

Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 177

bast

Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

von

Rolf Breitenbücher
Frederik Buckenhüskes

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

Martin Radenberg
Dominik Twer

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

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 177

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.

<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 84.0105

Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Fachbetreuung

Alexandra Spilker

Referat

Betonbauweisen

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9323

ISBN 978-3-95606-683-2

Bergisch Gladbach, März 2022

Kurzfassung – Abstract

Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

Füllsysteme für Fugen in Betonfahrbahnen sind während ihrer Nutzungsdauer vielfältigen Beanspruchungen ausgesetzt. Daraus leiten sich erhöhte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Gesamtsystems „Fuge“ ab. Neben jahreszeitlich schwankenden klimatischen Änderungen spielen insbesondere zyklische Beanspruchungen durch den überrollenden Verkehr sowie die Alterung der Fugenmassen eine maßgebliche Rolle.

Ziel dieses Forschungsprojekts war es, ein praxisorientiertes Prüfverfahren zu entwickeln, das zum einen das Gesamtsystem „Fuge“ bestehend aus Betonfugenflanke, Voranstrichmittel sowie der Fugenmasse umfasst und andererseits die maßgebenden Szenarien der in-situ-Beanspruchungen realistisch abbildet. Dazu wurden Systemprüfkörper bestehend aus Beton und Fugenfüllstoff definiert, an denen über die herkömmlichen Prüfungen am Füllstoff hinaus, statische Zug-/Scherversuche und zyklische Druck-/Zug-/Scherversuche an neuen und künstlich gealterten Proben vorgenommen wurden. Diese Prüfungen wurden sowohl an Laborproben (Referenz) als auch an Systemprüfkörpern aus Bohrkernen von originären Bestandstrecken durchgeführt.

Die Untersuchungen zeigten u.a., dass die heiß verarbeitbaren Fugenmassen, mit Ausnahme der modifizierten Fugenmasse vom Typ N2+, infolge künstlicher Alterung erheblich versprödeten, d.h. bei deutlich reduziertem Dehnvermögen höhere Maximalspannungen aufwiesen. Dieser Effekt zeichnete sich auch bei den im dynamischen Scherrheometer ermittelten Phasenwinkeln und komplexen Schermoduln ab. Unter der Annahme eines exponentiellen Verlaufs der Alterung von heiß verarbeitbaren Fugenmassen, konnte für die künstliche Laboralterung ein simulierter Nutzungszeitraum von etwa 6 Jahren ermittelt werden. Für die kalt verarbeitbaren Fugenmassen erwies sich die für heiß verarbeitbare Fugenmassen herangezogene künstliche Alterung unter Druck und Temperaturbeanspruchung als nicht zweckmäßiges Verfahren.

Zur ersten Validierung der entwickelten Laborprüfverfahren wurde im BAB-Netz eine heiß und eine kalt verarbeitbare Fugenmasse über die ersten 21 Monate Nutzungsdauer intensiv beobachtet.

Unter Einbeziehung der Systemprüfungen an Labor- und in-situ-Proben wurde ein erster Bewertungsansatz entwickelt, mit dem, anhand wissenschaftlich orientierter Kenn- und Grenzwerte, Fugenmassen im nicht gealterten ebenso wie im künstlich gealterten Zustand bewertet werden können.

Evaluation of the characteristics of joint sealants

Filling systems for joints in concrete pavements are exposed to a variety of stresses during their service life. This implies increased requirements for the durability of the whole "joint" system. In addition to seasonal unsteady climatic changes, cyclical loads caused by rolling traffic and the ageing of joint sealants are particularly relevant.

The aim of this research project was to develop a practise-oriented test procedure that on one hand comprises the entire "joint" system consisting of the concrete joint flank, primer and the joint sealant and on the other hand realistically depicts the decisive scenarios of in-situ stresses. For this purpose, system test specimens consisting of concrete and joint filler were defined so that in addition to the conventional tests on the filler, static tensile/shear tests and cyclic pressure/tensile/shear tests could be carried out on new and artificially aged specimens. These tests were performed on laboratory samples (reference) as well as on system samples of drill cores from original existing pavements.

The investigations demonstrated that the hot applied joint sealants, with exception of the modified joint sealant type N2+, were significantly embrittled due to artificial ageing, i.e. exhibiting higher maximum stresses with significantly reduced ductility. This effect also occurred with the phase angles and complex shear modulus determined in the dynamic shear rheometer. Based on the assumption of an exponential aging process of hot applied joint sealants, a simulated service life of about 6 years could be determined for artificial laboratory ageing. For the cold applied joint sealants, artificial ageing under pressure and temperature stress, which was used for hot applied joint sealants, proved to be inappropriate.

For a first validation of the developed laboratory test procedures within the BAB network a hot and a cold processed joint sealant was intensively observed over the first 21 months of use.

With involvement of system tests on laboratory and in-situ samples, an initial evaluation procedure was developed with which joint sealants in both unaged and artificially aged conditions can be evaluated on the basis of scientifically oriented characteristic and limit parameters.

Summary

Evaluation of the characteristics of joint sealants

1 Research aim

Joint filling systems in concrete road pavements are exposed to a variety of stresses during their service life, which leads to increased requirements for the durability of the overall "joint" system. In addition to seasonal unsteady climatic influences, cyclical loads caused by rolling traffic and ageing of the joint sealants are particularly relevant. The increasing damage to joint sealing systems that has occurred in recent years, whether on existing or on new road pavements, made it necessary to conduct relevant studies in order to determine the causes as well as to question the current regulations.

In this context, a practise-oriented test procedure was developed in this research project with which on the one hand the behaviour regarding the overall "joint" system consisting of concrete joint flanks, primer and joint compound can be detected by means of "system test specimens" and on the other hand the decisive scenarios of in-situ stresses can be depicted realistically.

2 Approach

In the first stage of the research project a detailed literature research as well as a determination of rheological parameters and other physical material properties of six hot and two cold proceeded joint sealants were accomplished. Furthermore, specific laboratory tests on ageing behaviour and possible damage mechanisms on the entire joint system were carried out. In addition to a detailed survey of the joint condition, drill cores and samples for further laboratory tests were extracted from three representative sections of the federal motorways. In the following second stage, the results gathered in the previous parameter studies were linked in order to develop an adequate combined test procedure. On system test specimens (Figure 1), which can be both produced in a laboratory as well as gained from drill cores from concrete road pavements, static tensile/shear tests as well as cyclic pressure/tensile/shear tests were performed, whereby some of the laboratory samples were also subjected to artificial ageing.

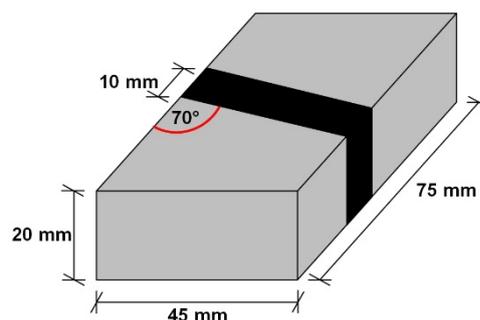


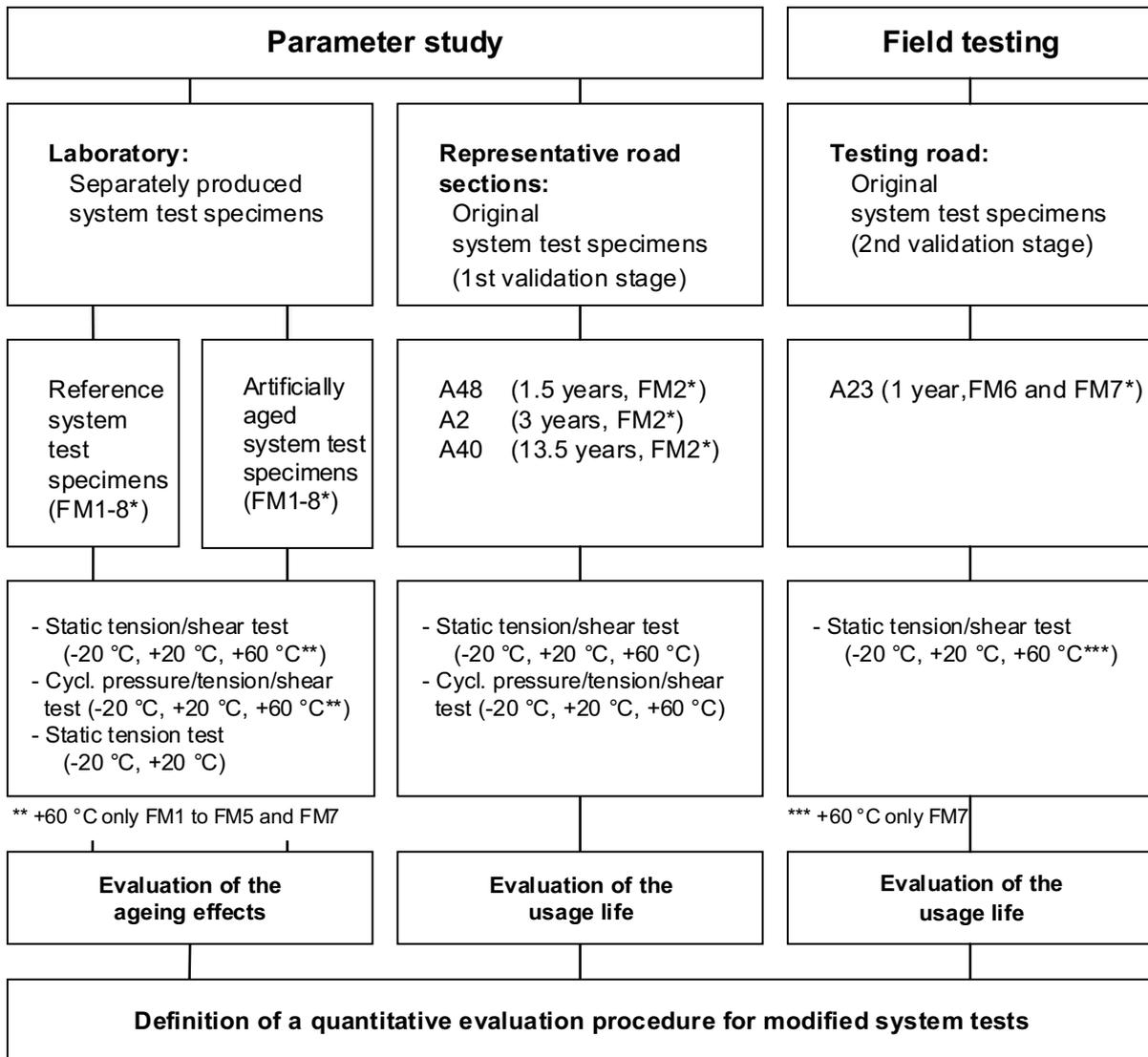
Figure 1: System test specimen for static tensile/shear tests and cyclic pressure/tension/shear tests

In this regard, an ageing scenario involving UV, pressure and temperature (PAV conditioning) was developed for the system test specimens, with which the decisive stresses are depicted as realistically as possible (Table 1).

Table 1: Overview of the basic conditions and sequence of artificial ageing

Artificial ageing (V1) of joint sealant compounds	
Basic conditions and sequence	1) Pressure and temperature stresses (65 h; 85 °C; 2.1 MPa) 2) UV exposure (11 days) 3) Freeze & thaw stresses (14 days)

In a third stage of the research project, knowledge from in-situ joint maintenance was drawn upon to validate this laboratory testing procedure. For this purpose, variations in the joint sealants and the pretreatment of the exposed joints were realized in four test fields on a federal motorway. The behaviour of renewed joints was observed over 21 months. At the same time drill cores were extracted from which system test specimens were obtained and examined according to the developed test procedure. By including these system tests on laboratory samples as well as on in-situ samples, a first evaluation approach with corresponding classification was created, with which joint sealants can be evaluated both in their original reference state and after artificial ageing. The overall investigation programme is summarised in Figure 2.



** +60 °C only FM1 to FM5 and FM7

*** +60 °C only FM7

* joint sealants used, see report section 3.2.1

Figure 2: Flowchart of the investigation program

3 Results

For the mainly conducted static and cyclic pressure/tension/shear tests a test temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ proved to be most suitable for hot applied joint sealants since the stiffness and therefore also the stress increase with sinking temperature because of the thermoplastic material behaviour.

A comparison of the test results between the reference condition and the artificially aged condition (REF, V1) demonstrated that the hot applied joint sealants, except for the modified joint sealant FM6 of type N2+, generate significantly higher maximum stresses after artificial aging with considerably reduced elasticity (Figure 3). In case of the cold applied joint sealants FM5 and FM7 it turned out that the artificial aging with regard to the included pressure and temperature stress (PAV conditioning), which is primarily designed for bituminous binders, proved to be less effective. This was reflected in significantly lower stresses in the aged samples compared to the unaged reference samples (see Figure 4). The reason for this is assumed to be the splitting of chemically crosslinked polymers into shorter polymers or monomers as a result of exposure to pressure and temperature. The stiffening behaviour of the hot applied joint sealants due to accelerated aging under pressure and temperature stress (PAV conditioning) was also demonstrated for the joint sealants FM1 to FM4 by corresponding changes in the phase angles and complex shear modulus, which were determined in the dynamic shear rheometer (see Figure 5 and Figure 6). Thus, the ageing behaviour was massively influenced by a change in the polymer structures.

For joint sealant FM1 of type N1, cyclical stresses after an artificial aging in the pressure/tension/shear test did not increase the maximum stress, but led to a further reduction in the elasticity. However, the modified hot applied joint sealant FM6 (type N2+) was least affected by artificial ageing, which was also reflected in the cyclic loading.

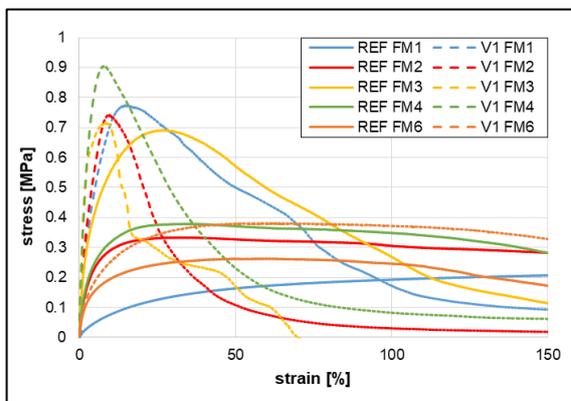


Figure 3: Tension curve for hot applied joint sealant compounds FM1 (N1-type), FM2-4 (N2-type) and FM6 (N2+-type) REF and V1 in static tensile/shear test at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

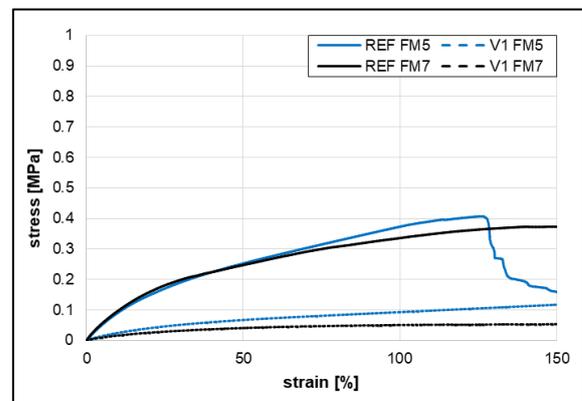


Figure 4: Tension curve for cold applied joint sealant compounds FM5 (class 25) and FM7 (class 35) REF and V1 in static tensile/shear test at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

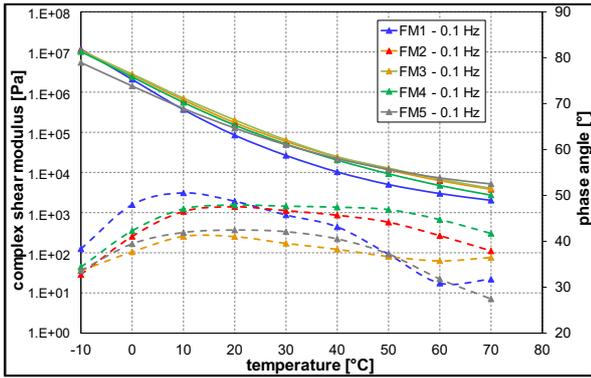


Figure 5: Complex shear modulus and phase angle at 0.1 Hz

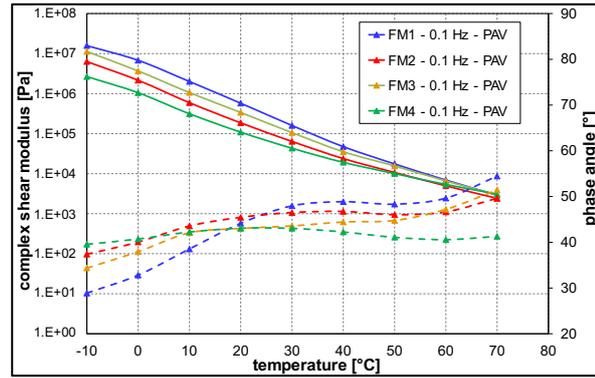


Figure 6: Rheological parameters following PAV-conditioning (0.1 Hz)

Four different test fields on a federal motorway were examined in the third stage of the research project to validate the developed laboratory test procedures. These four variants differed on the one hand in the type of pretreatment of joint flanks – brushing out the joints or regrooving and brushing out the joint flanks – and on the other hand in the joint sealants used (a hot-applied joint sealant (FM6) and a cold applied joint sealant (FM7)). In addition to accompanying the maintenance, a validation section with a length of 300 m and 500 m was intensively observed in each test field for 21 months. In each of these validation sections measuring marks were installed at 10 joints to record the change in the joint gap widths and one thermocouple was also installed in each test field. A more or less linear correlation has been discovered between the measured temperatures and the corresponding joint widths (transverse joints) (see Figure 7).

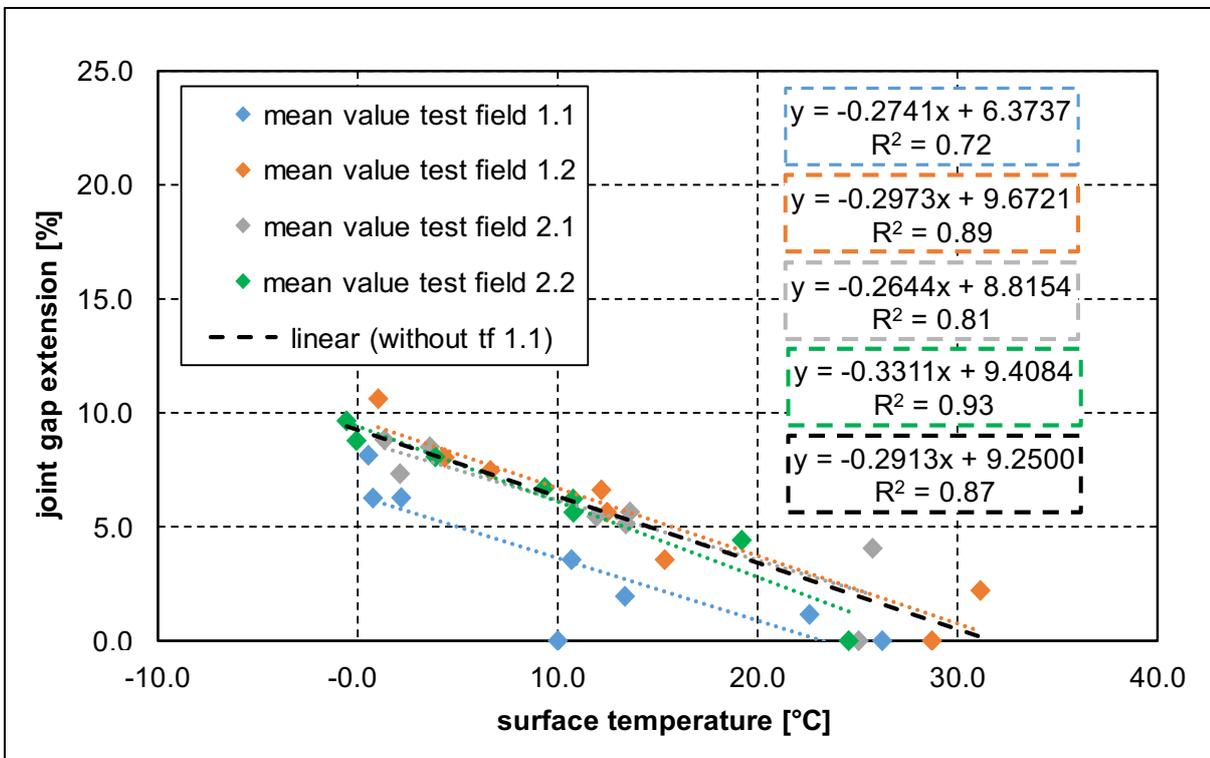


Figure 7: Linear correlation between the surface temperature and change in joint gap width in %

Simultaneous during the on-site investigations, the tightness of the joint filling systems was checked with a vacuum suction cup and evaluated using semi-quantitative criteria. However, no changes in the tightness could be detected within the observation period of 21 months. The samples taken after 12 months displayed only a slightly increased complex shear modulus for the hot applied joint sealant FM6 (type N2+). A significant change in the viscoelastic material behaviour, defined by a change in the phase angle, could not be determined. This was also confirmed in the system tests on original specimens from the section which had a higher elasticity at 20 °C than the unaged reference specimens. In the case of the dismantled system samples with the cold applied joint sealant FM7, a positive influence of the additional regrooving of the joint flanks (and subsequent brushing) on the adhesive behaviour between joint sealant and joint flank could be observed during maintenance. With the inclusion of system tests on laboratory and in-situ samples (cf. Figure 8), an initial evaluation approach was developed with which joint sealants in their original reference condition as well as in an artificially aged condition can be evaluated on the basis of scientifically oriented characteristic and limit values. As a characteristic value, the strain at 80 % of the maximum stress in the falling load branch ($\epsilon_{80,KA}$, $\epsilon_{80,Ref}$) was defined. Furthermore, the results of system tests on the hot workable joint sealant FM2 from the representative sections of two federal motorways were examined. As Figure 9 shows, a steady decrease in characteristic strain could be observed with increasing age of the joint sealants (ϵ_{80}). Based on the assumption of exponential aging of hot applied joint sealants, a simulated service life of about 6 years with a coefficient of determination $R = 0.9976$ could be determined for artificial laboratory ageing (V1).

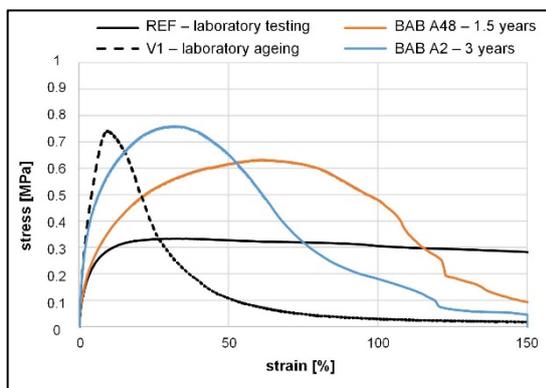


Figure 8: Static tensile/shear tests on original system test specimens of two federal autobahns and on the laboratory test specimens REF and V1 (FM2) at -20°C

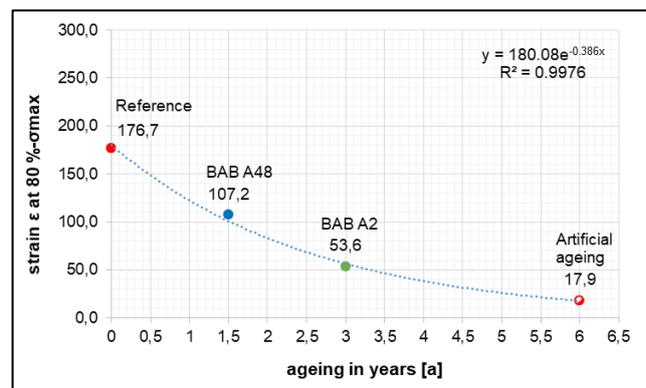


Figure 9: Calculation of simulated usage time by means of artificial laboratory ageing of N2-type hot applied joint sealant in static tensile/shear test at -20 °C

In conclusion, it can be stated that the test procedure developed in this research project enables the evaluation and characterization of hot applied joint sealants by means of artificial laboratory ageing.

Inhalt

1 Problemstellung und Zielsetzung	13		
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse	14		
2.1 Fahrbahndecken aus Beton	14		
2.1.1 Standardaufbau	14		
2.1.2 Lastunabhängige Beanspruchung	14		
2.1.3 Lastabhängige Beanspruchung	15		
2.2 Fugen in Betonfahrbahndecken	16		
2.2.1 Allgemeines	16		
2.2.2 Fugenabdichtung	16		
2.2.3 Einbau von Fugenfüllsystemen.....	17		
2.3 Fugenfüllstoffe für Betonfahrbahndecken ...	18		
2.3.1 Heiß verarbeitbare Fugenmassen	18		
2.3.2 Kalt verarbeitbare Fugenmassen.....	21		
2.3.3 Fugenprofile	21		
2.4 Beanspruchungen von Fugenfüllsystemen.	22		
2.4.1 Theoretische Betrachtung von Fugenspaltöffnungsweiten.....	22		
2.4.2 Fugenöffnungsweiten in situ	24		
2.4.3 Klimatische Einflüsse	26		
2.5 Schäden an Fugenfüllsystemen mit Fugenmassen.....	28		
2.5.1 Typische Schadensmerkmale.....	28		
2.5.2 In situ-Zustandserfassung	28		
2.6 Systemprüfungen heiß verarbeitbarer Fugenmassen.....	28		
3 Untersuchungsprogramm	30		
3.1 Projektablauf	30		
3.1.1 Parameterstudie.....	30		
3.1.2 Festlegung des Prüfverfahrens.....	31		
3.1.3 Erste Validierung der Erkenntnisse an einer Erprobungsstrecke	31		
3.2 Laboruntersuchungen an ausgewählten Fugenmassen.....	33		
3.2.1 Auswahl der Fugenmassen	33		
3.2.2 Ermittlung ausgewählter Stoffeigenschaften	33		
3.2.3 Rheologische Kenndaten der Fugenmassen	33		
3.3 Entwicklung eines Alterungsszenarios	34		
3.4 Modifizierte Systemprüfungen.....	35		
3.4.1 Probekörperherstellung und -gewinnung ..	35		
3.4.2 Durchführung der modifizierten Systemprüfungen	36		
4 Parameterstudie	37		
4.1 Eigenschaften der ausgewählten Fugenmassen	37		
4.1.1 Physikalisch-stoffliche Eigenschaften.....	37		
4.1.2 Rheologische Eigenschaften.....	38		
4.2 Definition eines Alterungsszenarios.....	40		
4.2.1 Einfluss der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung	40		
4.2.2 Einfluss der Temperatureinwirkung.....	42		
4.2.3 Einfluss der UV-Strahlung.....	45		
4.2.4 Festlegung der Randbedingungen eines Alterungsszenarios im Labormaßstab	46		
4.3 Definition der Prüfungsrandbedingungen der modifizierten Systemprüfungen	47		
4.3.1 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bei +20 °C.....	47		
4.3.2 Einfluss der Prüftemperatur	47		
4.3.3 Einfluss der Breite des Fugenspalts	48		
4.3.4 Einfluss der Fugenspaltlänge.....	49		
4.3.5 Einfluss der zyklischen Beanspruchung ..	50		
4.3.6 Reproduzierbarkeit	55		
4.3.7 Zusammenfassung der Prüfungsrandbedingungen.....	56		
4.4 Modifizierte Systemprüfungen an ungealterten Systemprüfkörpern.....	56		
4.4.1 Statischer Zugversuch	56		
4.4.2 Statischer Zug-/Scherversuch und zyklischer Druck-/Zug-/Scherversuch.....	57		
4.5 Modifizierte Systemprüfungen an künstlich gealterten Systemprüfkörpern	62		
4.5.1 Statische Zugversuche	62		
4.5.2 Statische Zug-/Scherversuche	64		
4.5.3 Zyklische Druck-/Zug-/Scherversuche.....	67		
4.5.4 Zusammenfassung der modifizierten Systemprüfungen an künstlich gealterten Systemprüfkörpern	68		
5 Untersuchung an repräsentativen Streckenabschnitten	70		
5.1 Zustandserfassung repräsentativer Streckenabschnitte	70		
5.1.1 Vorgehensweise	70		
5.1.2 BAB A48	70		
5.1.3 BAB A2	72		
5.1.4 BAB A40	74		

5.2 Laboruntersuchung der Ausbauproben	75	8 Zusammenfassung und Ausblick.....	110
5.2.1 Ausgewählte Stoffeigenschaften und rheologische Kenndaten.....	75	9 Literaturverzeichnis	113
5.2.2 Statischer Zug-/Scherversuch	77		
5.2.3 Zyklischer Druck-/Zug-/Scherversuch	81		
5.3 Zusammenfassung und Bewertung der repräsentativen Streckenabschnitte BAB A48, A2 und A40	83		
6 Erprobungsstrecke BAB A23	85		
6.1 Randbedingungen der Erprobungsstrecke .	85		
6.2 Aufbau der Testfelder	85		
6.3 Begleitung der Fugensanierung und Einbaudokumentation	86		
6.4 Dokumentation des Fugenzustandes während der Nutzungsdauer	88		
6.4.1 1. Begutachtung (Oktober 2016).....	88		
6.4.2 2. bis 7. Begutachtung (Januar 2017 bis März 2018).....	89		
6.5 Auswertung der Messergebnisse der in situ- Zustandserfassungen	91		
6.5.1 Änderung der Fugenspaltbreiten	91		
6.5.2 Bewertung der Dichtheit der Fugenfüllsysteme	96		
6.5.3 Veränderung der Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der Fahrbahnoberkante	97		
6.5.4 Bewertung der vertikalen Plattenlagen.....	98		
6.5.5 Bewertung der visuellen Zustandserfassungen.....	99		
6.6 Laboruntersuchung der Ausbauproben	100		
6.6.1 Ausgewählte Stoffeigenschaften und rheologische Kenndaten.....	100		
6.6.2 Statische Zug-/Scherversuche.....	101		
6.7 Zusammenfassung und Bewertung der Erprobungsstrecke BAB A23	104		
7 Definition eines quantitativen Bewertungsansatzes für modifizierte Systemprüfungen	105		
7.1 Möglichkeiten zur quantitativen Bewertung	105		
7.2 Entwicklung eines Bewertungskonzeptes.	106		
7.3 Bewertung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2	107		
7.4 Alterungsstabilität der Fugenmassen	108		
7.5 Zusammenfassung der Bewertung.....	108		

1 Problemstellung und Zielsetzung

Unbewehrte Betonfahrbahndecken werden zur Vermeidung von wilden Rissen mit Fugen hergestellt. Das Langzeitverhalten einer Betonfahrbahndecke wird durch eine wirksame Abdichtung dieser Fugen maßgebend beeinflusst. Fugenabdichtungen verhindern das Eindringen von Schmutz, Oberflächenwasser und Schadstoffen in den Unterbau. Die Dauerhaftigkeit der Fugenfüllsysteme ist dabei entscheidend für die Lebenszykluskosten einer Betonfahrbahndecke.

In den letzten Jahren wurden vermehrt Schäden an Fugenabdichtungen von Betonfahrbahndecken festgestellt. Die festgestellten Mängel in Form von Ablösungen von den Fugenflanken bzw. Reißen des Fugenfüllstoffes selbst werden insbesondere bei heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2 beobachtet. Schäden treten sowohl bei der turnusmäßigen Fugenpflege und grundhaften Erneuerung in Bestandsstrecken als auch bei der Fugenabdichtung in Neubaustrecken auf. Aufgrund der meist über ganze Lose hinweg aufgetretenen Schäden lässt sich ableiten, dass diese weniger auf eine einzige Unzulänglichkeit wie beispielsweise Einbaufehler, zurückzuführen sind, als vielmehr auf systembedingte Ursachen.

Nach den derzeitigen Regeln, insbesondere der Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fugenfüllungen in Verkehrsflächen (ZTV Fug-StB) [73], [74], den Technischen Prüfvorschriften für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen

(TP Fug-StB) [68], [69] und den Technischen Lieferbedingungen für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen (TL Fug-StB) [65], [66] werden hinsichtlich einer wirksamen Fugenabdichtung der Fugenfüllstoff und das Voranstrichmittel (Primer) lediglich separaten Überprüfungen unterzogen. Das Gesamtsystem „Fuge“ mit seinen geschnittenen Betonfugenflanken, dem Voranstrich und dem Fugenfüllstoff wird bislang nicht hinreichend untersucht. Darüber hinaus werden auch nicht alle wesentlichen Beanspruchungen, die auf ein Fugenfüllsystem in situ einwirken, in den Laborprüfungen realitätsnah erfasst.

