Mittelwert der Dehnungen und Dehnungsraten je Dreifachbestimmung aus den Bestandsdaten SMA 16 B S

Bild 4-68: Statistische Auswertung der Dehnungsraten aus Bestandsdaten je nach Asphaltorte

Bild 4-69: Minimale und maximale Dehnungsraten Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestandsdaten

Bild 4-70: Statistische Auswertung der Dehnungsraten aller erhobenen Daten

Bild 4-71: Histogramm Dehnungsraten aller erhobenen Daten

Bild 4-72: Histogramm LN-Dehnungsraten aller erhobenen Daten

Bild 4-73: Minimale und maximale Dehnungsrate getrennt nach Asphaltorte und Ursprung der Daten

Bild 4-74: Minimale und maximale Dehnungsrate je nach Bindemittelsorte

Bild 4-75: Minimal- und Maximalwert der Dehnungsraten unterteilt in Asphalt- und Bindemittelsorte

Bild 4-76: Verhältnis BK zu MPK (Umrechnungsfaktor) - Laborvarianten

Bild 4-77: Verhältnis Dehnungsrate MPK zu BK aller erhobenen Daten

Bild 4-78: Vergleich der Mittelwerte der Dehnungsraten in situ gegenüber aller erhobenen, im Labor hergestellten Varianten

Bild 4-79: Korrelationen zwischen den Dehnungsraten in situ und der Laborvarianten

Bild 4-80: Anforderung an die Dehnungsrate

Bild 4-81: Anforderung an die Dehnungsrate für hohe verformungswirksame Beanspruchungen (SMA)

Bild 4-82: Gegenüberstellung der Spannweite zur kritischen Spannweite aller erhobenen Daten nach [M stat. Ausw., Teil 1, 2000]

Bild 4-83: Zusammenhang zwischen der Spannweite von drei Einzelergebnissen und deren Mittelwert

Tabellen

- Tab. 1-1: Versuchsbedingungen Einaxialer Druck-Schwellversuch gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 25 B1, 2022]
- Tab. 1-2: Vergleich der Randbedingungen des Druck-Schwellversuches in den Jahren 1999 - 2022 nach [Gilbers, 2022]
- Tab. 1-3: Vorschlag für maximale Dehnungsraten im DSV nach Verkehrskategorien, [in Anlehnung an Karcher, 2005]
- Tab. 1-4: Vorschlag für maximale Dehnungsraten im DSV nach Verkehrskategorien, [Schellenberg; Schellenberg, 2008]
- Tab. 1-5: Vergleichsuntersuchungen DSV am BK und MPK des KIT [Plachkova-Dzhurova.; Milch, 2020]
- Tab. 1-6: Vergleichsuntersuchungen an Referenz BK, MPK und BK (WSV) nach [Arnold, 2009]
- Tab. 1-7: Erfahrungswerte für die dynamische Stempeldringtiefe an Gussasphalten bei $n = 2.500$ LW
- Tab. 2-1: Anzahl der durchgeführten Untersuchungen in Abhängigkeit von dem Versuch und Praxis- und Laborproben
- Tab. 2-2: Variantenübersicht der im Labor hergestellten Asphaltmischgüter
- Tab. 2-3: Variantenübersicht der von der BAST zur Verfügung gestellten Mischgutvarianten
- Tab. 2-4: Kornzusammensetzung des verwendeten Kalksteinfüller und der Lieferkörnungen des Diabas
- Tab. 2-5: Kornzusammensetzung der Lieferkörnungen des verwendeten Gabbros
- Tab. 2-6: Kornzusammensetzung der Lieferkörnungen der verwendeten Moräne
- Tab. 2-7: Äqui-Schermodultemperaturen T ($G^* = 15$ kPa) sowie zugehörige Phasenwinkel δ der verwendeten Bindemittel
- Tab. 2-8: Äqui-Schermodultemperaturen T ($G^* = 15$ kPa) sowie zugehörige Phasenwinkel δ der verwendeten Bindemittel (BAST-Varianten)
- Tab. 2-9: Zugabeanteile der Gesteinskörnungen je nach Asphaltmischgutsorte, Gesteinsart und Art der Sieblinie (m = mittlere Sieblinie, o = obere Sieblinie, u = untere Sieblinie) sowie die Rohdichte des Gesteinskörnungsgemisches
- Tab. 2-10: Asphaltrohddichte, Raumdichte und Hohlraumgehalt der Marshall-Probekörper der Walzasphalte
- Tab. 2-11: Asphaltrohddichte, Raumdichte, Füller-Bindemittel-Verhältnis und Stempeldringtiefen sowie deren Z
- Tab. 2-12: Untersuchungsprogramm Asphaltbetone mit Zuordnung der Varianten zu den Prüfmethode
- Tab. 2-13: Untersuchungsprogramm SMA mit Zuordnung der Varianten zu den Prüfmethode
- Tab. 2-14: Untersuchungsprogramm Gussasphalte mit Zuordnung der Varianten zu den Prüfmethode
- Tab. 2-15: Übersicht der Praxisstrecken
- Tab. 2-16: Randbedingungen für die Untersuchungen bei höchsten Beanspruchungen
- Tab. 3-1: Zustandsklassen nach der [ZTV ZEB-StB, 2006]
- Tab. 3-2: Aufbau der tabellarischen Auswertung
- Tab. 3-3: Hinweise zu den Abkürzungen der Datenbanken
- Tab. 3-4: Streckenabschnitte mit Übereinstimmungen aus ZEB-Daten und SKM-Datenbank
- Tab. 3-5: Festgelegte Praxisstrecken

- Tab. 4-1: Korrelationsmatrix der Verformungskennwerte der Laborvarianten und Bindemittleigenschaften
- Tab. 4-2: Phasenwinkel und komplexer Schermodul der verwendeten Bindemittel
- Tab. 4-3: Erfahrungswerte für die Stempel Eindringtiefe [mm] nach 2.500 LW
- Tab. 4-4: maßgebende Dehnungswerte Varianten Sonderprogramm AS 3A (Mittelwerte)
- Tab. 4-5: Schichtdicken der Bohrkerne Berliner Ring A10
- Tab. 4-6: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht Berliner Ring A10
- Tab. 4-7: Raumdichten der Bohrkerne sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten Berliner Ring A10
- Tab. 4-8: Ergebnisse Einaxialer Druck-Schwellversuch A10 Berliner Ring
- Tab. 4-9: Schichtdicken und Raumdichten der entnommenen Bohrkerne Olzheim B51
- Tab. 4-10: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten (ES1 bis ES3) B51
- Tab. 4-11: Raumdichten der Bohrkerne sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten B54 Münster/Ochtrup
- Tab. 4-12: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B54 Münster/Ochtrup
- Tab. 4-13: Raumdichten der Marshall-Probekörper aus Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtmaterial B54 Münster/Ochtrup
- Tab. 4-14: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B50 Hunsrück
- Tab. 4-15: Raumdichten der Bohrkerne sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der verschiedenen Schichten B50 Hunsrück
- Tab. 4-16: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B226 Witten
- Tab. 4-17: Raumdichten der Bohrkerne sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der verschiedenen Schichten B226 Witten
- Tab. 4-18: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht Hüllerstraße Gelsenkirchen
- Tab. 4-19: Raumdichten der Bohrkerne sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der verschiedenen Schichten Hüllerstraße
- Tab. 4-20: Ergebnisse der Dynamischen Stempel Eindringversuche Hüllerstraße Gelsenkirchen
- Tab. 4-21: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht Hahnerberger Straße Wuppertal
- Tab. 4-22: Raumdichten, Hohlraumgehalte und Rohdichte der Bohrkerne und Marshall-Probekörper Hahnerberger Straße, Wuppertal
- Tab. 4-23: Schichtdicken L459 Hamminkeln
- Tab. 4-24: Korngrößenverteilung der Asphaltdeckschicht und Asphaltrohddichte L459, Hamminkeln
- Tab. 4-25: Raumdichten und Hohlraumgehalt der Bohrkerne L459, Hamminkeln
- Tab. 4-26: Schichtdicken Bohrkerne B57 Aachen
- Tab. 4-27: Korngrößenverteilung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B57 Aachen
- Tab. 4-28: Raumdichten der Bohrkerne sowie Asphaltrohddichte und Hohlraumgehalte der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht B57 Aachen
- Tab. 4-29: Mittel- und Maximalwerte der Dehnungsraten unterteilt in Asphalt- und Bindemittelsorte
- Tab. 4-30: Verhältnis BK zu MPK (Umrechnungsfaktor) - Laborvarianten
- Tab. 4-31: Anforderungen an die Dehnungsrate je nach Asphaltart

Anhang A

Inhalt Anhang A

Tabellen:

Tab. A-1: Ergebnisse Einaxialer-DSV – Laborvarianten - V1-V17	134
Tab. A-2: Ergebnisse Einaxialer-DSV – Laborvarianten - V18-V33	135
Tab. A-3: Ergebnisse Dyn. SEV - Laboruntersuchungen – Varianten V1-V11	136
Tab. A-4: Ergebnisse Dyn. SEV - Laboruntersuchungen – Varianten V12-V22	137
Tab. A-5: Ergebnisse Dyn. SEV - Laboruntersuchungen – Varianten V23-V33	138
Tab. A-6: Ergebnisse Einaxialer DSV - BAST-Varianten	139
Tab. A-7: Ergebnisse Dyn. SEV - Laboruntersuchungen – BAST-Varianten	139
Tab. A-8: Ergebnisse DSV Praxisstrecken (Mittelwerte)	156
Tab. A-9: Einaxialer DSV - Bestehende Datensätze - Asphaltdeckschichtvarianten	157
Tab. A-10: Einaxialer DSV - Bestehende Datensätze - Asphaltbinderschichtvarianten	158
Tab. A-11: Einaxialer DSV - Bestehende Datensätze - Splittmastixvarianten	159
Tab. A-12: Einaxialer DSV - Ergebnisse Ringversuch (RUB)	160

Abbildungen:

Bild A-1: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V25_50°C	140
Bild A-2: Impulskriechkurve Modifizierter DSV – V25 60°C	140
Bild A-3: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V25 65°C	141
Bild A-4: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V26 50°C	141
Bild A-5: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V26 60°C	142
Bild A-6: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V26 65°C	142
Bild A-7: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V28 50°C	143
Bild A-8: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V28 60°C	143
Bild A-9: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V28 65°C	144
Bild A-10: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V30 50°C	144
Bild A-11: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V30 60°C	145
Bild A-12: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V30 65°C	145
Bild A-13: Bohrkerne 1-9 – Berliner Ring/A10	146
Bild A-14: Bohrkerne 10-18 – Berliner Ring/A10	147
Bild A-15: Bohrkerne Ø 100 mm, Entnahmestelle 1 – B51 Olzheim	148
Bild A-16: Bohrkerne Ø 100 mm, Entnahmestelle 2 – B51 Olzheim	149
Bild A-17: Bohrkerne Ø 100 mm, Entnahmestelle 3 – B51 Olzheim	150
Bild A-18: Gefüge-zerstörte Probekörper - B51 Olzheim	151
Bild A-19: Bohrkernentnahme - B50 Hunsrück	152
Bild A-20: Entnahmestelle und Bohrkerne – Hüllerstraße Gelsenkirchen	153
Bild A-21: Entnahmestelle und Bohrkerne - Hahnerberger Straße Wuppertal	154
Bild A-22: entnommene Bohrkerne L459 – Hamminkeln	155

Bild A-23: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (1)	161
Bild A-24: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (3)	161
Bild A-25: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (2)	162
Bild A-26: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (4)	162
Bild A-27: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (5)	163

Lfd. Nr. / PK-Nr.		Endmischungen		DSV BK			DSV MPK			Faktor BK-MPK	
		Raumdichte BK	Raumdichte MPK	Dehnung bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate	Spannweite/kr. Spannweite Dehnungsrate	Dehnung bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate	Spannweite/kr. Spannweite Dehnungsrate		
V1	1	2,604	2,58	24,2	1,7	0,2	9,6	0,8	0,2	2,0	
	2	2,591	2,588	21,7	1,7		10,6	0,8			
	3	2,597	2,573	28,7	1,9		7,9	1,0			
	MW	2,597	2,580	24,9	1,8		4,1	9,4			0,9
V2	1	2,577	2,546	21,7	2,7	1,1	7,3	0,7	0,2	5,0	
	2	2,588	2,548	21,2	3,7		6	0,5			
	3	2,570	2,549	17,3	2,6		6	0,6			
	MW	2,578	2,548	20,1	3,0		4,5	6,4			0,6
V3	1	2,657	2,575	59,9	13,4	2,5	14,8	5,3	1,8	2,0	
	2	2,658	2,573	52,7	10,9		15,1	5,5			
	3	2,653	2,559	57,1	11,6		18,9	7,1			
	MW	2,656	2,569	56,6	12,0		7,3	16,3			6,0
V4	1	2,590	-	20,4	1,9	0,7	-	-	-	-	
	2	2,586	-	18,9	1,3		25,6	2,0			
	3	2,587	-	25,6	2,0		21,6	1,7			4,1
	MW	2,588	-	21,6	1,7		4,1	-			-
V5	1	2,593	-	18,3	1,7	0,2	-	-	-	-	
	2	2,604	-	16,1	1,6		15,1	1,5			
	3	2,602	-	15,1	1,5		16,5	1,6			4,1
	MW	2,600	-	16,5	1,6		4,1	-			-
V6	1	2,541	2,518	27,6	2,6	0,6	9	1,7	0,8	2,0	
	2	2,532	2,505	29,4	2,7		14,3	1,6			
	3	2,525	2,507	29,3	3,2		9,5	0,9			
	MW	2,533	2,510	28,8	2,8		4,5	10,9			1,4
V7	1	2,565	2,495	22,2	1,4	0,6	7,4	0,8	0,3	2,7	
	2	2,557	2,490	23,9	1,8		7,2	0,6			
	3	2,536	2,498	21,5	2,0		6,4	0,5			
	MW	2,553	2,494	22,5	1,7		4,1	7,0			0,6
V8	1	2,575	2,557	31,5	6,2	0,7	9,8	1,5	1,0	3,2	
	2	2,579	2,56	30,8	6,1		9,6	1,5			
	3	2,568	2,548	32,1	5,5		9,5	2,5			
	MW	2,574	2,555	31,5	5,9		5,4	9,6			1,8
V9	1	2,608	-	41,5	4,2	1,0	-	-	-	-	
	2	2,611	-	30	3,2		33,3	3,5			
	3	2,593	-	33,3	3,5		34,9	3,6			4,7
	MW	2,604	-	34,9	3,6		4,7	-			-
V10	1	2,426	-	28,6	2,4	0,2	-	-	-	-	
	2	2,424	-	30,7	2,6		31,5	2,4			
	3	2,420	-	31,5	2,4		30,3	2,5			4,4
	MW	2,423	-	30,3	2,5		4,4	-			-
V11	1	2,544	2,542	36,2	2,1	0,9	14,4	1,2	0,7	3,0	
	2	2,556	2,548	36	1,9		9,9	0,5			
	3	2,550	2,543	31,5	2,8		1,1	0,6			
	MW	2,550	2,544	34,6	2,3		4,3	8,5			0,8
V12	1	2,539	2,511	19,1	1,1	1,5	9,1	0,5	0,3	5,5	
	2	2,519	2,527	22,9	2,6		7,5	0,2			
	3	2,518	2,519	25,1	1,8		10,8	0,3			
	MW	2,525	2,519	22,4	1,8		4,2	9,1			0,3
V13	1	2,573	-	23,0	7,3	3,8	-	-	-	-	
	2	2,575	-	47,1	3,5		44,1	4,2			
	3	2,574	-	44,1	4,2		38,07	5,0			5,2
	MW	2,574	-	38,07	5,0		5,2	-			-
V14	1	2,372	-	36,5	2,7	1,5	-	-	-	-	
	2	2,373	-	35,7	3,9		37,9	4,2			
	3	2,380	-	37,9	4,2		36,7	3,6			4,7
	MW	2,375	-	36,7	3,6		4,7	-			-
V15	1	2,525	2,505	37,1	2,3	0,9	12,6	0,6	0,4	3,3	
	2	2,508	2,501	36,7	2,9		11	0,6			
	3	2,515	2,489	39,0	2,0		14,2	1,0			
	MW	2,516	2,498	37,6	2,4		4,3	12,6			0,7
V16	1	2,548	2,525	44,3	4,7	0,5	13,5	1,7	1,8	2,1	
	2	2,533	2,525	49,2	4,7		15,0	3,3			
	3	2,545	2,529	39,4	4,2		13,7	1,5			
	MW	2,542	2,526	44,3	4,5		5,0	14,07			2,2
V17	1	2,499	-	28,4	2,3	0,3	-	-	-	-	
	2	2,483	-	28,6	2,5		29	2,2			
	3	2,498	-	29	2,2		28,7	2,3			4,3
	MW	2,493	-	28,7	2,3		4,3	-			-