Bei diesem Forschungsvorhaben sollten zum einen die Ursachen für die derzeitigen Probleme mit heiß verarbeitbaren Fugenmassen unter materialtechnischen Aspekten eruiert werden. Zum anderen wurde unter wissenschaftlichen Ansätzen ein kombiniertes Prüfverfahren entwickelt, mit dem das Fugenfüllsystem ganzheitlich, d.h. die Fuge als System, unter Berücksichtigung der maßgebenden

Einwirkungen überprüft werden kann. Somit besteht die Möglichkeit mit Hilfe dieses Verfahrens auch Untersuchungen an Ausbauproben aus Fugensystemen von Bestandsstrecken zu prüfen und zu bewerten. Durch eine technisch ganzheitliche Bewertung ist es somit möglich, Fugen in Zukunft wesentlich dauerhafter zu planen und auszuführen. Angestrebt ist hierbei, dass Erneuerungen der Fugenmassen frühestens nach 7 bis 10 Jahren erforderlich werden. Damit wird die Betonbauweise insgesamt robuster und wirtschaftlicher.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse

2.1 Fahrbahndecken aus Beton

2.1.1 Standardaufbau

Die in Deutschland gängigen Systeme für Betonfahrbahndecken sind in den „Richtlinien zur Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen“ (RStO 12) [59] geregelt. In der Regel besteht ein Querschnitt dabei aus Untergrund und Oberbau, wobei Erstgenanntes den verdichteten anstehenden Boden darstellt. Um eine ausreichende Dauerhaftigkeit einer Betonfahrbahndecke gewähren zu können, muss der Untergrund ausreichend verdichtet und tragfähig sein. Der Oberbau einer Verkehrsfläche setzt sich in Deutschland in den meisten Fällen aus mehreren Schichten zusammen. Gerade auf stark befahrenen Straßen wird unter der Betondecke eine hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) eingebaut. So kann der Widerstand gegen mechanische und klimatische Beanspruchungen erhöht werden. Die Betondecke kann dabei mit oder ohne Verbund zur HGT ausgeführt werden. Letzteres wird durch das Einlegen einer dünnen Vliesunterlage realisiert. Die Dicke der Betondecke wird in Abhängigkeit von der Belastungsklasse und der Bauweise in den RStO 12 festgelegt oder durch die Anwendung der „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen“ (RDO Beton) [53] entsprechend den Anforderungen individuell dimensioniert. Die Herstellung einer Betondecke findet in aller Regel im Hocheinbau mit einem Gleitschalungsfertiger statt. Um eine ausreichende Griffigkeit der Oberfläche zu erhalten wurde über viele Jahre der Frischbeton mittels Besen (Besenstrich) oder Jutetuch texturiert. Da eine derart strukturierte Oberfläche allerdings zu einer erhöhten Lärmentwicklung führen kann, wurde eine zweischichtige Bauweise des Oberbaus mit Waschbeton im Oberflächenbereich als Regelbauweise eingeführt. Durch den Einsatz von aufgespritzten Kombinationsmitteln (Verzögerer + Nachbehandlungsmittel) kann der Oberflächenmörtel nach einigen Stunden ausgebürstet und eine entsprechend strukturierte Oberfläche geschaffen werden [37].

Straßenbeton muss zusätzlich zu einer hohen Tragfähigkeit eine ausreichende Dauerhaftigkeit aufweisen. Darüber hinaus ist neben einer geeigneten Oberflächenbeschaffenheit zudem ein hinreichender Widerstand gegen witterungs- und temperaturbedingte Beanspruchungen sowie gegen mechanischen Verschleiß erforderlich. Die

sich daraus ableitenden hohen Anforderungen an den Beton und an seine Ausgangsstoffe sind in den „Technischen Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton“ (TL Beton-StB 07) [64] geregelt.

2.1.2 Lastunabhängige Beanspruchung

Thermische Beanspruchung

Bereits bei der Hydratation des Zements im jungen Beton entstehen Spannungen infolge Temperaturänderungen. Nach den TL Beton-StB 07 [64] muss der Beton für Fahrbahndecken mindestens 340 kg/m^3 Zement enthalten. Bei Fahrbahndeckendicken von rd. 26-28 cm kommt es in den ersten

12 bis 18 Stunden infolge der freigesetzten Hydratationswärme zu einem Temperaturanstieg von ca. 15 bis 25 K [9]. Durch die Verformungsbehinderung entstehen Druckspannungen im Betongefüge, welche allerdings aufgrund des noch hohen Relaxationsvermögens und der geringen Steifigkeit des Betons sehr niedrig ausfallen (Bild 1).

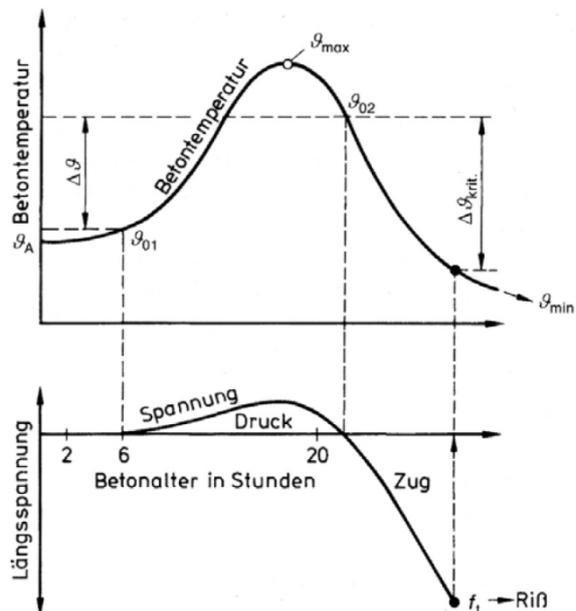


Bild 1: Temperatur- und Spannungsentwicklung während der Hydratation [9]

Mit fortschreitender Hydratation und Temperaturerhöhung nimmt die Steifigkeit allmählich zu und das Relaxationsvermögen ab. Bis zum Erreichen des Temperaturmaximums stellen sich geringfügige Druckspannungen deutlich unter 1 N/mm^2 ein, welche sich allerdings beim darauffolgenden Rückgang der Temperatur von ca. 1 bis 3 K schon wieder völlig abbauen. Die Temperatur zu diesem Zeitpunkt wird Nullspannungstemperatur genannt, da der Beton in diesem Moment spannungsfrei ist. Das weitere Abkühlen des Betons bis zur Umge-

nungstemperatur hat dann zur Folge, dass sich Zugspannungen im Gefüge aufbauen, welche im Extremfall die noch geringe Zugfestigkeit des jungen Betons überschreiten und Risse hervorrufen. Da die Temperatur über die Höhe einer Betonplatte bei der Hydratation nicht konstant ist, sondern ein Gefälle zwischen Umgebung und Bauteilkern vorherrscht, ist auch die Nullspannungstemperatur über die Dicke nicht konstant [9]. Zudem spielt der Einfluss der Außentemperatur zum Zeitpunkt des Einbaus und in der Erhärtungsphase eine bedeutende Rolle. Inwieweit die Erhärtungsbedingungen bzw. kritischen Temperaturdifferenzen einen signifikanten Einfluss auf die über den Querschnitt entstehenden Spannungen nehmen, soll anhand des folgenden Bildes verdeutlicht werden.

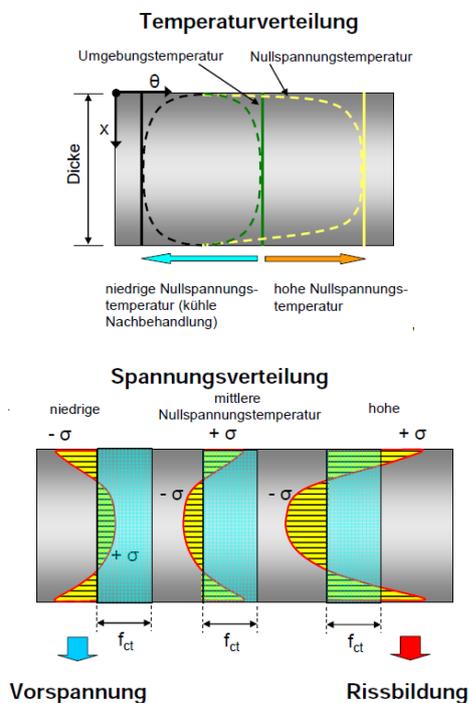


Bild 2: Einfluss der Nullspannungstemperatur auf die entstehenden thermischen Spannungen in einer Betonplatte (f_{ct} = Zugfestigkeit des Betons) [36]

Wie aus Bild 2 zu entnehmen ist, führt eine hohe (der Einfachheit halber hier über den Querschnitt als konstant angenommene) Nullspannungstemperatur zu einer frühen Rissbildung in der Randzone, während eine geringe Nullspannungstemperatur dort zu einer Druckvorspannung führt, jeweils gleiche Umgebungstemperaturen vorausgesetzt. Das Auftreten einer thermisch induzierten Rissbildung wird demnach durch höhere Nullspannungstemperaturen begünstigt. [45]

Zwangsspannungen infolge abfließender Hydrationswärme während der Erhärtung des Betons stellen eine der häufigsten Rissursachen dar. Aber auch im Gebrauchszustand können sich Risse infolge behinderter Temperatur- und Feuchtever-

formung ausbilden. Jahreszeitlich bedingte Temperaturspannungen (Sommer/Winter), die aus großen Temperaturunterschieden resultieren, werden dabei aufgrund der langen Einwirkungsdauer durch Kriechen und Relaxation vermindert. Tageszeitlich bedingte Temperaturspannungen (Tag/Nacht) sind demgegenüber zwar aufgrund des kleineren Temperaturunterschiedes geringer ausgeprägt, werden aber nicht durch Kriechen oder Relaxation abgemindert.

2.1.3 Lastabhängige Beanspruchung

Betonfahrbahndecken werden zusätzlich zu lastunabhängigen Belastungen durch den überrollenden Verkehr beansprucht. Dieser erzeugt dadurch Biegezugspannungen im Querschnitt. WESTERGAARD [70] hat 1926 ein Berechnungsschema entwickelt, mit dem bis heute solche Spannungen berechnet werden. Diesem Näherungsverfahren liegt die Bettungsmodultheorie zugrunde. Unter Verwendung von Korrekturwerten lassen sich die Spannungen für die Lastfälle „Plattenmitte“, „Plattenrand“ und „Plattenecke“ wie folgt abschätzen:

Plattenmitte:

$$Q_{QM} = \frac{0,275 \cdot Q}{h^2} \cdot (1 + \mu) \cdot \left[\lg \left(\frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) - 0,436 \right] \quad \text{Gl. 1}$$

Plattenrand:

$$Q_{QR} = \frac{0,529 \cdot Q}{h^2} \cdot (1 + 0,54 \cdot \mu) \cdot \left[\lg \left(\frac{E \cdot h^3}{k \cdot b^4} \right) + \lg \left(\frac{b}{1 - \mu^2} \right) - 2,484 \right] \quad \text{Gl. 2}$$

Plattenecke:

$$Q_{QE} = \frac{3 \cdot Q}{h^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{12 \cdot (1 - \mu^2) \cdot k}{E \cdot h^3} \right)^{0,3} - (a \cdot \sqrt{2})^{1,2} \right] \quad \text{Gl. 3}$$

3

- mit:
- H Dicke der Betondecke [mm]
 - $a = \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot p}}$ Belastungshalbkreismesser [mm]
 - P Kontaktdruck [N/mm²]
 - Q Radlast [N]
 - $b = \sqrt{1,6 \cdot a^2 + h^2} - 0,675 \cdot h$
für $a < 1,724 \cdot h$ [mm]
 - $b = a$ für $a > 1,724 \cdot h$ [mm]
 - k Bettungsmodul [N/mm³]
 - E Elastizitätsmodul des Betons [N/mm²]
 - μ Querdehnzahl des Betons

Die Lastfälle „freier Rand“ und „Plattenecke“ werden durch konstruktive Maßnahmen wie eine wirkungsvolle Rissverzahnung und die Verdübelung der Querfugen abgemindert. Der Lastabtrag erfolgt dabei über die Nachbarplatte. Mit der in Deutschland maximal zulässigen Achslast von 11,5 t ergibt

sich bei einer Plattendicke von 270 mm eine statische Biegespannung in Plattenmitte von rd. 1,1 N/mm². Am Plattenrand beträgt diese rd. 1,2 N/mm² [62]. In der Praxis sind für diese statischen Biegespannungen zusätzlich Sicherheitsfaktoren in Abhängigkeit von der Straßenoberfläche von 1,0 bis 1,5 anzusetzen, da die Achslasten durch Eigenschaften wie die Beschaffenheit der Fahrbahn, den Dämpfungseigenschaften der Achse, der Reifenbauart und der Fahrzeuggeschwindigkeit starken dynamischen Schwankungen ausgesetzt sind.

2.2 Fugen in Betonfahrbahndecken

2.2.1 Allgemeines

Aufgrund von sich einstellenden Zwangsspannungen in einer Betondecke infolge Temperaturänderung und Verformungsbehinderung würden sich bei einer endlosen Betonplatte willkürlich Risse in der Fahrbahn ausbilden. Um diese unkontrollierte Rissbildung zu vermeiden, werden Fugen in der Fahrbahndecke angeordnet. Diese teilen dabei die Fläche in Platten mit definierten Abmessungen ein. Die Plattenabmessungen variieren u.a. je nach Plattendicke, Reibungsbeiwert zur Unterlage und Festbetoneigenschaften. Diese dürfen das 25-fache, bei quadratischen Platten das 30-fache der Plattendicke nicht überschreiten [37]. Eine Kantenlänge von $\leq 7,50$ m ist anzustreben. Daraus ergibt sich bei einer 270 mm dicken Betondecke eine maximale Plattenlänge von 6,75 m.

Bei den Fugen wird zwischen Scheinfugen, Pressfugen und Raumfugen unterschieden. Scheinfugen, die bei Betonfahrbahndecken die maßgebende Rolle spielen, werden hergestellt, um eine Sollbruchstelle in der Platte zu schaffen. Durch eine gezielte Querschnittsverjüngung kommt es bei einer Überschreitung der Zugfestigkeit des Betons an dieser „Schwachstelle“ zu einem kontrollierten Riss.

Die Scheinfugen sind so früh wie möglich zu schneiden, sobald der junge Beton ausreichend tragfähig ist und die Schneidkanten nicht mehr ausbrechen. Die Tiefe des Fugenschnitts beträgt nach ZTV Beton-StB 07 [72] bei Querscheinfugen mindestens 25 %, jedoch höchstens 30 % der Deckendicke, bei den Längsfugen mindestens 40 %, maximal jedoch 45 % der Deckendicke. Pressfugen dagegen trennen zwei Platten vollständig voneinander ab. Sie entstehen zwischen zwei Betonierabschnitten in Form von Arbeitsfugen. Raumfugen ermöglichen durch einen größeren Spalt weitaus größere Ausdehnungen der Platte. Solche Fugen werden in Betonfahrbahndecken i.d.R. nur an Übergängen zu anderen Bauwerken angeordnet.

Zur Verhinderung des Abwanderns von Platten und einer Stufenbildung werden die Platten in Querrichtung miteinander verankert und in Fahrbahnlängsrichtung verdübelt. Ein Standardanker zur Gewährleistung der Querkraftübertragung an Längsfugen hat je nach Belastungsklasse einen Durchmesser von rd. 20 mm sowie eine Länge von mindestens 800 mm. Bei Längspressfugen werden 5 Anker je Platte, bei Längsscheinfugen im Hinblick auf eine wirksame Rissverzahnung 3 Anker je Platte angeordnet. In den Querrugen werden die Dübel im Regelfall mittig und parallel zur Straßenachse alle 25 cm eingebaut. Sie haben einen Durchmesser von rd. 25 mm sowie eine Länge von rd. 500 mm [37].

Mit der Verdübelung soll eine sichere Querkraftübertragung erreicht werden. Die Wirksamkeit einer Querkraftübertragung kann mit dem Wirksamkeitsindex W bestimmt werden [37].

$$W = \frac{2 \cdot y_2}{y_1 + y_2} \cdot 100 \quad \text{Gl. 4}$$

mit: W Wirksamkeitsindex [%]
 y_1 Einsenkung des belasteten Fugenrandes
 y_2 Einsenkung des unbelasteten Fugenrandes

Die Querkraftübertragung ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Zu den Wichtigsten zählen dabei die Rissverzahnung und die Wirksamkeit der Verdübelung.

2.2.2 Fugenabdichtung

Um eine freie Dehnung der Betonplatten weitestgehend zu ermöglichen, müssen die Fugen frei von Schmutz sein. Gleichzeitig muss verhindert werden, dass Oberflächenwasser durch die Fugen in den Unterbau der Fahrbahn gelangt. Um dies gewährleisten zu können, müssen diese abgedichtet werden. Hierzu können verschiedene Fugenfüllstoffe nach ZTV Fug-StB 15 [74] in Verbindung mit

TL/TP Fug-StB 15 [66], [69] verwendet werden.

Dabei kommen sowohl „Fugenfüllungen mittels Verguss“ als auch „Fugenfüllungen mittels Elastomer-Profilen“ in Betracht. In Tab. 1 ist eine Übersicht über die derzeit nach ZTV Fug-StB 15 [74] zugelassenen Fugenfüllstoffe gegeben.

Vor dem Einbringen des Fugenfüllsystems muss die anfangs geschnittene Fugenkerbe der Scheinfuge um die für das System notwendige Breite und Tiefe aufgeweitet werden. In den Fugenspalt, auch Fugenkammer genannt, wird der Fugenfüllstoff (z.B. bestehend aus Unterfüllstoff, Voranstrich und Fugenmasse) eingebracht. Die Geometrie des Fugenspaltes richtet sich nach dem zu verwen-

denden Material für die Fugenfüllung sowie nach der zu erwartenden Änderung der Fugenspaltbreite. In Tab. 2 sind Richtwerte nach ZTV Fug-StB 01 [73] dargestellt.

Art der Fugenfüllung	Unterteilung und Bauart
Heiß verarbeitete Fugenmassen auf Bitumenbasis	Heiß verarbeitete Fugenmassen (Typ N2) Pflasterfugenmasse* Schienenfugenmasse* Rissmasse Elastische Fugenmasse (Typ N1)
Kalt verarbeitete Fugenmassen auf reaktiver Kunststoffbasis	Fugenmasse der Belastungsklasse A (ZGV 25 % + 35 %*) Fugenmasse der Belastungsklasse B (ZGV 25 % + 35 %*) Fugenmasse der Belastungsklasse C (ZGV 25 % + 35 %*)
Fugenprofile	Offene Profile Hohlkammerprofile Vollprofile
Fugenbänder* (bitumenhaltig)	Vorgeformte thermoplastische Bandprofile

*nicht europäisch geregelte Produkte

Tab. 1: Fugenfüllstoffe nach ZTV Fug-StB 15 [74]

Fugenart		Änderung der Fugenspaltbreite (mm)
Querscheinfugen	Plattenlänge ≤ 5 m	bis 2
	Plattenlänge > 5 bis $\leq 7,5$ m	bis 3
Längsscheinfugen	verankert	bis 1
	nicht verankert	bis 4
Raumfugen		bis 5
Pressfugen	verankert	bis 1
	nicht verankert	bis 4

Tab. 2: Richtwerte der zu erwartenden Änderungen der Fugenspaltbreite [73]

Vor dem Aufweiten des Fugenspaltes ist die Rissbreite unterhalb der Fugenkerben frühmorgens festzustellen. Der Beton muss zu diesem Zeitpunkt ein Alter von mindestens 7 Tagen erreicht haben. Bei vorhandenen Rissbreiten über 1 mm sind die in Tab. 2 dargestellten Änderungen der Fugenspaltbreite um genau diese Werte zu erhöhen. In Bild 3 ist beispielhaft der Querschnitt einer Querscheinfuge mit Fugenfüllsystem dargestellt.

Bei heiß verarbeitbaren Fugenmassen muss die Vergusstiefe mindestens das 1,5-fache der Fugenspaltbreite betragen. Um jedoch ein verstärktes

Überquellen der Fugenmasse bei Stauchung zu vermeiden, ist die Vergusstiefe auf das 2,5-fache der Fugenspaltbreite zu begrenzen. Damit dies eingehalten werden kann, bzw. um eine Dreipunkthaftung (an der Fugenkerbe) zu verhindern, muss vor dem Vergießen der Fugen eine elastische Unterfüllung in den Fugenspalt eingebracht werden. [2]

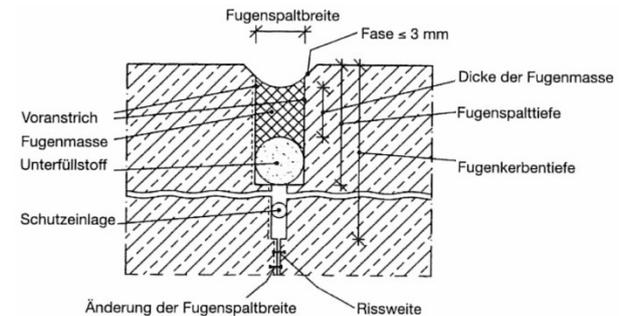


Bild 3: Querschnitt einer Querscheinfuge mit Fugenfüllsystem [73]

Von der Oberfläche her muss der Fugenverguss unterhalb der Betondecke enden, da der Kontakt zwischen Reifen und Fugenmassen grundsätzlich vermieden werden soll.

Die erforderlichen Fugenabmessungen in Abhängigkeit von der Änderung der Fugenspaltbreite sind exemplarisch für heiß verarbeitbare Fugenmassen mit einer Bewegungsaufnahme von maximal 25 % (Typ N2) in Tab. 3 aufgezeigt.

Änderung der Fugenspaltbreite (mm)	Fugenspaltbreite (mm)	Fugenspalttiefe mit Unterfüllstoff (mm)	Fugenspalttiefe ohne Unterfüllstoff (mm)
bis 2,0	8	27	20
bis 2,5	10	30	25
bis 3,0	12	35	30
bis 4,0	15	40	40
bis 5,0	20	50	40

Tab. 3: Erforderliche Fugenabmessungen in Abhängigkeit von der Änderung der Fugenspaltbreite (Fugenmasse Typ N2) [74]

2.2.3 Einbau von Fugenfüllsystemen

Für die Herstellung eines Fugenfüllsystems sind nach dem Schneiden des Fugenspaltes (ugs. Kammerschnitt) der Unterfüllstoff einzubringen und ggf. ein erforderlicher, auf das Gesamtsystem abgestimmter Voranstrich an beiden Fugenflanken zu applizieren. Anschließend wird der Fugenfüllstoff eingebracht.

Parallel zu diesem Forschungsprojekt wurde der Einbau verschiedener Fugenfüllsysteme in einer Untersuchungsstrecke des BMVI im Auftrag der BASt dokumentiert begleitet. Dabei wurden die einzelnen Arbeitsschritte beim Einbau der Fugen-

füllsysteme ab dem Zeitpunkt des Schneidens des Fugenspalt dokumentiert.

Beispielhaft sind nachfolgend die möglichen Arbeitsschritte zur Herstellung eines Fugenfüllsystems mit heiß oder kalt verarbeitbaren Fugenmassen angeführt, welche bei der vorgenannten Untersuchungsstrecke durchgeführt wurden. Kurz vor dem Fugenverguss wurde der Fugenspalt hergestellt, d.h. die Fugen aufgeweitet und die Fugenkanten abgefast. Danach erfolgte die Reinigung der Fugenflanken. Mit einer rotierenden Drahtbürste wurden zunächst Verunreinigungen wie Sand, Blätter, etc. entfernt (Bild 4, links). Da die Betonoberfläche aufgrund der vorherrschenden Witterungsverhältnisse mehr oder weniger durchgehend feucht war, bzw. die Fugen teilweise sogar mit Wasser gefüllt waren, wurden diese nach der Reinigung mit einer Heißluftlanze getrocknet (Bild 4, rechts) und anschließend nochmals mit der rotierenden Drahtbürste gesäubert. Nach diesem Arbeitsschritt wurde eine elastische Unterfüllschnur (Schaumstoffrundschnur) mit einer auf die Vergusstiefe angepassten Einrollhilfe in den Fugenspalt eingebracht (Bild 5, links). Die Dicke der Unterfüllschnur wurde so gewählt, dass diese nach dem Einrollen mehr oder weniger fest im Fugenspalt eingeklemmt war. Je nach Fugenfüllsystem wurde im nachfolgenden Arbeitsschritt der Voranstrich appliziert. Dazu wurden die Komponenten des zum System gehörenden Voranstrichs in den Behälter einer Druckluftspritze gegeben. Mit Überdruck wurde der Voranstrich über eine Lanze in den Fugenspalt eingebracht (Bild 5, rechts). Nach dem Ablüften des Voranstrichs wurde der Fugenspalt mit dem vorgesehenen Fugenfüllstoff vergossen.



Bild 4: links: Reinigen mit rotierender Drahtbürste; rechts: Trocknen mit Heißluftlanze



Bild 5: links: Einbringen der Unterfüllschnur; rechts: Applizieren des Voranstrichs



Bild 6: Einbringen von Fugenmasse (links: Heißverguss; rechts: Kaltverguss)

Der Einbau der Fugenfüllstoffe erfolgte für die heiß verarbeitbaren Fugenmassen mit einer maschinellen Vergusslanze (Bild 6, links). In einem vorgeschalteten Schmelzkessel mit integriertem Rührwerk wurden die Fugenmassen auf eine vorgegebene Verarbeitungstemperatur aufgeschmolzen. Da die kalt verarbeitbaren Fugenmassen stets als Zweikomponenten-Gebinde mit abgestimmten Mischungsverhältnissen angeliefert werden, wurden diese mit gesonderten – auf das jeweilige Material abgestimmten – Misch- und Verarbeitungsapparaturen in die Fuge eingebracht (Bild 6, rechts).

2.3 Fugenfüllstoffe für Betonfahrbahndecken

2.3.1 Heiß verarbeitbare Fugenmassen

Die europäische Norm für Fugeneinlagen und Fugenmassen DIN EN 14188-1 [29] definiert mit dem Begriff Fugenmasse das Material, welches „bei einheitlicher Beschaffenheit einer Fuge durch Haftverbund mit den Fugenflanken die Fuge verschließt, um das Eindringen von Wasser und schädlichen Stoffen zu verhindern“. Bei heiß verarbeitbaren Fugenmassen handelt es sich um thermoplastische Massen, welche durch Aufschmelzen und anschließendem Vergießen in die vorbereitete Fuge eingebracht werden.

Heiß verarbeitbare Fugenmassen werden gemäß [29] in die nachstehenden Klassen eingeteilt:

- N1 – elastisch, hoch dehnfähig
- N2 – normal, geringer dehnfähig
- F1 – hoch dehnfähig, treibstoffbeständig
- F2 – geringer dehnfähig, treibstoffbeständig

Fugenmassen des Typs F1 und F2 sind in Deutschland nicht zulässig [74]. Der aktuelle, nationale Stand der Technik differenziert in den ZTV Fug-StB 15 [74] sowie den zugehörigen Regelwerken TL/TP Fug-StB 15 [66], [69] ebenfalls zwischen unterschiedlichen Arten von heiß verarbeitbaren Fugenmassen entsprechend der Nomenklatur der DIN EN 14188-1 [29]. In den mittlerweile zurückgezogenen Regelwerken [65], [68], [73] wurden heiß verarbeitbare Fugenmassen noch wie folgt deklariert. Fugenmassen vom Typ N2 wurden

in [73] als heiß verarbeitbare Fugenmassen definiert. Fugenmassen Typ N1 wurden als elastische Fugenmassen bezeichnet. Das nationale Regelwerk differenziert darüber hinaus noch zwischen Pflaster- und Schienenfugenmassen sowie Rissmassen, welche keinem europäisch geregelten Produkte darstellen. Das grundlegende Materialverhalten von heiß verarbeitbaren Fugenmassen ist in Bild 7 aufgezeigt.

Sowohl Fugenmassen vom Typ N1 als auch Fugenmassen vom Typ N2 sind bitumenhaltige thermoplastische Massen. N1-Massen sind vorwiegend elastisch eingestellt und werden bis zu einer Zulässigen Gesamtverformung (ZGV) von 35 % eingesetzt. Die Summe aus Dehnung, Stauchung und Scherung entspricht dem Verformungsbereich der ZGV. In diesem Verformungsbereich wird die Funktionsfähigkeit der Fugenmasse gewährleistet. Sie eignen sich somit besonders für Bereiche in denen stärkere Fugenbewegungen auftreten. Änderungen der Fugenspaltbreite bis zu einer ZGV von 25 % können von Fugenmassen des Typs N2 aufgenommen werden. Diese Massen sind für alle Verkehrsflächen aus Beton und Asphalt geeignet. Die Anforderungen an gestiegene Gebrauchseigenschaften führen zu einer stetigen Optimierung der Fugenmassen. So differenzieren Fugenmassen unterschiedlicher Hersteller neben der Wahl und der Menge des Basisbindemittels auch in der Zugabe von Polymeren, mineralischen Füllstoffen und weiteren Zusätzen.

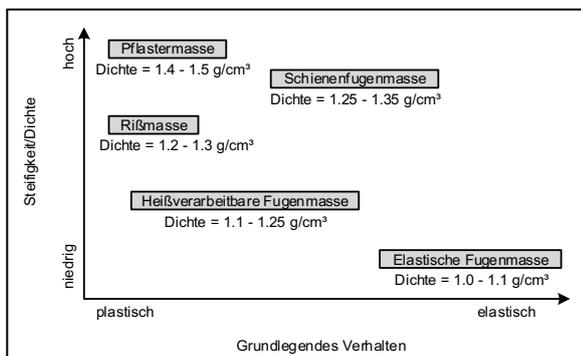


Bild 7: Grundlegendes Materialverhalten von heiß verarbeitbaren Fugenmassen nach [55]

Den unterschiedlichen Anforderungen an die jeweiligen Gebrauchseigenschaften der verschiedenen Fugenmassen liegt stets eine bitumenhaltige Basis zugrunde. Bitumen ist ein komplexes Vielstoffgemisch, welches durch Vakuumdestillation aus Rohölen geeigneter Provenienzen gewonnen wird. Bitumenhaltige Bindemittel zählen zu den Kohlenwasserstoff-Bindemitteln. Die chemische Zusammensetzung umfasst neben den maßgebenden Bestandteilen Kohlenstoff und Wasserstoff geringe Anteile von Schwefel, Stickstoff und Sauerstoff. Weitere geringfügige Anteile der Elemente

Nickel, Vanadium, Eisen und Natrium sind ebenfalls Bestandteil von Bitumen. Die chemische Zusammensetzung ist sehr stark durch die Herkunft und Art der Herstellung geprägt [54].

Die gestiegenen Anforderungen an die schadensfreie Bewegungsaufnahme von Fugenfüllsystemen können in einem Temperaturbereich von -20 bis +60 °C durch einfache Straßenbaubitumen nicht erfüllt werden. Die elastische bzw. plastische Einstellung der Fugenmassen erfolgt mittels Modifizierung des Bindemittels durch geeignete Polymere und weitere Zusätze. Eine beispielhafte Auflistung geeigneter Polymere zur Modifizierung von Bindemitteln ist in Bild 8 dargestellt. Rot hervorgehoben sind häufig eingesetzte Elastomere und Plastomere zur Modifizierung von Bitumen im Asphaltstraßenbau.

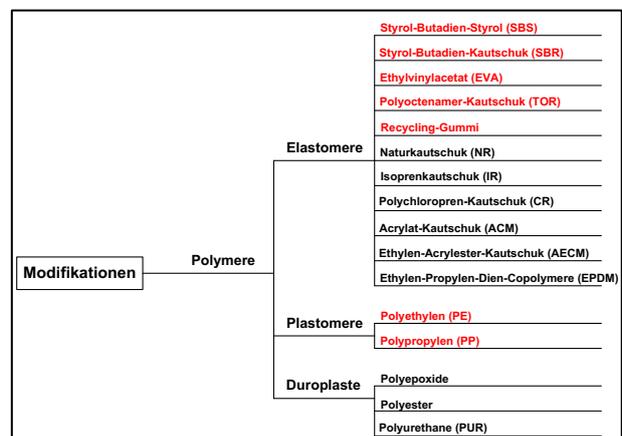


Bild 8: Polymergruppen zur Modifizierung von Bindemitteln [50]

Die möglichen Veränderungen auf die Eigenschaften des Bindemittels lassen sich in Abhängigkeit der Polymere nach [60] folgendermaßen auflisten:

- erhöhte Elastizität
- bessere Wärmestandfestigkeit
- besseres Kälteverhalten
- bessere Haftung am Gestein (Adhäsion)
- besserer innerer Zusammenhalt (Kohäsion)
- besseres Ermüdungsverhalten
- erhöhte Alterungsresistenz

Materialeigenschaft	Prüfverfahren
Äußere Beschaffenheit und Vorbereitung von Proben	SNV 671913 DIN EN 13880-6
Sicherheitsspanne gegen Überhitzen*	TP Fug-StB 01
Erweichungspunkt Ring und Kugel	DIN EN 1427
Dichte	DIN EN 13880-1
Konus-Penetration	DIN EN 13880-2
Kugel-Penetration und elastisches Rückstellvermögen	DIN EN 13880-3
Wärmebeständigkeit (Konus- und Kugel-Penetration)	DIN EN 13880-4
Fließlänge	DIN EN 13880-5
Verträglichkeit mit Asphalt	DIN EN 13880-9
Entmischungsneigung*	DIN 1996-16
Kältesprödigkeit*	DIN 1996-18
Formbeständigkeit*	DIN 1996-17

Tab. 4: Prüfverfahren zur Bestimmung relevanter Stoffeigenschaften heiß verarbeitbarer Fugenmassen vom Typ N1 und N2

Durch Zugabe von mineralischen Bestandteilen, Polymeren und weiteren Zusätzen wird das erforderliche Materialverhalten der Fugenmassen, welches auf die Anforderungen abgestimmt ist, eingestellt. Somit ist es möglich, stark viskoplastische bis hin zu deutlich elastischen Materialeigenschaften zu generieren [55].

Die Festlegung der Eignung von Fugenmassen erfolgt gemäß den Anforderungen nach TL Fug-StB 15 [66] bzw. DIN EN 14188-1 [29] durch die Prüfungen der Materialkennwerte nach TP Fug-StB 15 [69] sowie den maßgebenden europäischen Normen DIN EN 13880. In Tabelle 4 sind die maßgebenden Prüfverfahren aufgelistet. Dort mit „*“ gekennzeichnete Prüfverfahren sind derzeit nicht europäisch genormt bzw. noch nicht harmonisiert.

Bitumenhaltige Werkstoffe weisen komplexe, temperaturabhängige Materialeigenschaften auf. Die Prüfung eines thermoplastischen Materials bei einer bestimmten Temperatur, wie beispielsweise die Untersuchung der Konus-Penetration, ermöglicht nur eine begrenzte Aussagekraft. Ein geeigneter Ansatz die Performance-Eigenschaften von

viskoelastischen Materialien über den gesamten Gebrauchs- und Verarbeitungstemperaturbereich zu erfassen, ist die Prüfung mittels Dynamischen Scherrheometer (DSR). Hierdurch können sowohl elastische als auch viskose Anteile ermittelt werden und die Rheologie der Fugenmasse quantifiziert werden.

Dabei wird ein bitumenhaltiges Bindemittel kraftschlüssig zwischen einer stillstehenden und einer oszillierenden Platte eingespannt und deformiert. Durch das Aufbringen von sinusförmigen Schwingungen können aus den Messungen die viskoelastischen Eigenschaften eines Bindemittels beschrieben werden. Dazu werden die signifikanten Kenngrößen, der Komplexe Schermodul G^* und der Phasenwinkel δ gemessen. Der Komplexe Schermodul entspricht dem Widerstand der untersuchten Probe gegen eine erzwungene Verformung und setzt sich zusammen aus dem Speichermodul G' und dem Verlustmodul G'' . Speichermodul und Verlustmodul können rechnerisch über trigonometrische Funktionen des Phasenwinkels in Abhängigkeit vom komplexen Schermodul ermittelt werden (Bild 9) [39].

Der Phasenwinkel beschreibt die zeitliche Verschiebung zwischen der aufgebrachtten Spannung und der aus der Bindemittelprobe resultierenden Dehnung. Er dient somit als ein Maß für die elastischen und viskosen Anteile der Verformung (Bild 10).

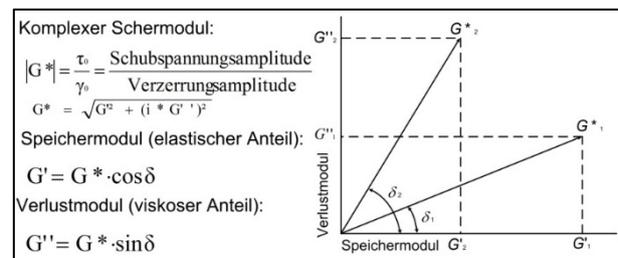


Bild 9: Zusammenhänge der im Dynamischen Scherrheometer ermittelbaren Kenngrößen in Anlehnung an [39]

Der sogenannte Verlustfaktor (auch Dämpfungsfaktor genannt) $\tan \delta$ beschreibt den Verhältniswert zwischen den viskosen und elastischen Anteilen des viskoelastischen Deformationsverhaltens des Materials. Die Berechnung erfolgt durch die Division der verlorenen Energie (G'') und der gespeicherten Energie (G') [44].

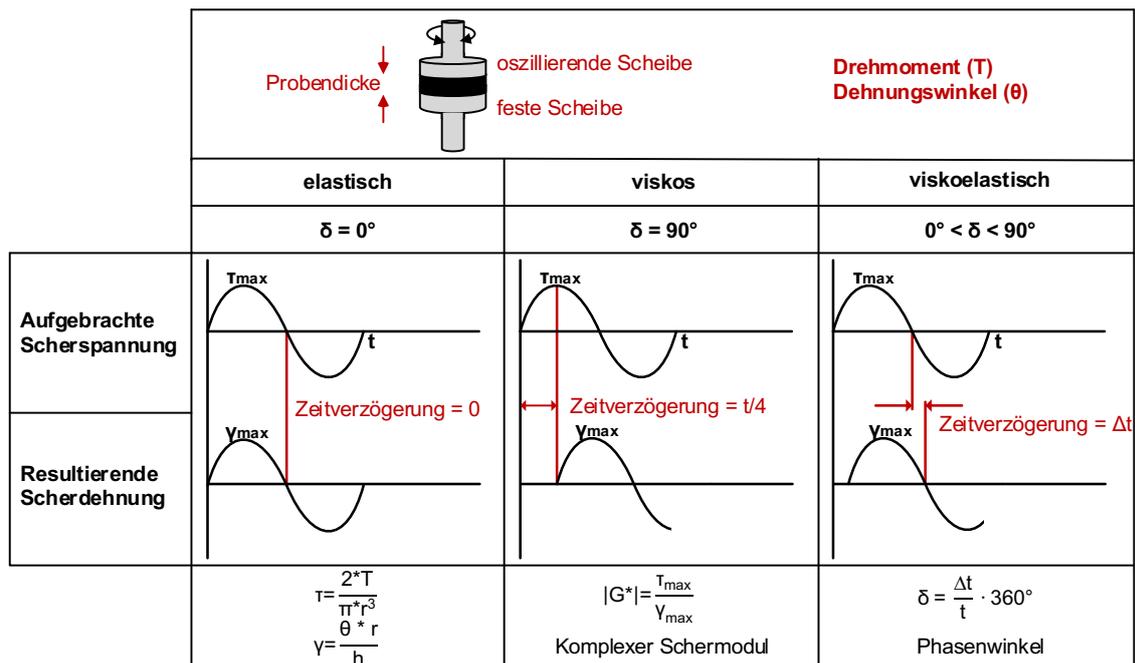


Bild 10: Messvorgang und Darstellung der Ergebnisse des Dynamischen Scherrheometers nach [41]

2.3.2 Kalt verarbeitbare Fugenmassen

Kalt verarbeitbare Fugenmassen sind reaktive Ein- oder Mehrkomponentensysteme auf Kunststoffbasis (z.B. Polysulfide, Polyurethane, Silikone). Es wird zwischen selbstverlaufenden (selbstnivellierenden) und standfesten kalt verarbeitbaren Fugenmassen unterschieden. Selbstverlaufende Massen weisen im Anlieferungszustand ein niedrigviskoses Materialverhalten auf und härten durch das Implizieren des erforderlichen Katalysators aus. Abweichend von heiß verarbeitbaren Fugenmassen weisen kalt verarbeitbare Fugenmassen ein mehr oder weniger rein elastisches Materialverhalten auf. [1], [2], [3]

Fugenmassen auf Kunststoffbasis eignen sich besonders für Verkehrsflächen auf die gleichzeitig chemische Substanzen einwirken. Gemäß [74] werden kalt verarbeitbare Fugenmassen entsprechend ihrer chemischen Beanspruchung in vier Belastungsklassen eingeteilt. Diese Einteilung findet sich ebenfalls in dem aktuellen Entwurf der DIN EN 14188-2 [31] wieder. Neben den Belastungsklassen A bis C ist noch eine weitere Belastungsklasse D definiert. Diese gilt für Expositionen gegenüber speziellen chemischen Beanspruchungen. Die Klassen A bis C implizieren stets die untergeordnete Kategorie, wobei Klasse A keine Anforderungen an die chemische Beständigkeit stellt und für „normal beanspruchte Verkehrsflächen“ [74] geeignet ist, Klasse B Anwendungen bei Kontakt mit Flugzeugkraftstoffen und Enteisungsmitteln umfasst und Klasse C Anwendungen bei

zusätzlichem Kontakt mit Otto- und Dieselkraftstoffen umfasst.

Die Einteilung hinsichtlich möglicher Änderungen in der Fugenspaltbreite erfolgt unabhängig von der chemischen Beanspruchung entsprechend der ZGV von bis zu 25 % bzw. bis zu 35 %, wobei nur Produkte mit einer ZGV von 25 % europäisch genormt sind.

Art und Umfang der erforderlichen Prüfungen für kalt verarbeitbare Fugenmassen sind in den TL Fug-StB 15 [66] festgelegt.

2.3.3 Fugenprofile

Eine weitere Möglichkeit der Abdichtung von Fugen in Betonfahrbahnen bieten elastomere Fugenprofile. Hierbei handelt es sich um elastische offene Profile, Hohlkammer- oder Vollprofile, die unter Vorspannung in den Fugenspalt eingebaut werden. Durch die elastischen Eigenschaften des Profils führen die aus der Vorspannung resultierenden Anpresskräfte zu einem kraftschlüssigen Verbund mit den Fugenflanken. Aufnehmbare Änderungen der Fugenspaltbreite liegen i.d.R. bei 30 %. Ein wesentlicher, ausführungstechnischer Vorteil von elastomeren Fugenprofilen gegenüber heiß oder kalt verarbeitbaren Fugenmassen liegt in der Witterungsunabhängigkeit beim Einbau. [1], [2], [3] Die Unterteilung von Fugenprofilen erfolgt nach Härteklassen. Die Anforderungen an die entsprechenden Härteklassen sowie die Anwendungs- und Prüfungsvorgaben sind in den nationalen Regelwerken [74], [66], [69] unter Berücksichti-

gung der entsprechenden europäischen Regelwerke vorgegeben.

2.4 Beanspruchungen von Fugenfüllsystemen

2.4.1 Theoretische Betrachtung von Fugenspaltöffnungsweiten

Jahreszeitliche Temperaturänderungen

Für die Beanspruchung des Fugenfüllsystems sind u.a. die Änderungen der Fugenspaltbreiten im Laufe der Zeit maßgebend. Ursächlich hierfür sind zum einen tages- und jahreszeitliche Temperaturänderungen, zum anderen Schwindverformungen. Letztere verlaufen mehr oder weniger in eine Richtung, nach einigen Jahren sind sie abgeklungen. Daher sind diese für die Änderungen der Fugenspaltbreiten – insbesondere bei Fugensanierungen – eher nachgeordnet.

Für die maßgeblichen Verformungen infolge von Temperaturänderungen sind einerseits die relativen Temperaturänderungen, andererseits die Längen der an die jeweilige Fuge angrenzenden Teilflächen entscheidend.

Bedingt durch die Reibung zwischen dem Untergrund und der Betonplatte werden die Eigenverformungen der Betondecke zwar behindert, diese Behinderung baut sich jedoch erst allmählich vom freien Rand her auf. Die Länge des teilweise beweglichen Endbereichs (freie Länge L) ergibt sich nach [37] aus:

$$L = \frac{\sigma_D}{\mu * \gamma}$$

mit: σ_D maximale Zwangsspannung
(= $\alpha_T \cdot \Delta T \cdot E$) [N/mm²]
 μ Reibungsbeiwert [-]
(für Erstverschiebungen von Betonfahrbahnplatten: rd. 1,5)
 γ Wichte des Betons [kN/m³]

In Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes μ ergeben sich hieraus mit typischen Betonkennwerten ($\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $E = 34.000 \text{ N/mm}^2$ und $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$), die in Bild 11 für Temperaturänderungen ΔT von 1 K, 5 K, 10 K und 15 K dargestellten freien Längen des beweglichen Endbereichs.

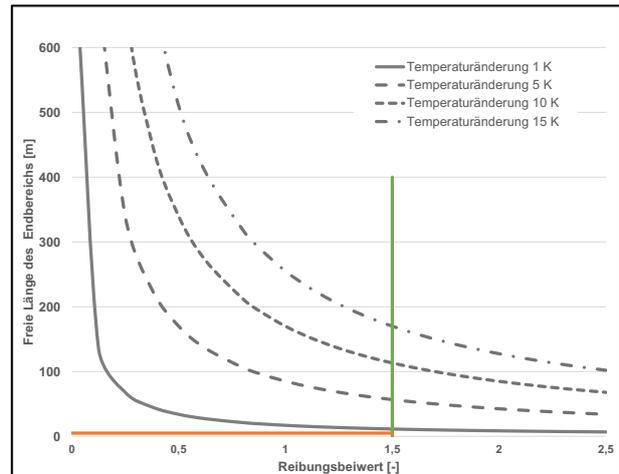


Bild 11: Freie Länge des beweglichen Endbereichs in Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes und der Temperaturänderung

Aus Bild 11 ist ferner ersichtlich, dass sich selbst bei einer Temperaturänderung von nur 1 K (bei einem für Betonplatten auf Tragschichten typischen Reibungsbeiwert von rd. 1,5) eine freie Länge von deutlich über 2,5 m (= halbe Plattenlänge) ergibt. Daher baut sich in Betondecken – unter der Voraussetzung, dass alle Fugen gerissen sind – praktisch nie mehr voller Zwang auf.

Bei Betonfahrbahnplatten mit verdübelten Querscheinfugen sind jahreszeitliche Temperaturschwankungen von 35 K ($L = 400 \text{ m}$) zu erwarten. Solange die Scheinfugen im unteren Fugenbereich nicht geschlossen sind, werden insbesondere bei einer Abkühlung, d.h. einer weiten Öffnung der Fuge, die Bewegungen innerhalb einer in der Regel 5 m langen Platte, bzw. beidseits der Fuge jeweils 2,5 m relevant. Bei einem Verhältnis von 2,5 m/400 m kann innerhalb dieser freien Strecke von praktisch ungehinderter Verformung ausgegangen werden. Der Reibungseffekt ist vernachlässigbar, zumal (bzw. solange) die Dübel in Plattenlängsrichtung auch nicht weiter verformungsbehindernd wirken.

Die nach der Herstellung der Fugen auftretenden Temperaturänderungen führen zu Verformungen der Betonflächen, die auf die Querscheinfugen und somit auch auf das Fugenfüllsystem hin gerichtet sind und somit von Letzterem schadfrei aufgenommen werden müssen.

Die Verformungen des jeweiligen freien Plattenrandes, die sich innerhalb der Ist-Länge (= halbe Länge der Teilflächen) einstellt, errechnet sich zu: [37]

$$\Delta L = \frac{\alpha_T * \Delta T * L}{2} \quad \text{Gl. 6}$$

mit: α_T $1,2 * 10^{-5} \text{ [K}^{-1}\text{]}$
 ΔT Temperaturänderung [K]
 L Länge der Teilfläche [m]

Die Fugenbewegungen von Betonfahrbahnplatten mit einer Länge von jeweils 5 m bilden sich demnach aus der Summe der Verformungen von zwei freien Plattenrändern mit Ist-Längen von je 2,5 m.

Es ist davon auszugehen, dass sich Betondecken während heißer Sommermonate bei Lufttemperaturen von bis zu 35 °C durch die zusätzliche Sonnenstrahlung im Inneren auf bis zu etwa 45 °C erwärmen. Im Winter kann eine Abkühlung bis auf -15 °C erfolgen [28, 29]. Für die spätere Beanspruchung des Fugenfüllsystems spielt die Temperatur der Betonfläche, bei der die Fuge abgedichtet wird, die sog. Fixiertemperatur, eine entscheidende Rolle. In Bild 12 sind die sich aus den Änderungen der Fugenspaltbreite generierenden Dehnungen und Stauchungen von Fugenmassen bei unterschiedlichen Fixiertemperaturen dargestellt. Zugrunde gelegt wurden dabei eine 5 m lange Betonplatte und eine bisher übliche Fugenspaltbreite von 8 mm.

Die Fixierung des Fugenfüllsystems (Temperatur zum Zeitpunkt des Fugenvergusses) hat somit einen maßgebenden Einfluss auf die Beanspruchung des Fugenfüllstoffes. Wird das Fugenfüllsystem bei geringen Temperaturen fixiert, so erfährt der Fugenfüllstoff bei weiterer Abkühlung nur noch vergleichsweise geringe Dehnungen, da das Temperaturdelta zwischen Verguss und minimaler Bauteiltemperatur im Winter vergleichsweise klein ist.

Demgegenüber ist der Unterschied zu den im Sommer zu erwartenden hohen Temperaturen vergleichsweise groß, sodass entsprechend hohe Stauchungen in der Fugenmasse generiert werden, welche i.d.R. bautechnisch durch den geschlossenen Riss unterhalb des Fugenspalts begrenzt werden. Erfolgt der Fugenverguss hingegen bei vergleichsweise hohen, sommerlichen Temperaturen, so wird das Gesamtsystem im Sommer weniger gestaucht, erfährt im Winter hingegen höhere Dehnbeanspruchungen.

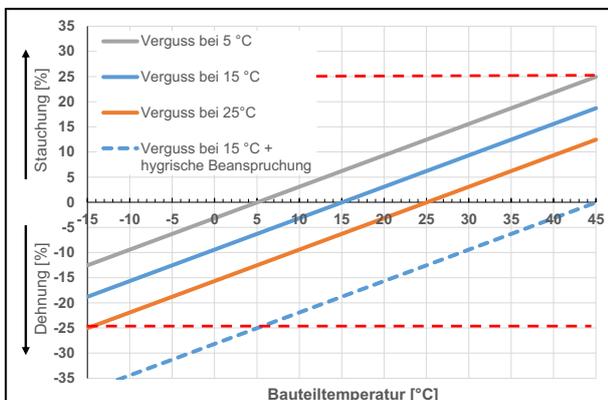


Bild 12: Dehnungen und Stauchungen von Fugenmassen in Abhängigkeit von der Fixiertemperatur für 5 m lange Betonplatten und eine Fugenspaltbreite von 8 mm

Gemäß EN 14188-1 [29] sowie ZTV Fug-StB 15 [74] sind die für Straßenbeton üblichen Fugenmassen des Typs N2 für Änderungen der Fugenspaltbreite bis 25 % ausgelegt. Aus Bild 12 geht weiterhin hervor, dass die Dehnung bei einer Fugenmasse, die bei etwa 25 °C eingebaut wurde, bei einer entsprechenden Abkühlung im Winter auf -15 °C diesen Grenzwert bereits erreichen kann. Werden diesen temperaturbedingten Verformungen zusätzlich die Schwindverkürzungen überlagert, die in Betonplatten zu etwa 0,3 ‰ angenommen werden können, führt dies bei 5 m langen Betonplatten zu zusätzlichen Dehnungen in einer 8 mm Fuge von rd. 20 %. Damit werden die zulässigen Dehnungen des Fugenfüllsystems in vielen Fällen bereits überschritten. Wird das Fugenfüllsystem hingegen in der kühlen Jahreszeit bei nur 5 °C fixiert, wird dieses im Sommer bei reiner Betrachtung der Temperaturverformung ebenfalls bereits bis zum zulässigen Wert von 25 % gestaucht. Werden auch hier die sich allmählich aufbauenden Schwindverformungen überlagert, so wirken diese in diesem Fall entlastend. Gleichzeitig ist bei einer Erwärmung zu beachten, dass sich Stauchungen im Fugenfüllsystem nur insoweit einstellen können, bis der Riss unterhalb der Scheinfuge noch nicht geschlossen ist (Bild 13). Dies wird wiederum von der Temperatur zum Zeitpunkt des Durchreißen der Betonplatten beeinflusst. Aus diesen Darlegungen ist ersichtlich, dass für Fugenfüllsysteme Überdehnungen wesentlich kritischer zu werten sind als zu große Stauchungen.

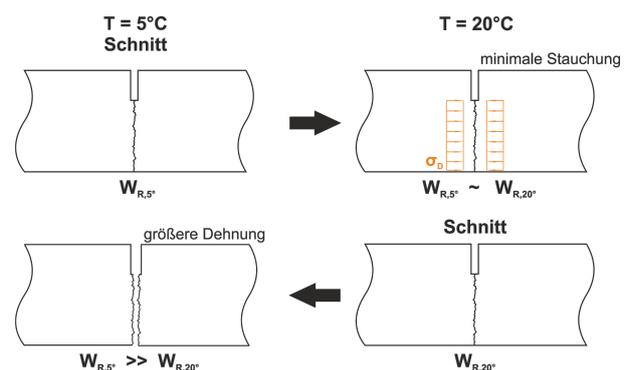


Bild 13: Einfluss der Temperatur auf die Fugenbewegung

Um die auftretenden relativen Längenänderungen eines Fugenfüllsystems zu reduzieren, ist es möglich die Ausgangsfugenspaltbreite zu vergrößern. In Bild 14 ist der Einfluss der Fugenspaltbreite beispielhaft für eine Fixiertemperatur von 25 °C dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass mit zunehmender Fugenspaltbreite die Dehnungen im gleichen Verhältnis reduziert werden können. Bei einem Temperaturrückgang um 20 K verringern sich bei einer Vergrößerung der Fugenspaltbreite

von 8 mm auf 10 mm die Dehnungen im Fugenfüllsystem um rd. 2,5 % (absolut).

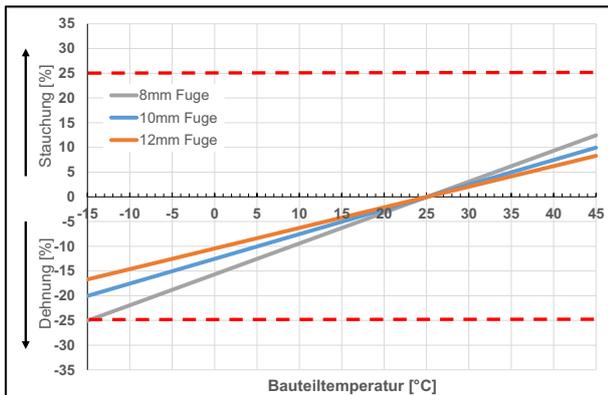


Bild 14: Dehnungen und Stauchungen von Fugenmassen in Abhängigkeit von der Fugenspaltpbreite (Verguss bei 25 °C)

Querscheinfugen in Betonfahrbahndecken auf Autobahnen sind i.d.R. in einem Abstand von rd. 5 m angeordnet. Wie bereits dargelegt, können bei diesen Plattengeometrien die zulässigen relativen Längenänderungen bereits überschritten werden. Bei dieser Betrachtung wird zusätzlich stillschweigend vorausgesetzt, dass jede Scheinfuge auch tatsächlich gerissen ist. Wenn mehrere Einzelfelder hintereinander nicht gerissen sind, wirken diese als ein gesamtes Paket. Das hat zur Folge, dass sich die gesamten Verformungen auf die gerissenen Scheinfugen am Ende dieses Pakets niederschlagen. In Bild 15 sind die Auswirkungen eines sog. „Paketreißens“ auf die relativen Längenänderungen der Fugenspaltpbreiten infolge Temperaturverformung beispielhaft dargestellt.

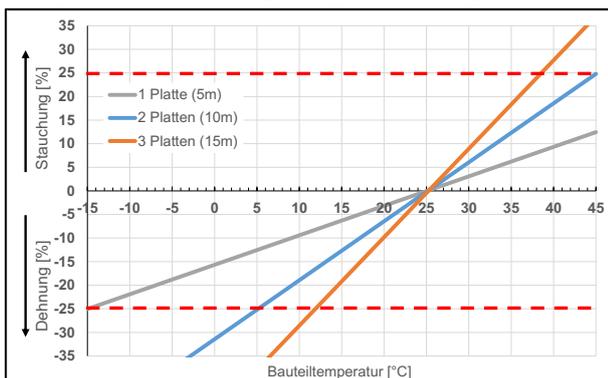


Bild 15: Dehnungen und Stauchungen von Fugenmassen infolge ungerissener Scheinfugen (Verguss bei 25 °C, 8 mm Fugenspaltpbreite)

Bereits bei einem Zweier-Paket aus zwei zusammenhängenden Einzelfeldern wird die ZGV von 25 % bei einer Abkühlung von rd. 20 K überschritten. Bei einem Dreier-Paket reichen hierfür lediglich rd. 12,5 K aus.

Tägliche Temperaturänderungen (Tag/Nacht)

Den längerfristigen Temperaturänderungen, die sich annähernd gleichmäßig über den gesamten Querschnitt auswirken, können sich zusätzlich kurzfristige Temperaturänderungen z.B. aus Tag/Nacht-Unterschieden überlagern.

Bei einer Abkühlung von oben, die sich insbesondere in den Nachtstunden einstellt, ist mit einem Temperaturgradienten von $-0,035 \text{ K/mm}$ zu rechnen [37]. Dies führt vom Grundsatz her zu einer Verdrehung des Plattenrandes bzw. der Fuge, was in diesem Fall zu einer zusätzlichen Aufweitung der Fuge an der Plattenoberseite und damit zu einer zusätzlichen Beanspruchung des Fugenfüllsystems führt. Allerdings wird diese Verdrehung zum einen durch das Platteneigengewicht, zum anderen durch die Verdübelung stark eingeschränkt, sodass die ohnehin nur geringe Verdrehung infolgedessen für die Betrachtung der Beanspruchung des Fugenfüllsystems vernachlässigt werden kann. Dies gilt jedoch nicht für die Dehnungen und Stauchungen, welche sich durch den entsprechenden Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht einstellen.

Verkehrslast

Die horizontalen Fugenbewegungen überlagern sich zusätzlich mit vertikalen Fugenbewegungen infolge des überrollenden Verkehrs. Je nach Unterlage sowie Wirksamkeit der Rissverzahnung in den Querscheinfugen und der Verdübelung ist von Vertikalverschiebungen $< 1 \text{ mm}$ auszugehen [37].

Aufgrund der hochfrequenten Verkehrszyklen können hierdurch zusätzlich Beanspruchungen für das Fugenfüllsystem entstehen.

2.4.2 Fugenöffnungsweiten in situ

Die in Abschnitt 2.4.1 aufgezeigten theoretischen Betrachtungen setzen teilweise idealisierte Randbedingungen voraus. So haben beispielsweise der tatsächliche Reibbeiwert und der tatsächliche Wärmeausdehnungskoeffizient des Betons einen maßgebenden Einfluss auf die resultierenden Fugenbewegungen.

Insbesondere der Reibbeiwert ist durch die Konzeption der Bauweise beeinflusst. Neben den Bauweisen Betondecke auf Vliesstoff und HGT oder Verfestigung, sind gemäß RStO 12 [59] der Einsatz einer Betondecke auf einer Asphalttragschicht oder einer Schottertragschicht für die Belastungsklassen BK1,8 bis BK100 möglich. Weitere individuelle Konzepte, wie z.B. eine Betondecke auf einer Verfestigung ohne Vliesstoff (vgl. Abschnitt 6) sind ebenfalls in der Praxis vorhanden. Neben der Reibung zwischen der Betondecke und der unteren Schicht ist dabei die maßgebende

Dicke von ausgeprägter Bedeutung. So erfährt eine kompakte Bauweise, ohne Vliesstoff als Trennlage, aufgrund der geringeren Temperaturbeanspruchungen über die gesamte Bauteiltiefe geringere Dehnungen bzw. Stauchungen. Aus den thermischen und hygri-schen Beanspruchungen der Betonfahrbahn resultieren Längenänderungen, welche zu einer Reduzierung oder Aufweitung der Fugenspaltbreite und damit zu mechanischen Beanspruchungen des Fugenfüllstoffes führen.

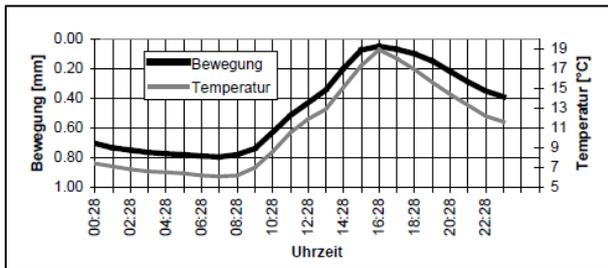


Bild 16: Messwerte der Fugentemperatur und der horizontalen Fugenbewegung [40]

Im Rahmen einer Versuchsstrecke im Schweizer Kanton Uri haben HEAN et. al [40] in dem Zeitraum von 1995 bis 1998 festgestellt, dass bei einer maximalen Temperaturspanne der Betonfahrbahnplatten von 48 °C Veränderungen der Fugenspaltbreite von 0,8 bis 3,3 mm gemessen wurden. Im Bereich von Blockverschiebungen, welche u.a. durch Paketrinne entstehen können, wurden Verschiebungen von bis zu 5,6 mm gemessen. Die maximalen täglichen Änderungen der Fugenspaltbreiten (vgl. Bild 16) konnten zu 0,4 bis 1,4 mm, bei Blockverschiebungen zu 1,7 mm, ermittelt werden.

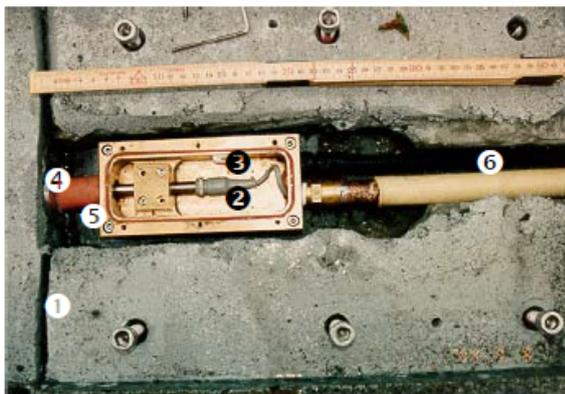


Bild 17: Messeinrichtung zur Erfassung der horizontalen Fugenbewegungen nach [40]

Neben der Möglichkeit einzelne Fugen durch die Einrichtung von aufwendigen, vergleichsweise anfälligen und kostenintensiven Dauermessstellen zu überprüfen [40], besteht die Möglichkeit die Fugenspaltöffnungsweiten diskontinuierlich zu erfassen. BIRMANN [7] berichtet von einer Versuchsstrecke (A81), auf welcher bereits 1974

Messmarken zur Erfassung der Veränderung der Fugenspaltöffnungsweiten installiert wurden. Die Bestimmung der Fugenspaltöffnungsweiten erfolgt hierbei nach einer Nullmessung ausschließlich durch die Relativänderung der Messmarken zueinander. Bei der Nullmessung wird zum einen die tatsächliche Fugenspaltbreite im Fugenspalt ermittelt, zum andern wird der Relativabstand der Messmarken zueinander bestimmt. Folglich ist es möglich, durch die Berücksichtigung der Nullmessung, anhand der relativen Verschiebung der Messmarken stets auf die tatsächlichen Änderungen der Fugenspaltbreite zu schließen (vgl. Bild 18 und Bild 19).

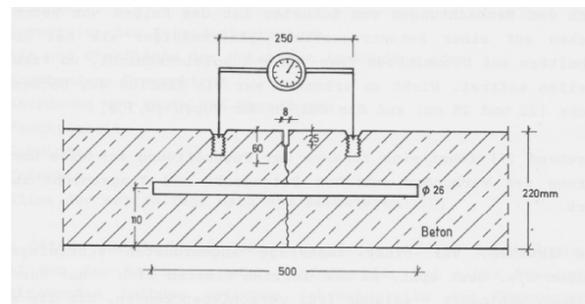


Bild 18: Fugenspaltmessung mit einem Setzdehnmessgerät (Systemskizze) [7]

BIRMANN [7] konnte im Rahmen der zwölfjährigen Dokumentation der Versuchsstrecke maximale Fugenspaltöffnungen von rd. 2,4 mm feststellen. Ferner wurde festgestellt, dass die Fugenspaltöffnungsweiten im Verlauf der Liegezeit der Betonfahrbahndecke gleichmäßiger werden. So ist durch eine statistische Auswertung der Schiefe ersichtlich, dass diese im Verlauf der Liegezeit abnimmt, was durch gleichmäßigere Fugenspaltöffnungsweiten erklärbar ist.



Bild 19: Messmarken und Fugenspaltmessung mit einem Setzdehnmessgerät (System der BAST in Anlehnung an [7])

In weiteren Untersuchungen eruierte BIRMANN [8], dass im Verlauf der Nutzungsdauer einer Betonfahrbahn – sofern keine Sanierungsmaßnahmen stattfinden – eine deutliche Erhöhung der Änderung der Fugenspaltbreiten festzustellen ist. So wurden auf der Teststrecke B47 bei Dreisen im Zeitraum von 1966 bis 1969 maximale Fugenspaltöffnungen von rd. 2 mm festgestellt, im Zeitraum von 1989 bis 1990 wurden nach 24 Jahren

Nutzungsdauer maximale Fugenspaltöffnungen von bis zu 3,5 mm festgestellt, welche eine ähnliche Größenordnung wie die Messerergebnisse von HEAN et. al [40] aufwiesen.