Tab. A-1: Ergebnisse Einaxialer-DSV – Laborvarianten - V1-V17

Lfd. Nr. / PK-Nr.	Endmischungen		DSV BK			DSV MPK			Faktor BK-MPK
	Raumdichte BK	Raumdichte MPK	Dehnung bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate	Spannweite/kr. Spannweite / Dehnungsrate	Dehnung bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate	Spannweite/kr. Spannweite / Dehnungsrate	
V18	1	2,543	-	46,3	3,0	0,3	-	-	-
	2	2,543	-	51,5	2,9				
	3	2,542	-	48,6	3,2				
	MW	2,543	-	48,8	3,0				
V19	2	2,531	2,507	26,3	2,2	1,1	10,5	1,3	1,6
	3	2,523	2,495	25,8	1,7		11,9	2,4	
	4	2,540	2,503	25,9	2,8		9,3	2,9	
	MW	2,531	2,502	26,0	2,2		10,57	2,2	
V20	1	2,557	2,54	34,6	4,8	1,0	9,4	1,7	0,9
	2	2,554	2,541	43,7	5,3		8,1	0,8	
	3	2,561	2,532	39,1	4,3		9,2	1,6	
	MW	2,557	2,538	39,1	4,8		5,1	8,90	
V21	1	2,552	-	26,0	2,2	0,5	-	-	-
	2	2,550	-	27,6	2,7				
	3	2,560	-	25,2	2,3				
	MW	2,554	-	26,3	2,4				
V22	2	2,559	-	39,0	2,9	1,4	-	-	-
	3	2,561	-	39,0	4,0				
	4	2,560	-	38,1	2,6				
	MW	2,560	-	38,7	3,2				
V23	1	2,521	2,473	47,7	3,7	2,2	8,1	1,6	0,5
	2	2,516	2,477	59,1	5,9		9,0	1,2	
	3	2,517	2,482	62,7	5,1		11,4	6,7	
	MW	2,518	2,477	56,5	4,9		5,1	9,50	
V24	1	2,498	2,474	31,6	3,0	2,6	11,3	1,1	0,9
	2	2,492	2,467	30,8	4,3		9,2	2,0	
	3	2,488	2,472	28,3	5,6		4,1	1,9	
	MW	2,493	2,471	30,2	4,3		4,9	8,20	
V25	1	2,520	2,488	39,2	2,1	2,4	11,5	1,3	2,3
	2	2,520	2,489	42,3	2,9		11,2	1,8	
	3	2,511	2,478	55,6	4,5		17,9	3,6	
	MW	2,517	2,485	45,7	3,2		4,6	13,53	
V26	1	2,580	-	28,5	1,8	0,7	-	-	-
	2	2,503	-	13,6	2,0				
	3	2,499	-	29,0	2,5				
	MW	2,527	-	23,7	2,1				
V27	1	2,533	-	55,3	4,2	2,4	-	-	-
	2	2,531	-	67,5	5,9				
	3	2,538	-	51,4	3,5				
	MW	2,534	-	58,1	4,5				
V28	1	2,481	2,459	45,4	3,2	4,3	14,0	1,6	3,4
	2	2,482	2,461	44,8	3,8		9,9	1,3	
	3	2,463	2,451	77,2	7,5		12,0	1,4	
	MW	2,475	2,457	55,8	4,8		5,1	11,97	
V29	1	2,487	2,459	30,5	2,9	0,6	10,7	0,4	2,7
	2	2,492	2,456	31,7	3,0		8,7	1,4	
	3	2,491	2,454	27,5	2,4		11,3	1,3	
	MW	2,490	2,456	29,9	2,8		4,5	10,23	
V30	1	2,495	2,483	60,1	5,5	1,8	12,0	1,2	3,1
	2	2,499	2,471	56,5	3,8		12,3	1,5	
	3	2,493	2,479	68,5	5,6		12,1	2,1	
	MW	2,496	2,478	61,7	5,0		5,1	12,13	
V31	1	2,447	-	41,8	3,6	2,8	-	-	-
	2	2,439	-	43,5	5,9				
	3	2,432	-	42,9	6,4				
	MW	2,439	-	42,7	5,3				
V32	1	2,499	-	40,3	3,0	2,0	-	-	-
	2	2,491	-	55,5	5,0				
	3	2,491	-	39,7	3,2				
	MW	2,494	-	45,2	3,7				
V33	1	2,349	-	61,8	5,3	1,0	-	-	-
	2	2,347	-	56,8	4,9				
	3	2,345	-	60,4	5,9				
	MW	2,347	-	59,7	5,4				

Tab. A-2: Ergebnisse Einaxialer-DSV – Laborvarianten - V18-V33

Lfd. Nr. / PK-Nr.	Raumdichte BK	PK-Höhe	Eindringtiefe nach 10.000 Zyklen [mm] / MW		krit. Spannweite (30% vom Mittelwert)	Standardabweichung	Dehnung [‰]		Standardabweichung	mit/ohne Seitenbehinderung	
V1	2	2,606	81,3	1,692	1,731	0,519	0,039	20,78	21,18	0,400	mit Ring
	3	2,589	82,1	1,770							
	1	2,592	82,4	1,863	2,089	0,627	0,226	22,62	25,53	2,910	ohne Ring
	4	2,600	81,4	2,314							
	MW	2,597	-								
V2	2	2,595	83,1	0,817	0,943	0,283	0,126	9,86	11,35	1,485	mit Ring
	3	2,585	83,3	1,069							
	1	2,577	82,9	1,751	2,654	0,796	0,903	21,06	31,59	10,530	ohne Ring
	4	2,570	84,5	3,557							
	MW	2,582	-								
V3	1	2,601	82,3	3,167	3,507	1,052	0,340	38,27	42,91	4,640	mit Ring
	2	2,602	80,4	3,847							
	3	2,6	81,7	2,749	2,858	0,857	0,109	33,68	34,98	1,300	ohne Ring
	4	2,583	81,8	2,966							
	MW	2,597	-								
V4	1	2,576	83,4	1,554	1,534	0,460	0,020	18,66	18,36	0,300	ohne Ring
	2	2,577	83,9	1,514							
	MW	2,577	-								
V5	1	2,587	84,4	1,123	1,115	0,335	0,008	13,34	13,23	0,110	ohne Ring
	2	2,602	83,7	1,107							
	MW	2,595	-								
V6	1	2,570	62,0	1,355	1,541	0,462	0,186	21,71	24,60	2,890	mit Ring
	3	2,552	62,0	1,726							
	2	2,575	61,3	2,104	2,007	0,602	0,097	34,21	32,39	1,820	ohne Ring
	4	2,577	62,3	1,91							
	MW	2,569	-								
V7	3	2,514	63,6	1,307	2,443	0,733	1,136	20,35	39,13	18,775	mit Ring
	4	2,551	61,6	3,579							
	1	2,529	63,6	1,515	2,479	0,744	0,964	23,69	39,72	16,025	ohne Ring
	2	2,535	61,7	3,442							
	MW	2,532	-								
V8	1	2,556	60,5	1,721	1,764	0,529	0,043	28,47	28,55	0,080	mit Ring
	3	2,543	63,1	1,807							
	2	2,555	63,4	2,302	2,525	0,758	0,223	36,32	39,91	3,585	ohne Ring
	4	2,537	63,2	2,748							
	MW	2,548	-								
V9	1	2,603	62,2	1,525	1,390	0,417	0,135	24,38	22,23	2,155	ohne Ring
	2	2,586	62,1	1,255							
	MW	2,595	-								
V10	1	2,415	62,5	2,370	2,357	0,707	0,014	37,55	37,50	0,050	ohne Ring
	2	2,423	62,1	2,343							
	MW	2,419	-								
V11	2	2,537	40,3	1,568	1,634	0,490	0,066	38,67	39,82	1,150	mit Ring
	3	2,541	41,2	1,699							
	1	2,523	41,5	1,693	1,679	0,504	0,014	40,77	40,79	0,015	ohne Ring
	4	2,549	40,7	1,665							
	MW	2,538	-								

Tab. A-3: Ergebnisse Dyn. SEV - Laboruntersuchungen – Varianten V1-V11

Lfd. Nr. / PK-Nr.	Raumdichte BK	PK-Höhe	Eindringtiefe nach 10.000 Zyklen [mm] / MW		krit. Spannweite (30% vom Mittelwert)	Standardabweichung	Dehnung [‰]		Standardabweichung	mit/ohne Seitenbehinderung	
V12	1	2,539	42,4	1,036	1,005	0,301	0,032	24,38	23,45	0,930	mit Ring
	3	2,532	43,1	0,973				22,52			
	2	2,529	41,8	1,100	1,527	0,458	0,427	26,20	36,02	9,820	ohne Ring
	4	2,545	42,5	1,953				45,84			
	MW	2,536	-								
V13	-										
	1	2,56	40,7	2,616	2,397	0,719	0,220	64,11	58,92	5,190	ohne Ring
	2	2,555	40,3	2,177				53,73			
	MW	2,558	-								
V14	-										
	1	2,374	41,6	1,872	1,710	0,513	0,163	44,79	41,16	3,635	ohne Ring
	2	2,366	40,9	1,547				37,52			
	MW	2,370	-								
V15	3	2,532	42,2	1,774	1,763	0,529	0,012	41,88	41,42	0,465	mit Ring
	4	2,537	42,5	1,751				40,95			
	1	2,521	41,5	1,387	1,491	0,447	0,104	33,32	35,12	1,800	ohne Ring
	2	2,512	42,0	1,595				36,92			
	MW	2,526	-								
V16	3	2,532	42,1	2,125	1,957	0,587	0,168	50,28	46,41	3,875	mit Ring
	4	2,534	41,8	1,789				42,53			
	1	2,533	41,5	2,200	2,168	0,650	0,032	52,89	51,70	1,195	ohne Ring
	2	2,540	42,1	2,136				50,5			
	MW	2,535	-								
V17	-										
	1	2,48	43,1	1,206	1,295	0,389	0,089	27,93	29,61	1,680	ohne Ring
	2	2,480	43,0	1,384				31,29			
	MW	2,480	-								
V18	-										
	1	2,537	40,8	2,171	2,142	0,643	0,029	53,07	50,85	2,220	ohne Ring
	2	2,537	43,4	2,113				48,63			
	MW	2,537	-								
V19	2	2,521	63,2	1,041	1,355	0,407	0,314	16,41	21,38	4,970	mit Ring
	4	2,514	63,2	1,669				26,35			
	1	2,514	62,8	1,459	1,722	0,517	0,263	23,17	27,37	4,200	ohne Ring
	3	2,526	62,9	1,985				31,57			
	MW	2,519	-								
V20	3	2,550	61,6	1,872	1,942	0,582	0,070	30,26	31,24	0,975	mit Ring
	4	2,555	62,1	2,011				32,21			
	1	2,555	61,7	1,927	1,787	0,536	0,141	31,18	28,92	2,265	ohne Ring
	2	2,535	61,6	1,646				26,65			
	MW	2,549	-								
V21	-										
	1	2,532	63,0	2,129	2,038	0,611	0,092	33,76	32,05	1,710	ohne Ring
	2	2,528	62,0	1,946				30,34			
	MW	2,530	-								
V22	-										
	1	2,529	62,8	2,165	2,075	0,623	0,090	34,35	33,18	1,170	ohne Ring
	2	2,557	61,9	1,985				32,01			
	MW	2,543	-								

Tab. A-4: Ergebnisse Dyn. SEV - Laboruntersuchungen – Varianten V12-V22

Lfd. Nr. / PK-Nr.	Raumdichte BK	PK-Höhe	Eindringtiefe nach 10.000 Zyklen [mm] / MW		krit. Spannweite (30% vom Mittelwert)	Standardabweichung	Dehnung [%]		Standardabweichung	mit/ohne Seitenbehinderung	
V23	3	2,518	42,1	1,861	2,084	0,625	0,223	44,12	49,10	4,975	mit Ring
	4	2,511	42,5	2,306							
	1	2,523	42,6	1,813	1,916	0,575	0,103	42,54	44,80	2,255	ohne Ring
	2	2,520	42,7	2,019							
	MW	2,518	-								
V24	3	2,489	41,1	0,967	1,030	0,309	0,063	23,57	25,24	1,665	mit Ring
	4	2,479	40,3	1,093							
	1	2,486	41,1	1,181	1,125	0,337	0,057	28,65	27,48	1,175	ohne Ring
	2	2,475	40,5	1,068							
	MW	2,482	-								
V25	2	2,507	40,6	1,428	1,733	0,520	0,305	35,02	41,31	6,285	mit Ring
	3	2,505	42,6	2,037							
	1	2,511	41,3	1,721	1,826	0,548	0,105	41,52	44,00	2,480	ohne Ring
	4	2,506	41,3	1,93							
	MW	2,507	-								
V21	1	2,532	63,0	2,129	2,038	0,611	0,092	33,76	32,05	1,710	ohne Ring
	2	2,528	62,0	1,946							
	MW	2,530	-								
V22	1	2,529	62,8	2,165	2,075	0,623	0,090	34,35	33,18	1,170	ohne Ring
	2	2,557	61,9	1,985							
	MW	2,543	-								
V28	1	2,472	41,6	1,153	1,342	0,403	0,189	27,54	32,39	4,845	mit Ring
	4	2,469	41,0	1,531							
	2	2,472	41,1	2,159	3,356	1,007	1,197	52,37	79,06	26,685	ohne Ring
	3	2,470	42,4	4,552							
	MW	2,471	-								
V29	2	2,465	42,2	2,86	2,001	0,600	0,859	66,58	46,99	19,590	mit Ring
	4	2,474	41,1	1,142							
	1	2,468	40,6	1,662	1,563	0,469	0,099	40,78	38,03	2,755	ohne Ring
	3	2,461	41,3	1,463							
	MW	2,467	-								
V30	2	2,488	41,5	2,395	2,652	0,796	0,257	57,39	63,70	6,305	mit Ring
	3	2,487	41,2	2,909							
	1	2,487	41,3	2,406	2,908	0,872	0,502	57,97	69,75	11,775	ohne Ring
	4	2,484	41,6	3,41							
	MW	2,487	-								
V31	1	2,407	41,6	2,945	2,414	0,724	0,531	70,69	57,81	12,885	ohne Ring
	2	2,424	41,8	1,883							
	MW	2,416	-								
V32	2	2,474	41,8	1,789	1,712	0,514	0,077	42,69	40,82	1,875	ohne Ring
	3	2,469	41,6	1,635							
	MW	2,472	-								
V33	1	2,343	40,6	2,116	2,241	0,672	0,125	51,79	54,01	2,215	ohne Ring
	2	2,333	41,4	2,366							
	MW	2,338	-								

Tab. A-5: Ergebnisse Dyn. SEV - Laboruntersuchungen – Varianten V23-V33

Mischgutart	Bindemittel		Endmischungen		DSV BK			DSV MPK			Faktor BK-MPK
			Raumdichte BK	Raumdichte MPK	Dehnung bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate	Spannweite/k.r. Spannweite Dehnungsrate	Dehnung bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate	Spannweite/k.r. Spannweite Dehnungsrate	
AC 11 D S	50/70	1	2,399	2,363	63,8	14	2,2	20,8	7,3	0,8	1,9
		2	2,392	2,364	63,7	11,8		20,1	7,0		
		3	2,398	2,374	62,5	13,4		21,6	6,5		
		MW	2,396	2,367	63,3	13,1	7,7	20,8	6,9	5,7	
AC 11 D SP	10/40-65 A (RC)	1	2,393	2,377	51,6	6,7	0,6	10,6	1,2	0,2	5,1
		2	2,389	2,374	48,6	6,5		9,4	1,2		
		3	2,391	2,38	48,5	6,1		9,7	1,4		
		MW	2,391	2,377	49,6	6,4	5,6	9,9	1,3	4,0	
SMA 8 S	25/55-55 A	1	2,451	2,422	80,1	33,1 (WP)	10,3	23,8	10,8 (WP)	6,7	3,0
		2	2,450	2,438	71,3	24,9 (WP)		17,6	4,6		
		3	2,453	2,428	66,1	22,8 (WP)		24,9	11,3 (WP)		
		MW	2,451	2,429	72,5	26,9	11,9	22,1	8,9	6,4	
AC 16 B S	25/55-55 A	1	2,423	2,364	29,0	5,2	0,8	7,8	1,5	0,3	3,9
		2	2,425	2,38	25,2	5,3		5,8	1,2		
		3	2,418	2,371	26,2	4,5		9,8	1,2		
		4	2,414	-	26,2	5,2		-	-		
		MW	2,420	2,372	26,7	5,1	5,2	7,8	1,3	4,0	
AC 22 B S	10/40-65 A	1	2,581	2,521	34,2	17,2	20,5	13,8	7,1	3,5	4,4
		2	2,588	2,525	31,58	16,7 (WP)		12,9	5,3		
		3	2,552	2,511	25,6	37,2 (WP)		11	3,6		
		MW	2,574	2,519	30,4	23,7	10,9	12,6	5,3	5,3	
AC 22 B SG	25/55-55 A (RC)	1	2,503	2,457	29	2,6	0,6	5,2	0,6	0,4	4,7
		2	2,508	2,452	23,7	2,7		6,6	0,8		
		3	2,504	2,453	30,9	3,2		7,9	0,4		
		MW	2,505	2,454	27,9	2,8	4,5	6,6	0,6	3,8	

Tab. A-6: Ergebnisse Einaxialer DSV - BAST-Varianten

BAST-Mischgüter		Raumdichte BK	PK-Höhe	Eindringtiefe nach 10.000 Zyklen [mm] / MW		krit. Spannweite (30% vom Mittelwert)	Standardabweichung	Dehnung [%]		Standardabweichung	mit/ohne Seitenbehinderung	
AC 11 D S	50/70	2	2,385	41,5	2,887	2,755	0,827	0,132	69,49	67,16	2,335	mit Ring
		3	2,383	40,5	2,623							
		1	2,389	40,3	2,886	3,275	0,982	0,389	71,53	80,38	8,850	ohne Ring
		4	2,388	40,8	3,663							
		MW	2,386	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SMA 8 S	25/55-55 A	3	2,458	40,6	2,391	2,316	0,695	0,075	58,87	57,04	1,830	mit Ring
		4	2,462	40,6	2,241							
		1	2,46	41,1	2,366	2,200	0,660	0,167	57,57	52,72	4,850	ohne Ring
		2	2,458	42,5	2,033							
		MW	2,460	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AC 16 B S	25/55-55 A	1	2,407	61,1	1,419	1,469	0,441	0,050	23,25	24,11	0,860	mit Ring
		3	2,413	60,9	1,518							
		2	2,407	61,1	1,914	1,777	0,533	0,138	31,36	29,18	2,180	ohne Ring
		4	2,414	60,8	1,639							
		MW	2,410	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AC 22 B S	10/40-65 A	2	2,525	84,0	2,396	2,210	0,663	0,187	28,51	26,72	1,795	mit Ring
		3	2,549	81,0	2,023							
		1	2,563	81,8	2,253	2,602	0,781	0,349	27,53	31,78	4,250	ohne Ring
		4	2,551	81,9	2,951							
		MW	2,547	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. A-7: Ergebnisse Dyn. SEV - Laboruntersuchungen – BAST-Varianten