Mit einer maximalen Fugenspaltänderung von 2,3 mm zwischen dem Sommer 1993 und dem Winter 1993/94 bei einem Plattenformat von 5 x 5 m konnten EISENMANN et. al [36] die Größenordnung der Fugenspaltöffnungsweiten an Querscheinfugen bestätigen. Dies gilt ebenfalls für die maximalen Fugenspaltänderungen, von ca. 2,3 bis 4,3 mm, welche ROßBACH [57] und RECKNAGEL et. al [55] festgestellt haben. Abweichend zu den vorgenannten Autoren, wurden hierbei jedoch stahlfaserbewehrte Betonplatten mit einer Länge von 10 m und einer Fugenspaltbreite von 20 mm untersucht.

Die kritische Würdigung der Literatur zeigt, dass eine hinreichende Anzahl an Fugen, welche unmittelbar hintereinander folgen, zur Bestimmung einer realistischen Abschätzung der tatsächlichen Änderungen der Fugenspaltbreiten unabdingbar ist.

Vorzugsweise ist hierzu ein robustes und praxistaugliches Messinstrumentarium vorzusehen, welches die Änderungen der Fugenspaltbreiten sowie die Bauteiltemperatur kontinuierlich aufzeichnet. Mit dem Forschungsvorhaben FE 08.0244 der Bundesanstalt für Straßenwesen „Optimierung von Fugenkonstruktionen – Ermittlung realer Beanspruchungen des Fugensystems“ ist derzeit ein Projekt in Bearbeitung, welches neben den langsam auftretenden horizontalen Bewegungen ebenfalls dynamische, vertikale Beanspruchungen auf das Fugensystem berücksichtigt. Somit soll nach Abschluss der Forschung ein geeignetes Messinstrumentarium zur kontinuierlichen Datenerfassung bereitstehen, welches eine mehrdimensionale Erfassung von Fugenbewegungen ermöglichen soll.

2.4.3 Klimatische Einflüsse

Neben den temperatur- und feuchtebedingten Verformungen der Betonplatten und den damit einhergehenden Änderungen der Fugenöffnungsweiten haben die klimatischen Randbedingungen auch direkte Auswirkungen auf das Alterungsverhalten von Fugenfüllsystemen.

Fugenmassen weisen nach dem Verguss eine konkave Oberfläche auf. Der Einsatz von Auftaumitteln kann gemäß [67] neben Natriumchlorid (NaCl) und Calciumchlorid (CaCl₂) auch Magnesiumchlorid (MgCl₂) umfassen. Natriumchlorid ist aufgrund wirtschaftlicher Faktoren sowie einer unkomplizierten Handhabung das gebräuchlichste Auftaumittel.

Chloride mit ihren hygroskopischen Eigenschaften führen zum Verklumpen der einzelnen Körner. Um die Rieselfähigkeit der Salze zu gewährleisten, werden Antitackmittel (Natriumferrocyanid und Kaliumferrocyanid) eingesetzt. Untersuchungen am Lehrstuhl für Verkehrswegebau an der Ruhr-Universität Bochum, im Rahmen des Forschungsvorhabens „Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphalttschichten – Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens“ (FE 07.0254), zeigen bei Natriumchloridlösungen mit verschiedenen Ferrocyanidkonzentrationen ein einheitliches Bild bei der Bindemittelablösung. Ein direkter Einfluss auf die Adhäsion zwischen Bindemittel und Gestein auf Basis des Antitackmittels ist folglich nicht zu erwarten [51].

Der Einfluss sogenannter Inhibitoren – Zusätze, welche die Korrosion durch Chloride verhindern sollen – auf die chemischen und rheologischen Eigenschaften von Fugenmassen, ist zurzeit noch nicht bekannt [42].

Bitumen weist ein temperaturabhängiges viskoelastisches Materialverhalten auf. Viskosität und Steifigkeit des Bindemittels verhalten sich antiproportional zur Temperatur. Heiß verarbeitbare Fugenmassen weisen folglich die höchste Steifigkeit zu dem Zeitpunkt auf, an dem die maximalen Fugenöffnungsweiten erreicht werden. Diese Überlagerung der maximalen Dehnung kombiniert mit der maximalen Steifigkeit, führt dementsprechend zu den höchsten Spannungen bei niedrigen Temperaturen.

Hohe Temperaturen und UV-Strahlungen können zusätzlich zu weiteren physikalischen und chemischen Veränderungen der Fugenmassen führen. Nach [47] kann die Alterung von bitumenhaltigen Bindemitteln im Wesentlichen in drei unterschiedliche Mechanismen unterteilt werden:

- oxidative Alterung
- destillative Alterung
- Strukturalterung

Die oxidative Alterung ist auf die chemische Reaktion zwischen Kohlenwasserstoffen des Bitumens und Luftsauerstoff zurückzuführen. Diese Reaktion findet an der Kontaktfläche zur Luft statt. Ausgelöst durch thermische Homolyse oder durch photochemische Reaktion – bedingt durch die Einwirkung von UV-Strahlung – kommt es zur Bildung von Hydroperoxiden, welche in Kettenreaktionen mit Radikalmechanismen zur Bildung von Asphalttenen führen. Somit wird die Viskosität des Bindemittels erhöht [47]. In Abhängigkeit von der Konzentration gebildeter Radikale, weist die oxidative Alterung einen progressiven Alterungsfortschritt auf [49].

Die Verdunstung leicht flüchtiger Bestandteile des Bitumens an der Oberfläche wird durch die destillative Alterung beschrieben, die insbesondere bei hohen Temperaturen zum Zeitpunkt der Verarbeitung zu Materialveränderungen führt.

Die Strukturalterung beschreibt die Verschiebung der Kolloidstrukturen innerhalb des Bitumens. Disperse Anteile des Bitumens koagulieren zu größeren Aggregaten und führen zu einer Vergrößerung der festen Phase und folglich zu einer Erhöhung der Viskosität.

Zusammenfassend führt die Alterung von Bitumen bedingt durch chemische und strukturelle Veränderungen, zu einer Steigerung der Viskosität sowie einer Erhöhung des elastischen Verformungsanteils [48].

Bei der Charakterisierung des Alterungsverhaltens von Fugenfüllsystemen, insbesondere bei heiß verarbeitbaren Fugenmassen, gilt es darüber hinaus die Wechselwirkungen der weiteren Zusätze zu berücksichtigen.

So ist die Polymerdegradation, welche ein aufspalten von ursprünglich langen Polymerketten in der Fugenmasse, zu kürzeren Polymerketten, bis hin zu Monomeren beschreibt, ein nicht zu vernachlässigender Aspekt. Speziell durch die Veränderung der Polymerbestandteile erfolgt eine Verschiebung des viskoelastischen Materialverhaltens, welches in der Theorie mitunter gegenläufig zum Alterungsverhalten von Bitumen sein kann. Zum Zeitpunkt der Verarbeitung erfolgt die Zersetzung der Polymere vorrangig durch hohe Temperaturen und mechanische Einflüsse durch die Scherung des Rührwerks. Im weiteren Verlauf der Nutzungsdauer ist aber auch eine Beeinflussung durch weitere Einflussfaktoren, wie z.B. die UV-Strahlung möglich.

Neben den Einflüssen aus Frosttaumitteln, Temperatur und UV-Strahlung bildet Oberflächenwasser einen weiteren Einflussfaktor auf das Fugenfüllsystem. Die Dauerhaftigkeit eines auf heiß und kalt verarbeitbaren Fugenmassen basierenden Fugen-systems ist signifikant durch die Haftung zwischen Fugenmasse und Betonflanke geprägt. Es existieren unterschiedliche Ansätze und Theorien, welche das Haftverhalten zwischen Bitumen und Gestein beschreiben. Die umfangreichen Ansätze der Beschreibung des Haftverhaltens spiegeln sich darüber hinaus auch in den Einflussfaktoren auf die Haftung wider. Neben den mineralogischen sowie physikalischen Eigenschaften des Gesteins sind ebenfalls die chemischen und rheologischen Eigenschaften des Bindemittels von Bedeutung für einen adäquaten Haftverbund. [6]

Maßgebender Schädigungsprozess in Asphaltgemischen, in Gegenwart von Wasser, ist die Verdrängung des Bitumenfilms vom Gestein. Gelangt Wasser an die Grenzfläche zwischen Bitumen und Gestein, wird das vorherrschende thermodynamische Gleichgewicht gestört und das Bitumen wird verdrängt. [43] Die Übertragung dieser Problematik auf die Beanspruchung von Fugenfüllsystemen zeigt, dass die Grenzfläche Fugenmasse–Betonflanke ein offenes System für die Beanspruchung durch Oberflächenwasser ist.

Das Schnittbild des Fugenspalts, welcher die Kontaktfläche zwischen Fugenmasse und Beton darstellt, weist neben der basischen Mörtelphase auch geschnittene Gesteinskörner auf. Die Adhäsion zwischen Bindemittel und Gestein ist unter anderem von den chemischen und petrographischen Eigenschaften des Gesteins beeinflusst. Anhand des Siliziumdioxid-Anteils (SiO_2 -Anteil) werden Gesteine in saure, intermediale oder basische Gesteine klassifiziert (Bild 20). Dabei ist festzustellen, dass mit steigendem SiO_2 -Anteil (saure Gesteine) ein eher hydrophiles Materialverhalten vorliegt, während basische Gesteine hydrophob sind.

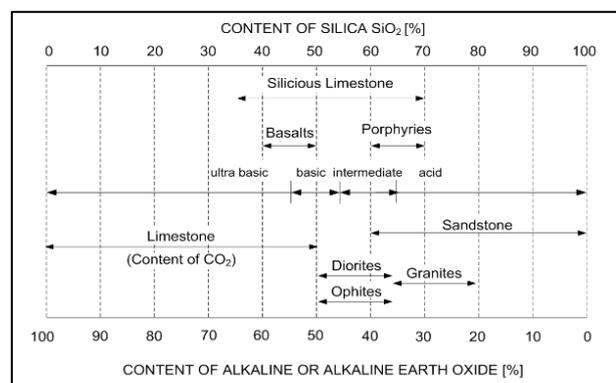


Bild 20: Chemische Zusammensetzung von Gesteinen [6]

Eine direkte Übertragung der Versagensmechanismen, welche aus der Asphaltforschung bekannt sind, ist jedoch nicht möglich, da ein Fugenfüllsystem in der Regel die Grenzflächen Fugenmasse – Voranstrich – Betonflanke aufweist. Der adhäsive Versagensmechanismus ist folglich um die Auswirkungen des Voranstrichmittels – sofern es zur Anwendung kommt – zu ergänzen. In Konsequenz dieser komplexen Systembeanspruchung ist es demnach unabdingbar, das gesamte Fugenfüllsystem ebenfalls unter kritischen Randbedingungen zu bewerten.

2.5 Schäden an Fugenfüllsystemen mit Fugenmassen

2.5.1 Typische Schadensmerkmale

Schäden an Fugenfüllsystemen und die damit verbundenen Beeinträchtigungen für die Betonbauweise sind eine fortwährende Problematik. Für eine gleichbleibende Qualität und Dauerhaftigkeit der gesamten Betonfahrbahndecke ist ein funktionsfähiges und intaktes Fugenfüllsystem von großer Bedeutung. Eine erste Übersicht verschiedener Schadensbilder, mit dem Ansatz der Einteilung in vier- respektive fünf – Versagenskategorien und den resultierenden Schadensbildern, gliedert sich wie folgt [55], [56]:

Mangelnde Adhäsion an den Fugenflanken

- Stand- und Lagesicherheit
- Abdichtung gegenüber Wasser und Verschmutzungen

Mangelnde Kohäsion der Fugenmasse

- Abdichtung gegenüber Wasser und Verschmutzungen

Mangelnde Alterungsbeständigkeit

- Starke oberflächliche Versprödung der Fugenmasse
- Beeinflussung der Kohäsion und Adhäsion

Konstruktiv und verarbeitungsbedingte Mängel

- Überdrücken der Fugenmassen, Ausfahrungen
- Inadäquate Verarbeitung der Fugenmasse
Blasenbildung

2.5.2 In situ-Zustandserfassung

Im Zuge dieses Forschungsvorhabens wurde an verschiedenen Teilabschnitten von Autobahnen in Deutschland, bei denen heiß verarbeitbare Fugenmassen zum Einsatz kamen, eine Zustandserfassung der Fugen unternommen. Hierzu wurden die jeweiligen Querscheinfugen im ersten Fahrstreifen sowie in der Standspur augenscheinlich auf Mängel wie Ablösungen, Versprödungen etc. untersucht. Des Weiteren wurde an ausgewählten Fugen eine Dichtheitsüberprüfung mit einer Saugglocke durchgeführt. Hierzu wurde in der Saugglocke mittels Vakuumpumpe ein Unterdruck erzeugt, sodass Luft über undichte Stellen wie Ablösungen oder Risse in die Glocke hineinströmen konnte. Um die entscheidenden Stellen kenntlich zu machen, wurden die Fugen zuvor mit einem Wasser-Tensidgemisch bestrichen. In Tab. 5 sind die wesentlichen Zustände der Fugen in den jeweiligen Teilabschnitten zusammengefasst. Eine Fotodokumentation ist dem Anhang 10.2 zu entnehmen.

	Fugenspaltbreite	Zustand der Fugen
A24	10 mm	- teilw. Flankenablösung - oberflächlich versprödet - im Standstreifen überdrückt - stellenweise Grasbewuchs
A24	9 mm	- teilw. Über- und Unterverguss - oberflächlich versprödet - überwiegend dicht
A27	10-12 mm	- wenig Über-/ Unterverguss - wenig oberflächlich versprödet - überwiegend dicht
A30	9 mm	- punktuell Flankenablösung - teilw. Absackung - oberflächlich wenig versprödet - teilw. undicht - im Standstreifen überdrückt - stellenweise Grasbewuchs
A7	10 mm	- oberflächlich versprödet - teilw. im Standstreifen überdrückt

Tab. 5: Zusammenfassung der Zustandserfassung

2.6 Systemprüfungen heiß verarbeitbarer Fugenmassen

In Abschnitt 2.4 wurde dargelegt, welchen vielschichtigen Belastungen ein Fugenfüllsystem ausgesetzt ist. Zur Gewährleistung einer hohen Dauerhaftigkeit ist folglich eine isolierte Betrachtung der einzelnen Bestandteile des Fugenfüllsystems nicht zielführend.

Für eine ganzheitliche Bewertung eines Fugenfüllsystems ist in Konsequenz eine ganzheitliche Bewertung des Systems – bestehend aus Fugenmasse, Voranstrich (sofern erforderlich) und Betonfugenflanken – unabdingbar.

Dieser Ansatz wird in den TP Fug-StB 01 [68] für kalt verarbeitbare Fugenmassen bereits verfolgt. Dort werden, neben verschiedenen Prüfungen der Fugenmassen, die Untersuchung des Dehnspannungswerts, die Durchführung von Dehn-Stauch-Zyklen, die Analyse des Rückstellvermögens sowie die Betrachtung des Verhaltens bei zyklischer Scherbeanspruchung am Gesamtsystem gefordert. Bei der Bewertung heiß verarbeitbarer Fugenmassen beschränken sich die Prüfungen am System auf die Untersuchung des Dehn- und Haft-

vermögens nach der SNV 671920 [63] vor und nach der Wärmealterung.

Die Prüfungen erfolgen nach [68] einheitlich an Mörtelprismen mit definierter Zusammensetzung. Dieser Ansatz ist in der DIN EN 14188-1 [29] nicht mehr verankert. Die Systemprüfungen an Mörtelprismen sind ein erster Ansatz zur Bewertung der Leistungsfähigkeit eines Fugenfüllsystems. Allerdings werden dabei die in situ maßgebenden Randbedingungen nicht ausreichend repräsentiert. Speziell die Adhäsion ist durch die Oberflächenstruktur und -beschaffenheit der Betonfugenflanken maßgebend beeinflusst. Die Prüfung der Adhäsion an geschnittenen Betonflanken ist dementsprechend die konsequente Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse.

Die primäre Belastung der Fugenmasse ist in den Verformungen der an die Fugen angrenzenden Betonplatten zu sehen. Diese können sowohl horizontale als auch vertikale Wegänderungen in das System induzieren. Die sekundären Einflüsse aus den klimatischen Randbedingungen sind jedoch nicht zu vernachlässigen.

Der aktuelle Stand der Technik unterscheidet zwischen drei Systemprüfungen für heiß verarbeitbare Fugenmassen:

- Funktionsprüfung von Fugenmassen [22]; lt. [29] „Haftvermögen für Kaltklimagebiete“
- Prüfverfahren zur Bestimmung des Dehn- und Haftvermögens bei kontinuierlicher Dehnung und Stauchung [25]; lt. [29] „Haftvermögen“

- Prüfverfahren zur Bestimmung des Dehn- und Haftvermögens bei diskontinuierlicher Dehnung“ [28]; lt. [29] „Haft- und Dehnvermögen“ (Fortschreibung der Prüfnorm zur Bestimmung der Dehnbarkeit und des Haftvermögens im Fugenmodell nach Rabe)

Die Prüfverfahren unterscheiden sich sowohl in der maximalen Fugenöffnungsweite (Dehnung), der Fugenöffnungsgeschwindigkeit, des Bewegungsablaufs als auch in der Prüffläche und Fugenbreite voneinander. Die wesentlichen Unterschiede der Prüfungen sind in Tab. 7 aufgezeigt.

Die Anforderungen an heiß verarbeitbare Fugenmassen sind in [29] definiert. Neben der maximalen Spannung innerhalb der Belastungszyklen, respektive der Spannung am Versuchsende, wird das Haftverhalten mit Hilfe von Adhäsions- und Kohäsionsbrüchen bewertet (Tab. 6).

	DIN EN 13880		
	Teil 7	Teil 10	Teil 13
σ_{\max}	1,0 N/mm ²	0,48±0,1 N/mm ²	1,0/0,75 N/mm ²
$\sigma_{\text{Versuchsende}}$ (Typ N1)	-	-	≤ 0,15 N/mm ²
Adhäsionsbrüche	Keine	< 50 mm ²	Keine
Spalttiefe Flanke	Keine	< 3 mm	Keine
Kohäsionsbrüche	Keine	< 20 mm ²	Keine
Risstiefe	Keine	< 3 mm	Keine

Tab. 6: Anforderungen an Systemuntersuchungen von Fugenmassen Typ N1 und Typ N2 in Fahrbahndecken aus Beton [29]

	DIN EN 13880-7	DIN EN 13880-10	DIN EN 13880-13
Fugenbreite	12 mm	24 mm	15 mm
Prüffläche	600 mm ²	3500 mm ²	6000 mm ²
max. Fugenöffnungsweite	-2,4 bis 7,2 mm / -0,6 bis 1,8 mm*	18,0 mm	5,25/ 3,75 mm*
Änderung der Fugenspaltbreite	-20 bis 60 % = 80 % / 5 bis 15 % = 20 %*	75 %	25/ 35 %*
max. Fugenöffnungsgeschwindigkeit	0,01 (± 0,002) mm/min 0,6 mm/h	6,0 (± 0,25) mm/h 6,0 mm/h	0,1 (± 0,25) mm/360s 1,0 mm/h
Prüftemperatur	-30 bis +25 °C / -20 bis +25 °C*	-20 °C / 0 °C*	-25 / -20 °C*
Fixiertemperatur	11 °C		
Beregnung	20 % d. Prüfdauer	-	-
Vorkonditionierung	dyn. Belastung + Beregnung	-	14 Tage Wasserbad
Bewegungsablauf	dynamisch, linear	dynamisch, linear	dynamisch, diskontinuierlich
Anzahl der Zyklen	3	3	1
Bewertungskriterium	max. Spannung; Sichtprüfung	max. Spannung; Sichtprüfung	max. Spannung; Sichtprüfung; Spannung nach Relaxation (Typ N1)

*Prüfungsrandbedingungen für Fugenmassen des Typs N1 / Prüfungsrandbedingungen für Fugenmassen des Typs N2

Tab. 7: Prüfparameter zur Charakterisierung des Dehn- und Haftvermögens von Fugenmassen [22], [25], [28]

Abschnitt	Simulierte Jahreszeit	Fugenöffnung		Temperatur	Rel. Luftfeuchte	Berechnungszyklen	UV-Strahlung
		statisch	dynamisch				
1	Frühling	0 mm	$\pm 0,1$ mm f = 3 Hz	15 °C	von 40 % auf 60 %	0	100 %
2	Sommer	-1,0 mm	$\pm 0,1$ mm f = 3 Hz	50 °C	60 %	11 x 1 min mit 5 l/min	100 %
3	Herbst	0 mm	$\pm 0,1$ mm f = 3 Hz	15 °C	von 60 % auf 20 %	5 x 1 min mit 5 l/min	100 %
4	Winter	4,9 mm	$\pm 0,1$ mm f = 3 Hz	-20 °C	-	0	0
5	Frühling	0 mm		15 °C	20 %	0	100 %

Tab. 8: Beanspruchungsfunktion eines Jahreszyklus des Labor-Alterungsversuchs für PFM nach RECKNAGEL et. al [55]

Eine weitere von RECKNAGEL et. al im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen entwickelte Systemprüfung umfasst eine möglichst große Bandbreite der realen Systembeanspruchungen [55].

Im Fokus steht bei dieser Systemprüfung eine möglichst realitätsnahe Simulation des Systemverhaltens zur Vorhersage der Funktionsfähigkeit des gesamten Fugenfüllsystems (vgl. Bild 21).

Neben den langsam ablaufenden statischen Fugenspaltöffnungen in horizontale Richtung wird kontinuierlich eine horizontale, dynamische Belastung in das System induziert, welche die Verkehrsbelastung simulieren soll. Durch Variation der Fugenspaltöffnungsweite sowie des Temperatur-, Feuchtigkeits- und UV-Regimes werden in Abhängigkeit von der simulierten Jahreszeit unterschiedliche Belastungszustände beaufschlagt, wobei die Simulation eines Jahres eine Zeitdauer von 168 h umfasst (vgl. Tab. 8). Die Simulation von 10 Jahren dauert folglich an einer Probe 10 Wochen zzgl. Probenvorbereitung. Die Probekörper werden aus 500 x 200 x 100 mm großen Betonplatten gewonnen, wobei die Fugenspaltbreite des Probekörpers 15 mm beträgt. Aufgrund der Probekörperabmessungen können dementsprechend keine Prüfkörper aus Bestandsstrecken untersucht werden. [57]

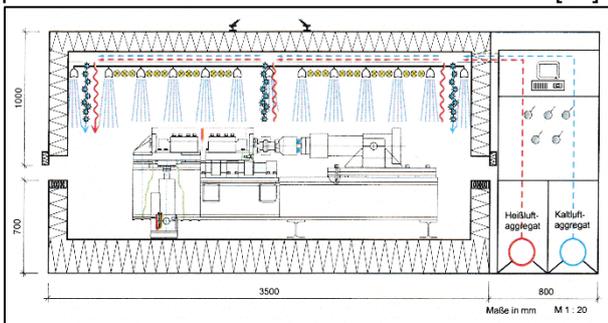


Bild 21: Systemzeichnung des Alterungsprüfstandes nach RECKNAGEL et. al [55] aus [57]

3 Untersuchungsprogramm

3.1 Projektablauf

3.1.1 Parameterstudie

Insgesamt wurden acht Fugenmassen in die Parameterstudie einbezogen. Neben den für die derzeitigen Probleme maßgebenden heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2, wurde eine heiß verarbeitbare Fugenmasse des Typs N1, eine heiß verarbeitbare Fugenmasse des sog. Typs N2+ (dieser Typ entspricht einer Fugenmasse des Typs N2, jedoch mit einer ZGV von 35 %) sowie zwei kalt verarbeitbare Fugenmassen in die Untersuchungen einbezogen. Von den heiß verarbeitbaren Fugenmassen wurden zunächst die rheologischen Kenndaten bestimmt sowie weitere physikalische Stoffeigenschaften ermittelt. In weiteren Laboruntersuchungen wurden gezielte Untersuchungen hinsichtlich des Alterungsverhaltens von Fugenmassen sowie möglicher Schadensmechanismen am gesamten Fugensystem durchgeführt. Neben den bereits im vorangegangenen Kapitel beschriebenen in-situ Bestandsaufnahmen (vgl. Tab. 5) wurden in der Parameterstudie zudem drei repräsentative Streckenabschnitte auf Bundesautobahnen für weitere Untersuchungen ausgewählt. Diese sollten nach Möglichkeit unterschiedliche Liegezeiten der Fugenmassen aufweisen. Nach einer in situ-Zustandserfassung dieser Abschnitte wurden Bohrkern aus dem Fugenbereichen für weitere Laboruntersuchungen entnommen. Um den Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen der Streckenabschnitte auf das Gesamtsystem Fuge zu minimieren, wurde bei der Wahl der Streckenabschnitte darauf geachtet, dass die Randbedingungen (ausgenommen der Liegezeit der Fugenmasse) weitestgehend vergleichbar waren. In Betracht kommende Streckenabschnitte sollten daher nach Möglichkeit u.a. folgende Randbedingungen erfüllen:

- gleiche Fugenmasse (Typ, Hersteller)

- gleiche ausführende Firma (gleiches Einbauregime)
- nachvollziehbare Witterungsverhältnisse während des Fugenvergusses

Die in diesen Parameterstudien gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse bildeten die Basis für die Entwicklung des kombinierten Prüfverfahrens, mit dem Fugenfüllsysteme zukünftig ganzheitlich und den idealisierten Randbedingungen der Praxis entsprechend bewertet werden können.

3.1.2 Festlegung des Prüfverfahrens

In der zweiten Stufe des Forschungsvorhabens wurden die Ergebnisse der Parameterstudie zusammengeführt. Dabei wurden die aus den Laboruntersuchungen generierten Daten mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche sowie den in situ-Zustandserfassungen verknüpft. Anhand der Ergebnisse wurde eine mögliche Gewichtung der einzelnen Einflussparameter vorgenommen. Diese wurden dann bei den weiteren Festlegungen des Prüfverfahrens berücksichtigt.

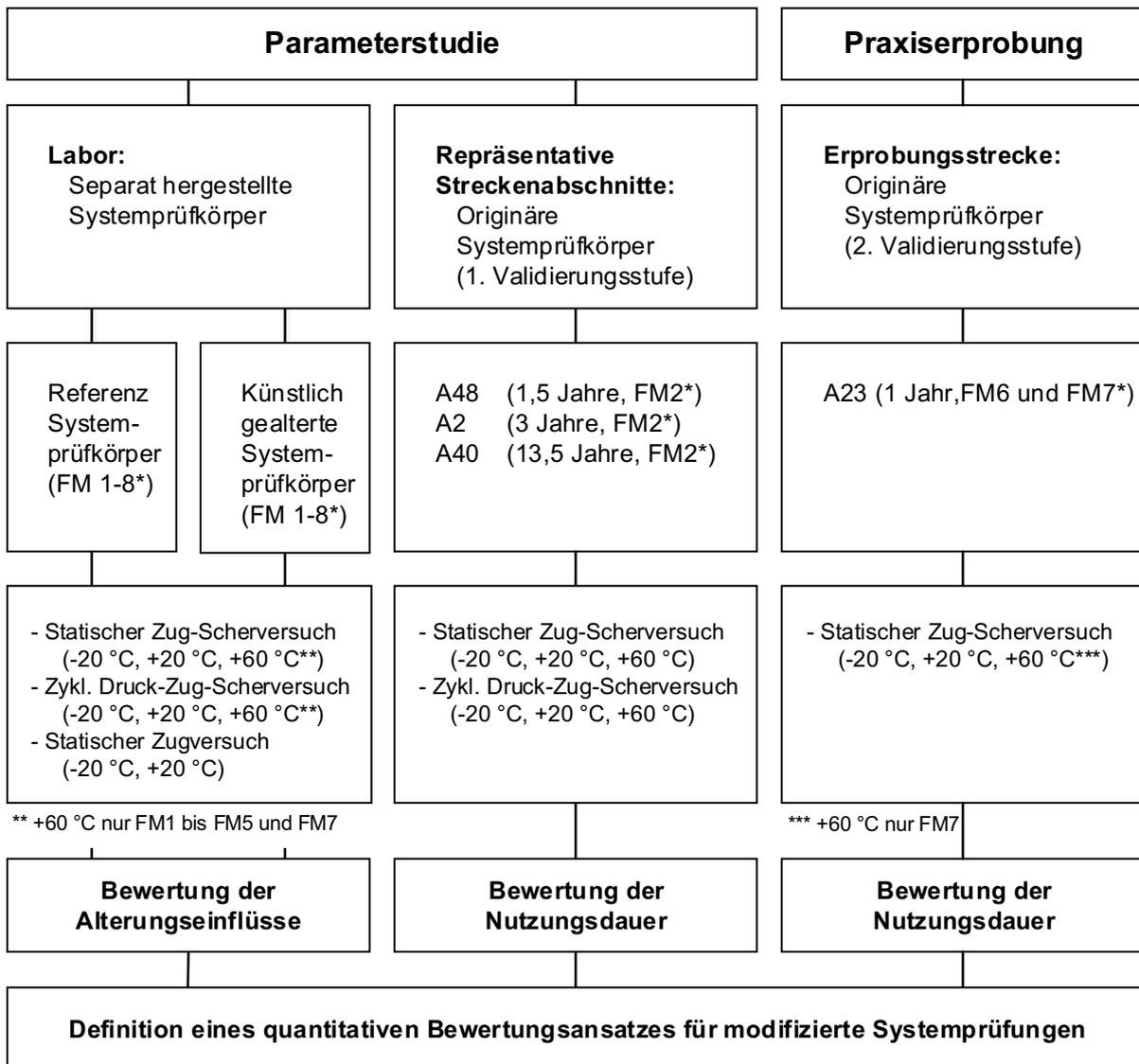
Für kombinierte Prüfverfahren wurden Prüfungen am gesamten Fugenfüllsystem durchgeführt. Zusätzlich wurden Untersuchungen an den Fugenmassen durchgeführt. Dabei wurden neben ausgewählten Standardprüfungen auch performanceorientierte Prüfungen wie die Bestimmung komplexer rheologischer Kennwerte analysiert.

Um das zu entwickelte Prüfverfahren einfach handhabbar und gleichzeitig robust zu gestalten, wurden einfache Geometrien der Systemprüfkörper angestrebt. An diesen Systemprüfkörpern, die sowohl als separate Probekörper im Labor herge-

stellt als auch aus Bohrkernen aus Betonfahrbahndecken gewonnen werden können, wurden in erster Linie statische Zug-/Scherversuche und zyklische Druck-/Zug-/Scherversuche durchgeführt. Daraus konnte anschließend die Dehn- und Stauchfähigkeit des Fugensystems abgeleitet werden. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit eines definierten Alterungsszenarios mit in die Systemprüfung integriert. Das angestrebte Ziel hierbei war die beschleunigte künstliche Alterung der Systemprüfkörper bzw. der Fugenmassen für einen realen Beanspruchungszeitraum von rd. 7 bis 10 Jahren zu simulieren. Die genauen Randbedingungen für die künstliche Alterung der Prüfkörper wurden aus den entsprechenden Erkenntnissen im Vorfeld der Parameterstudie definiert. Neben der genauen Beschreibung der Randbedingungen für ein kombiniertes Prüfverfahren wurde auf Grundlage der Parameterstudie ein erster Ansatz zur Festlegung von möglichen Bewertungskriterien vorgenommen.

3.1.3 Erste Validierung der Erkenntnisse an einer Erprobungsstrecke

In der dritten Stufe dieses Forschungsvorhabens erfolgte eine erste Bewertung der Validität des Prüfverfahrens, dabei wurden die Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen in situ an einer Erprobungsstrecke abgeglichen. Hierzu wurde ein Autobahnabschnitt ausgewählt, bei dem zeitnah entsprechende Fugenerhaltungsmaßnahmen vorgenommen wurden. Projekt- und organisationsbedingt wurde hierzu die Anlage von vier Testfeldern (vgl. Abschnitt 3.2.1) durchgeführt.



*vgl. Abschnitt 3.2.1

Bild 22: Ablaufschema des Untersuchungsprogramms

Bei dieser Maßnahme wurden die Fugenfüllsysteme über die gesamte Fahrbahnbreite erneuert. Somit war es möglich, die evtl. vorhandenen Auswirkungen der unterschiedlichen Verkehrsbelastungen in den einzelnen Fahrstreifen bzw. Standstreifen mit erfassen zu können. Die gesamte Sanierungsmaßnahme war rd. 4,2 km lang, wobei eine intensive Begutachtung stets in einem Abschnitt von etwa 800 m erfolgte.

In die wissenschaftlichen Untersuchungen wurde der gesamte 800 m-Abschnitt der Erprobungsstrecke einbezogen, detaillierte Studien und Messungen wurden hierbei in einzelnen, vorher festgelegten Messquerschnitten vorgenommen. Basierend auf den Erkenntnissen aus der Parameterstudie und möglichen Einflussfaktoren durch die Fugenvorbereitung wurde dazu in Abstimmung mit dem

Auftraggeber und den zuständigen Behörden im Voraus festgelegt, in welcher Form ein Untersuchungsprogramm zu realisieren ist.

Es handelt sich um eine Untersuchungsstrecke des BMVI, welche im Vorfeld durch die BAST konzipiert wurde. Die zu verwendenden Fugenfüllprodukte und Varianten der Vorbehandlung der Fugenflanken wurden durch die BAST festgelegt.

Vor der Erhaltungsmaßnahme wurde der Fugenzustand allgemein und detailliert in den ausgewählten Messquerschnitten (Fugengeometrie, Plattenversatz, etc.) erfasst. In den Messquerschnitten wurden zudem die horizontalen Fugenbewegungen, die Temperaturen in unterschiedlichen Tiefen der Betondecke sowie die Lufttemperatur über rd. 21 Monate erfasst, wobei dieser Zeit-

raum von Juli 2016 bis März 2018 zwei Winterperioden umfasste.

Nach einem Jahr Nutzungsdauer wurden im Juli 2017 aus geeigneten Fugenquerschnitten Bohrkern entnommen, an denen die festgelegten Systemprüfungen durchgeführt wurden. An Ausbauproben der heiß verarbeitbaren Fugenmassen wurden darüber hinaus die festgelegten standardisierten Stoffeigenschaften und rheologischen Kennwerte ermittelt. Anschließend wurde das entwickelte Prüfverfahren einschließlich der Prüfkriterien mit den Ergebnissen und Erfahrungen aus dieser Teststrecke abgeglichen, bzw. die Erkenntnisse, aufbauend auf den Ergebnissen der Bohrkernuntersuchungen der drei repräsentativen Streckenabschnitte aus der Parameterstudie, adaptiert.

3.2 Laboruntersuchungen an ausgewählten Fugenmassen

3.2.1 Auswahl der Fugenmassen

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag in der Betrachtung von plastisch eingestellten, heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2. Durch Integration von zwei kalt verarbeitbaren Fugenmassen, einer elastisch eingestellten, heiß verarbeitbaren Fugenmasse des Typs N1 sowie einer Masse entsprechend dem aktuellen Stand der Technik der Fugenmassen des Typs N2 (sog. Typ N2+), wurde die weitergehende Adaptierung und Eignung des Prüfverfahrens für Fugenfüllsysteme eruiert.

Folgende Fugenmassen wurden im Rahmen der Parameterstudie analysiert und eingesetzt:

- FM 1 – heiß verarbeitbare Fugenmasse Typ N1
- FM 2 – heiß verarbeitbare Fugenmasse Typ N2
- FM 3 – heiß verarbeitbare Fugenmasse Typ N2
- FM 4 – heiß verarbeitbare Fugenmasse Typ N2
- FM 5 – kalt verarbeitbare Fugenmasse Klasse 25
- FM 6 – heiß verarbeitbare Fugenmasse Typ N2+
- FM 7 – kalt verarbeitbare Fugenmasse Klasse 35
- FM 8 – heiß verarbeitbare Fugenmasse Typ N2 (Vergleichsprobe Produktionsjahr 2011)

Die Fugenmassen FM6 und FM7 wurden im Projektverlauf erst mit Umsetzung der Erprobungsstrecke in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Entsprechende Untersuchungsergebnisse an diesen Massen wurden durch die BAST zur Verfügung gestellt und in den Bericht implementiert.

Zum Zeitpunkt der Umsetzung der Erprobungsstrecke fanden die Fugenmassen FM1 bis FM5 keine Anwendung in Betonfahrbahndecken.

Zur Erweiterung des Bewertungshintergrundes wurde vom Forschungsnehmer die Fugenmasse FM8 in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen.

Hierdurch sollte ein Bewertungshintergrund auf Basis einer Fugenmasse aus dem Jahr 2011 erfolgen. Diese Fugenmasse wurde durch ein Mitglied des Betreuungsausschusses bereitgestellt.

3.2.2 Ermittlung ausgewählter Stoffeigenschaften

Im Rahmen der Parameterstudie wurden ausgewählte Stoffeigenschaften nach TP Fug-StB 15 [69] der verwendeten Fugenmassen analysiert. Dies erfolgt sowohl im frischen (Anlieferungszustand) als auch exemplarisch nach verschiedenen Alterungsstufen.

3.2.3 Rheologische Kenndaten der Fugenmassen

Die rheologischen Kennwerte komplexer Schermodul und Phasenwinkel wurden mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) in Anlehnung an [33] bestimmt. Die dieser Prüfung zugrunde liegenden Prüfparameter sind in der Tab. 8 aufgeführt. Es erfolgte stets eine Doppelbestimmung.

Mit den Ergebnissen der rheologischen Untersuchungen können theoretische Betrachtungen von Spannungs-Dehnungs-Zuständen in Fugensystemen bei unterschiedlichen Temperaturen abgeleitet werden, die wiederum bei der Auswahl geeigneter Randbedingungen der Systemprüfungen hilfreich sein können.

Prüfparameter zur Bestimmung der rheologischen Kennwerte mittels DSR	
Messsystem	Platte/Platte
Prüfart	weggesteuert / oszillierend
Vorgegebene Deformation	0,05 bis 1,0 %
Prüftemperaturbereich	-10 bis +70 °C
Prüfintervalle	10 °C
Zeit der Temperierung zwischen den Prüfintervallen	15 min
Probendurchmesser	8 mm
Spaltbreite	3 mm

Tab. 9: Prüfparameter zur Bestimmung der rheologischen Kennwerte mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR)

Neben der Bestimmung des Schermoduls und des Phasenwinkels (temperaturabhängige Veränderung der elastischen und viskosen Dehnungsanteile) können mit dem DSR Relaxationsversuche durchgeführt werden. Dabei wurde eine 5 mm dicke Probe der Fugenmasse in die Prüfgeometrie eingespannt und bis zu einer festgelegten Temperatur abgekühlt. Die Probe wurde mit einer Anfangszugkraft belastet und in dieser Position möglichst bis zur vollständigen Relaxation gehalten (Bild 23). Die der Prüfung zugrunde liegenden Prüfparameter sind in der Tab. 9 aufgeführt.

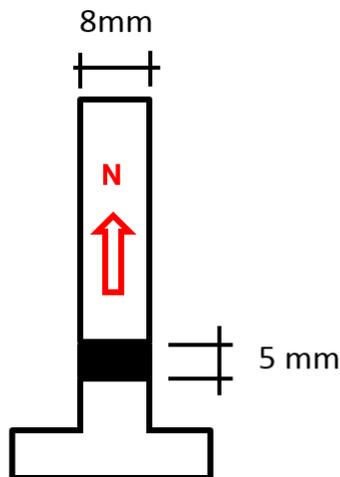


Bild 23: Schematischer Versuchsaufbau Relaxationsverhalten

Prüfparameter zur Bestimmung der Relaxationseigenschaften mittels DSR	
Messsystem	Platte/Platte
Prüfart	kraftgesteuert / statisch
Vorgegebene Dehnung	10 %
Relaxationszeit	120 min
Prüftemperatur	-10 °C
Probendurchmesser	8 mm
Spaltbreite	5 mm

Tab. 10: Prüfparameter zur Bestimmung der Relaxationseigenschaften mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR)

3.3 Entwicklung eines Alterungsszenarios

Um die Einwirkungen von Frost mit und ohne Taumittel im Winter auf das gesamte Fugensystem abzubilden, wurden Systemprüfkörper einer zyklischen Temperatur- und Frost-Tauwechsel-Belastung in Anlehnung an das CDF/CIF-Prüfverfahren [61] ausgesetzt. Abweichend davon wurde die Konzentration des Taumittels NaCl sowie die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel variiert.

Zur Vorsättigung wurden die Systemprüfkörper auf Abstandshaltern in einem verschlossenen Behälter mit Prüflösung für sieben Tage gelagert. Die Temperatur lag währenddessen stets bei $20 \pm 2^\circ\text{C}$. In geregelten Abständen wurde der Flüssigkeitsstand überprüft und gegebenenfalls nachreguliert. Nach dem kapillaren Saugen wurden die Systemprüfkörper für 28 Zyklen einer Frost-Tauwechsel-Belastung ausgesetzt. In Bild 24 ist ein Zyklus schematisch dargestellt.

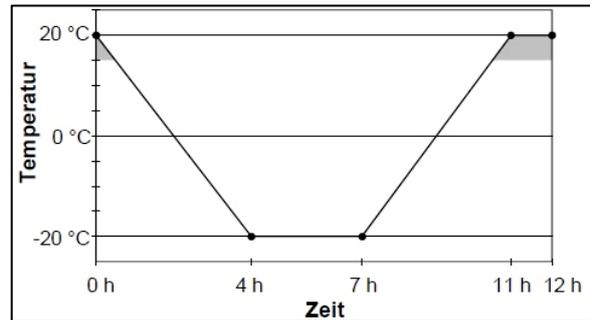


Bild 24: Frost-Tauwechsel-Zyklus nach [61]

Nach der Abfolge einer definierten Anzahl von Frost-Tauwechsel-Wechseln wurden an den Systemprüfkörpern die Haftzugfestigkeit mittels statischen Zug-/Scherversuch ermittelt. Durch den Vergleich mit einer Referenzprobe konnte somit das Schädigungspotential von Frost mit oder ohne Taumittelsatz auf das Fugenfüllsystem bewertet werden.

Einen hohen Einfluss auf chemische und strukturelle Veränderungen der Fugenmassen haben neben der Frost-Tauwechsel-Belastung die Einwirkung ultravioletter Strahlung und Temperaturbeanspruchungen.

Die Wirkmechanismen von UV-Strahlung innerhalb von hochmodifizierten, bitumenhaltigen Werkstoffen sind aktuell noch nicht hinreichend bekannt.

Aufgrund der absorbierten UV-Strahlung heizt sich das vollständige Fugenfüllsystem auf. Innerhalb des Fugenfüllsystems kommt es zu einem Temperaturgefälle, wobei die Temperatur an der Systemoberfläche am höchsten ist. Für eine realitätsnahe Abbildung der Belastung wurden Systemprüfkörper herangezogen. Diese wurden einer definierten Bestrahlungsdauer mit einer vorher festgelegten Strahlungsintensität ausgesetzt. Die Temperatur der Fugenmasse wurde während der Konditionierung diskontinuierlich gemessen und durfte 60°C nicht übersteigen. Veränderungen der Materialeigenschaften wurden anschließend qualitativ durch Sichtprüfung und quantitativ durch Systemprüfungen erfasst.

Die Erueierung einer realitätsnahen beschleunigten UV-Konditionierung erfolgte durch separate Voruntersuchungen. Die Parameter Strahlungsintensität und Bestrahlungsdauer wurden gemäß Tab. 10 variiert. Hierzu wurden die Fugenmassen in Anlehnung an [32] vorbereitet, sodass eine definierte und konstante Schichtdicke der Fugenmassen von 3 mm bestrahlt wurde. Die Veränderungen der elastischen und viskosen Anteile der Fugenmassen wurden nach der UV-Belastung mittels Dynamischen Scherrheometer ermittelt.

Zielwert	Reale Strahlungsintensität	4-fache Strahlungsintensität
1 Jahre	ca. 3800 MJ/m ² in 44 Tagen	ca. 3800 MJ/m ² in 11 Tagen
2,5 Jahre	falls erforderlich	falls erforderlich
5 Jahre	nicht vorgesehen	ca. 19000 MJ/m ² in 11 Tagen

Tab. 11: Variation der UV-Strahlung

Als Bezugswert diente die mittlere Globalstrahlung in Deutschland, welche im Zeitraum von 1981 bis 2010 eine mittlere Jahressumme von 1055 kWh/m² (3798 MJ/m²) aufwies [11]. Das eingesetzte UV-Bestrahlungssystem weist eine Strahlungsintensität von 135 W/m² auf. Bei realer Strahlungsintensität des Systems, ist somit die Simulation der durchschnittlichen Globalstrahlung eines Jahres in Deutschland innerhalb von 44 Tagen möglich (1056 kWh/m²). Die Simulation von 5 Jahren würde folglich 220 Tage in Anspruch nehmen und sollte aufgrund des hohen Zeitaufwandes soweit möglich und sinnvoll minimiert werden. Eine mögliche Zeitraffung der UV-Strahlung ist durch die Reduzierung der Oberfläche der Prüfkörper zur Strahlungsquelle möglich. Das $1/r^2$ -Abstandsgesetz der Bestrahlungsstärke belegt, dass die Bestrahlungsstärke mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt. Eine Halbierung des Abstandes zur Strahlungsquelle bedeutet folglich eine Erhöhung der Strahlungsintensität um den Faktor 4 [15]. Die Konditionierungsdauer reduziert sich somit auf 11 Tage zur Simulation eines Jahres (ca. 3800 MJ/m²) bzw. 55 Tage zur Simulation von 5 Jahren (ca. 19000 MJ/m²). Bezogen auf die mittlere Jahressumme von 1055 kWh/m² in Deutschland bedeutet die Reduzierung des Abstandes zur Strahlungsquelle eine theoretische Beschleunigung der UV-Alterung um den Faktor 33,2, gegenüber dem Faktor 8,3 bei der realen Strahlungsintensität. Zur Anwendung kam das Sonnenlichtsimulationssystem UVACUBE400 mit dem H2-Filter sowie dem SOL 500 Bestrahlungsgerät zur Simulation der natürlichen Sonnenstrahlung der Firma Dr. Hönle AG. Hierbei wird ein möglichst realitätsnahes Sonnenlichtspektrum im Wellenlängenbereich von 250 bis ca. 2.500 nm generiert.

Die beschleunigte Langzeit-Alterung von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln erfolgt im Labormaßstab nach DIN EN 14769 „Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV)“ [32]. Dieses Prinzip der Langzeit-Alterung wurde von der Bitumenanwendung für die Anwendung bei Fugenmassen übertragen. Ein unbewegter Fugenmassenfilm wurde für eine definierte Zeitspanne (65 h) auf eine vorgewählte

Temperatur erwärmt (85 °C). Eine zusätzliche Beschleunigung des Alterungsprozesses erfolgte durch die Einwirkung eines festgelegten Drucks (2,1 MPa = 21 bar) in einem Druckalterungsbehälter (Pressure Ageing Vessel – PAV). Somit können die thermischen Veränderungen, welchen das Bindemittel, respektive die Fugenmasse, während der Nutzung unterliegen, zeitraffend simuliert werden. Die Veränderungen der elastischen und viskosen Anteile der Fugenmassen wurden anschließend ebenfalls mittels Dynamischen Scherrheometer ermittelt.

Die Zusammenfassung der Vorkonditionierung aus Frost-Tauwechsel-Beanspruchung, UV-Strahlung sowie thermischer Langzeitbeanspruchung, sollen folglich eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Belastungen auf das Fugenfüllsystem wiedergeben, ohne extrem komplexe und aufwendige Prüfapparaturen vorhalten zu müssen.

3.4 Modifizierte Systemprüfungen

3.4.1 Probekörperherstellung und -gewinnung

Neben den Untersuchungen an den reinen Fugenmassen erfolgen weitere Untersuchungen an sogenannten Systemprüfkörpern, d.h. am System Beton–Fugenflanke–Voranstrich–Fugenmasse–Voranstrich–Fugenflanke–Beton (Bild 25). Um sowohl horizontale als auch vertikale Fugenbewegung zu erfassen, wird die Fuge unter einer Neigung von 1:3 zur Beanspruchungsrichtung angeordnet. Hierdurch können in den Zug-/Scherversuchen sowohl Zug- bzw. Druck- als auch Scherbeanspruchungen in dem Fugenfüllsystem abgebildet werden. Der Winkel α beträgt bei dieser Probekörpergeometrie 70 °. Somit sind sowohl die in der Theorie vorherrschenden horizontalen Fugenspaltöffnungsweiten von bis zu 3 mm, als auch die vertikalen Fugenspaltbewegungen von maximal 1 mm [46] praxisorientiert abgebildet.

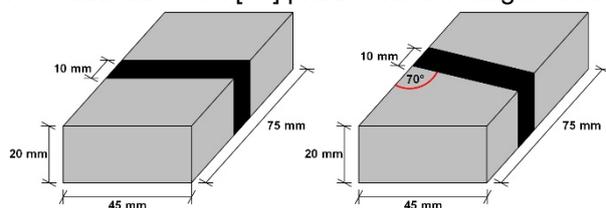


Bild 25: Abmessungen der Systemprüfkörper für den statischen Zugversuch (links) und den statischen Zug-/Scher- und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (rechts)

Mit den vorgesehenen Abmessungen von 45x75x20 mm³ war es möglich, Systemprüfkörper auch aus Bohrkernen, die zuvor aus den Fugenbereichen von bestehenden Betonfahrbahndecken entnommen wurden, gewinnen zu können. Aus einem Bohrkern mit einem Durchmesser von rd.

150 mm konnten dementsprechend zwei solcher Proben präpariert werden. Um ungestörte Systemprüfkörper zu gewährleisten, musste aufgrund der Teilung von Bohrkernen aus dem Fugenbereich (gerissene Querscheinfugen) sowohl bei der Bohrkernentnahme, als auch bei anschließender Probenpräparation eine gesonderte Sicherung erfolgen. Um ein Auseinanderklappen der Bohrkern nach der Bohrung zu vermeiden, wurde zuvor eine Stahlplatte über der geplanten Entnahmestelle fixiert. Dadurch wurde eine mögliche Störung des Fugensystems während der Entnahme verhindert. Nach der Entnahme des Bohrkerns wurde dieser zusätzlich fixiert. Um auch bei der darauffolgenden Gewinnung der Systemprüfkörper das Fugensystem nicht zu beschädigen, wurden die Probekörper nach dem in Bild 26 dargestellten Ablaufschema unter Verwendung adäquater Fixierungen präpariert.

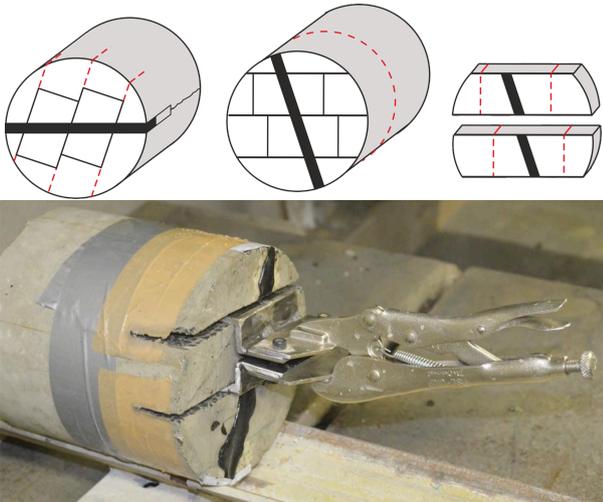


Bild 26: Ablaufschema Probekörpergewinnung

3.4.2 Durchführung der modifizierten Systemprüfungen

In dem ganzheitlichen Prüfverfahren sollten die maßgebenden Beanspruchungsszenarien eines Fugenfüllsystems, welche in Abschnitt 2.4 aufge-

zeigt sind, realitätsnah abgebildet werden. Zur Charakterisierung des Systemverhaltens der Fugenmassen wurden drei unterschiedliche Systemprüfungen durchgeführt:

- statischer Zugversuch ($\alpha = 90^\circ$)
- statischer Zug-/Scherversuch ($\alpha = 70^\circ$)
- zyklischer Druck-/Zug-/Scherversuch ($\alpha = 70^\circ$)

Für die Festlegung der exakten Randbedingungen bei der Prüfdurchführung wurden vorab die nachstehenden Einflüsse untersucht:

- Prüftemperatur
- Prüfgeschwindigkeit
- Breite des Fugenspalts
- Breite der Probe (= Fugenspaltlänge)
- Zyklische Beanspruchung

Die Durchführung der Tastversuche erfolgte in Universalprüfmaschinen unter konstanten Temperaturbedingungen. Für die Untersuchungen der Parameterstudie sowie der Praxisvalidierung (Abschnitte 4.4, 4.5, 5.2 und 6.6.2) wurde ein Mehrfachprüfstand konzipiert (Bild 27).

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Tastversuche erfolgte die Festlegung der Prüfsystematik zur Charakterisierung der einzelnen Fugenmassen FM1 bis FM8. Hierzu wurde die Haftzugfestigkeit im statischen Zugversuch und Zug-/Scherversuch ermittelt. Zusätzlich wurde nach einer zyklischen Druck-/Zug-/Scherbeanspruchung die Resthaftzugfestigkeit des Fugenfüllsystems bestimmt. Die Untersuchungen wurden sowohl an im Labor hergestellten Systemprüfkörpern (im Referenzzustand und nach der künstlichen Alterung), als auch an Systemprüfkörpern der ausgewählten Streckenabschnitte (A2, A23, A40 und A48) durchgeführt.

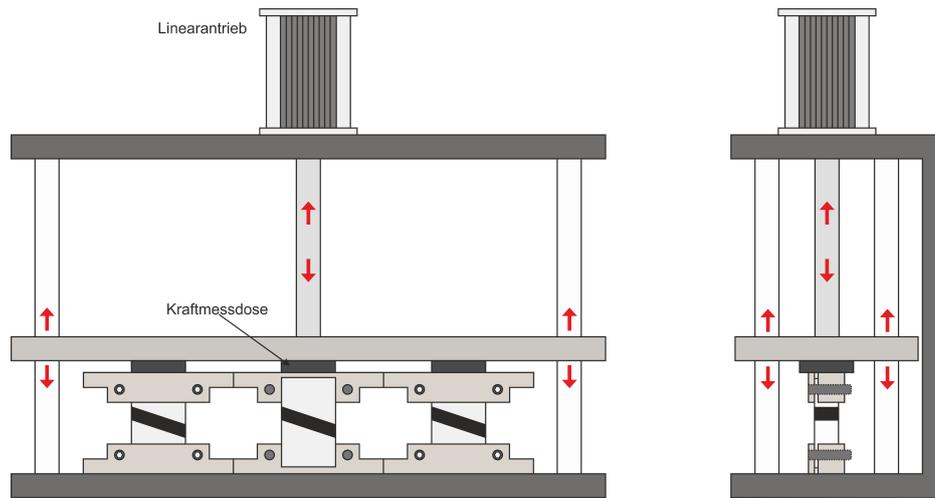


Bild 27: Systemzeichnung des Mehrfachprüfstands der Ruhr-Universität Bochum

4 Parameterstudie

4.1 Eigenschaften der ausgewählten Fugenmassen

4.1.1 Physikalisch-stoffliche Eigenschaften

Im Projektverlauf wurden die Fugenmassen FM6 bis FM8 in dem Prüfprogramm ergänzt, daher wurden nicht alle Voruntersuchungen und stofflichen Eigenschaften an den ergänzten Fugenmassen durchgeführt. Die nachfolgenden Untersuchungen sind darüber hinaus für die Untersuchung von kalt verarbeitbaren Fugenmassen (FM5 und FM7) nicht geeignet.

Die stoffliche Zusammensetzung wurde aufgrund des hohen Polymeranteils in Anlehnung an [35] mit verlängerten Anlöszeiten ermittelt. Abweichend erfolgte ein zusätzliches Dekantierverfahren über ein Sieb mit einer Maschenweite von 0,063 mm.

Probe	Extrahierbarer Bindemittelanteil	Nicht extrahierbarer organischer Anteil	Mineralischer Anteil (Füller, < 0,063 mm)
FM1	99,2 M.-%	0,8 M.-%	0,0 M.-%
FM2	77,2 M.-%	10,6 M.-%	12,2 M.-%
FM3	69,4 M.-%	15,5 M.-%	15,1 M.-%
FM4	67,9 M.-%	17,2 M.-%	14,9 M.-%

Tab. 12: Stoffliche Zusammensetzung der Fugenmassen

Auffällig ist der hohe Anteil extrahierbaren Bindemittels bei der Fugenmasse des Typs N1. Diese Masse weist keine mineralischen Anteile und nur einen sehr geringen Anteil nicht extrahierbarer organischer Anteile > 0,063 mm auf. Die Fugenmassen des Typs N2 weisen untereinander eine vergleichbare stoffliche Zusammensetzung auf. Die Anteile nicht extrahierbarer organischer Be-

standteile liegt zwischen 10,6 und 17,2 M.-%. Der Füller-Anteil beträgt 12,2 bis 15,1 M.-%.

FM	Nadelpenetration	Konuspenetration	EP RuK
[-]	[1/10 mm]	[1/10 mm]	[°C]
FM1	71,6	82,6	104,1
FM2	61,5	67,0	94,6
FM3	57,2	59,3	98,0
FM4	67,0	65,5	92,2
FM6	64,0	57,1	103,4
FM8	61,2	50,2	95,1

Tab. 13: Messwerte Nadelpenetration und EP RuK (Anlieferungszustand)

Die Messwerte der Nadelpenetration, der Konuspenetration und der Bestimmung des Erweichungspunktes mit dem Ring und Kugel-Verfahren im Anlieferungszustand sind in der Tab. 13 aufgeführt. Tab. 14 zeigt die Messwerte Nadelpenetration und der Bestimmung des Erweichungspunktes mit dem Ring und Kugel-Verfahren nach der Wärmealterung nach TP Fug-StB [68].

FM	Nadelpenetration	EP RuK
[-]	[1/10 mm]	[°C]
FM1	76,7	104,4
FM2	66,1	97,4
FM3	53,1	95,7
FM4	75,4	94,0

Tab. 14: Messwerte Nadelpenetration und EP RuK nach der Wärmealterung nach TP Fug-StB [68]

Zur Charakterisierung der Tieftemperaturperformance der Fugenmassen wurden zusätzlich zu den Untersuchungen mit dem Dynamischen

Scherrheometer Untersuchungen mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) nach [34] durchgeführt. Die Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit (S) sowie die Neigung der Tangente des Kurvenverlaufes der Biegekriechsteifigkeit (m-Wert) sind die Bewertungsgrößen dieses Versuchs. Die Ergebnisse der BBR-Untersuchungen sind in Tab. 15 aufgelistet. Aufgrund des komplexen Materialverhaltens (unter anderem der geringen Biegekriechsteifigkeit) ist eine Messung nicht in allen Fällen möglich gewesen.

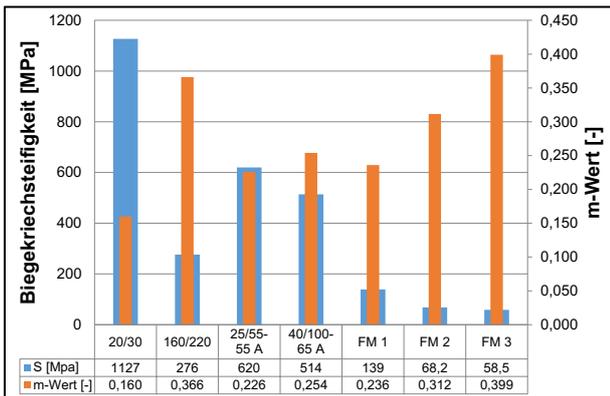


Bild 28: Darstellung der BBR-Ergebnisse bei -25 °C

Die Ergebnisse der BBR-Untersuchungen bei -25 °C sind für die Fugenmassen FM1 bis FM3 in Bild 28 dargestellt. FM4 und FM6 wiesen dagegen eine zu geringe Steifigkeit zur Durchführung der BBR-Messung auf und waren nicht messbar. Es ist ersichtlich, dass die Fugenmassen ein differenzierendes Materialverhalten gegenüber klassischen Straßenbaubitumen und polymermodifizierten Bitumen aufweisen. Die Steifigkeit der Fugenmassen FM1 bis FM3 ist deutlich geringer als die Steifigkeit eines weichen Straßenbaubitumens (160/220). Der m-Wert der Fugenmassen liegt ferner über dem m-Wert eines hoch-polymermodifizierten Bitumens (40/100-65 A).

Eine Prüfung der Fugenmassen nach der Wärmealterung nach TP Fug-StB [68] war aufgrund der zu geringen Steifigkeiten nicht möglich. Das BBR erwies sich zur Prüfung von Fugenmassen somit als nicht zweckmäßig. Ergänzend ist anzumerken, dass sich die Probekörperherstellung der Prüfkörper (Abmessungen: 6,4 x 12,7 x 127 mm) mit heiß verarbeitbaren Fugenmassen aufgrund der vergleichsweise hohen Viskosität als sehr schwierig erwiesen hat.

Probe	T	Anlieferungszustand		Wärmealterung nach TP Fug-StB	
		S	m-Wert	S	m-Wert
[-]	[°C]	[MPa]	[-]	[MPa]	[-]
FM1	-10	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	-16	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	-25	139	0,236	n.m.	n.m.
FM2	-10	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	-16	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	-25	68,2	0,3115	n.m.	n.m.
FM3	-10	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	-16	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	-25	58,5	0,399	59,45	0,398
FM4	-10	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	-16	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
	-25	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
FM6	-10	n.m.	n.m.	-	-
	-16	n.m.	n.m.	-	-
	-25	n.m.	n.m.	-	-

n.m. = nicht messbar, Proben wiesen eine zu geringe Steifigkeit zur Durchführung der BBR-Messung auf

Tab. 15: Ergebnisse der BBR-Untersuchungen

4.1.2 Rheologische Eigenschaften

Viskose und elastische Anteile

Die Untersuchung der Ausgangsproben erfolgte an den heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM1 bis FM4, FM6 und FM8. Bild 29 zeigt exemplarisch die frequenzabhängige Verschiebung der Isochronen des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels (gestrichelte Linie) für den Gebrauchstemperaturbereich von -10 bis +70 °C.

Die rheologische Kennwerte der Fugenmassen sind in Bild 30 bis Bild 33 abgebildet.

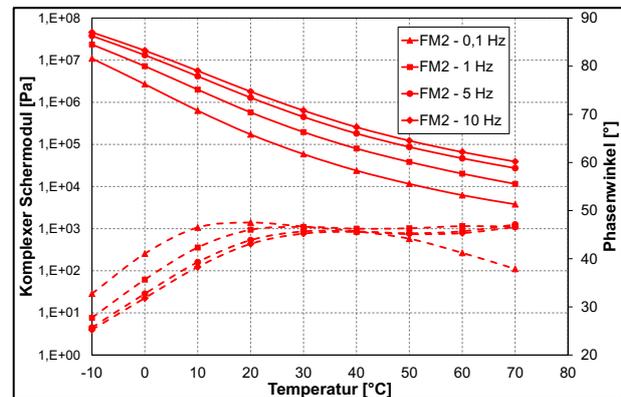


Bild 29: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel FM2

Es ist festzustellen, dass mit ansteigender Prüffrequenz und sinkender Prüftemperatur der komplexe Schermodul zunimmt. Dieses Materialverhalten entspricht den bekannten Eigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln. Bindemittel mit hohem Modifizierungsgrad unterscheiden sich maßgeblich durch das Verhältnis zwischen den elastischen und viskosen Anteilen. Bei unterschiedlichen Frequenzen wird ein differenziertes viskoelastisches Materialverhalten angesprochen. Ein rein elastischer Festkörper weist einen Phasenwinkel von 0° auf. Handelt es sich um eine rein viskose Flüssigkeit, liegt der Phasenwinkel bei 90° .