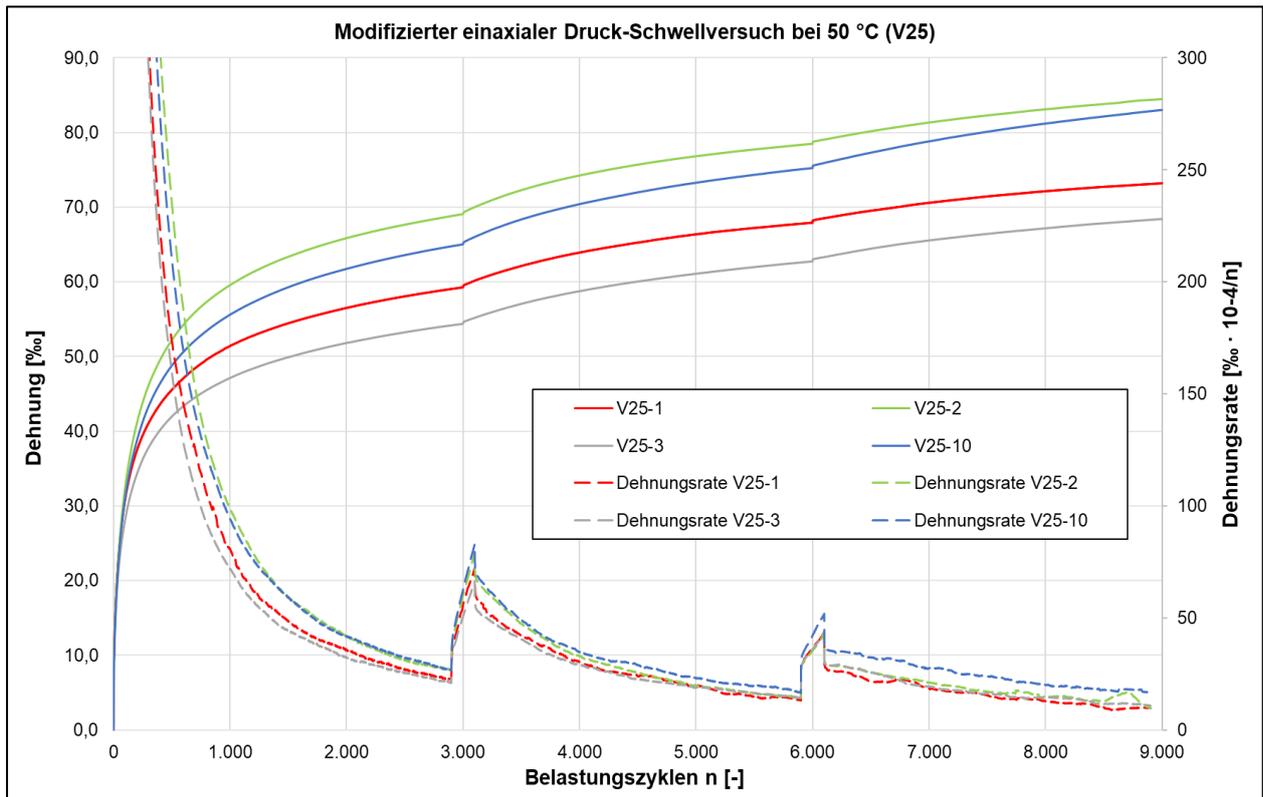


Bild A-1: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V25_50°C

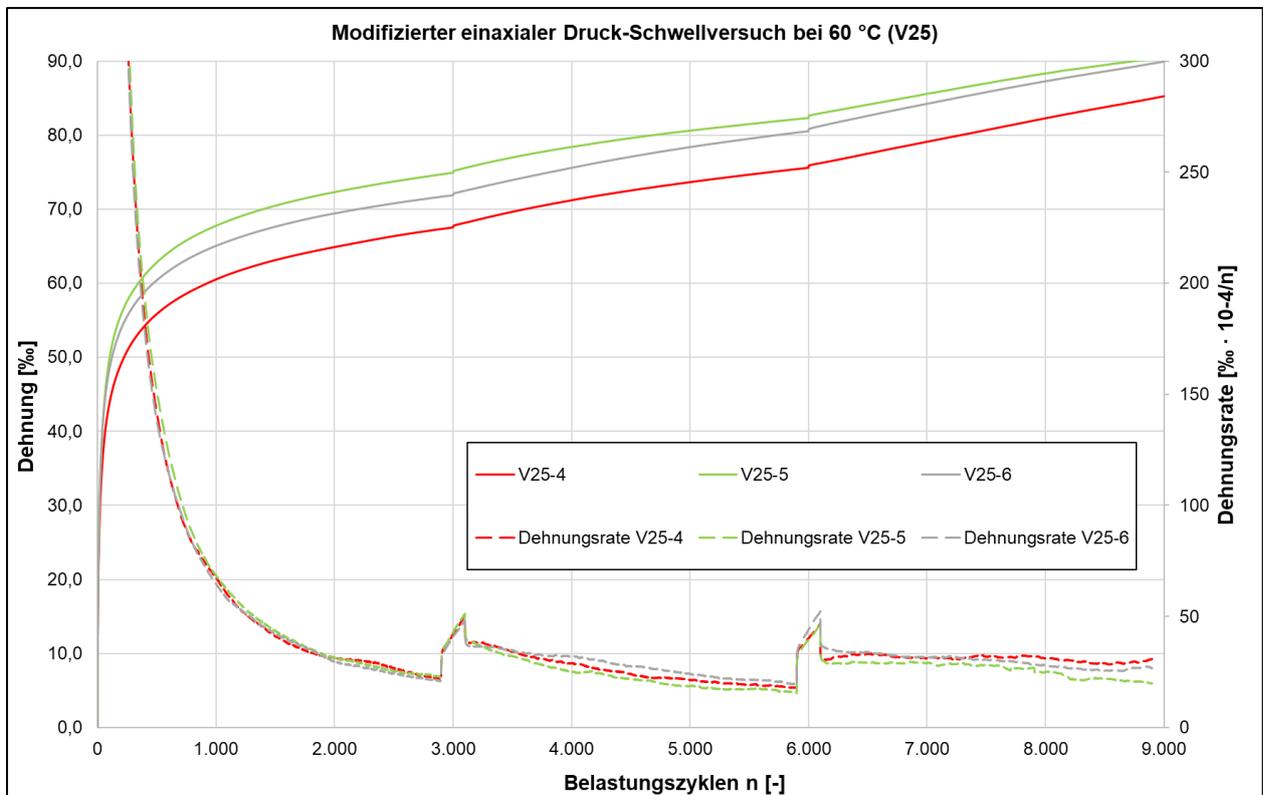


Bild A-2: Impulskriechkurve Modifizierter DSV – V25 60°C

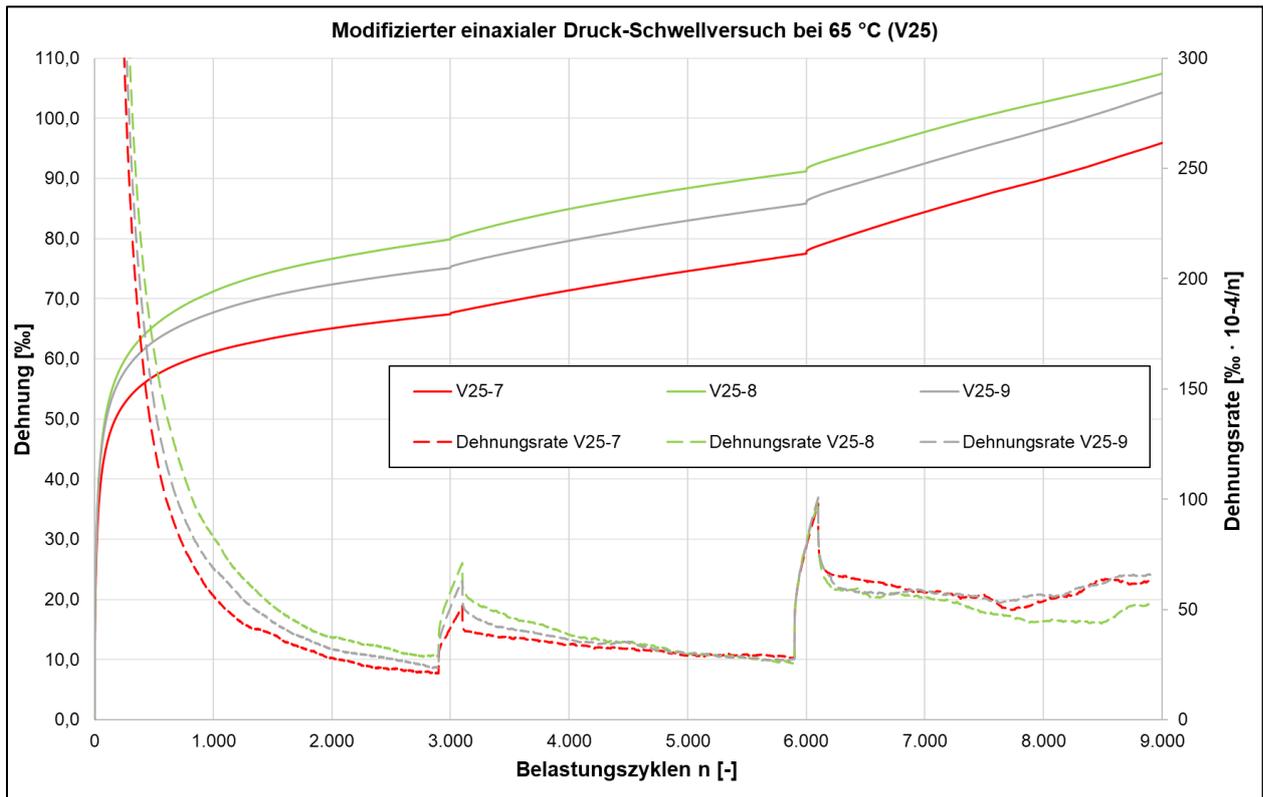


Bild A-3: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V25 65°C

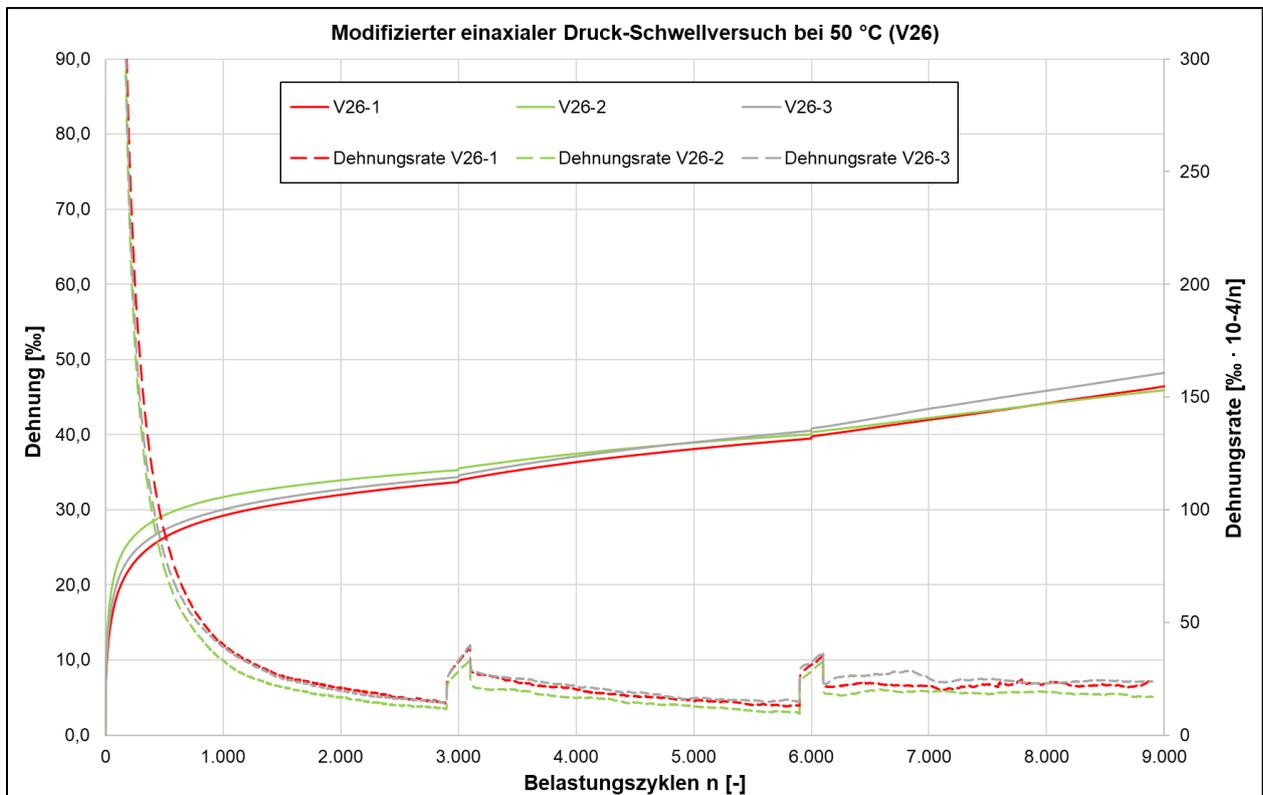


Bild A-4: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V26 50°C

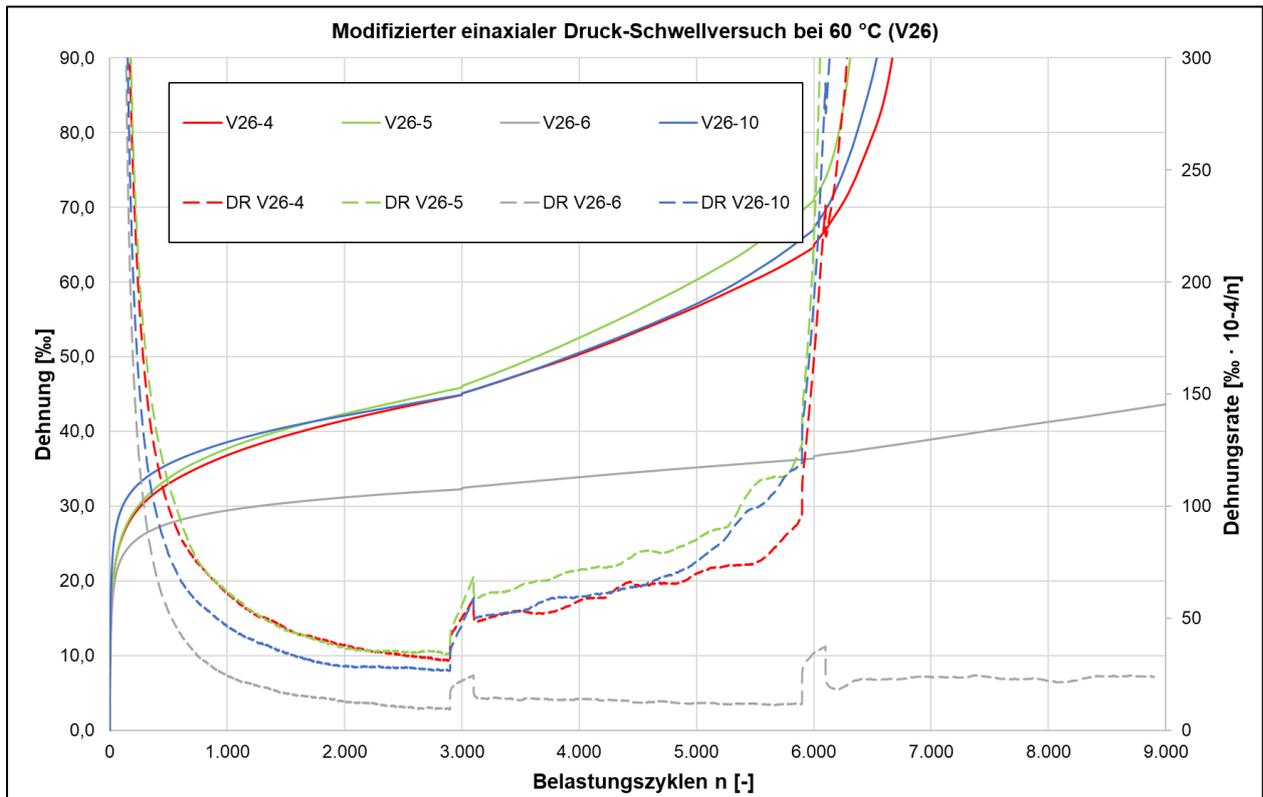


Bild A-5: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V26 60°C

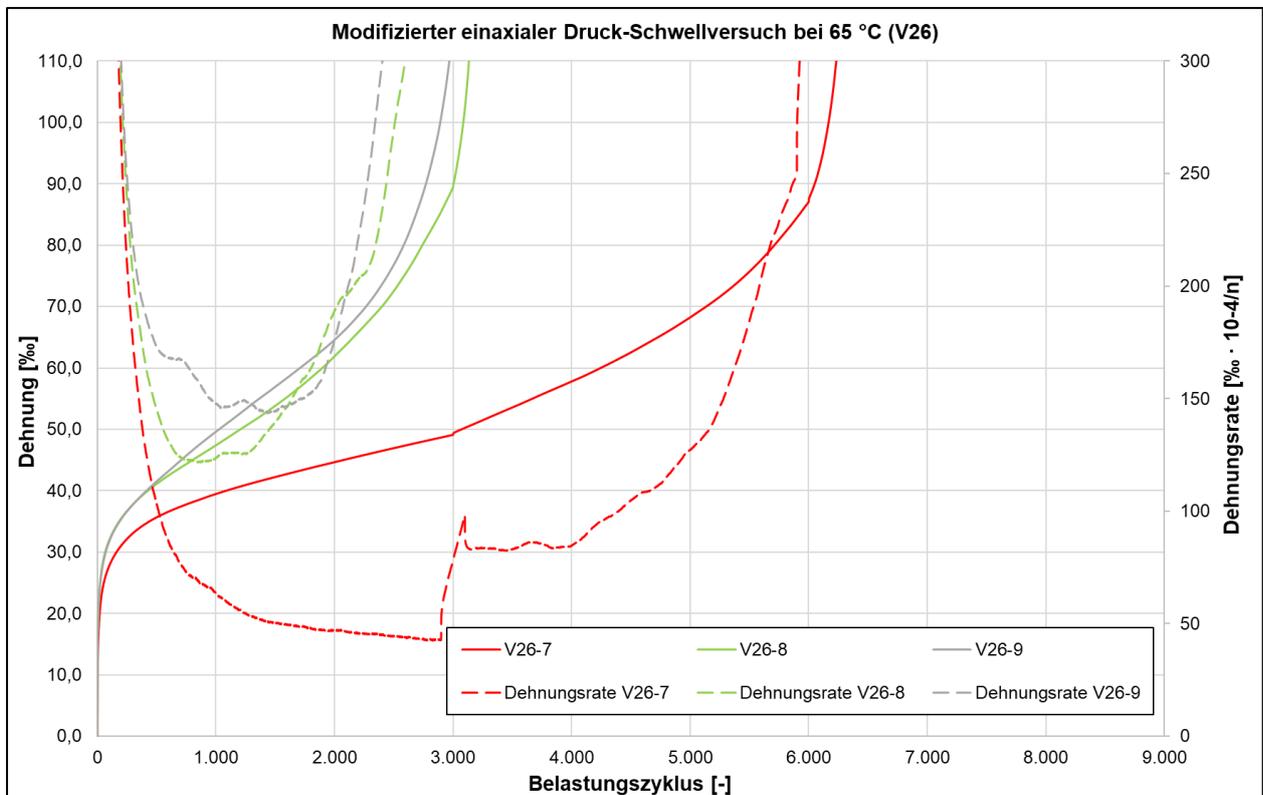


Bild A-6: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V26 65°C

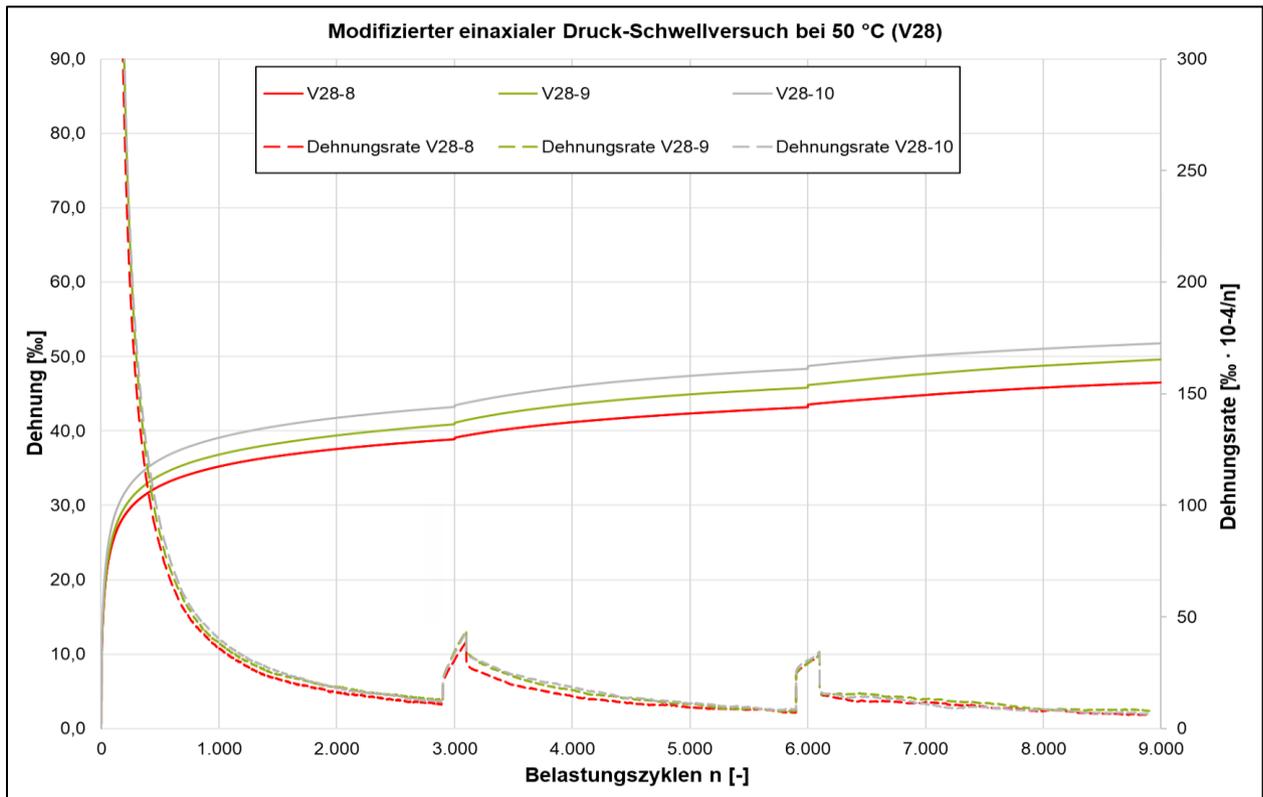


Bild A-7: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V28 50°C

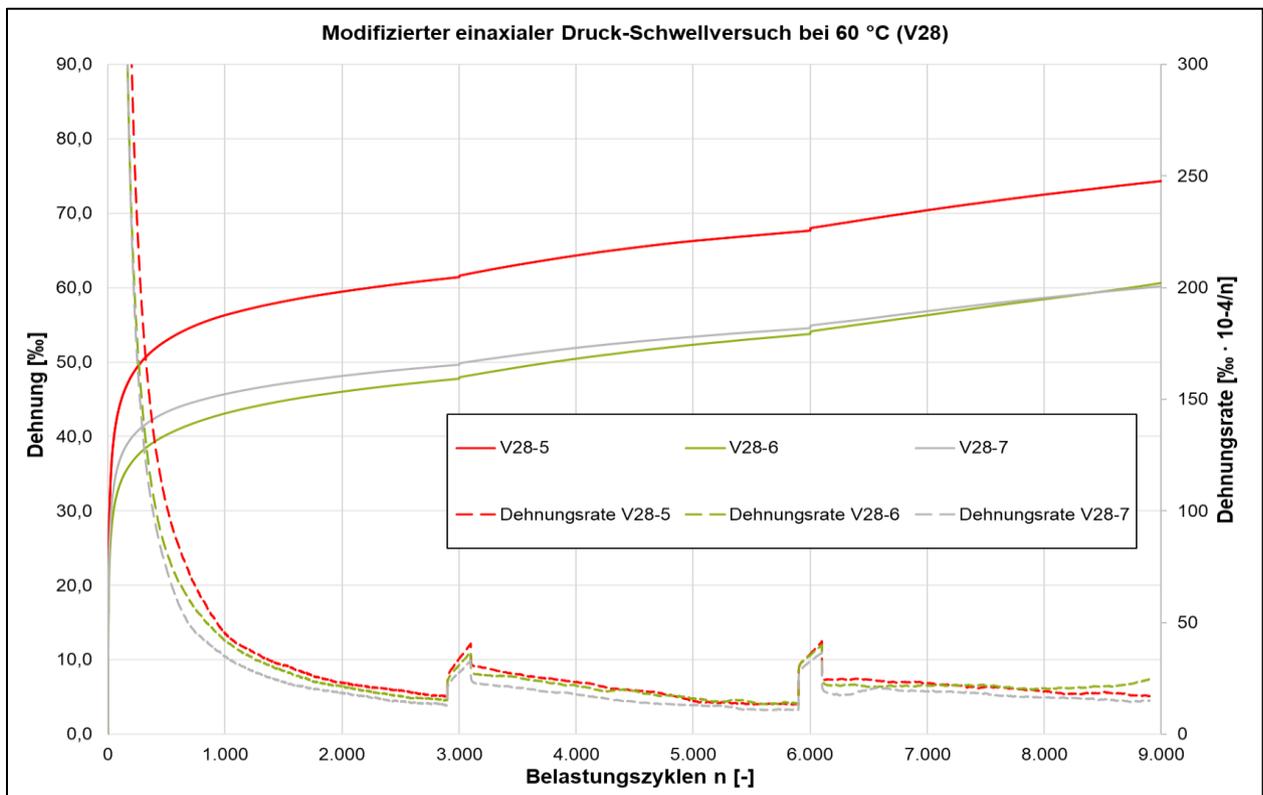


Bild A-8: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V28 60°C

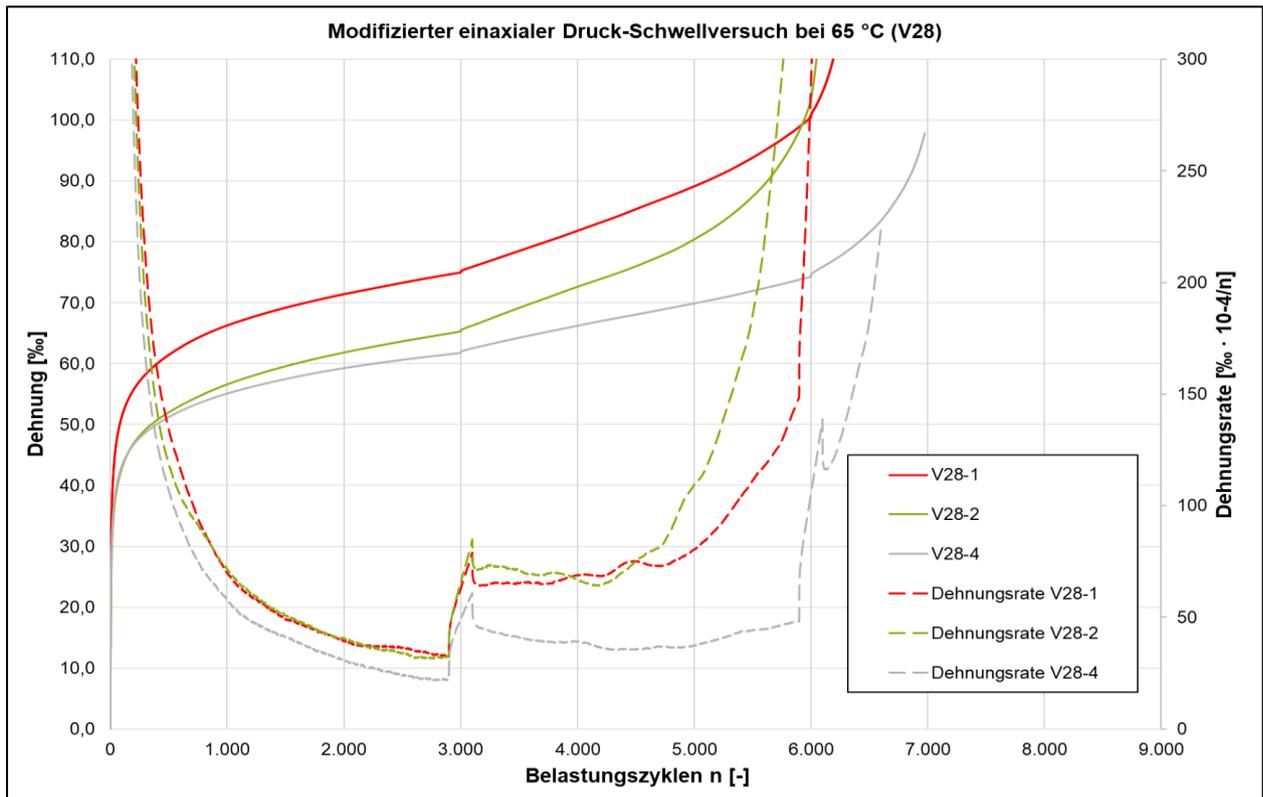


Bild A-9: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V28 65°C

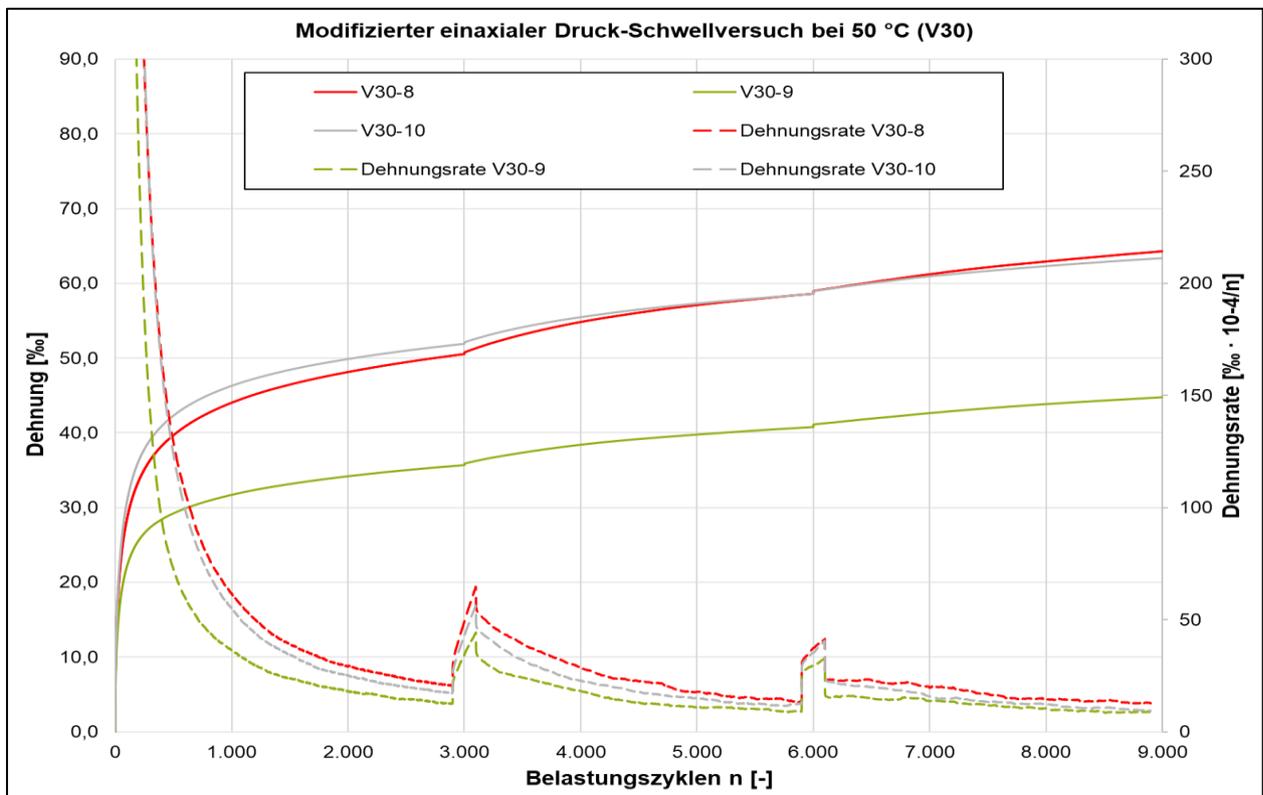


Bild A-10: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V30 50°C

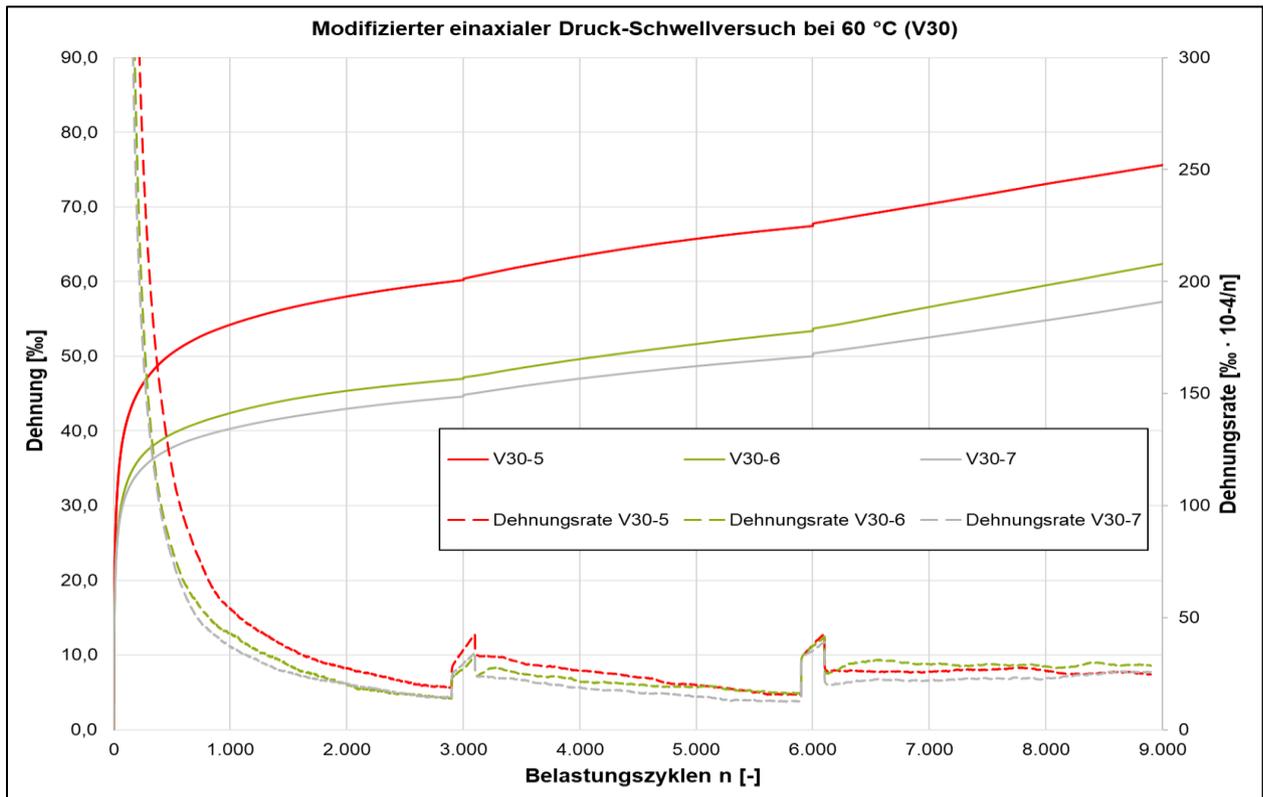


Bild A-11: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V30 60°C

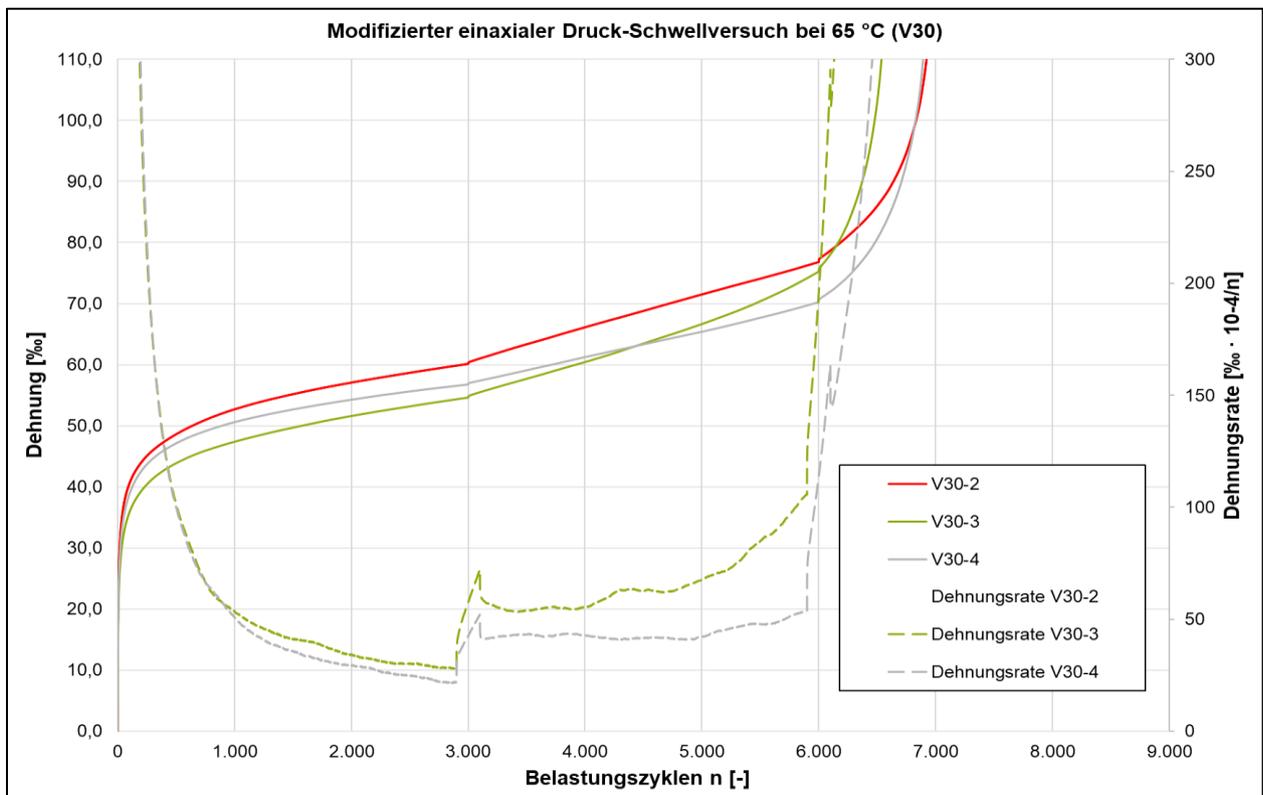


Bild A-12: Impulskriechkurven Modifizierter DSV – V30 65°C



Bild A-13: Bohrkerne 1-9 – Berliner Ring/A10

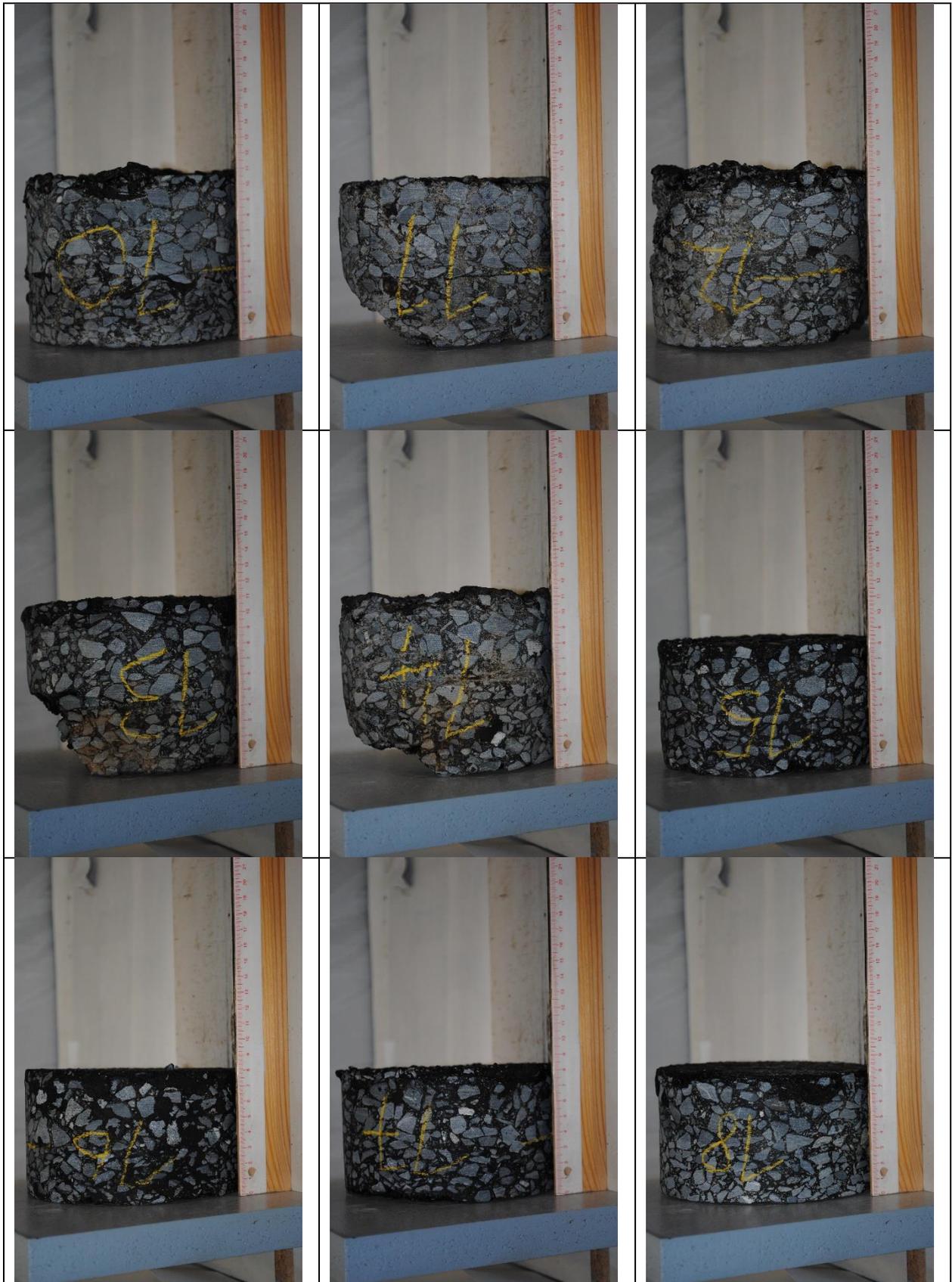