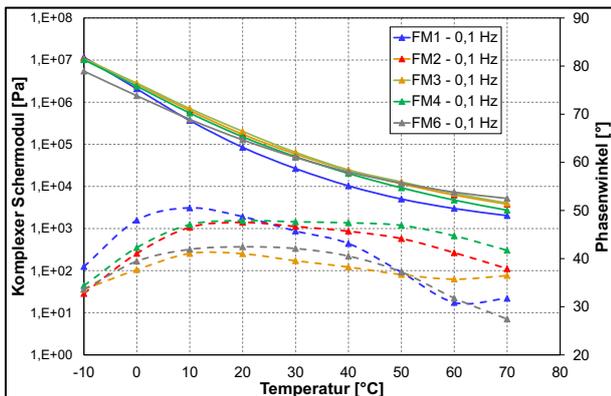


Bild 30: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel bei 0,1 Hz

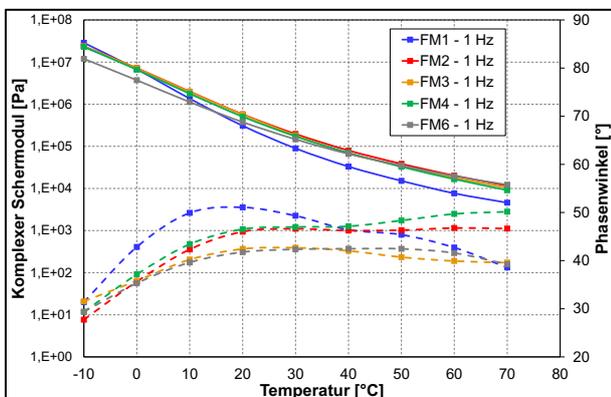


Bild 31: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel bei 1 Hz

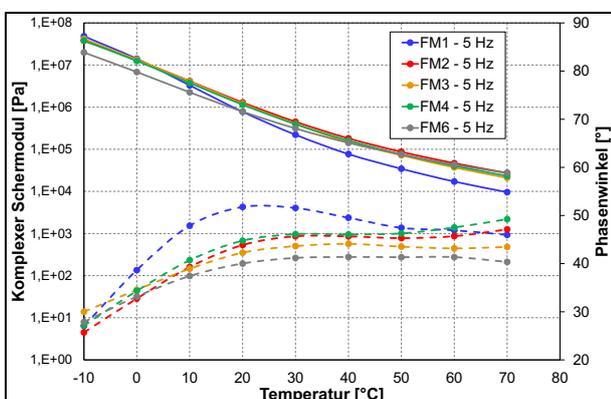


Bild 32: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel bei 5 Hz

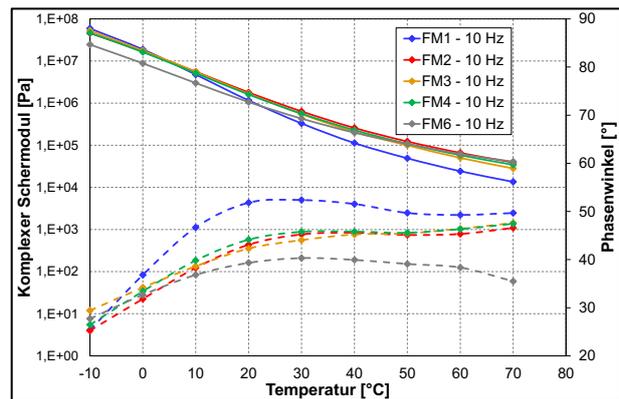


Bild 33: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel bei 10 Hz

Wie in Bild 9 (Abschnitt 2.3.1) dargestellt, verhält sich der Speichermodul (elastischer Anteil) antiproportional gegenüber dem Phasenwinkel. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass mit zunehmendem Phasenwinkel der viskose Anteil steigt. Alle Fugenmassen weisen im Temperaturbereich $< 20^\circ\text{C}$ (FM1 und FM3) bzw. $< 30^\circ\text{C}$ (FM2, FM4 und FM6) mit abnehmender Frequenz eine Zunahme des viskosen Anteils auf, während sich dieses Materialverhalten bei höheren Temperaturen umkehrt. Dieses Materialverhalten ist durchaus typisch für bitumenhaltige Massen mit hohem Elastomeranteil.

Ein relativ ausgeprägtes Plateau des Phasenwinkels über die Temperaturspanne von 20°C ($0,1\text{ Hz}$) bzw. 30°C (10 Hz) bis 50°C ($0,1\text{ Hz}$) bzw. (70°C) prognostiziert ein gleichbleibendes Verhältnis zwischen elastischen und viskosen Anteilen der Fugenmassen vom Typ N2. Aufgrund eines geringeren komplexen Schermoduls bei höheren Temperaturen reduzieren sich jedoch auch die Absolutwerte des Speicher- bzw. Verlustmoduls.

Aufgrund der Ergebnisse kann den vier Fugenmassen des Typs N2 (FM2 bis FM4) ein vergleichbares Steifigkeitsverhalten zugeordnet werden. Die Fugenmasse Typ N1 weist bei Temperaturen $< 0^\circ\text{C}$ eine frequenzunabhängige, geringfügig höhere Steifigkeit gegenüber den Fugenmassen Typ N2 auf. Dieses Verhältnis wechselt ab ca. 0°C .

Bei hochfrequenten Belastungen ist aufgrund des Phasenwinkels eine klare Unterscheidung zwischen den Fugenmassen Typ N1 und N2 möglich. Die Differenzierung zwischen den Fugenmassen des Typs N2 (FM2, FM3 und FM4) ist erst bei geringen Frequenzen (1 Hz und $0,1\text{ Hz}$) möglich. Die Unterschiede der Phasenwinkel werden dabei mit sinkender Frequenz ausgeprägter.

Von den vier untersuchten Fugenmassen des Typs N2 weist FM6 ein differenziertes Steifigkeitsverhalten auf. Der komplexe Schermodul ist im Temperaturbereich von -10°C bis ca. 40°C im

Vergleich zu den weiteren Fugenmassen des Typs N2 geringer. Dieses Verhalten ist frequenzunabhängig festzustellen und kehrt sich bei einer Temperatur von ca. 40 °C bei den Frequenzen 0,1 Hz und 1 Hz um. Der flachere Verlauf des komplexen Schermoduls in Abhängigkeit von der Prüftemperatur im Vergleich zu den weiteren Fugenmassen des Typs N2 lässt in Kombination mit dem geringen Phasenwinkel einen höheren Polymergehalt vermuten.

Ein Frequenzspektrum von 0,1 Hz bis 10 Hz bildet ein typisches Belastungsprofil, welches durch Verkehrsbeanspruchungen induziert wird. Temperaturbedingte Bewegungszyklen der Betonplatten liegen jedoch in einem deutlich geringeren Frequenzbereich. Eine Tagesganglinie entspricht einer Frequenz von ca. $1,16 \cdot 10^{-5}$ Hz, die Frequenz einer Jahresganglinie liegt bei ca. $3,21 \cdot 10^{-8}$ Hz.

Relaxationsverhalten

Zur Erfassung der rheologischen Eigenschaften bei Frequenzen nahe 0 wurde das Relaxationsverhalten der Fugenmassen nach Abschnitt 3.2.3 bei einer Belastung von 10 N ($0,2 \text{ N/mm}^2$) bestimmt. Bild 34 zeigt, dass FM1 einen vergleichbaren Relaxationsverlauf wie FM2 und FM3 aufweist. FM4, ebenfalls eine Fugenmasse Typ N2, unterscheidet sich deutlich von den anderen Massen und weist ein signifikant ausgeprägtes Relaxationsverhalten zu Beginn der Entlastung auf, welches sich nach 120 Minuten FM1 bis FM3 annähert. Die benötigte Zeit zur Reduzierung der Spannung durch materialinterne Umlagerungen und Wirkmechanismen um 80 % differiert zwischen den Fugenmassen Typ N2 um über 130 %. FM3 und FM4 unterscheiden sich um den Faktor 13,4, FM3 und FM2 um den Faktor 2,2 (vgl. Tab. 11).

Diese Erkenntnis war aufgrund der Ergebnisse des Komplexen Schermoduls sowie des Phasenwinkels so nicht zu erwarten, da die elastischen und viskosen Materialanteile der drei Fugenmassen Typ N2 bei 0,1 Hz bei -10 °C ein vergleichbares Materialverhalten prognostizieren.

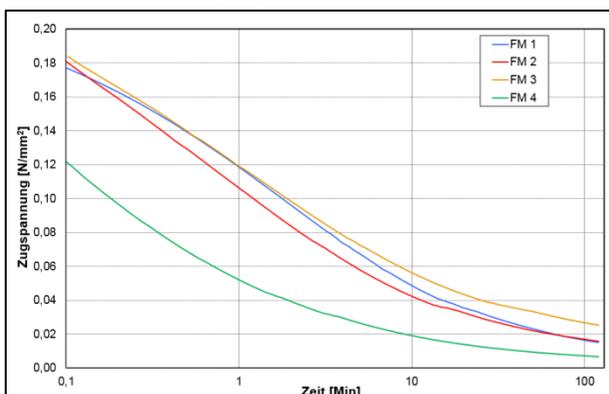


Bild 34: Relaxationsverhalten bei -10 °C

Zeitdauer bis X % der Anfangsspannung			
Probe	X = 80 %	X = 50 %	X = 20 %
FM1	11 sec	1 min 26 sec	12 min 9 sec
FM2	12 sec	1 min 13 sec	11 min 32 sec
FM3	15 sec	1 min 57 sec	25 min 50 sec
FM4	3 sec	0 min 11 sec	1 min 56 sec

Tab. 16: Relaxationskennwerte der Fugenmassen

Extrahierte Fugenmassen

Die rheologischen Untersuchungen der extrahierten Fugenmassen mittels DSR zeigen, dass sowohl bei den Fugenmassen des Typs N2 als auch bei der Fugenmasse des Typs N1 eine deutliche Veränderung der elastischen und viskosen Anteile vorliegt.

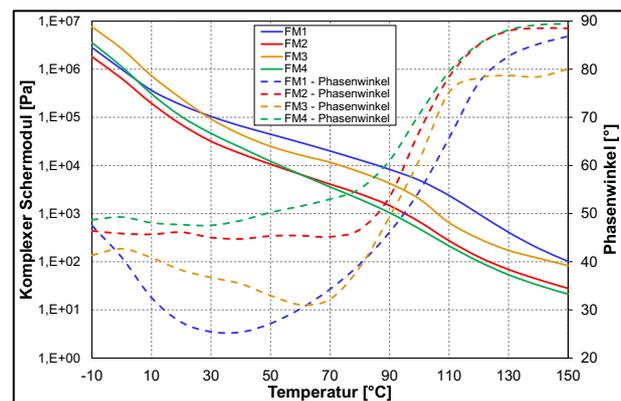


Bild 35: Komplexer Schermodul und Phasenwinkel bei 1,59 Hz und 2 mm Spaltabstand nach der Extraktion

Aufgrund der extrahierten Polymere und mineralischen Bestandteile kommt es zu einer Verschiebung des Phasenwinkels und des komplexen Schermoduls (vgl. Bild 35). Die Ergebnisse des rückgewonnenen Anteils der Fugenmasse zeigen, dass ein quantifizierter Vergleich der Fugenmasse mittels Prüfung an der gesamten Fugenmasse erfolgen sollte. Eine rheologische Prüfung der rückgewonnenen Bestandteile der Fugenmasse ist folglich nicht zielführend und sollte vermieden werden.

4.2 Definition eines Alterungsszenarios

4.2.1 Einfluss der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung

Um die maßgebende NaCl-Konzentration der Prüflösung für eine praxisnahe Beanspruchung der Fugenmasse eruiieren zu können, wurden in einer ersten Versuchsreihe die Konzentrationen der

Prüflösung für eine Frost-Tauwechselbeanspruchung in den CDF/CIF-Prüfungen wie folgt variiert:

- Prüflösung 1: demineralisiertes Wasser
- Prüflösung 2: 1%-NaCl-Lösung
- Prüflösung 3: 3%-NaCl-Lösung

Nach 4, 8, 14 und 28 Frost-Tauwechseln (FTW) wurden an jeweils 3 Systemprüfkörpern statische Zug-/Scherversuche bei +20 °C durchgeführt. Dabei wurde die Fuge um 300 % gedehnt. Der Verlauf der sich dabei einstellenden Spannungen ist exemplarisch für Prüflösung 3 in Bild 36 dargestellt.

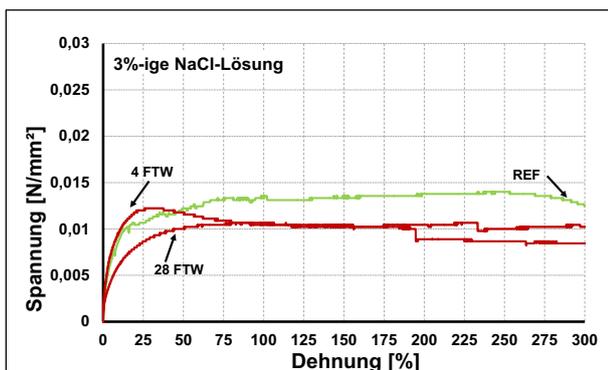


Bild 36: Statischer Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechselbeanspruchung (FM4, +20 °C, 1,0 mm/min)

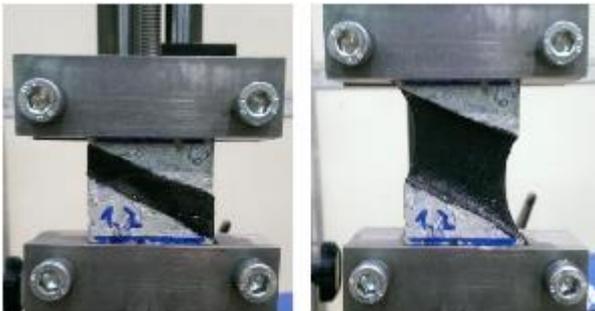


Bild 37: Statischer Zug-/Scherversuch an einem Systemprüfkörper nach Frost-Tauwechselbeanspruchung

Auffallend war, dass selbst nach 28 Frost-Tauwechseln in einer 3%-NaCl-Lösung keine signifikanten Schäden im Fugenfüllsystem hervorgerufen wurden. In Bild 37 ist deutlich zu erkennen, dass selbst bei einer überproportionalen Fugendehnung keine Haftverluste oder ein kohäsives Materialversagen festzustellen waren.

In einer weiteren Prüfreihe wurden Prüfkörper, die vorher Frost-Tauwechseln mit einer 3%-NaCl-Lösung (Prüflösung 3) unterzogen worden waren, bei -20 °C in statischen Zug-/Scherversuchen untersucht. Die Proben wurden nach 14 Frost-Tauwechseln (B4) und nach 28 Frost-Tauwechseln (B5) geprüft. In den nachfolgenden Bildern (Bild 38 bis Bild 41) sind die ermittelten Spannungs-Dehnungsdiagramme dargestellt.

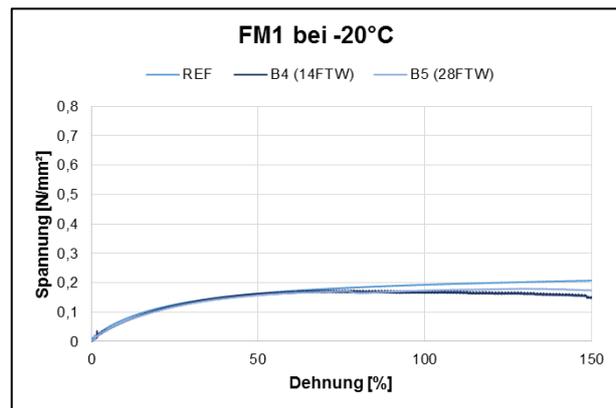


Bild 38: Statischer Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechselbeanspruchung (FM1, -20°C, 0,1 mm/min)

FM1 (-20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,24	299,8
B4	0,17	72,6
B5	0,18	129,9

Tab. 17: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechselbeanspruchung (FM1, -20°C, 0,1 mm/min)

Für FM1 konnte bei der -20 °C Prüfung kein signifikanter Einfluss der Frost-Tauwechselbeanspruchung erkannt werden. Das Spannungsmaximum fiel zwar nach 28 FTW geringfügig niedriger aus als bei der Referenzprobe ohne Frost-Tauwechselbeanspruchung (Bild 38, Tab. 17) jedoch konnten an den Fugensystemen visuell keine Ablösungen oder Schäden festgestellt werden. Bei FM2 fiel das Spannungsmaximum nach der Frost-Tauwechselbeanspruchung gegenüber der zugehörigen Referenz um bis zu rd. 10 % größer aus (Bild 39, Tab. 18). Nach 14 FTW begann die Fugenmasse ab einer Dehnung von etwa 28 % adhäsiv zu versagen. Nach 28 FTW konnte dieses Versagensbild bereits ab einer Dehnung von rd. 18 % beobachtet werden. Fugenmasse FM3 zeigte nach 14 FTW einen ähnlichen Verlauf der Spannungsentwicklung im Bezug zur Referenz. Nach 28 FTW versagte die Fugenmasse bereits schon ab einer Dehnung von rd. 20 % adhäsiv. Das Spannungsmaximum fiel dabei auf rd. 0,51 N/mm² ab (Bild 40 und Tab. 19).

Bei FM4 waren nach 14 FTW noch keine signifikanten Schäden am Fugensystem entstanden. Nach 28 FTW hingegen fiel die maximal aufnehmbare Spannung um rd. 37 % ab, gleichzeitig begann sich die Fugenmasse von den Fugenflanken zu lösen (Bild 41, Tab. 20).

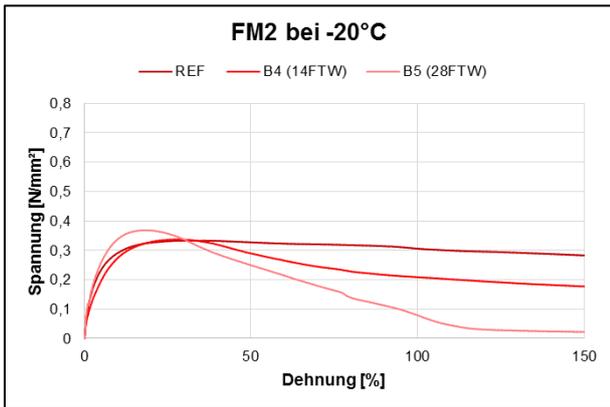


Bild 39: Statischer Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

FM2 (-20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,33	33,7
B4	0,34	27,8
B5	0,37	17,7

Tab. 18: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

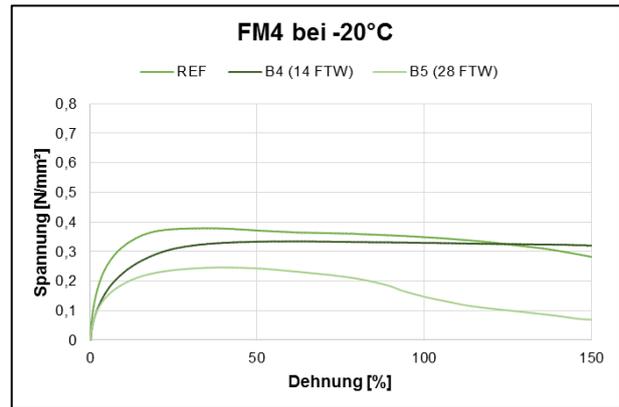


Bild 41: Statischer Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (FM4, -20°C, 0,1 mm/min)

FM4 (-20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,38	33,3
B4	0,33	62,5
B5	0,25	37,7

Tab. 20: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (FM4, -20°C, 0,1 mm/min)

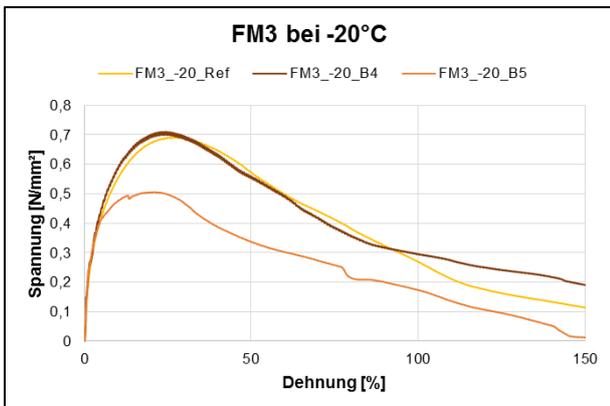


Bild 40: Statischer Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (FM3, -20°C, 0,1 mm/min)

FM3 (-20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,69	27,4
B4	0,71	24,1
B5	0,51	20,9

Tab. 19: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach Frost-Tauwechsel-Beanspruchung (FM3, -20°C, 0,1 mm/min)

4.2.2 Einfluss der Temperatureinwirkung

Der Einfluss einer beschleunigten Langzeitalterung durch Druck- und Temperaturbeanspruchung auf Fugenmassen wurde, wie in Abschnitt 3.3 erläutert, in Anlehnung an [32] durchgeführt. Die Alterung im Druckbehälter erfolgte für 65 h bei 85 °C und 21 bar. In Bild 42 bis Bild 45 ist das rheologische Verhalten nach der Konditionierung mit Hilfe des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels dokumentiert. Der Vergleich der unkonditionierten und konditionierten Fugenmassen bei den Prüffrequenzen von 0,1 Hz und 10 Hz zeigte bei den vier Fugenmassen (FM1 bis FM4) zum Teil deutliche Veränderung nach der PAV-Konditionierung. Das Alterungsverhalten war u.a. stark durch die Veränderung der Polymerstrukturen geprägt, darüber hinaus waren ebenfalls Einflüsse der Bitumenalterung (Bitumenverhärtung) festzustellen.

Die Fugenmasse des Typs N1 (FM1) wies deutliche Effekte durch die Konditionierung auf (vgl. Bild 42). Die Reduzierung des Phasenwinkels war sowohl bei 0,1 Hz als auch bei 10 Hz nachweisbar. FM1 zeigte darüber hinaus eine deutliche Erhöhung des komplexen Schermoduls, vorrangig im Temperaturbereich zwischen 0 und 70 °C, welche auf eine Alterung des Bitumens aufgrund der thermischen Beanspruchung zurückzuführen ist. Die sehr geringe Reduzierung des komplexen Schermoduls bei -10 °C von FM2 (Bild 43) ist

hingegen eher auf die Veränderung der Polymerstrukturen zurückzuführen. Dies spiegelte sich auch in der Veränderung des Phasenwinkels wieder.

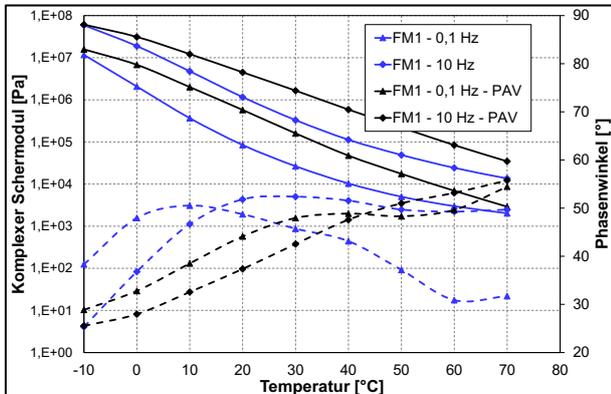


Bild 42: Rheologische Kenngrößen nach der PAV-Konditionierung (FM1)

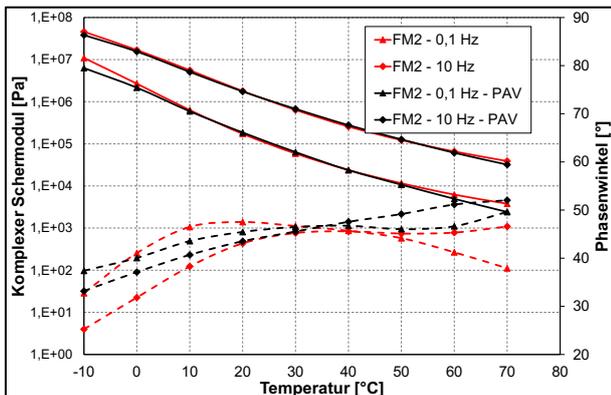


Bild 43: Rheologische Kenngrößen nach der PAV-Konditionierung (FM2)

FM3 (Bild 44) wies im tiefen Temperaturbereich eine geringere Abhängigkeit gegenüber den Polymeren auf. Bei Temperaturen über ca. 15 °C wurde ebenfalls eine Verschiebung der viskosen und elastischen Anteile innerhalb der Fugenmasse deutlich. Die Erhöhung des komplexen Schermoduls war ebenfalls eher gering und zeigte einen geringen Einfluss der Bitumenalterung durch die Erhöhung des Widerstandes gegen eine erzwungene Verformung. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Fugenmasse FM4 (Bild 45) zeigten ein vergleichbares Alterungsverhalten wie FM2. Die Verschiebung des Phasenwinkels lies eine Polymerdegradation erkennen, durch den Polymerabbau lässt sich ebenfalls die Reduzierung des komplexen Schermoduls im Temperaturbereich < 30 °C erklären.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Fugenmassen zum Teil sehr unterschiedlich auf die PAV-Konditionierung reagierten.

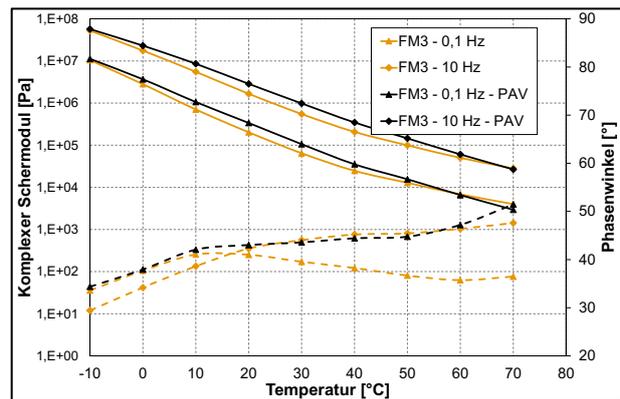


Bild 44: Rheologische Kenngrößen nach der PAV-Konditionierung (FM3)

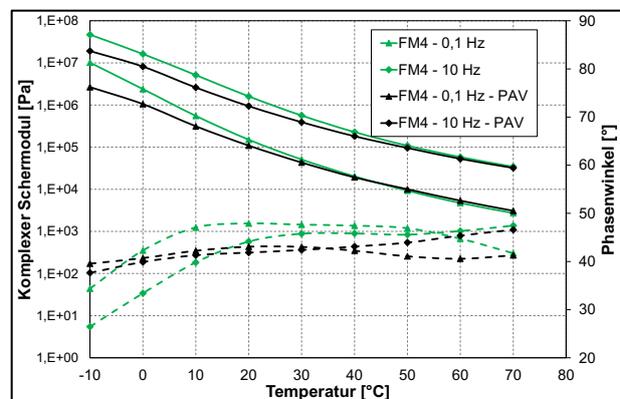


Bild 45: Rheologische Kenngrößen nach der PAV-Konditionierung (FM4)

Ein weiterer Ansatz der Temperaturbeanspruchung wird in den TP Fug-StB 01 [68] beschrieben. Die Wärmealterung gemäß TP Fug-StB 01 beschreibt ebenfalls eine thermische Beanspruchung der Fugenmasse. Im Vergleich zu der PAV-Konditionierung weist die im Regelwerk beschriebene Alterung eine geringere thermische Beanspruchung der Fugenmasse auf. Die Fugenmasse wird gemäß [68] bei $(70 \pm 1)^\circ\text{C}$ für (168 ± 2) h thermisch beansprucht.

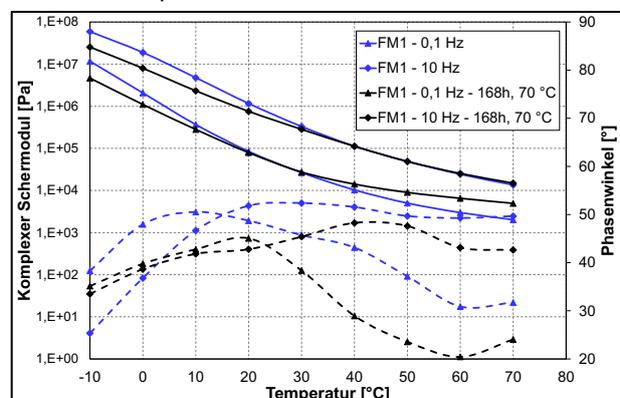


Bild 46: Rheologische Kenngrößen nach der Wärmealterung gemäß TP Fug-StB 01 (FM1)

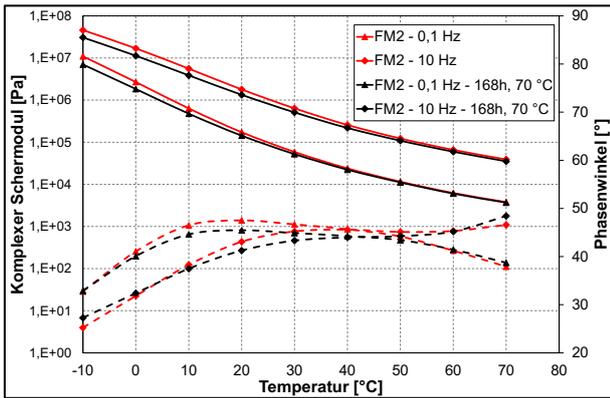


Bild 47: Rheologische Kenngrößen nach der Wärmealterung gemäß TP Fug-StB 01 (FM2)

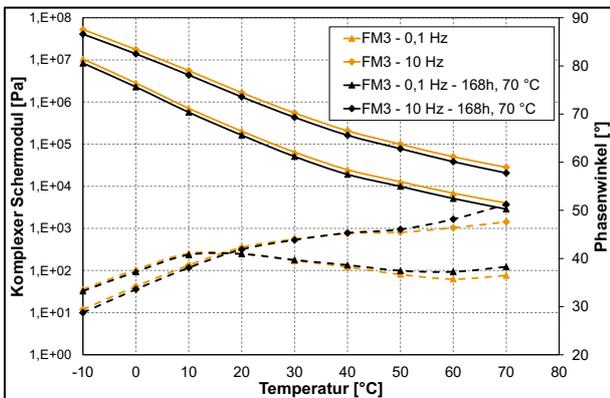


Bild 48: Rheologische Kenngrößen nach der Wärmealterung gemäß TP Fug-StB 01 (FM3)

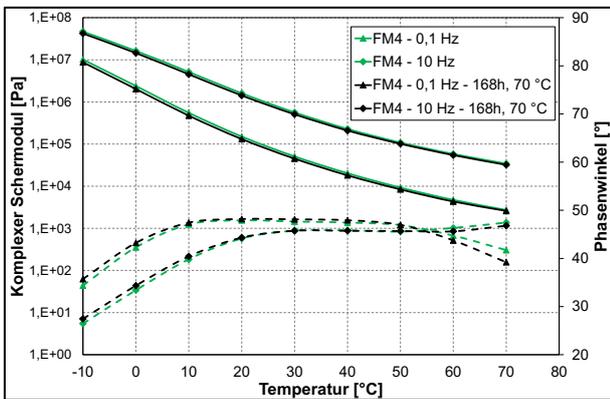


Bild 49: Rheologische Kenngrößen nach der Wärmealterung gemäß TP Fug-StB 01 (FM4)

Die Untersuchung mit dem Dynamischen Scherrheometer zeigten zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Veränderungen der einzelnen Fugenmassen. FM1 reagierte sehr ausgeprägt auf die Wärmealterung nach TP Fug-StB 01 [68] (Bild 46). FM2 wies eine sehr geringe Veränderung der Messwerte auf (Bild 47). FM3 wies ebenfalls nur einen geringfügig kleinen komplexen Schermodul auf (Bild 48). Die Ergebnisse der Prüfung von FM4 zeigen hingegen keinerlei Anzeichen für eine thermisch bedingte Veränderung der Fugenmasse (Bild 49).

Die zwei untersuchten Temperaturbeanspruchungsverfahren wiesen unterschiedliche Intensitäten auf. Die Darstellung der rheologischen Eigenschaften der Proben im Anlieferungszustand sind in Bild 30 aufgezeigt. Wie in Bild 50 dargestellt, hat die Wärmealterung gemäß TP Fug-StB 01 [68] einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die rheologischen Kenngrößen der Fugenmassen. Speziell die Fugenmassen des Typs N2 (FM2 bis FM4) zeigten nach Alterung keine Differenzierung zwischen den einzelnen Massen. Die thermische Veränderung mittels der beschleunigten Langzeitalterung durch Druck- und Temperaturbeanspruchung (PAV-Alterung) wies hingegen größere Unterschiede in der Ergebnisspreizung auf. Hierbei war einerseits eine Differenzierung der Steifigkeiten der Fugenmassen – insbesondere der Fugenmassen des Typs N2 – möglich, andererseits war auch eine ausgeprägte Veränderung des Phasenwinkels zu verzeichnen.

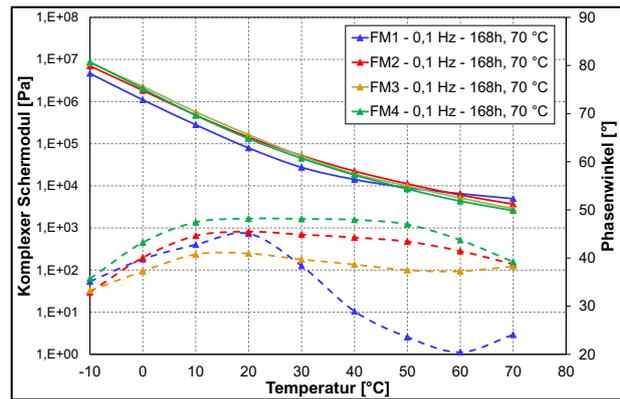


Bild 50: Rheologische Kenngrößen nach der Wärmealterung gemäß TP Fug-StB (0,1 Hz)

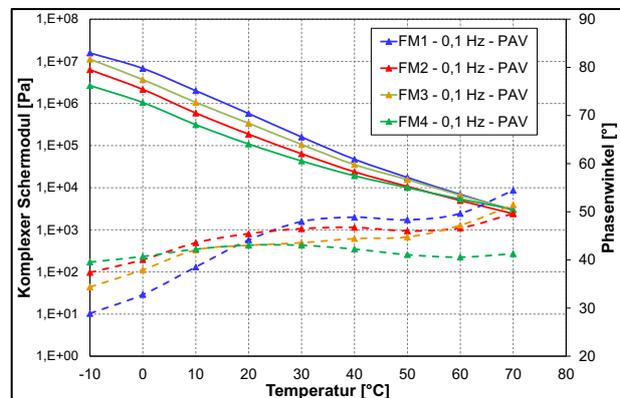


Bild 51: Rheologische Kenngrößen nach der PAV-Konditionierung (0,1 Hz)

Ziel der künstlichen Alterung soll ein praxisorientiertes Beanspruchungsszenario sein. Die thermische Beanspruchung der Fugenmassen im Druckbehälter zeigte eine deutlich stärkere Differenzierung

rung der vier untersuchten Fugenmassen. Es handelt sich hierbei um ein aus der Bitumenprüfung übernommenes Prüfverfahren zur Simulation der Langzeitalterung. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurde daher dieses Konditionierungsverfahren zur Simulation der temperaturbedingten Langzeitalterung und der damit einhergehenden oxidativen Alterungsprozesse für die Definition des künstlichen Alterungsszenarios herangezogen (vgl. Abschnitt 4.2.4).

4.2.3 Einfluss der UV-Strahlung

Neben den Veränderungen der Fugenmassen während der Nutzungsdauer durch thermisch-oxidative Alterungseinflüsse und Frost-Tauwechsel-Beanspruchungen erfolgt eine weitere Beanspruchung der Fugenmasse durch den Einfluss der UV-Strahlung. Wie in Abschnitt 3.3 erläutert, werden drei unterschiedliche Alterungsstufen simuliert.

Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf die Simulation von 1055 kWh/m² Globalstrahlung bei realer Strahlungsintensität. Es wird folglich die Sonneneinstrahlung eines Jahres um den Faktor 8,3 beschleunigt, ohne die Intensität der Strahlung zu überhöhen. Die Lagerungszeit dieser Proben betrug, wie in Abschnitt 3.3 erläutert 44 Tage. Die Weiteren UV-Bestrahlungen erfolgten bei 4-facher Strahlungsintensität für 11 bzw. 55 Tage. Somit wurde die Simulation der Globalstrahlung für 1 bzw. 5 Jahre ermöglicht.

Die Probenvorbereitung erfolgte analog zur beschleunigten Langzeitalterung durch Druck- und Temperaturbeanspruchung (PAV-Alterung) in Anlehnung an [24]. Somit wurde eine definierte Oberfläche mit einer definierten Filmdicke der Bestrahlung ausgesetzt. Die Parameterstudie der UV-Strahlungsintensität erfolgte an den heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2.

Bild 52 bis Bild 54 zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem Dynamischen Scherrheometer für die Fugenmassen des Typs N2 (FM2 bis FM4) nach der UV-Beanspruchung. Die Darstellungen zeigen zur besseren Vergleichbarkeit jeweils den komplexen Schermodul bei 0,1 und 10 Hz sowie den Phasenwinkel bei 0,1 Hz.

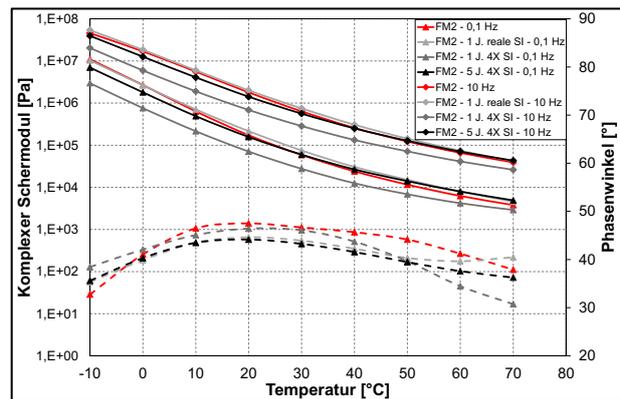


Bild 52: Rheologische Kenngrößen der drei UV-Alterungsstufen (FM2)

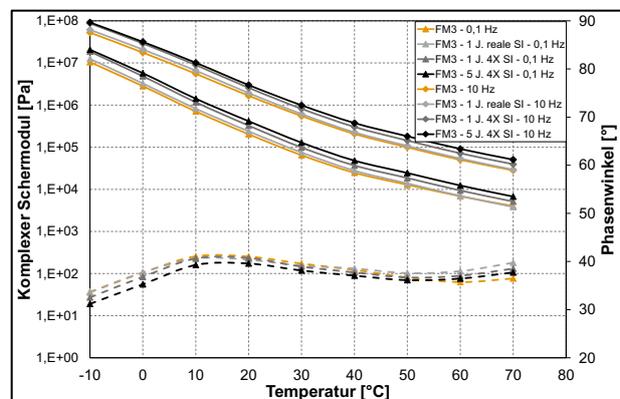


Bild 53: Rheologische Kenngrößen der drei UV-Alterungsstufen (FM3)

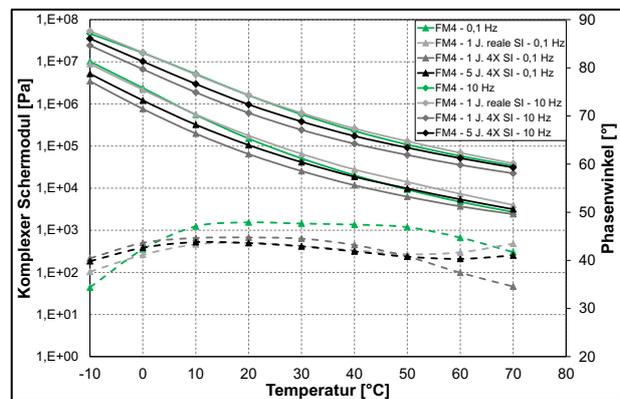


Bild 54: Rheologische Kenngrößen der drei UV-Alterungsstufen (FM4)

Analog zu den Ergebnissen der thermisch beanspruchten Fugenmassen wiesen die Fugenmassen nach der Beanspruchung durch die UV-Strahlung ebenfalls unterschiedliche Reaktionen auf. Abweichend zu den Ergebnissen der thermischen Beanspruchung zeigte die Fugenmasse FM4 die stärksten Veränderungen durch die UV-Strahlung. Auffällig ist hierbei der Abfall des komplexen Schermoduls (Bild 54). An FM2 wurden nur geringe Veränderungen des Phasenwinkels gegenüber der ursprünglichen Fugenmasse festgestellt (Bild 52).

Vergleichsweise robust zeigte sich FM3 gegenüber der UV-Strahlung (Bild 53).

Die Definition, welches UV-Strahlungsszenario einen geeigneten Ansatz für die Differenzierung der einzelnen Fugenmassen bietet, ist anhand der Ergebnisdarstellungen nicht klar abzugrenzen. Ein Vergleich der Fugenmassen unter Fokussierung des Einflusses der Strahlungsszenarien ist in Bild 55 bis Bild 57 dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass FM2, FM3 und FM4 ein vergleichbares Materialverhalten nach der Konditionierung aufwiesen. Bei der Erhöhung der Strahlungsintensität zeigte sich hingegen eine deutliche Differenzierung der Fugenmassen. FM2 und FM4 wiesen weiterhin eine untereinander vergleichbare Materialcharakteristik auf. Auffällig war hierbei die deutliche Reduzierung des komplexen Schermoduls. FM3 wies hingegen eine Erhöhung des Schermoduls auf und grenzt sich somit von den Fugenmassen FM2 und FM4 ab. Eine Erhöhung der Bestrahlungsdauer um den Faktor 5, was der Simulation der mittleren Jahressumme der Globalstrahlung für 5 Jahre entspricht, führte im weiteren Verlauf zu einem leichten Anstieg der komplexen Schermoduli der drei Fugenmassen.

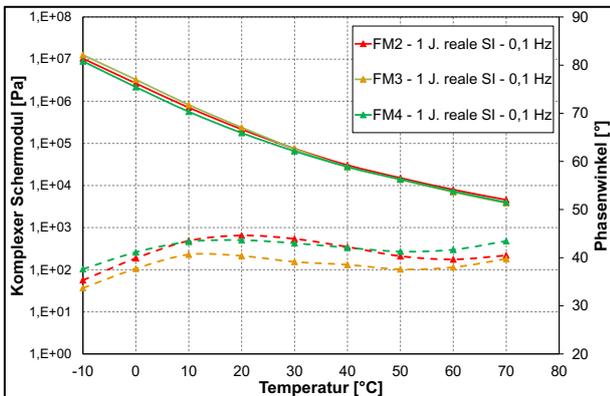


Bild 55: Rheologische Kenngrößen der Fugenmassen vom Typ N2 bei 0,1 Hz und dem Strahlungsszenario 1 Jahr, reale SI

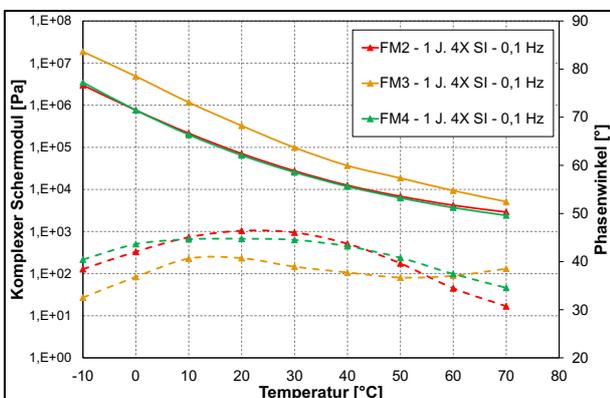


Bild 56: Rheologische Kenngrößen der Fugenmassen vom Typ N2 bei 0,1 Hz und dem Strahlungsszenario 1 Jahr, 4X SI

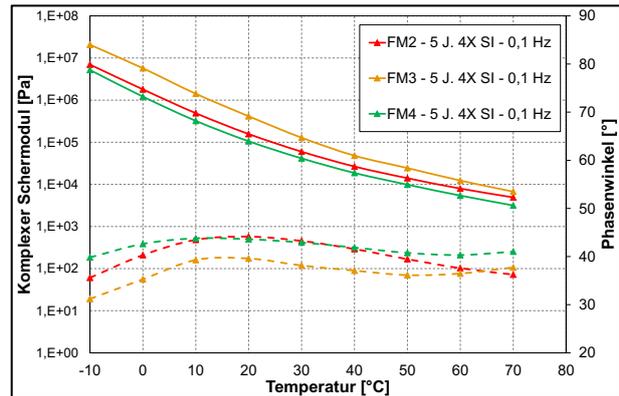


Bild 57: Rheologische Kenngrößen der Fugenmassen vom Typ N2 bei 0,1 Hz und dem Strahlungsszenario 5 Jahre, 4X SI

Ein effektiver Ansatz zur Simulation einer praxisorientierten UV-Strahlungsbeanspruchung, unter Berücksichtigung einer möglichst effizienten Ergebnisspreizung, war somit durch die Bestrahlung der Systemprüfkörper für 11 Tage bei 4-facher Strahlungsintensität gegeben. Hierdurch wird die Beanspruchung der mittleren Jahressumme der Globalstrahlung für ein Jahr simuliert.

4.2.4 Festlegung der Randbedingungen eines Alterungsszenarios im Labormaßstab

Die drei Alterungsstufen – Frost-Tauwechsel-Beanspruchung, Temperatureinwirkung und UV-Strahlung – generieren vermutlich sehr vielfältige Wirkmechanismen innerhalb des gesamten Fugensystems und/oder innerhalb der Fugenmasse. Eine Kombination der Alterungsstufen ist folglich ein unabdingbarer Schritt zur praxisorientierten Abbildung des Schädigungsprozesses zur Bewertung eines dauerhaften Fugenfüllsystems.

In den Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.3 wurden verschiedene Randbedingungen der vorgesehenen Alterungsstufen analysiert. Die Herleitung der Kombinationen, welche die größten Ergebnisspreizungen zwischen den einzelnen Fugenmassen ermöglicht, ist durch die Kombination der folgenden Parameter gegeben:

Frost-Tauwechsel-Beanspruchung:
28 FTW in 3 %-NaCl-Lösung

Temperaturbeanspruchung:
beschleunigte Langzeitalterung durch Druck- und Temperaturbeanspruchung gemäß [24] für 65 h bei 85 °C und 2,1 MPa

UV-Beanspruchung:
Simulation mit 4-facher Strahlungsintensität für 11 Tage

Die Reihenfolge der einzelnen Alterungsstufen hat möglicherweise ebenfalls einen Effekt auf die Prüfergebnisse nach der Konditionierung. Grundsätzlich bestehen zwei mögliche Konditionierungsreihenfolgen:

Variante 1 (V1): Temperaturbeanspruchung – UV-Beanspruchung – Frost-Tauwechsel-Beanspruchung

Variante 2 (V2): Temperaturbeanspruchung – Frost-Tauwechsel-Beanspruchung – UV-Beanspruchung

Die Temperaturbeanspruchung ist aufgrund der Prüfsystematik zu Beginn des Alterungsszenarios durchzuführen. Die kalt verarbeitbaren Systemprüfkörper werden hierbei gemäß Diskussion im Betreuungsausschuss nach der Herstellung in den Druckbehälter eingebaut.

Eine klare Differenzierung der Reihenfolge V1 oder V2 war nicht möglich, daher wurde die Reihenfolge V1 ausgewählt. Vorteilhaft ist hierbei u.a. die Vermeidung von undefinierten Feuchtigkeitsbedingungen im Prüfkörper infolge der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung, die wiederum undefinierte Prozesse (Dampfdruck) während der UV-Konditionierung auslösen können.

4.3 Definition der Prüfungsrandbedingungen der modifizierten Systemprüfungen

Wie in Abschnitt 3.4.2 dargelegt, können die Ergebnisse der Systemuntersuchungen sowohl von der Prüfgeschwindigkeit, der Prüftemperatur und der Geometrie der Probe beeinflusst werden.

Die Auswirkungen von diesen Einflussfaktoren auf die Prüfergebnisse wurden in ersten Tastversuchen vorab analysiert und bewertet.

4.3.1 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bei +20 °C

Zunächst wurde der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf die Spannungen im Fugensystem untersucht. In Bild 58 ist dieser für einen statischen Zug-/Scherversuch an einem Systemprüfkörper bei einer Temperatur von +20 °C dargestellt.

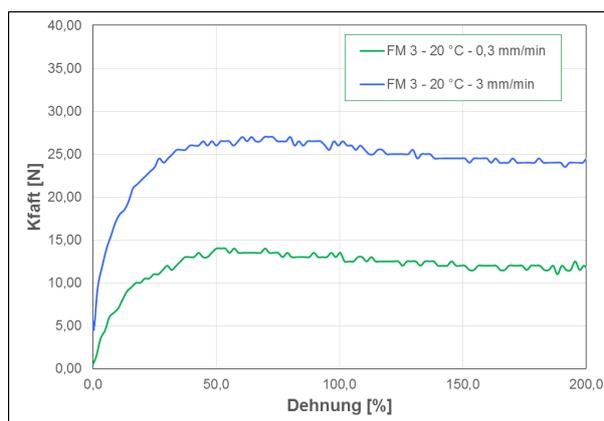


Bild 58: Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

Mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit nahm die maximale Spannung im Systemprüfkörper erwartungsgemäß zu. Bei einer Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit um den Faktor 10 ergab sich ein Anstieg der Spannung um rd. 120 %. Auffällig dabei war, dass selbst beim Überschreiten der maximal zulässigen Dehnung von 25 % um ein Vielfaches im Regelfall weder Ablösungen von den Fugenflanken noch ein Reißen in der Fugenmasse beobachtet werden konnten. Der Spannungsabfall nach Erreichen der Maximalspannung ist auf die Einschnürung im Querschnitt der Fugenmasse zurückzuführen.

4.3.2 Einfluss der Prüftemperatur

Untersucht wurden Systemprüfkörper bei +20 °C und -20 °C. Die Prüfgeschwindigkeit bei -20 °C wurde in Anlehnung an [25] zu 0,1 mm/m gewählt, bei +20 °C wurden Proben mit 0,3 mm/m bzw. 3 mm/m untersucht. Die Fugenspaltbreite der untersuchten Proben betrug 10 mm.

Das Kraft-Weg-Diagramm (Bild 59) zeigt, dass das Fugensystem bei -20 °C, trotz reduzierter Prüfgeschwindigkeit, wesentlich höhere Zugkräfte aufnehmen musste. Eine quantitative Aussage zur Leistungsfähigkeit der einzelnen Fugenmasse lässt sich demnach vermutlich eher bei -20 °C definieren. Der Einfluss der Prüftemperatur wurde an weiteren Fugenmassen eruiert und war Bestandteil der gesamten Parameterstudie.

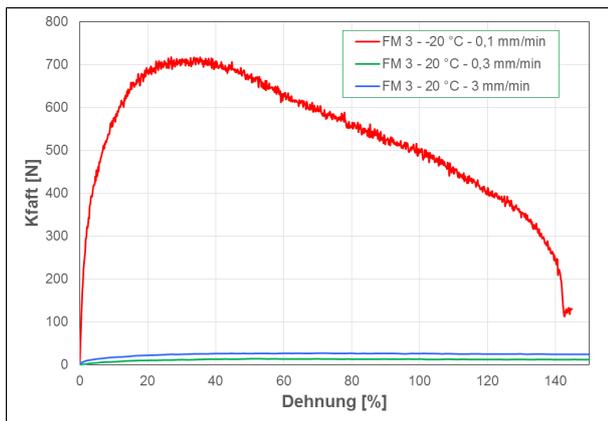


Bild 59: Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

4.3.3 Einfluss der Breite des Fugenspalts

Zusätzlich zum Einfluss der Prüfgeschwindigkeit sowie zur Prüftemperatur wurde der Einfluss der Fugenbreite ermittelt. Nach [73] sind Fugenfüllsysteme mit Fugenspaltbreiten zwischen 8 und 20 mm zu dimensionieren, wobei aufgrund von lärmtechnischen Aspekten geringe Fugenspaltbreiten präferiert werden.

Zur realitätsnahen Abbildung des Einflusses der Fugenbreite, ist es erforderlich das System anhand einer identischen Dehnrates zu bewerten. Bei einer Fugenspaltbreite von 20 mm gegenüber einer Fugenspaltbreite von 10 mm ist folglich eine Verdopplung der Prüfgeschwindigkeit notwendig, um die gleiche Dehnbeanspruchung in das System zu induzieren.

Der Vergleich von FM2 und FM3 zeigt, dass die Verdopplung der Fugenspaltbreite bei FM3 keine ausgeprägten Auswirkungen auf die maximale Spannung und die Dehnung zum Zeitpunkt der maximalen Spannung hatte. FM2 zeigte hingegen bei einer Erhöhung der Fugenbreite von 10 mm auf 20 mm – bei gleicher Dehnrates – eine Reduzierung der Maximalspannung um ca. 50 % (Bild 60). Gleichzeitig war die Dehnung zum Zeitpunkt der maximalen Spannung bei diesem Material bei einer Fugenbreite von 20 mm fast 20-mal höher als bei einer Fugenbreite von nur 10 mm. Das Systemverhalten von FM2 bei einer Fugenspaltbreite von 20 mm prognostizierte ein funktionsfähiges Fugenfüllsystem bis fast 200 % Dehnung, die Reduzierung der Fugenspaltbreite auf 10 mm führt hingegen zu einem Versagen bei ca. 10 %. Es ist aus den Ergebnissen der Dreifachbestimmungen ersichtlich, dass eine geringere Fugenspaltbreite das System bei identischer Dehnrates besser zu differenzieren vermag.

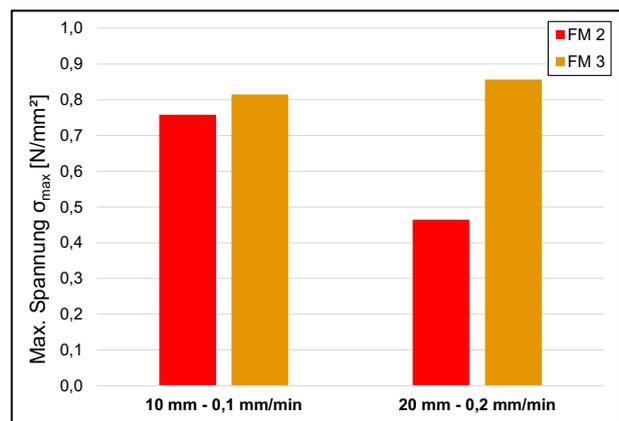


Bild 60: Einfluss der Breite des Fugenspalts auf die Maximalspannung

FM	Fugenspaltbreite	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[mm]	[N/mm ²]	[%]
FM2	10	0,76	10,7
FM2	20	0,47	194,4
FM3	10	0,82	29,3
FM3	20	0,86	16,9

Tab. 21: Einfluss der Breite des Fugenspalts auf die Maximalspannung und Dehnung

Neben der maximalen Spannung sowie der zugehörigen Dehnung ist die Versagensart nicht außer Acht zu lassen. FM3 weist sowohl bei 10 mm als auch bei 20 mm Fugenspaltbreite ein adhäsives Versagen in der Grenzfläche auf (Bild 63). FM2 zeigt dieses Versagen insbesondere bei einer Fugenspaltbreite von 20 mm. Bei einer Fugenspaltbreite von 10 mm kommt es in Teilen zu einem kohäsiven Versagen der Fugenmasse (Bild 62), was durch die erhöhten Spannungen in der Fugenmasse zu erklären ist.

Aufgrund der identischen Dehnrates wurde ein vergleichbarer Versagensmechanismus, unabhängig von der Fugenspaltbreite erwartet. Bild 64 zeigt hingegen die deutlichen Unterschiede von vier repräsentativen Kurvenverläufen der Prüferien im Spannungs-Dehnungs-Diagramm.

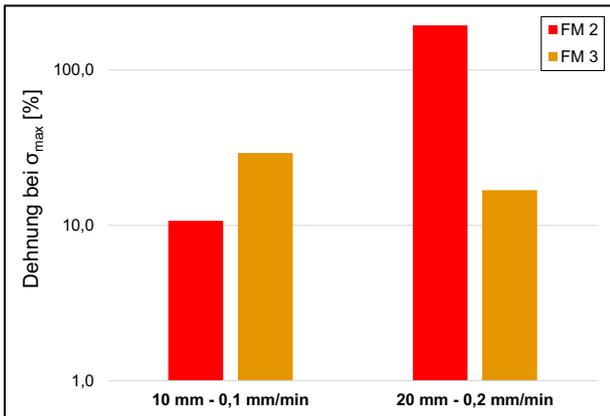


Bild 61: Einfluss der Breite des Fugenspalts auf die Dehnung zum Zeitpunkt der Maximalspannung (logarithmischer Maßstab)

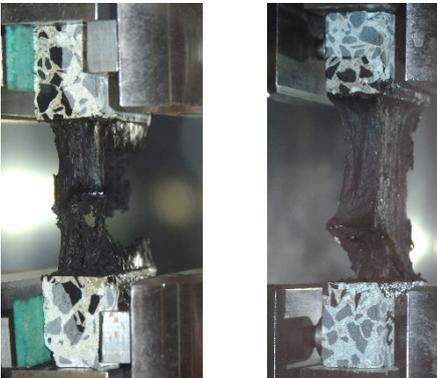


Bild 62: links: FM2 – 10 mm Fugenbreite (teilweise kohäsives Versagen), rechts: FM2 – 20 mm Fugenbreite (adhäsives Versagen)

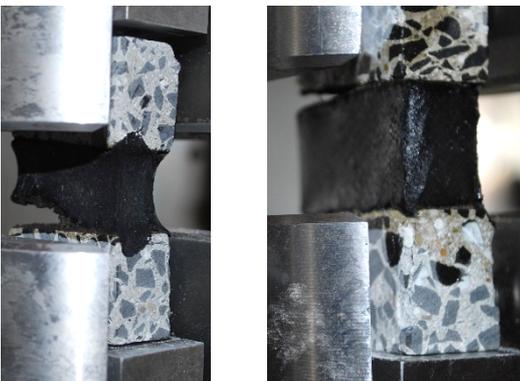


Bild 63: links: FM3 – 10 mm Fugenbreite (adhäsives Versagen), rechts: FM3 – 20 mm Fugenbreite (adhäsives Versagen)

Aufgrund der Anforderungen an die Fugenspaltbreiten aus der Praxis von 8 mm sowie den als kritisch für das Fugenfüllsystem anzusehenden Ergebnissen (hohe Spannung bei geringen Dehnungen) werden im weiteren Projektverlauf Fugenspaltbreiten von 10 mm untersucht und Prüfkörpern mit einer Fugenspaltbreite von 20 mm nicht weitergehend analysiert.

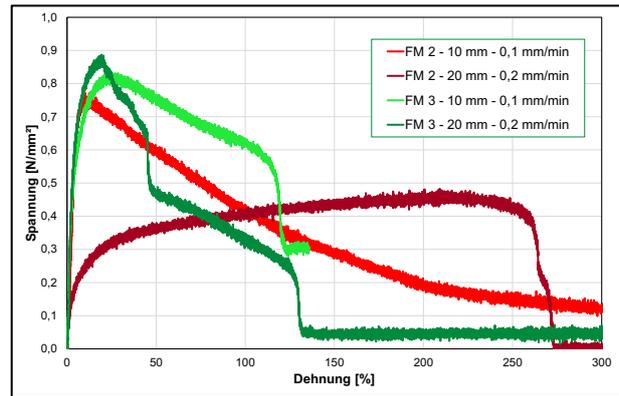


Bild 64: Einfluss der Breite des Fugenspalts auf den Spannungsverlauf

4.3.4 Einfluss der Fugenspaltlänge

Um festzustellen, inwieweit sich bei der gewählten Breite der Probekörper (=Fugenspaltlänge) von 45 mm Kerbspannungen auf die Prüfergebnisse auswirken, wurden in weiteren Vorversuchen Proben mit den in der Tab. 22 aufgelisteten Fugenlängen mittels statischer Zugversuche untersucht.

Flankenlänge	Prüffläche
45 mm	900 mm ²
90 mm	1800 mm ²
135 mm	2700 mm ²
180 mm	3600 mm ²

Tab. 22: Prüffläche in Abhängigkeit von der Flankenlänge

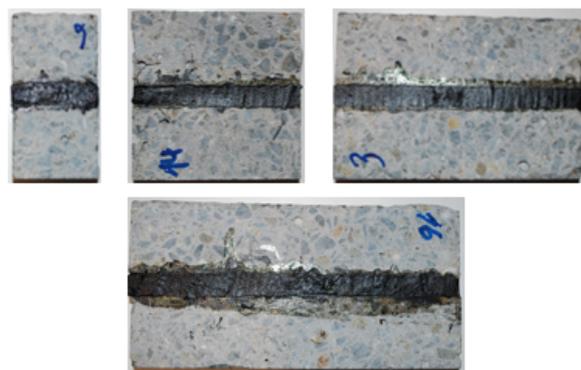


Bild 65: Probekörper zur Überprüfung des Einflusses der Fugenlänge

Bild 65 zeigt die visuelle Darstellung der Systemprüfkörper. Der Einfluss der Fugenlänge auf die Maximalkraft und die daraus resultierende Maximalspannung (Maximalkraft dividiert durch die Prüffläche) sind in Bild 66 und Bild 67 dargestellt. Die Auswertung der Prüfergebnisse zeigt, dass die Variation der Fugenspaltlänge keinen sehr ausgeprägten Einfluss aufwies. Es konnte keine signifikante Auswirkung auf die Maximalspannung festgestellt werden. Dies wird durch die grafische Ge-

genüherstellung der Maximalspannungen in Bild 68 verdeutlicht.

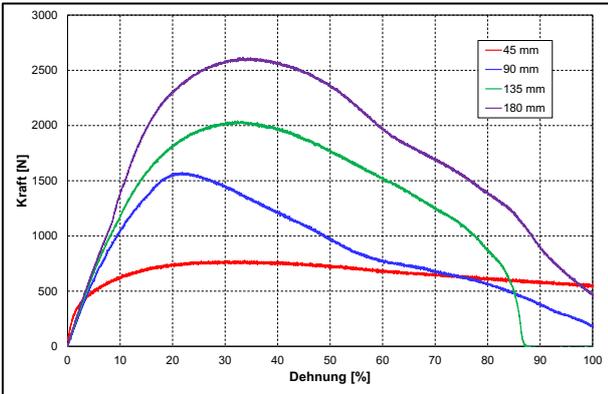


Bild 66: Einfluss der Fugenlänge auf die Kraftentwicklung

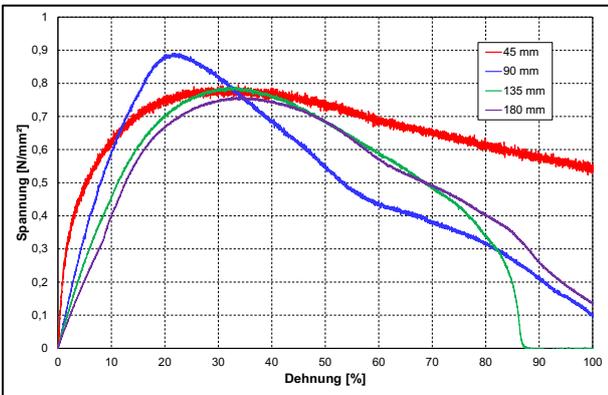


Bild 67: Einfluss der Fugenlänge auf die Spannungsentwicklung

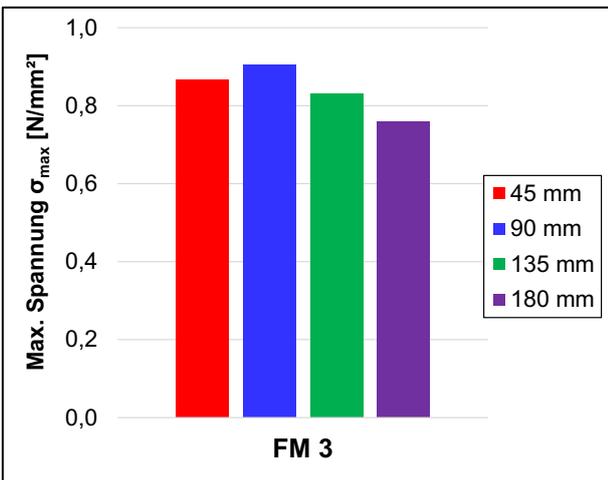


Bild 68: Einfluss der Fugenlänge auf die Maximalspannung

4.3.5 Einfluss der zyklischen Beanspruchung

Zur Berücksichtigung von Verkehrsbeanspruchungen und den daraus resultierenden Schubverformungen in den Fugenmassen wurden die Systemprüfkörper in dieser Versuchsreihe zyklischen Druck-/Zug-/Scherbeanspruchungen ausgesetzt. Die genauen Randbedingungen wurden in Vorversuchen ermittelt. Nach einer definierten Anzahl von

Lastwechselzyklen wurde die Resthaftfestigkeit der Fugenmassen in einem statischen Zug-/Scherversuch gemäß Abschnitt 4.3.7 ermittelt. Da bei der Fugenmasse FM3 bereits im Referenzversuch, also ohne zyklische Vorbelastung, stets ein Ablösen der Masse von den Fugenflanken zu beobachten war, wurde diese für die Vorversuche zunächst außer Acht gelassen. Zu Beginn wurde der Einfluss der Amplitudengröße auf die Verbundeigenschaften des Fugensystems untersucht.

Untersuchung bei +20 °C

Diese Versuche wurden mit einer Amplitude von $\pm 0,125$ mm und einer Frequenz von 3 Hz bis zu 15.000 Lastwechsel durchgeführt. Die Versuchstemperatur betrug +20 °C. Die Spitzenwerte (jeweilige maximale / minimale Spannungen) wurden im Intervall von 200 Zyklen aufgezeichnet. Die Spitzenwerte bei diesen zyklischen Beanspruchungen sind für die Fugenmassen FM1, FM2 und FM4 in Bild 69 dargestellt.

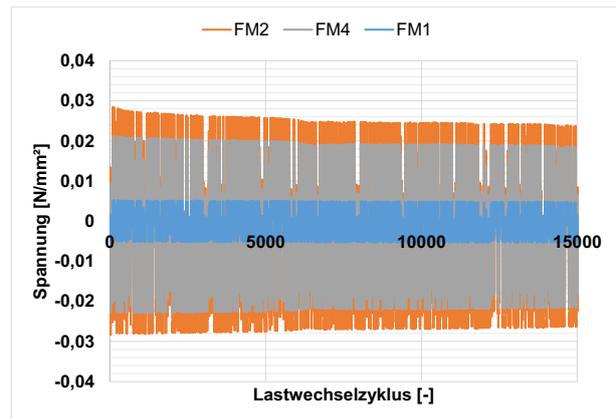


Bild 69: Spannungsentwicklung im zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (Amplitude $\pm 0,125$ mm, Frequenz 3 Hz, N=15000)

Der Grafik ist zu entnehmen, dass die vorherrschenden Spannungen über die Versuchszeit um bis zu rd. 17 % abnahmen. Ferner wird deutlich, dass FM1 im Vergleich zu den anderen Fugenmassen deutlich geringere Spannungen von nur rd. 0,005 N/mm² aufbaute und diese über die gesamte Versuchsdauer mehr oder weniger beibehielt.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde die Amplitude auf $\pm 0,25$ mm erhöht. Die Lastwechsel wurden auf 20.000 erhöht. Die Frequenz wurde mit 3 Hz beibehalten. Der Verlauf der Spannungen unter diesen Prüfbedingungen ist beispielhaft für die Fugenmassen FM1 und FM2 in Bild 70 dargestellt.