Bild A-14: Bohrkern 10-18 – Berliner Ring/A10

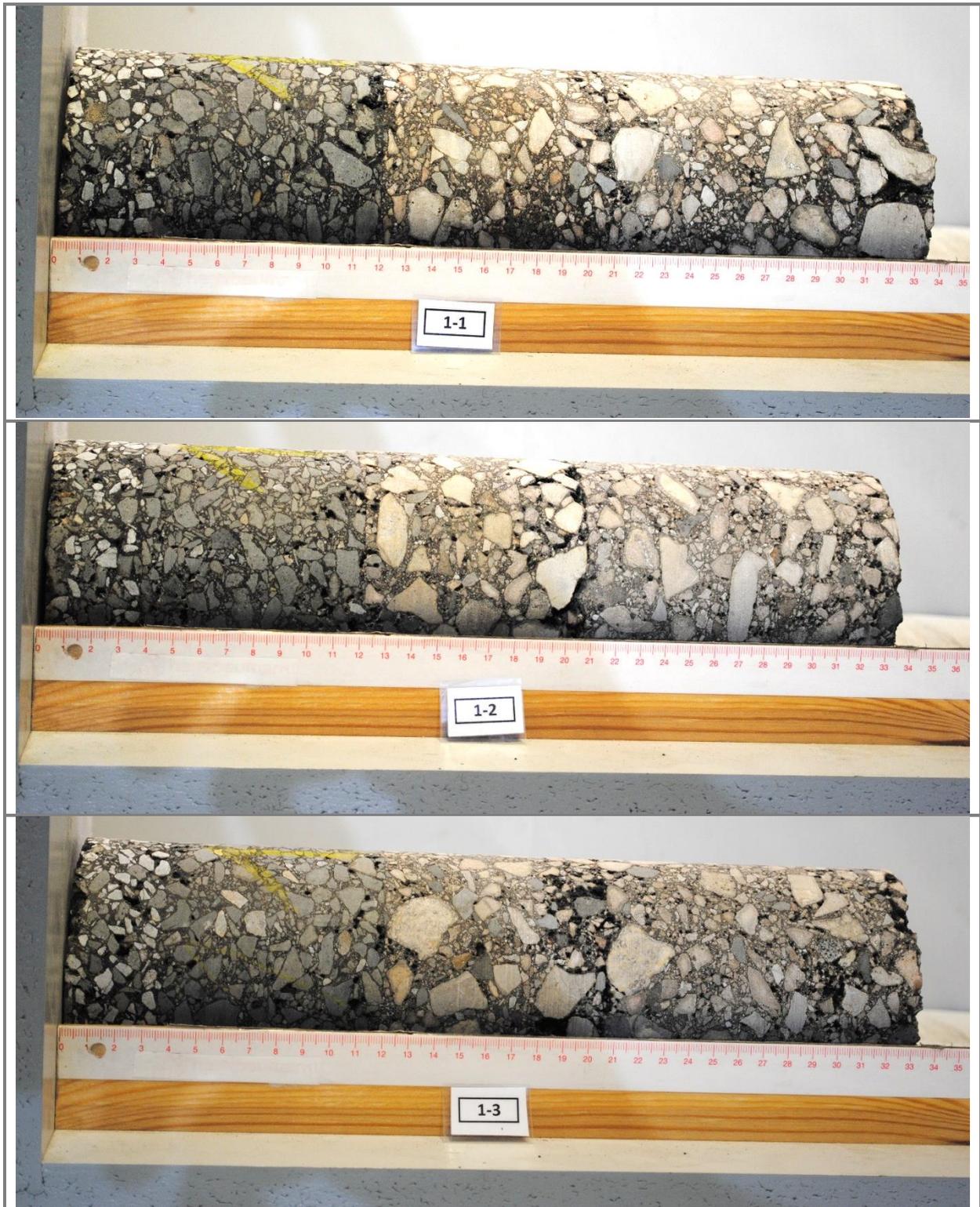


Bild A-15: Bohrkern \varnothing 100 mm, Entnahmestelle 1 – B51 Olzheim

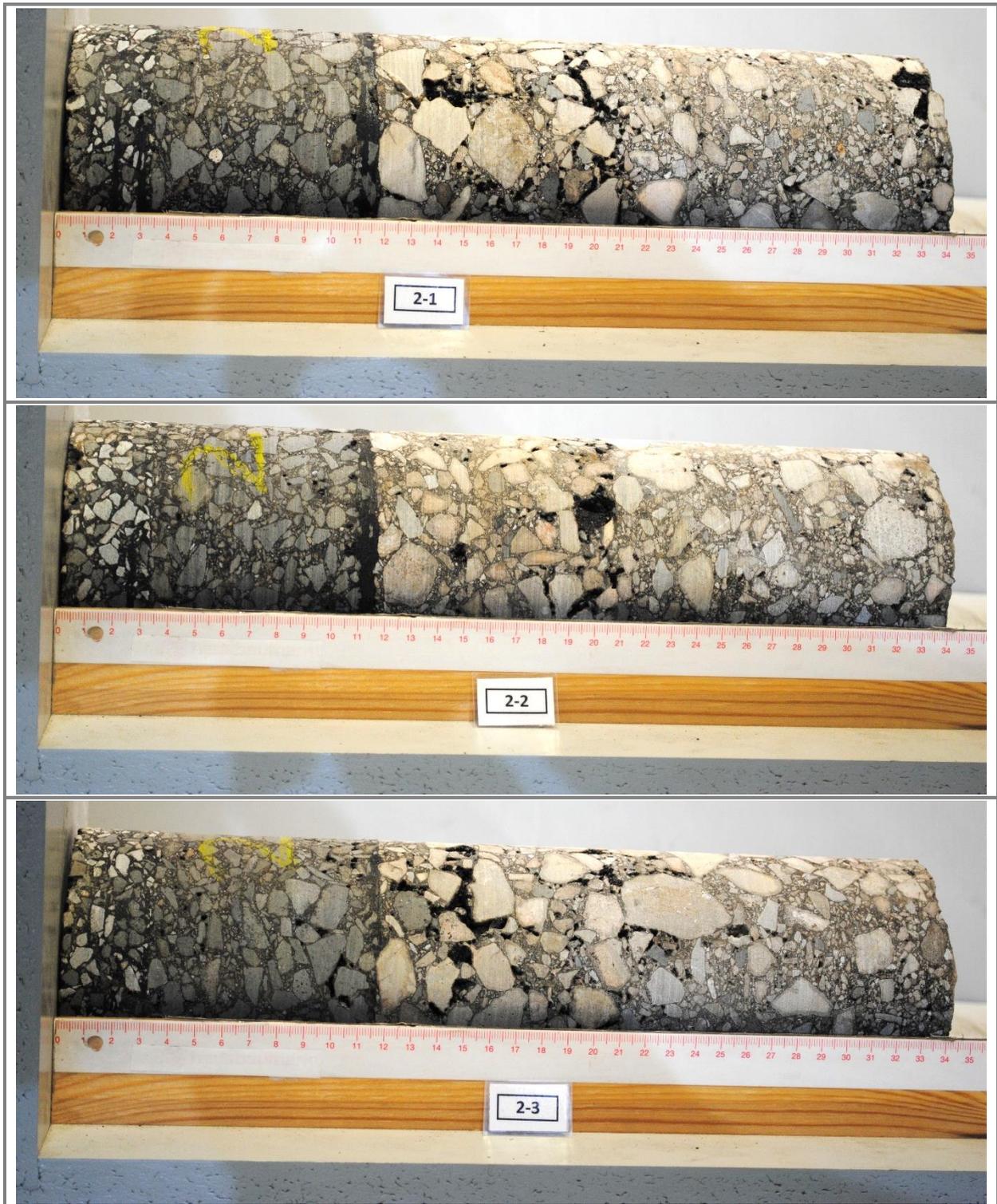


Bild A-16: Bohrkern \varnothing 100 mm, Entnahmestelle 2 – B51 Olzheim



Bild A-17: Bohrkern \varnothing 100 mm, Entnahmestelle 3 – B51 Olzheim



Bild A-18: Gefüge-zerstörte Probekörper - B51 Olzheim



Bild A-19: Bohrkernentnahme - B50 Hunsrück



Bild A-20: Entnahmestelle und Bohrkern – Hüllerstraße Gelsenkirchen

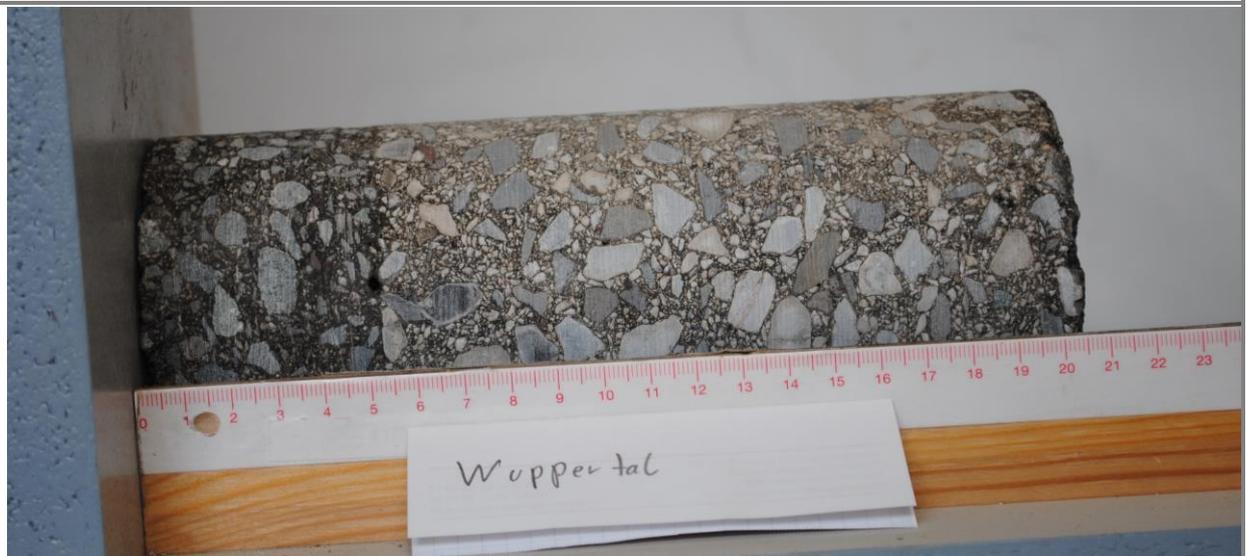


Bild A-21: Entnahmestelle und Bohrkern - Hahnerberger Straße Wuppertal



Bild A-22: entnommene Bohrkerne L459 – Hamminkeln

Tab. A-8: Ergebnisse DSV Praxisstrecken (Mittelwerte)

		Dehnung bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate	Bemerkung	MW Dehnungsrate	Spannweite	kr. Spannweite Dehnungsrate
DS+BS							
Berlin	SMA 11 S	85,3	43,2	kr. SW übertroffen	29,1	28,1	12,6
Ochtrup	SMA 11 S	43,3	15,1	-			
Münster	SMA 8 S	49,2	20,0	-	42,7	96,1	16,8
Hunsrück	SMA 8 S	40,2	16,6	-			
Witten	SMA 8	44,3	17,2	kr. SW übertroffen / 1 PK hat WP			
Olzheim 1	SMA 8 S	65,0	95,0	alle PK WP / kr. SW übertroffen			
Olzheim2	SMA 8 S	50,6	101,6	alle PK WP			
Olzheim 3	SMA 8 S	27,1	5,6	alle PK WP			
Gelsenkirchen	AC 8 D	19,8	115,2	-	115,2	-	-
Rees/Hamminkeln	AC 11 D S	17,5	45,2	alle PK WP / kr. SW übertroffen	251,3	412,3	81,5
Wuppertal	AC 11 D S	66,3	457,4	kr. SW übertroffen			
BS							
Berlin	SMA 16 B S	85,5	23,7	kr. SW übertroffen	23,7	0,0	11,0
Witten	AC 22 B S	47,0	28,2	1 PK hat WP / kr. SW übertroffen	36,1	71,3	14,8
Ochtrup	AC 22 B S	17,8	4,5	-			
Gelsenkirchen	AC 22 B S	14,4	75,8	alle PK WP / kr. SW übertroffen			
Hunsrück	AC 16 B S	28,0	6,9	-	20,1	34,2	9,8
Münster	AC 16 B S	55,4	24,7	-			
Olzheim 1	AC 16 B S (BS+TS)	27,5	31,2	kr. SW übertroffen / 1 PK hat WP			
Olzheim2	AC 16 B S (BS+TS)	27,5	39,9	1 PK hat WP			
Olzheim 3	AC 16 B S (BS+TS)	26,0	5,7	1 PK hat WP			
Wuppertal	AC 16 B S	12,7	12,3	kr. SW übertroffen			
MPK (DS)							
Berlin	SMA 11 S	-	-	-	0,9	0,0	3,9
Ochtrup	SMA 11 S	14,5	0,9	-			
Münster	SMA 8 S	13,9	0,6	nur zwei PK gültig	3,0	4,6	4,5
Hunsrück	SMA 8 S	20,4	4,8	-			
Witten	SMA 8	17,5	5,2	kr. SW übertroffen			
Olzheim 1	SMA 8 S	19,6	2,8	nur 1 PK			
Olzheim2	SMA 8 S	26,3	3,5	nur 1 PK			
Olzheim 3	SMA 8 S	18,7	1,3	nur 1 PK			
Gelsenkirchen	AC 8 D	39,0	10,8	-	10,8	-	-
Rees/Hamminkeln	AC 11 D S	22,7	8,1	1 PK hat WP / kr. SW übertroffen	5,8	4,6	5,4
Wuppertal	AC 11 D S	18,2	3,5	-			
MPK (BS)							
Ochtrup	AC 22 B S	8,5	2,0	-	1,7	0,6	4,1
Witten	AC 22 B S	7,3	1,4	1 PK hat WP			
Gelsenkirchen	AC 22 B S	18,4	60,9	alle PK haben WP	16,7	59,6	8,8
Wuppertal	AC 16 B S	8,9	1,4	-			
Münster	AC 16 B S	11,1	2,5	-			
Hunsrück	AC 16 B S	9,8	2,1	nur ein PK gültig			
Olzheim 1	-	-	-	-			
Olzheim2	-	-	-	-			
Olzheim 3	-	-	-	-			
Rees/Hamminkeln	-	-	-	-			
Berlin	-	-	-	-			

Tab. A-9: Einaxialer DSV - Bestehende Datensätze - Asphaltdeckschichtvarianten

Mittelwerte (der Dreifachbestimmung)							
Bohrkerne							
	Bindemittel	Raum-dichte	Dehnung	Dehnungs-rate	Spannweite	kr. Spannweite	Bemerkung
AC 8 D SP	25/45 VL	2,563	50,3	11,4	5,5	7,1	
AC 8 D SP	25/55-55 A	2,486	47,3	18,4	4,2	9,3	
AC 8 D SP	25/55-55 A	2,533	34,3	3,4	0,9	4,7	
AC 8 D SP	25/55-55 A	2,474	50,3	73,6	15,7	26,4	WP
AC 11 D SP	25/55-55 A	2,366	12,8	2,4	1,5	4,4	
AC 11 D SP	25/55-55 RC	2,431	73,7	10,9	2,6	7,0	
AC 11 D SP	10/25 VL	2,41	15,7	4,9	0,6	5,1	
AC 11 D SP	10/25 VL	2,637	19,6	2,9	2	4,5	
AC 11 D SP	10/40-65 A	2,48	35,5	3,5	0,7	4,7	
AC 11 D SP	10/40-80 VL	2,453	29,0	8,3	5,7	6,2	
AC 11 D SP	10/40-80 VL	2,441	72,4	13	2,3	7,6	65°C
AC 11 D SP	10/40-80 VL	2,455	49,0	5,3	2,4	5,3	
AC 11 D SP	10/40-80 VL	2,449	52,1	5,0	0,7	5,2	65°C
AC 11 D SP	25/55-55 A	2,466	28,0	4,9	2,3	5,1	
AC 11 D SP	10/40-80 VL	2,395	24,9	5,9	2,9	5,4	
AC 11 D SP	10/40-80 VL	2,396	37,4	3,6	0,8	4,7	60°C
AC 11 D SP	10/40-65 A	2,395	47,8	6,5	3,4	5,6	
AC 11 D SP	10/40-65 A	2,391	45,3	7,2	1,7	5,8	
AC 11 D SP	10/40-65 A	2,373	38,3	10,6	2	6,9	
AC 11 D SP	10/40-65 A	2,475	43,4	21,2	6,1	10,2	WP
AC 11 D SP	PmB 25/45 VL	2,387	40,6	6,5	0,9	5,6	
AC 11 D SP	25/55-55 A	2,545	51,1	8,9	4,7	6,3	
AC 11 D SP	10/40-65 A	2,54	31,6	4,6	0,4	5	
AC 11 D SP	25/55-55 RC HV	2,536	46,2	10,2	5,4	6,8	
AC 11 D SP	10/40-65 A	2,532	33,6	5,6	3,3	5,3	
AC 11 D SP	10/40-80 VL	2,518	43,9	9,2	2,5	6,4	
AC 11 D SP	25/55-55 A	2,427	34,1	4,9	0,7	5,1	
AC 11 D S	25/45 VL	2,373	40	26,6	9,5	11,8	WP
AC 11 D S	25/45 VL	2,390	37,1	10,1	4,3	6,7	
AC 11 D S	50/70	2,396	62	11,6	2,4	7,2	
AC 11 D S	50/70	2,397	58,7	11	2,7	7	
AC 11 D S	25/55-55 LT	2,388	37,9	16,9	7,5	8,8	WP
AC 11 D S	PmB 25/45VL	2,485	4,6	3,4	0,9	4,7	
AC 11 D S	25/55-55 A	2,513	39,5	3,5	0,5	4,7	
AC 11 D S	25/35 VL	2,476	66	13,4	5,5	7,8	
AC 11 D S	PmB 25/45VL	2,494	61,7	10,2	3,6	6,8	
MPK							
AC 8 D SP	25/55-55 A	2,399	25,03	2,57	2,4	4,4	
AC 8 D S	10/40-80	2,370	32,10	3,10	1,40	4,60	
AC 8 D S	10/40-80	2,338	8,40	2,80	4,20	4,50	
AC 11 D SP	PmB 25/45VL	2,376	6,70	2,80	2,20	4,50	
AC 11 D SP	10/40-65 A	2,519	12,40	1,20	0,00	4,00	
AC 11 D SP	25/45 VL	2,500	9,50	1,40	1,00	4,00	
AC 11 D SP	25/45 VL	2,500	8,20	1,00	0,50	3,90	
AC 11 D SP	25/55-55 A	2,372	11,70	2,00	0,80	4,20	
AC 11 D SP	25/55-55 A	2,545	8,80	1,10	1,00	4,00	
AC 11 D SP	25/55-55 A	2,446	7,20	1,30	0,30	4,00	
AC 11 D SP	25/55-55 A	2,392	12,20	4,20	4,40	4,90	
AC 11 D SP	10/40-80 VL	2,495	12,60	2,40	0,60	4,30	
AC 11 D S	25/55-55 A	2,391	13,60	2,10	0,80	4,30	
AC 11 D S	25/55-55 A	2,397	12,20	1,60	0,80	4,10	

Tab. A-10: Einaxialer DSV - Bestehende Datensätze - Asphaltbinderschichtvarianten

Mittelwerte (der Dreifachbestimmung)							
Bohrkerne							
	Bindemittel	Raum-dichte	Dehnung	Dehnungs-rate	Spannweite	kr. Spannweite	Bemerkung
AC 16 B SG	10/45-65 A	2,501	28,3	4,8	3,6	5,1	
AC 16 B SG	10/45-65 A	2,485	28,4	6,2	2,9	5,5	
AC 16 B SG	10/40-80 A	2,516	25,8	5,1	2,4	5,2	
AC 16 B SG	10/40-80 A	2,522	36,2	4,9	2,8	5,1	65°C
AC 16 B SG	10/40-80 A	2,516	16,5	4,8	2,4	5,1	
AC 16 B SG	10/40-80 A	2,494	31,7	8,4	5,2	6,2	65°C
AC 16 B SG	25/45 VL	2,388	37,6	55,7	4,9	20,9	WP
AC 16 B SG	25/45 VL	2,39	22,6	5,6	1,9	5,3	
AC 16 B SG	25/55-55 A	2,465	43,7	125,1	14,4	42,4	WP
AC 16 B SG	25/55-55 LT	2,616	41,4	5	0,7	5,2	
AC 16 B SG	25/55-55 LT	2,626	47,9	8,7	3,1	6,3	
AC 16 B SG	25/55-55 LT	2,41	34,6	19,4	11,1	9,6	WP
AC 16 B SG	PmB 10/25 VL	2,463	27,8	4,9	5,7	5,1	
AC 16 B SG	25/55-55 A	2,421	40,3	16,4	6,6	8,7	
AC 16 B SG	10/40-65 A	2,472	29,4	5	0,5	5,1	
AC 16 B S	10/40-65 A	2,436	29,4	5,8	2,6	5,4	
AC 16 B S	50/70	2,446	33,1	3,9	2	4,8	
AC 16 B S	25/55-55 A	2,427	24,1	6,4	1,6	5,6	
AC 16 B S	25/55-55 A	2,424	26	5,5	1,3	5,3	
AC 22 B SG	PmB 25/45 VL	2,54	31,8	4,8	3,3	5,1	
AC 22 B SG	PmB 25/45 VL	2,545	34,4	5,4	2,3	5,3	
AC 22 B SG	25/55-55 A	2,567	33,7	18,3	5,3	9,3	
AC 22 B SG	25/55-55 A	2,569	34,2	12,8	4	7,6	
AC 22 B S	PmB 10/25 VL	2,414	25,7	7,1	2,6	5,8	
AC 22 B S	PmB 10/25 VL	2,419	39,9	16,2	9,0	8,6	60°C
MPK							
AC 16 B SG	25/55-55 LT	2,65	11,8	1,4	0,2	4	
AC 16 B SG	25/55-55 LT	2,589	13,1	2,1	0,8	4,3	
AC 16 B SG	25/55-55 A RC	2,382	4,4	0,6	3,8	3,8	

Tab. A-11: Einaxialer DSV - Bestehende Datensätze - Splittmastixvarianten

Mittelwerte (der Dreifachbestimmung)							
Bohrkerne							
	Bindemittel	Raum- dichte	Dehnung	Dehnungs- rate	Spannweite	kr. Spannweite	Bemerkung
SMA 8 S	25/55-55 A	2,408	53,2	7,8	0,9	6,0	
SMA 8 S	25/55-55 A	2,343	47,5	11,7	11,8	7,2	
SMA 8 S	25/55-55 A	2,364	34,4	2,7	0,6	4,4	
SMA 8 S	25/55-55 A	2,343	34,1	3,5	3,8	4,7	
SMA 8 S	25/55-55 A	2,363	33,7	3,1	0,9	4,6	
SMA 8 S	PmB 25/45 VL	2,365	45,9	3,3	1,8	4,6	
SMA 8 S	25/55-55 A	2,357	50,7	10,2	0,7	6,8	
SMA 8 S	25/55-55 A	2,446	53,8	21	9,4	10,1	WP
SMA 8 S	25/55-55 A	2,446	56,7	21,1	5,6	10,1	WP
SMA 8 S	25/55-55 LT	2,487	44,1	5	0,5	5,1	
SMA 8 S	PmB 10/25 VL	2,353	39,4	6,4	3,7	5,6	
SMA 8 S	25/45 VL	2,382	14,3	3	1,2	4,5	
SMA 8 Hmb	25/55-55 A RC	2,256	15,8	7,3	5,5	5,9	WP
SMA 8 Hmb	PmB 25/45 VL	2,272	16,3	4,5	3,17	5	
SMA 8 Hmb	10/40-65 A RC	2,255	14,1	5,9	4,16	5,4	WP
SMA 8 Hmb	PmB 10/25 VL	2,265	14,6	2,3	0,81	4,3	
SMA 11 S	10/40-80 VL	2,483	29,7	4,8	0,8	5,1	
SMA 11 S	10/40-80 VL	2,495	42,2	5,8	1,3	5,4	65°C
SMA 11 S	70/100	2,403	33,1	17,7	7,4	9,1	WP
SMA 11 S	PmB 10/25 VL	2,496	59,1	7,3	0,8	5,9	
SMA 11 S	PmB 10/25 VL	2,509	72,3	6,7	1,5	5,7	
MPK							
SMA 8 S	25/45 VL	2,245	13,8	2,4	1,1	4,3	
SMA 8 S	25/55-55 LT	2,475	13,7	1,3	0,8	4	
SMA 8 S	25/55-55 LT	2,469	14,7	1,9	1	4,2	
SMA 8 S	25/55-55 A	2,322	5,6	0,6	0,22	3,8	
Bohrkerne							
SMA 16 B S	10/40-65 A	2,507	38,5	5,5	1,3	5,3	
SMA 16 B S	10/25 VL	2,447	30,8	6	1,9	5,5	60°C
SMA 16 B S	10/40-65 A	2,362	33,3	14,6	8	8,1	
SMA 16 B S	10/40-65 A	2,450	35,5	5,1	0,9	5,2	
SMA 16 B S	PmB 10/25 VL	2,576	46,2	13,9	3,6	7,9	
SMA 16 B S	PmB 10/25 VL	2,589	44,1	34,1	18,9	14,2	WP
SMA 16 B S	PmB 10/25 VL RC	2,570	32,8	7,4	3,8	5,9	
SMA 16 B S	PmB 10/25 VL RC	2,564	44,3	15,1	3,3	8,3	60°C / WP
SMA 16 B S	PmB 25/45 VL	2,422	31,3	2,9	1,3	4,5	
SMA 16 B S	10/40-65 A	2,468	35,8	6,6	5,8	5,6	
SMA 16 B S	10/40-65 A	2,501	42,4	16,1	3,7	8,6	
SMA 16 B S	PmB 10/25 VL	2,614	30,3	5,2	3,3	5,2	
SMA 16 B S	PmB 10/25 VL	2,616	38,8	6,1	2,5	5,5	60°C
MPK							
SMA 16 B S	10/25 VL	2,350	13,9	20,6	6,8	10	WP
SMA 16 B S	10/40-80	2,386	7,1	0,6	0,59	3,8	
SMA 16 B S	10/40-65 A	2,389	7,3	6,7	2,8	5,7	

Tab. A-12: Einaxialer DSV - Ergebnisse Ringversuch (RUB)

Daten Ringversuch / BK				Dehnung bei Versuchsende [%]	Dehnungsrate	Spannweite/kr. Spannweite Dehnungsrate	
SMA 8 S	1	25/55-55 A	2,455	57,9	15,6	6,4	
		25/55-55 A	2,459	52,6	9,2		
		25/55-55 A	2,460	54,1	9,4		
				2,458	54,9	11,4	7,1
	2	25/55-55 A	2,460	64,3	14,6	14,0	
		25/55-55 A	2,452	68,1	28,6		
		25/55-55 A	2,442	68,2	33,1 (WP)		
			2,451	66,2	21,6	10,3	
AC 11 D S	1	50/70	2,400	62,8	11,3	2,2	
		50/70	2,397	Fehler	Fehler		
		50/70	2,398	70,7	13,5		
				2,398	66,8	12,4	7,4
	2	50/70	2,396	65,4	12,6	0,4	
		50/70	2,399	67,7	12,4		
		50/70	2,394	66,1	12,2		
			2,396	66,4	12,4	7,4	
AC 11 D SP	1	10/40-65 A	2,399	46,8	7,3	0,8	
		10/40-65 A	2,399	45,8	7,4		
		10/40-65 A	2,400	49,3	6,6		
				2,399	47,3	7,1	5,8
	2	10/40-65 A	2,399	43,5	6,5	0,8	
		10/40-65 A	2,398	44,1	5,7		
		10/40-65 A	2,396	44,8	5,7		
			2,398	44,1	6,0	5,4	
AC 16 B S	1	25/55-55 A	2,426	31	5,4	0,8	
		25/55-55 A	2,427	33,5	6,2		
		25/55-55 A	2,429	33	5,9		
				2,427	32,5	5,8	5,4
	2	25/55-55 A	2,435	30,6	5,5	1,0	
		25/55-55 A	2,435	33,6	6,5		
		25/55-55 A	2,431	33,6	5,9		
			2,434	32,6	6,0	5,4	
AC 22 B S	1	25/55-55 A	2,582	26,5	7,2	5,3	
		25/55-55 A	2,570	30,7	11,4		
		25/55-55 A	2,596	28,1	6,1		
				2,583	28,4	8,2	6,2
	2	25/55-55 A	2,580	29,3	8,8	6,4	
		25/55-55 A	2,578	31	10,5		
		25/55-55 A	2,566	35,2	15,2		
			2,575	31,8	11,5	7,2	

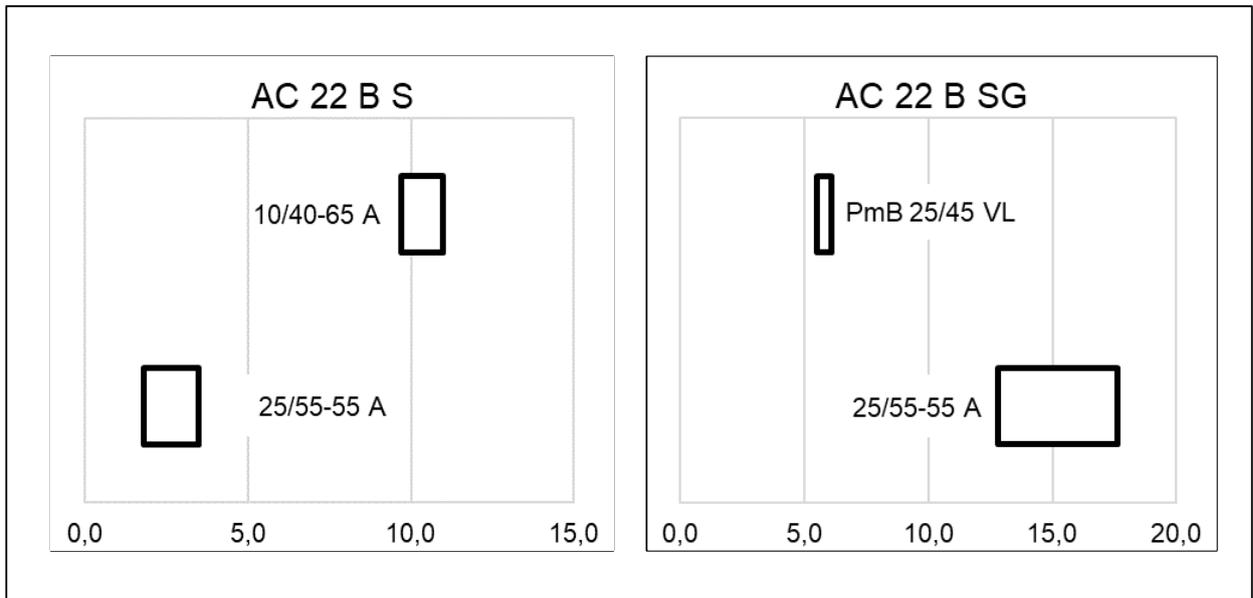


Bild A-23: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (1)

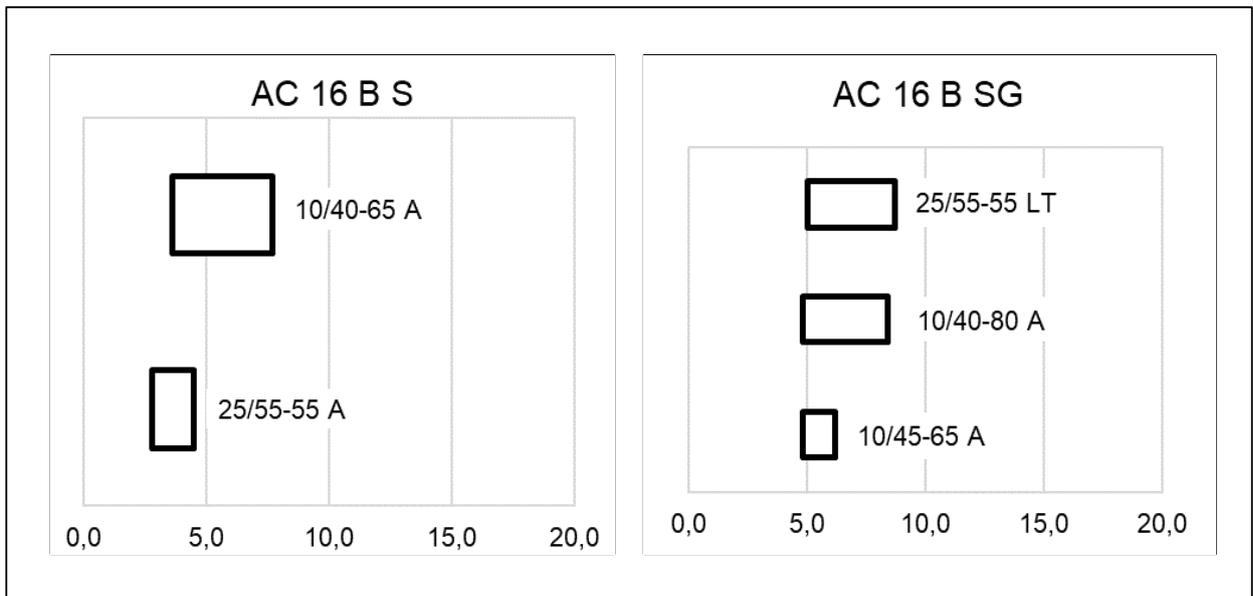


Bild A-24: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (3)

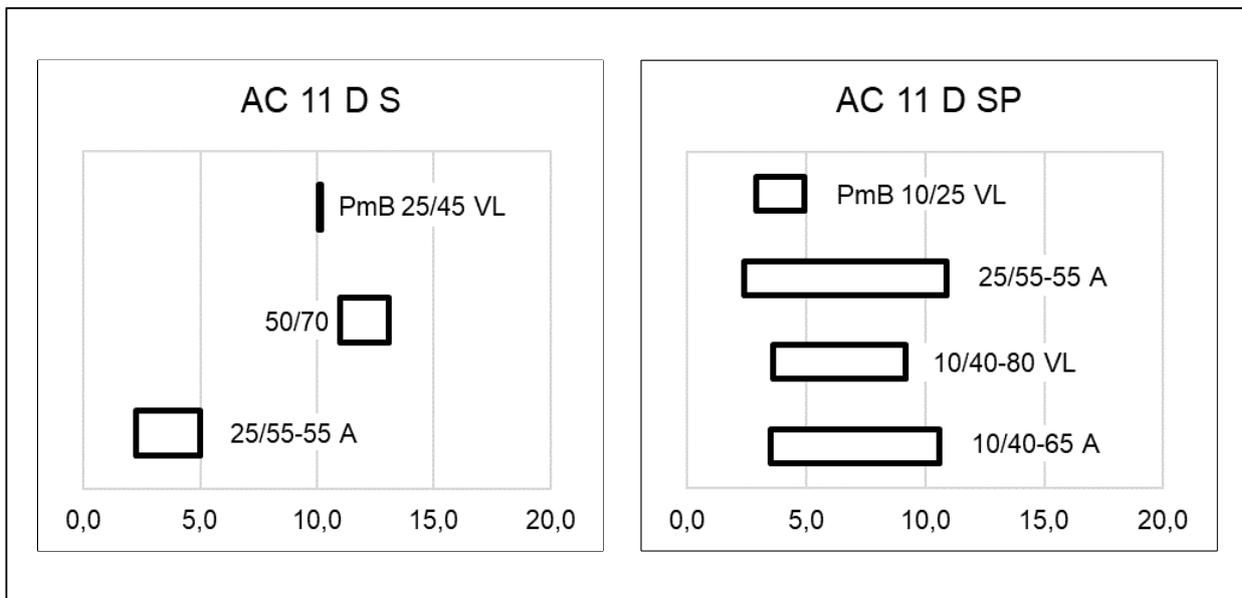


Bild A-25: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (2)

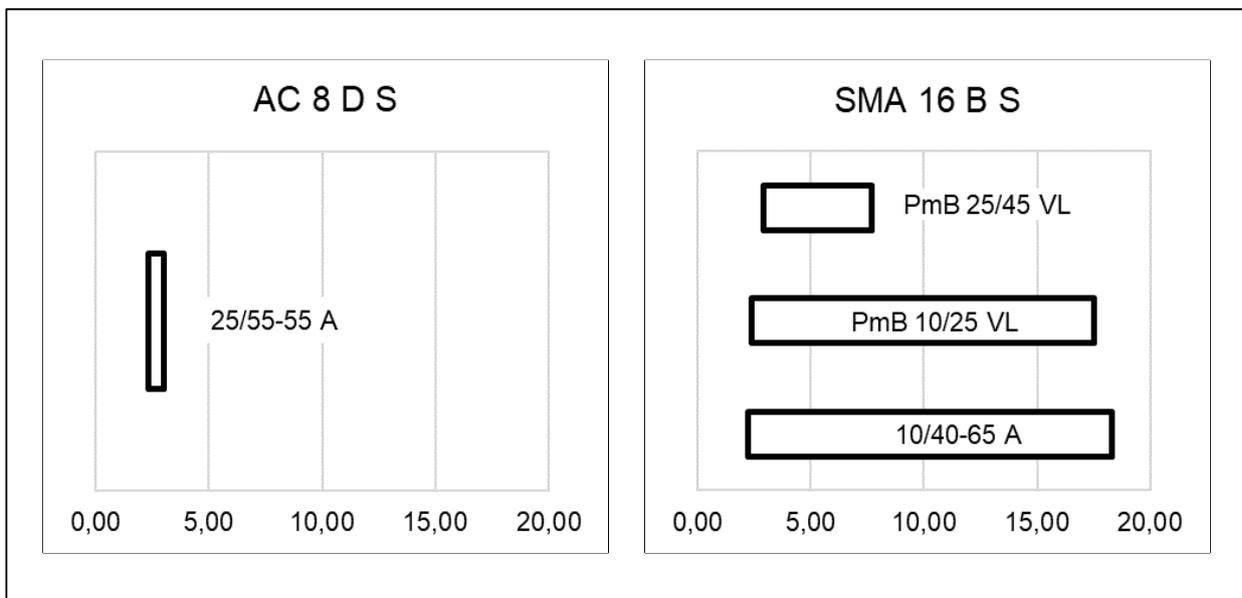


Bild A-26: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (4)

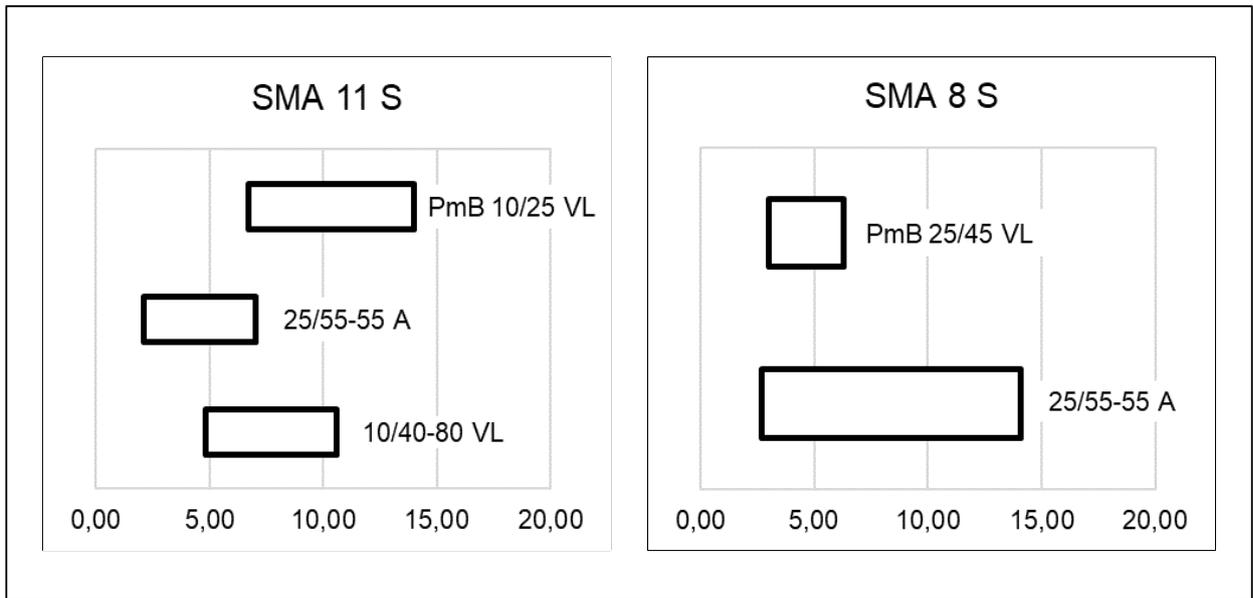


Bild A-27: Anforderungswerte je Asphaltart und verwendetem Bindemittel (5)

Anhang B

(statistische Auswertung)

Inhalt Anhang B

Tabellen:

Tab. B-1: Dehnungsrate Bohrkerne Laborvarianten (MW)	166
Tab. B-2: Dehnungsrate Marshall-Probekörper Laborvarianten (MW).....	166
Tab. B- 3: Dehnungsrate bestehender Datensätze (MW der Dreifachbestimmungen) - ohne Ausreißer.....	169
Tab. B-4: Dehnungsraten aller erhobenen Daten.....	170

Abbildungen:

Bild B-1: Box-Whisker-Plots - Laborvarianten - AC 22 B S/AC 16 B S (BK)	164
Bild B-2: Box-Whisker-Plots - Laborvarianten - AC 11 D S/AC 8 D S (BK).....	164
Bild B-3: Box-Whisker-Plots - Laborvarianten - SMA 16 B S/SMA 11 S (BK)	165
Bild B-4: Box-Whisker-Plots - Laborvarianten - SMA 8 S (BK)	165
Bild B-5: Box-Whisker-Plots - bestehende Datensätze - AC 11 D SP (BK)	166
Bild B-6: Box-Whisker-Plots - bestehende Datensätze - AC 11 D S/AC 16 B S (BK)	167
Bild B-7: Box-Whisker-Plots – bestehende Datensätze - AC 16 B SG/AC 22 B SG (BK)	167
Bild B-8: Box-Whisker-Plots – bestehende Datensätze - SMA 8 S (BK).....	168
Bild B-9: Box-Whisker-Plots – bestehende Datensätze - SMA 11 S/SMA 16 B S (BK).....	168

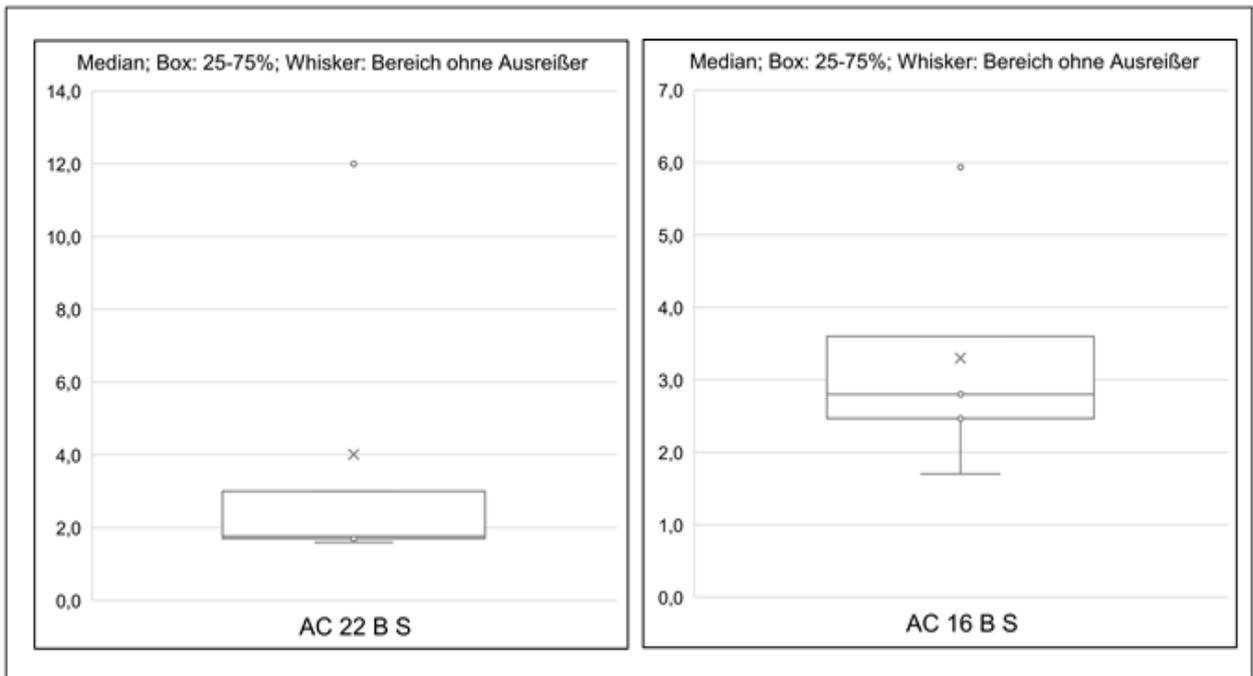


Bild B-1: Box-Whisker-Plots - Laborvarianten - AC 22 B S/AC 16 B S (BK)

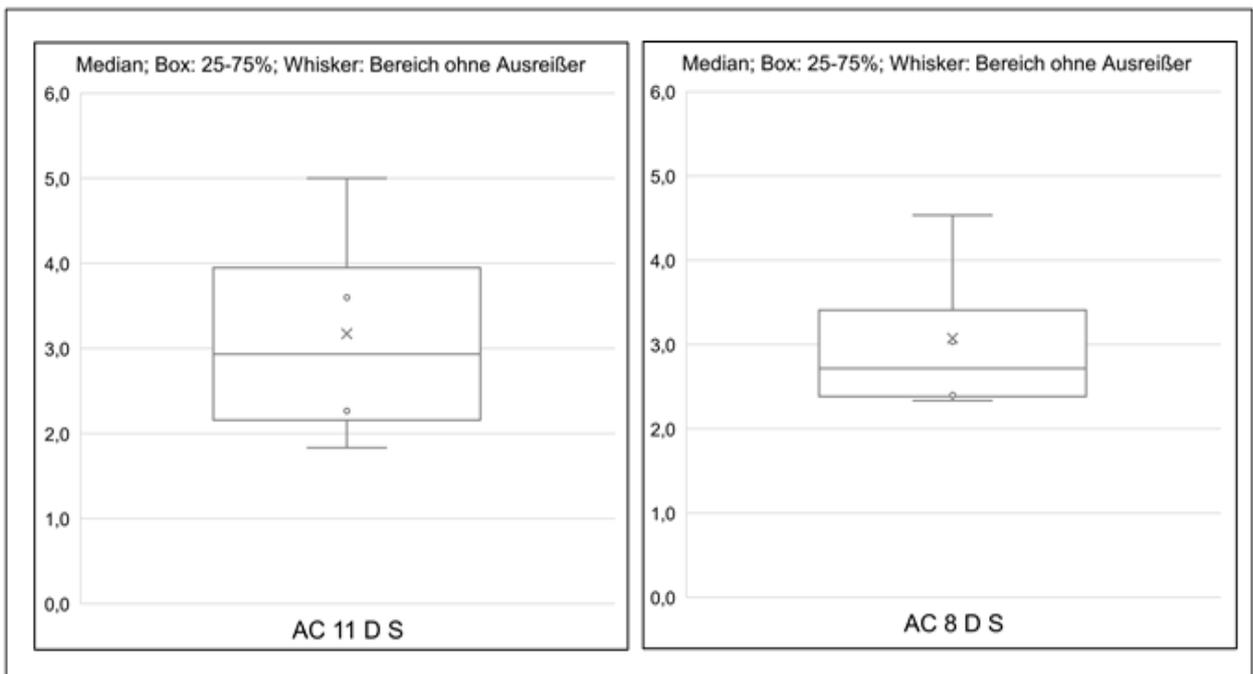


Bild B-2: Box-Whisker-Plots - Laborvarianten - AC 11 D S/AC 8 D S (BK)

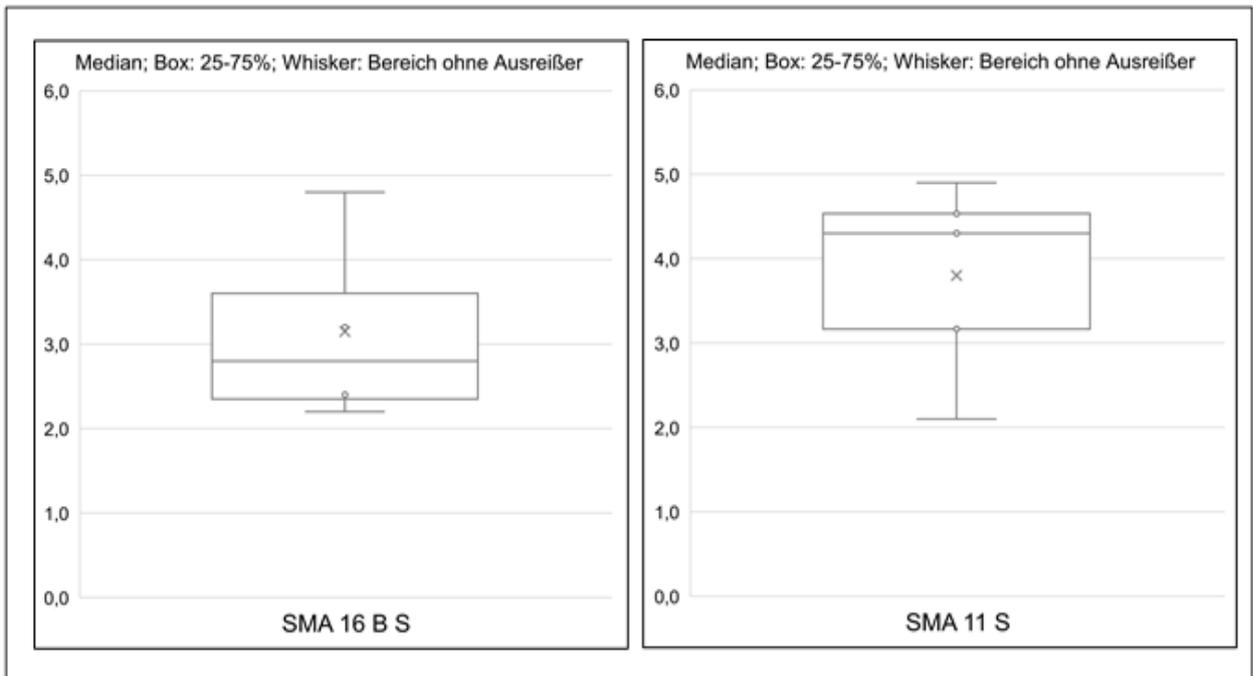


Bild B-3: Box-Whisker-Plots - Laborvarianten - SMA 16 B S/SMA 11 S (BK)

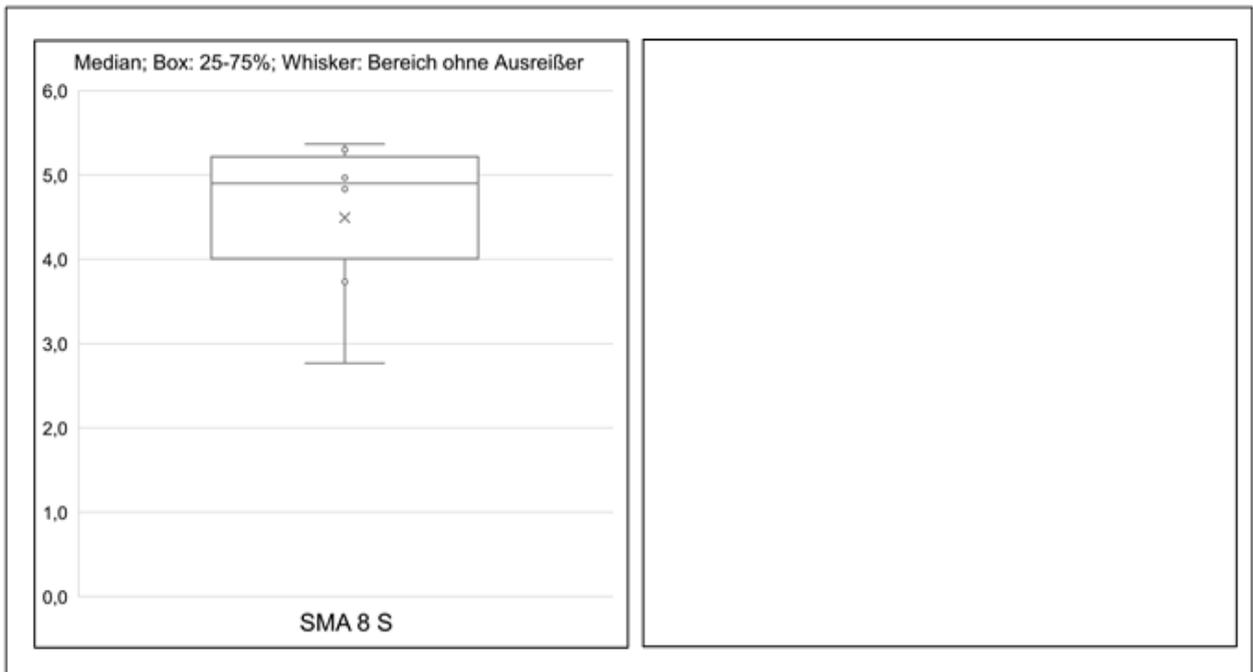


Bild B-4: Box-Whisker-Plots - Laborvarianten - SMA 8 S (BK)

Tab. B-1: Dehnungsrate Bohrkern Laborvarianten (MW)

	N	MITTLERE	MEDIAN	MIN	MAX	VAR	STABW	KONF. STABW - 95%	KONF. STABW +95%
AC 22 B S	5	4,0	1,8	1,6	12,0	20,26	4,50	2,70	12,93
AC 16 B S	5	3,3	2,8	1,7	5,9	2,63	1,62	0,97	4,66
AC 11 D S	4	3,2	2,9	1,8	5,0	2,05	1,43	0,81	5,33
AC 8 D S	4	3,1	2,7	2,3	4,5	1,04	1,02	0,58	3,81
SMA 16 B S	4	3,2	2,8	2,2	4,8	1,40	1,18	0,67	4,41
SMA 11 S	5	3,8	4,3	2,1	4,9	1,32	1,15	0,69	3,30
SMA 8 S	6	4,5	4,9	2,8	5,4	1,06	1,03	0,64	2,53

Tab. B-2: Dehnungsrate Marshall-Probekörper Laborvarianten (MW)

	N	MITTLERE	MEDIAN	MIN	MAX	VAR	STABW	KONF. STABW - 95%	KONF. STABW +95%
AC 22 B S	3	2,5	0,9	0,6	6,0	9,15	3,02	1,57	19,01
AC 16 B S	3	1,3	1,4	0,6	1,8	0,39	0,63	0,33	3,93
AC 11 D S	3	0,8	0,8	0,3	1,3	0,22	0,47	0,24	2,94
AC 8 D S	2	1,5	1,5	0,7	2,2	1,03	1,01	0,45	32,34
SMA 16 B S	2	1,8	1,8	1,4	2,2	0,32	0,57	0,25	18,05
SMA 11 S	3	1,8	1,7	1,5	2,2	0,15	0,38	0,20	2,42
SMA 8 S	3	1,4	1,4	1,0	1,6	0,08	0,29	0,15	1,83

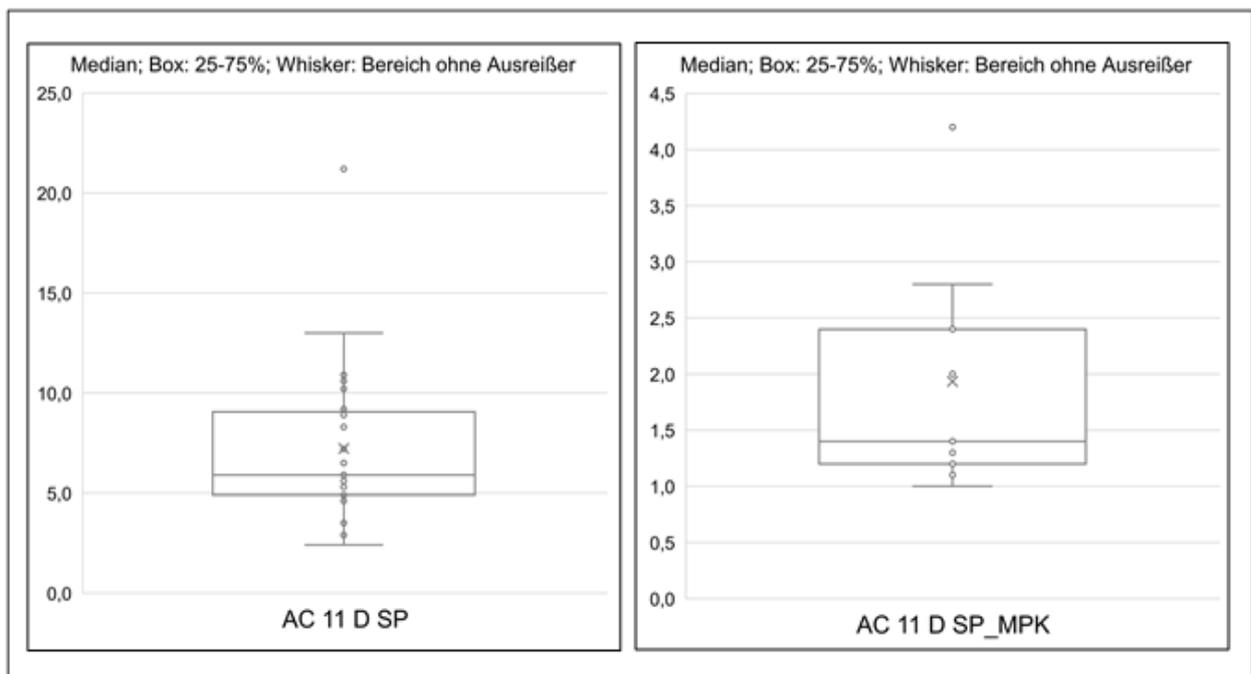


Bild B-5: Box-Whisker-Plots - bestehende Datensätze - AC 11 D SP (BK)

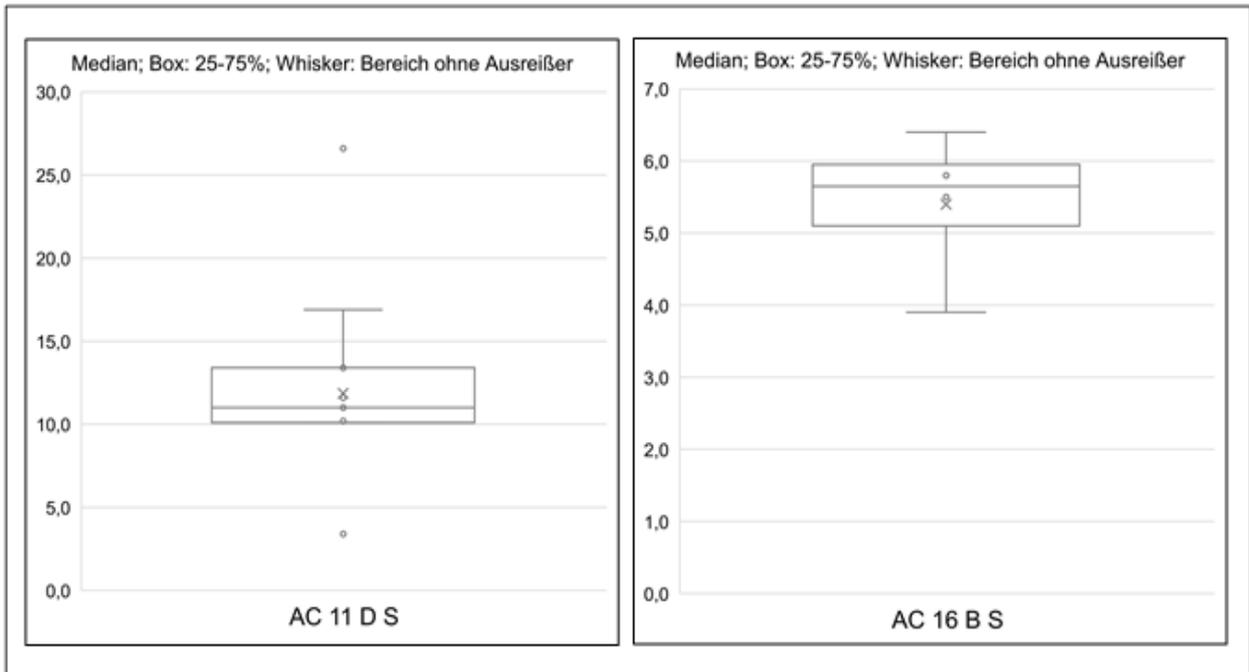


Bild B-6: Box-Whisker-Plots - bestehende Datensätze - AC 11 D S/AC 16 B S (BK)

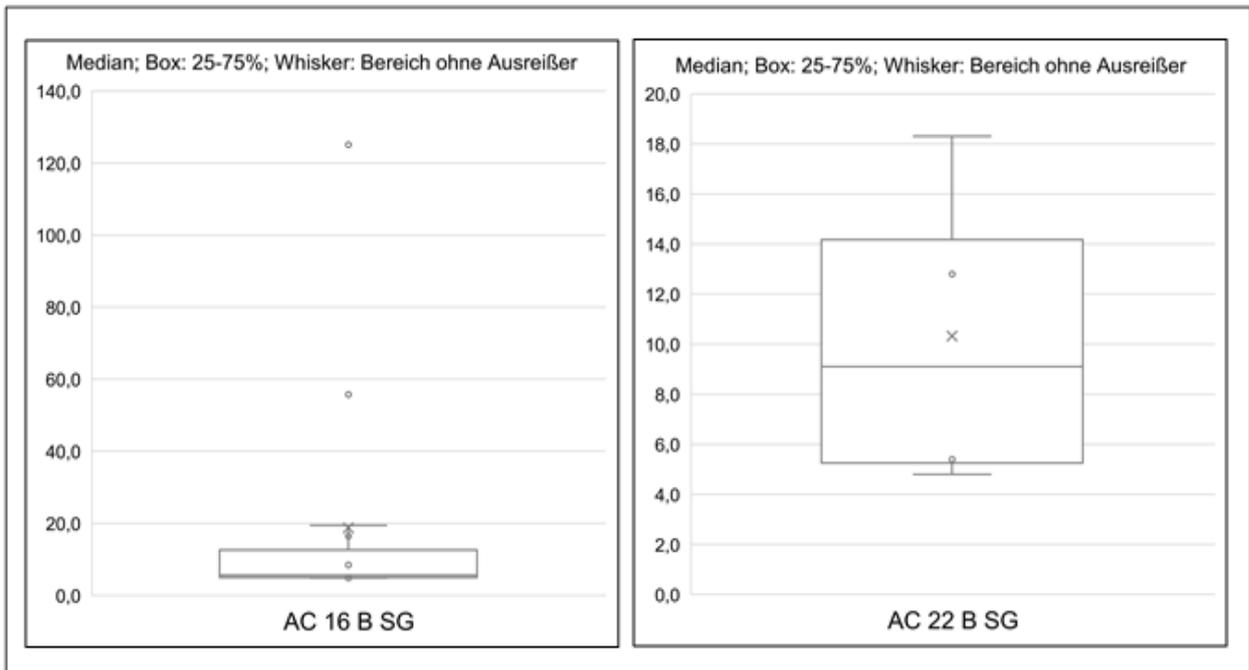


Bild B-7: Box-Whisker-Plots – bestehende Datensätze - AC 16 B SG/AC 22 B SG (BK)

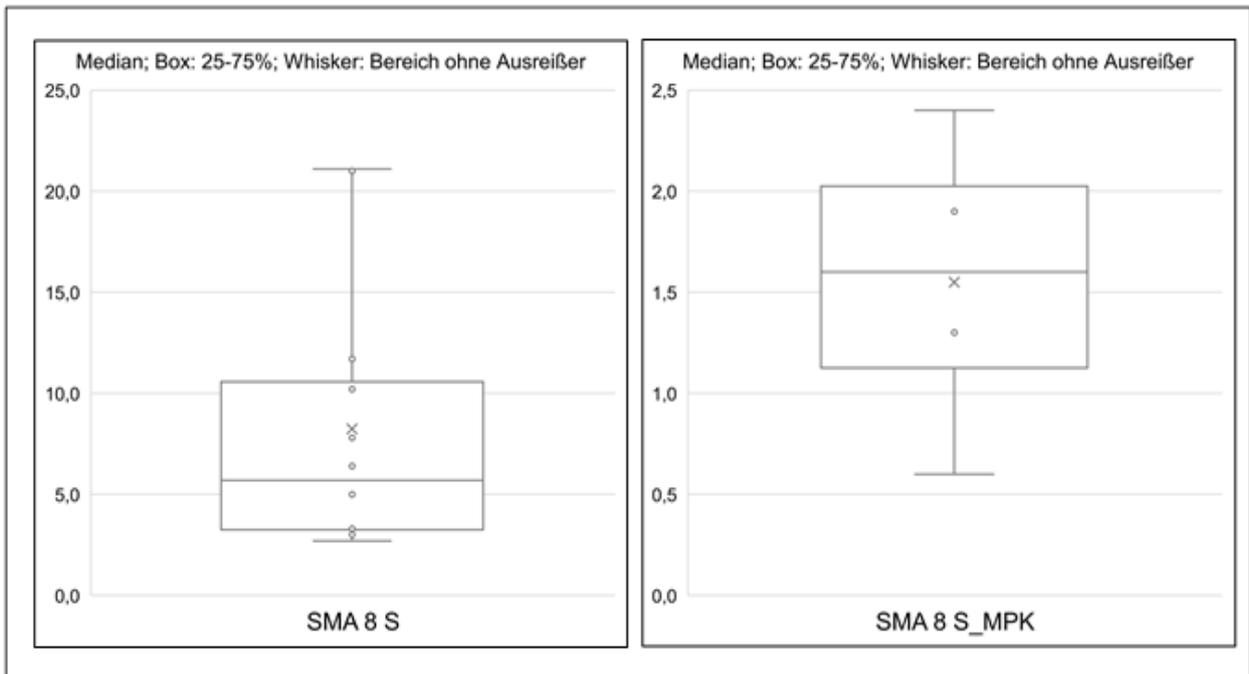


Bild B-8: Box-Whisker-Plots – bestehende Datensätze - SMA 8 S (BK)

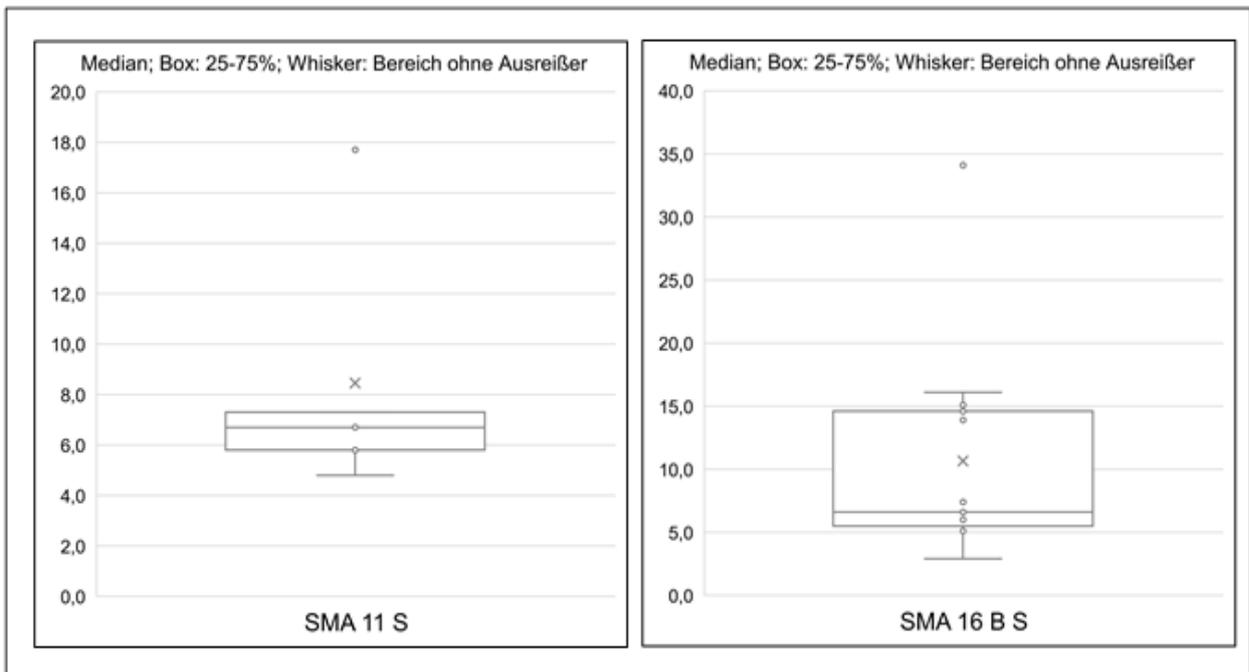


Bild B-9: Box-Whisker-Plots – bestehende Datensätze - SMA 11 S/SMA 16 B S (BK)

Tab. B- 3: Dehnungsrate bestehender Datensätze (MW der Dreifachbestimmungen) - ohne Ausreißer

	N	MITTLERE	MEDIAN	MIN	MAX	VAR	STABW	KONF. STABW - 95%	KONF. STABW +95%
AC 11 D SP	19	6,5	5,9	2,4	10,9	6,63	2,57	1,95	3,81
AC 11 D S	6	12,2	11,3	10,1	16,9	6,75	2,60	1,62	6,37
AC 16 B SG	10	6,7	5,1	4,8	16,4	13,15	3,63	2,49	6,62
AC 16 B S	4	5,4	5,7	3,9	6,4	1,14	1,07	0,60	3,98
AC 22 B SG	4	10,3	9,1	4,8	18,3	41,50	6,44	3,65	24,02
SMA 8 S	11	7,9	5,0	2,7	21,1	47,64	6,90	4,82	12,11
SMA 11 S	3	6,3	6,7	4,8	7,3	1,70	1,31	0,68	8,20
SMA 16 B S	8	8,8	6,5	2,9	16,1	26,75	5,17	3,42	10,53

Zusammenfassend Auswertung aller erhobenen Daten

Tab. B-4: Dehnungsraten aller erhobenen Daten

	N	MITTLERE	MEDIAN	MIN	MAX	VAR	STABW	KONF. STABW - 95%	KONF. STABW +95%
AC 22 B S	8	5,9	5,1	1,6	12,0	19,58	4,43	2,93	9,01
AC 22 B SG	5	8,8	5,4	2,8	18,3	42,35	6,51	3,90	18,70
AC 16 B S	12	4,6	5,3	1,7	6,4	2,59	1,61	1,14	2,73
AC 16 B SG	11	5,8	5,0	4,8	8,7	2,07	1,44	1,01	2,53
AC 11 D S	12	8,9	10,6	1,8	13,4	19,47	4,41	3,13	7,49
AC 11 D SP	24	6,3	5,9	2,4	10,9	5,64	2,37	1,85	3,33
AC 8 D S	4	3,1	2,7	2,3	4,5	1,04	1,02	0,58	3,81
SMA 16 B S	15	7,4	5,5	2,2	16,1	24,51	4,95	3,62	7,81
SMA 11 S	9	4,8	4,8	2,1	7,3	2,64	1,63	1,10	3,11
SMA 8 S	16	5,2	4,9	2,7	11,4	6,80	2,61	1,93	4,04

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

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 978-3-95606-872-0
<https://doi.org/10.60850/bericht-s220>
www.bast.de