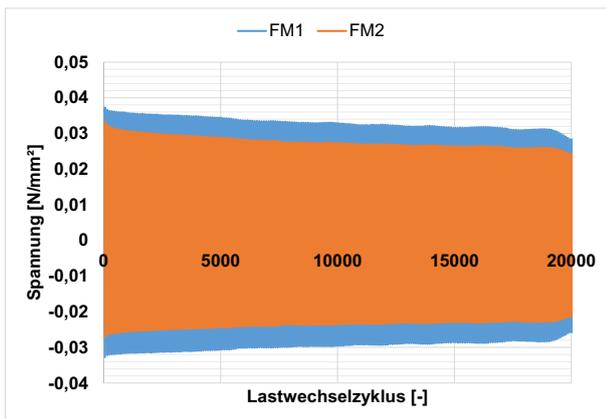


Bild 70: Spannungsentwicklung im zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (Amplitude $\pm 0,25$ mm, Frequenz 3 Hz, $N=20000$)

Fugenmasse FM1 wies am Anfang mit rd. $0,036$ N/mm² im Vergleich zu dem Versuch mit halb so hoher Verformungsamplitude rd. die 7-fache Spannung auf. Demgegenüber nahm bei FM2 diese Anfangsspannung nur geringfügig zu. Bei diesem Vergleich ist zu bedenken, dass bei gleicher Frequenz sich die Verformungsgeschwindigkeit ebenfalls verdoppelt hat und dabei sich ein unterschiedliches Relaxationsvermögen einstellt. Bei beiden Fugenmassen nahm unter diesen Prüfbedingungen die Spannung über die gesamte Versuchsdauer um bis zu rd. 23 % ab.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde – bei gleicher Amplitude ($\pm 0,25$ mm) – die Frequenz der zyklischen Belastung auf 5 Hz erhöht. In Bild 71 ist der Spannungsverlauf über 20.000 Lastwechsel für die Fugenmassen FM1 und FM2 unter diesen Prüfbedingungen dargestellt.

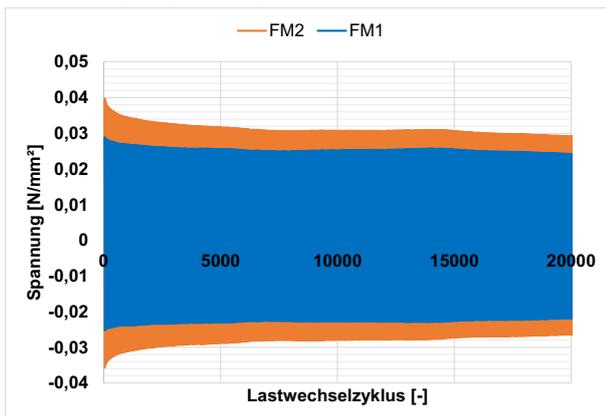


Bild 71: Spannungsentwicklung im zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (Amplitude $\pm 0,25$ mm, Frequenz 5 Hz, $N=20000$)

Es ist ersichtlich, dass die sich einstellenden Spannungen nur geringfügig von denen bei einer Prüffrequenz von 3 Hz abweichen. Ebenso war der Spannungsabbau während der Lastzyklen mehr oder weniger gleichbleibend.

In Bild 72 und Bild 73 sind die Resthaftzugfestigkeiten, ermittelt unmittelbar nach den zyklischen

Vorbelastungen, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die maximal noch aufzunehmenden Spannungen mit zunehmender Belastungsintensität teilweise herabgesetzt wurden. Bei einer vergleichsweise kleinen Amplitude von $\pm 0,125$ mm verlief die Spannungsentwicklung für FM2 in etwa gleich im Bezug zur Referenzuntersuchung. Durch eine Verdopplung der Amplitude wurde für FM2 ein Abfall der Resthaftzugfestigkeit von rd. 34 % verzeichnet. Nach einer Erhöhung der Frequenz auf 5 Hz, lag die maximale Spannung zwar noch immer unterhalb der Referenz, allerdings stieg sie im Bezug zum Versuch bei einer Frequenz von 3 Hz wieder an.

Für FM1 zeichnete sich demgegenüber ein erheblicher Anstieg der nach zyklischer Belastung mit kleiner Amplitude noch aufnehmbaren Spannung ab. Nachdem die Frequenz und die Amplitude erhöht wurden, konnte keine signifikante Veränderung im Spannungsmaximum ermittelt werden. Im Bezug zur Referenz ist allerdings ein schnellerer Abbau der Spannungen zu erkennen.

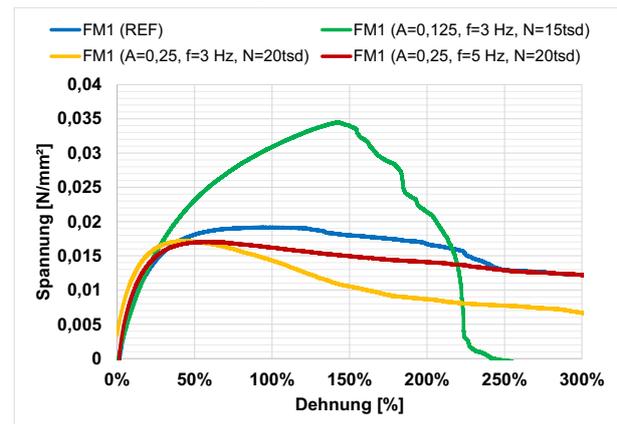


Bild 72: Statischer Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM1, $+20^{\circ}\text{C}$, $1,0$ mm/min)

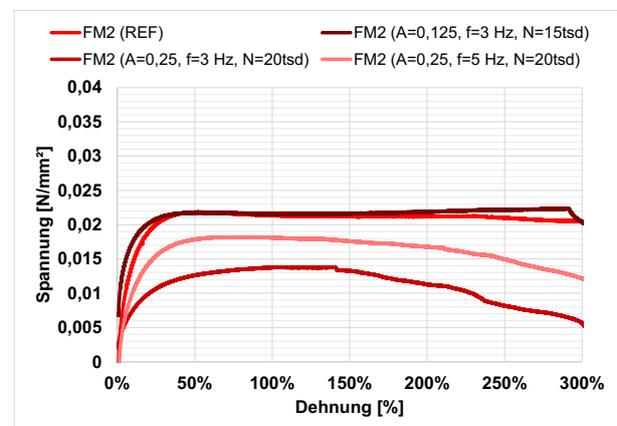


Bild 73: Statischer Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM2, $+20^{\circ}\text{C}$, $1,0$ mm/min)

Bei den bisher dargelegten Versuchen wurden die Proben stets im Initialzustand, d.h. spannungsfrei, einer höherfrequenten zyklischen Belastung zur

Simulation von Verkehrsbeanspruchungen ausgesetzt. Unter realen Randbedingungen erfahren die Fugensysteme jedoch aufgrund der jahreszeitlichen Temperaturunterschiede fast durchgängig Dehnungen bzw. Stauchungen. Die Auswirkungen solch einer „Vordehnung“ auf die Resthaftzugfestigkeit wurden ebenfalls untersucht (vgl. folgender Abschnitt).

Untersuchung bei -20 °C

Da bei niedrigeren Temperaturen die heiß verarbeitbaren Fugenmassen deutlich steifer werden und folglich die Zugspannungen dementsprechend um ein vielfaches größer ausfallen (Bild 74 bis Bild 77), wurde für die zyklische Beanspruchung der Fugensysteme eine Amplitude von ±0,05 mm (bei der Fugenbreite von 10 mm entsprechend 1 %) angesetzt. Diese Versuchsreihe wurde mit 3.000 Lastwechseln bei einer Frequenz von 0,5 Hz durchgeführt. Für die Fugenmassen FM1, FM2, FM3 und FM4 wurden vier Belastungsfälle betrachtet:

- REF: ohne zyklische Beanspruchung
- B1: 0% Vordehnung + zykl. Beanspruchung
- B2: 1% Vordehnung + zykl. Beanspruchung
- B3: 10% Vordehnung + zykl. Beanspruchung

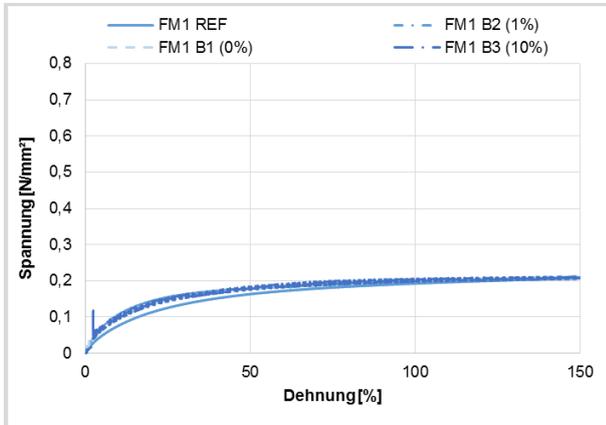


Bild 74: Statischer Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM1, -20°C, 0,1 mm/min)

FM1 (-20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,24	299,8
B1	0,25	299,5
B2	0,24	299,9
B3	0,22	298,3

Tab. 23: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM1, -20°C, 0,1 mm/min)

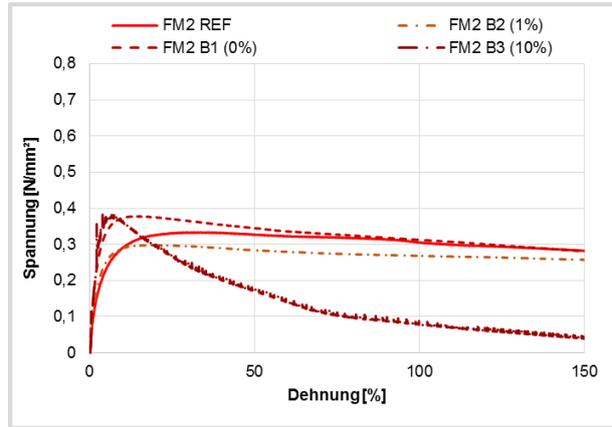


Bild 75: Statischer Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

FM2 (-20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,33	33,7
B1	0,38	13,3
B2	0,30	19,1
B3	0,39	4,8

Tab. 24: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

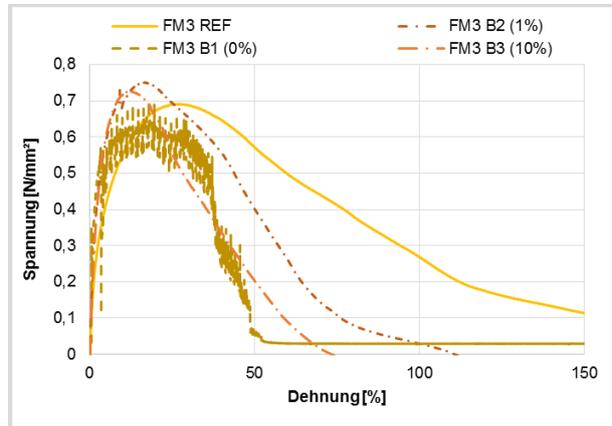


Bild 76: Statischer Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM3, -20°C, 0,1 mm/min)

FM3 (-20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,69	27,4
B1	0,70	18,0
B2	0,75	16,8
B3	0,72	12,0

Tab. 25: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM3, -20°C, 0,1 mm/min)

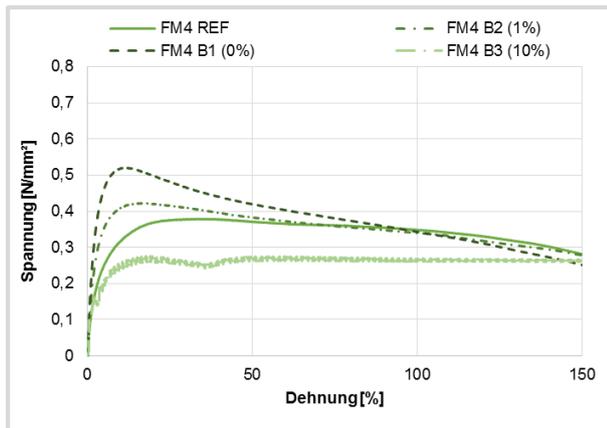


Bild 77: Statischer Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM4, -20°C, 0,1 mm/min)

FM4 (-20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,38	33,3
B1	0,52	11,2
B2	0,42	16,2
B3	0,28	19,1

Tab. 26: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM4, -20°C, 0,1 mm/min)

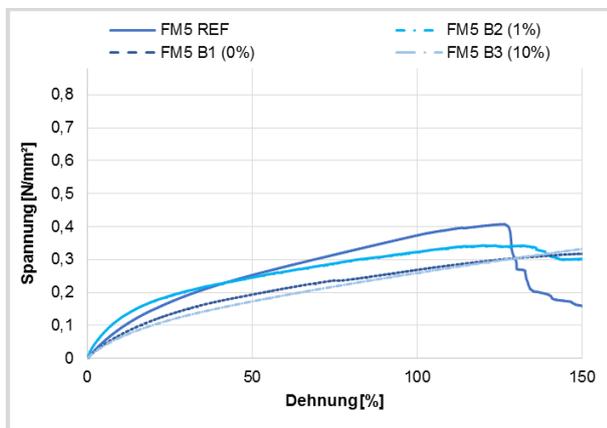


Bild 78: Statischer Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM5, -20°C, 0,1 mm/min)

FM5 (-20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,41	126,4
B1	0,32	150,0
B2	0,34	120,4
B3	0,38	209,0

Tab. 27: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung (FM5, -20°C, 0,1 mm/min)

Für FM1 ist ersichtlich, dass sich die Spannungsentwicklung mehr oder weniger unabhängig von der Vorbeanspruchung gleich einstellte (Bild 74 und Tab. 23). Bei Betrachtung der Systemprüfkörper konnte selbst nach einer Vordehnung von 10 % (Belastungsfall B3) keine signifikante Schädigung des Fugensystems festgestellt werden. Bei den Fugenmassen FM2 (Bild 75 und Tab. 24) und FM4 (Bild 77 und Tab. 26) lag das Spannungsmaximum bei Belastungsfall B1 um rd. 12 % (FM2) bzw. 27 % (FM4) höher als die jeweils zugehörige Referenz. Das Spannungsmaximum wurde bei FM4 bereits bei einer Dehnung von etwa 11% bzw. bei FM2 bei einer Dehnung von etwa 13 % erreicht. Nach Belastungsfall B2 fiel das Spannungsmaximum bei FM4 gegenüber der Referenz nur noch um rd. 10 % größer aus. Bei FM2 war kein erhöhtes Spannungsmaximum mehr zu erkennen. Nach einer weiteren Steigerung der Vordehnung auf 10 % (B3) war für FM2 erneut ein Anstieg des Spannungsmaximums von rd. 14 % im Bezug zur jeweiligen Referenz erkennbar. Die zugehörige Dehnung fiel mit rd. 5 % sehr gering aus. Die Schadensbilder äußerten sich dabei in Form von einem mehr oder weniger vollständigen adhäsiven Versagen. Bei FM4 fiel das Spannungsmaximum nach Belastungsfall B3 deutlich ab. Auch hier zeigte sich teilweise ein vollständiges adhäsives Versagensbild.

Bei der Fugenmasse FM3 (Bild 76 und Tab. 25) änderten sich die Spannungen nach Belastungsfall B1 nur wenig, hingegen waren die aufnehmbaren Dehnungen geringer. Bei weiterer Steigerung der Vorbeanspruchung (B2 bzw. B3) wurde hingegen ein geringer Anstieg des Spannungsmaximums von 8 % bzw. 5 %, wiederum bei gleichzeitig abnehmender Dehnung, im Bezug zur jeweiligen Referenz, deutlich. Bei den Versagensbildern zeigte sich hauptsächlich ein adhäsives Versagen.

Die kalt verarbeitbare Fugenmasse FM5 (Bild 78; Tab. 27) zeigte nach der Belastung B1, bezogen auf die Referenzprüfung, ein rund 22 % geringeres Spannungsmaximum bei gleichzeitig 19 % größerer Dehnung. Nach einer 10 %-igen Vordehnung und anschließender zyklischer Beanspruchung (B3) war die Maximalspannung, bezogen auf die Referenzuntersuchung, rund 9 % geringer, die Dehnung hingegen 66 % größer. Es stellte sich ein adhäsives Versagensbild zwischen Fugenmasse und Fugenflanke ein.

Untersuchung bei +20 °C

Für die zyklische Beanspruchung der Fugensysteme mit und ohne Vordehnung (B1 bis B3) wurde für die Untersuchungen bei +20 °C eine Amplitude

von ±0,125 mm, bezogen auf die Fugenbreite von 10 mm, angesetzt. Die Versuchsreihe wurde mit 10.000 Lastwechseln bei einer Frequenz von 1,5 Hz durchgeführt.

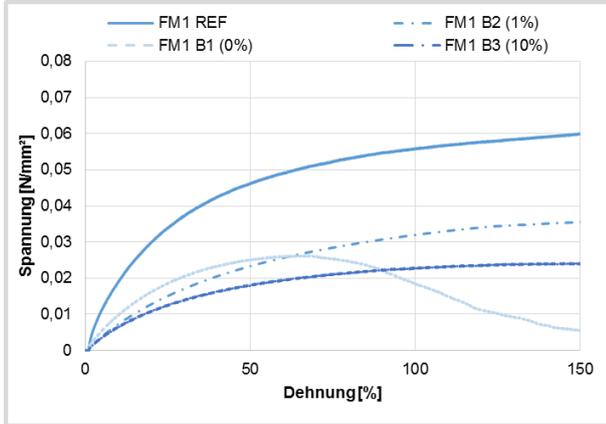


Bild 79: Statischer Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM1, +20°C, 1,0 mm/min)

FM1 (+20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,06	216,1
B1	0,03	67,6
B2	0,04	157,1
B3	0,02	148,8

Tab. 28: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM1, +20°C, 1,0 mm/min)

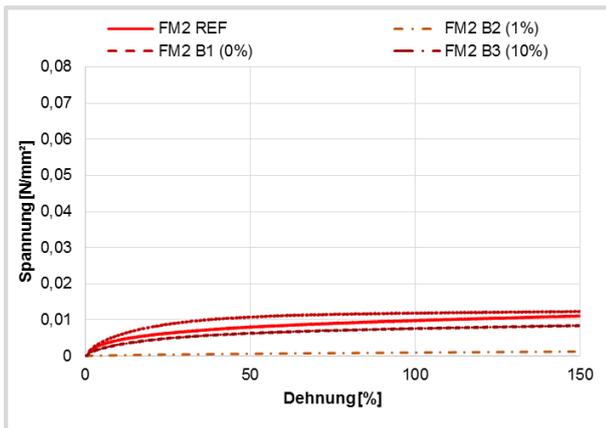


Bild 80: Statischer Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM2, +20°C, 1,0 mm/min)

FM2 (+20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,01	299,9
B1	0,01	298,5
B2	0,002	298,9
B3	0,01	292,0

Tab. 29: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM2, +20°C, 1,0 mm/min)

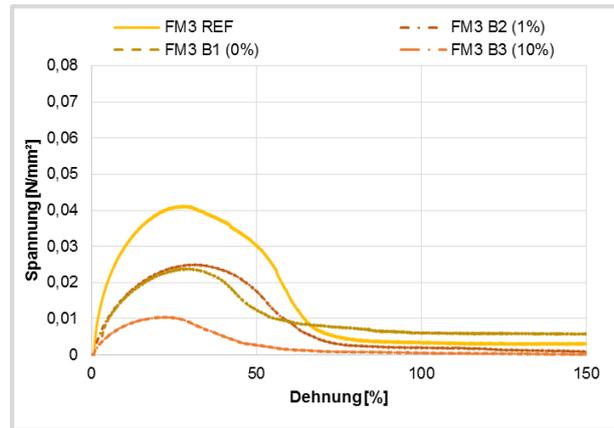


Bild 81: Statischer Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM3, +20°C, 1,0 mm/min)

FM3 (+20°C)	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,04	27,5
B1	0,02	27,5
B2	0,03	32,0
B3	0,01	23,0

Tab. 30: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM3, +20°C, 1,0 mm/min)

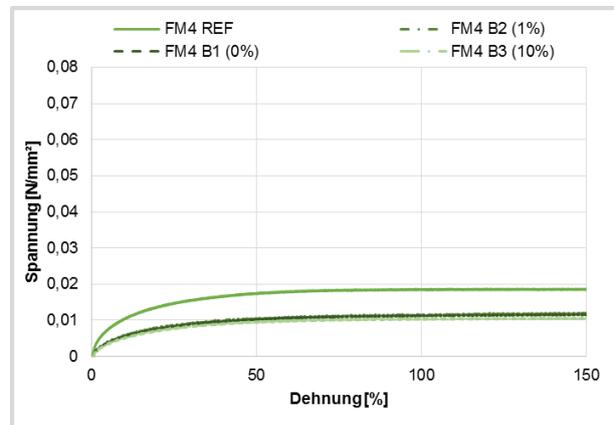


Bild 82: Statischer Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM4, +20°C, 1,0 mm/min)

FM4 (+20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,02	282,8
B1	0,01	298,5
B2	0,01	298,3
B3	0,01	288,8

Tab. 31: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM4, +20°C, 1,0 mm/min)

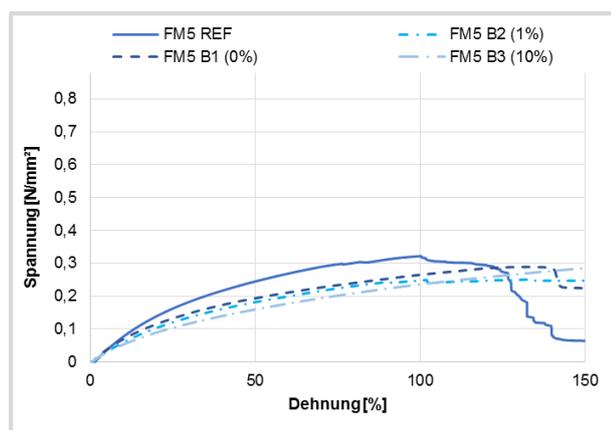


Bild 83: Statischer Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM5, +20°C, 1,0 mm/min)

FM5 (+20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF	0,32	99,9
B1	0,29	134,4
B2	0,25	186,8
B3	0,29	160,0

Tab. 32: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch in Abhängigkeit der Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (FM5, +20°C, 1,0 mm/min)

Es war wiederum festzustellen, dass sich bei allen vier Fugenmassen bei den +20 °C-Prüfungen die Spannungen anders entwickelten als bei den -20 °C-Prüfung. Erkennbar ist, dass für Fugenmasse FM1, FM3 und FM4 bei Zunahme des Beanspruchungsniveaus (B1 bis B3) sich die Spannungsentwicklung im Bezug zur jeweiligen Referenz reduzierte (Tab. 28, Tab. 30 und Tab. 31). Bei Betrachtung der Systemprüfkörper konnte sowohl für FM1 (Bild 84, links) als auch für FM3 (Bild 84, rechts) ein adhäsives Versagensbild festgestellt werden. Für FM4 dagegen zeigte sich keine signifikante Schädigung im Fugensystem.

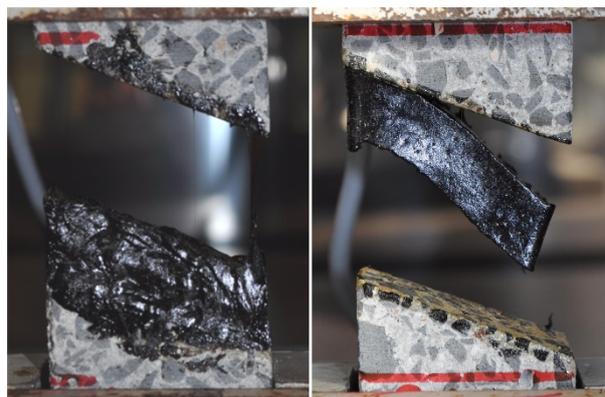


Bild 84: Versagensbilder im statischen Zug-/Scherversuch nach 10%iger Vordehnung und zyklischer Beanspruchung (links: FM1; rechts: FM3)

Für FM2 zeigte sich, dass die Spannungsentwicklungen nach den Belastungsfällen B1 und B3 bei den beiden Prüftemperaturen (-20 °C / +20 °C) vom Verlauf her nahezu gleichbleibend waren. Nach der Vorbeanspruchung B2 war die Spannung gegenüber der Referenz mit rd. 85 % nur geringfügig niedriger. Eine Schädigung des Fugensystems war auch nach Beanspruchung B2 nicht zu erkennen. Die kalt verarbeitbare Fugenmasse FM5 zeigte hingegen mit steigender Vorbeanspruchung B1 bis B3 geringfügig niedrigere Spannungen im Vergleich zur Referenzuntersuchung, jedoch wurden beim Erreichen der Spannungsmaxima größere Dehnungen erzielt (vgl. Bild 83, Tab. 32). Am Ende der Untersuchungen wurden sowohl adhäsive als auch kohäsive Versagensbilder festgestellt.

4.3.6 Reproduzierbarkeit

Die Reproduzierbarkeit der Untersuchungen sind beispielhaft anhand der Spannungsentwicklung je Probekörper in einer Dreifachbestimmung in Bild 85 und Tab. 33 für die heiß verarbeitbare Fugenmasse FM1 und die kalt verarbeitbare Fugenmasse FM5 für den statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C dargestellt.

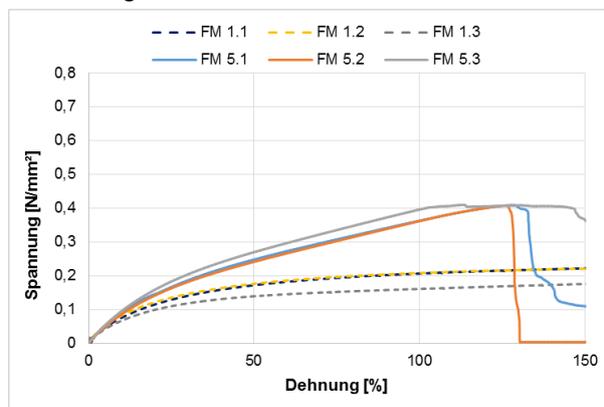


Bild 85: Spannungsentwicklung je Probekörper im statischen Zug-/Scherversuch der heiß und kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM1 und FM5 bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
FM1.1	0,25	299,98
FM1.2	0,25	299,76
FM1.3	0,21	299,72
FM5.1	0,41	128,19
FM5.2	0,41	125,36
FM5.3	0,41	113,25

Tab. 33: Ergebnisse je Probekörper im statischen Zug-/Scherversuch der heiß und kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM1 und FM5 bei -20 °C

4.3.7 Zusammenfassung der Prüfungsrandbedingungen

Anhand der Ergebnisse der Voruntersuchungen wurde die Parametermatrix gemäß Tab. 34 für die Versuchsrandbedingungen Zug- und Zug-/Scherversuche sowie in Tab. 35 für die zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuche definiert. Die Probekörpergeometrie respektive die Fugenspaltlänge für den zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch sind mit jener, des Zug-/Scherversuchs ident.

Die Systemprüfungen erfolgten stets als Dreifachbestimmung, wobei die Ergebnisdarstellung in Form von Mittelwerten in den Abschnitten 4.4 und 4.5 erfolgte.

Temperatur	Fugenspaltbreite	Fugenspaltlänge	Prüfgeschwindigkeit
[°C]	[mm]	[mm]	[mm/min]
-20	10	45,0 (ZV) 47,8 (ZSV)*	0,1
+20			1,0
+60			1,0

*Fugenspaltlänge bedingt durch den Scherwinkel $\alpha = 70^\circ$ bei ZSV größer

Tab. 34: Randbedingungen für die Zug- und Zug-/Scherversuche

Randbedingung	Prüftemperatur [°C]	
	-20	+20
Amplitude [mm]	± 0,05	± 0,125
Prüfgeschwindigkeit [mm/s]	0,10	0,75
Frequenz [Hz]	0,50	1,50
Zyklen [-]	3000	10.000

Tab. 35: Randbedingungen für die zyklische Beanspruchung des Druck-/Zug-/Scherversuchs

4.4 Modifizierte Systemprüfungen an ungealterten Systemprüfkörpern

4.4.1 Statischer Zugversuch

Untersuchung bei -20 °C

Im Folgenden sind die Prüfergebnisse der statischen Zugversuche (Prüfung mit orthogonalem Fugenschnitt zur Prüfrichtung) der heiß und kalt verarbeitbaren Fugenmassen dargestellt. Die Prüfung erfolgte mit den in Abschnitt 4.3.7 definierten Randbedingungen. Die Fugenlänge betrug 45 mm und die Fugenspaltbreite wurde mit 10 mm definiert. Die Prüfgeschwindigkeit lag bei 0,1 mm/min. Die Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse ist in Bild 86, die der kalt verarbeitbaren Fugenmassen in Bild 87 dargestellt. Die entsprechenden Maximalspannungen sowie die Dehnungen während des Erreichens der Maximalspannung sind in Tab. 36 sowie Tab. 37 aufgeführt. Die Untersuchungsergebnisse der +20 °C Untersuchungen sind dem Anhang 10.1.1 zu entnehmen.

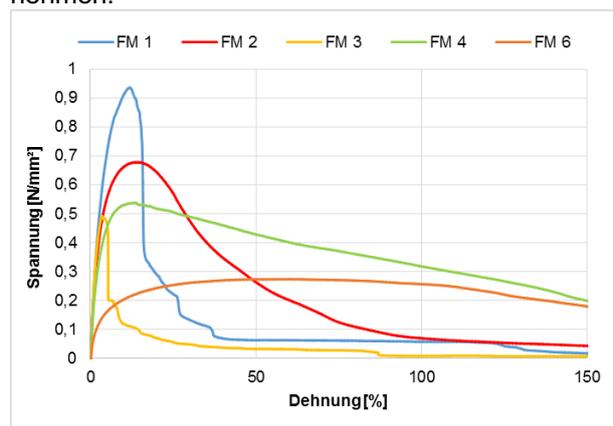


Bild 86: Spannungsentwicklung im statischen Zugversuch der heiß verarbeitbaren Fugenmassen bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
FM1 (Typ N1)	0,94	11,8
FM2 (Typ N2)	0,68	13,7
FM3 (Typ N2)	0,49	3,5
FM4 (Typ N2)	0,54	13,3
FM6 (Typ N2+)	0,27	60,0

Tab. 36: Ergebnisse der statischen Zugversuche der heiß verarbeitbaren Fugenmassen bei -20 °C

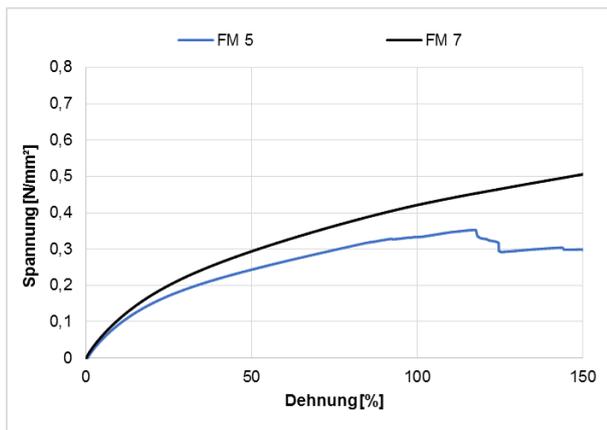


Bild 87: Spannungsentwicklung im statischen Zugversuch der kalt verarbeitbaren Fugenmassen bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
FM5 (Kl. 25)	0,35	117,5
FM7 (Kl. 35)	0,57	198,3

Tab. 37: Ergebnisse der statischen Zugversuche der kalt verarbeitbaren Fugenmassen bei -20 °C

4.4.2 Statischer Zug-/Scherversuch und zyklischer Druck-/Zug-/Scherversuch

Wie in Abschnitt 3.4.2 dargelegt, wurde zur Charakterisierung der einzelnen Fugenmassen ein statischer Zug-/Scherversuch (ZSV) sowie ein zyklischer Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) an Systemprüfkörpern nach Bild 25 durchgeführt. Die Prüfbedingungen sind für den statischen Zug-/Scherversuch der Tab. 34 und für den zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch der Tab. 35 in Abhängigkeit der Prüftemperatur zu entnehmen.

Im Nachfolgenden sind die Spannungsverläufe in Abhängigkeit der Dehnung sowie die korrelierenden Maximalspannungen und zugehörigen Dehnungen je Fugenmassentyp dargestellt.

Untersuchung bei -20 °C

Wie die Ergebnisse für FM1 (Typ N1) in Bild 88 und Tab. 38 zeigen, war infolge der zusätzlichen zyklischen Beanspruchung im Druck-/Zug-/Scherversuch im Vergleich zum statischen Zug-/Scherversuch keine nennenswerte Veränderung der Maximalspannung sowie der erreichten Dehnungen zu verzeichnen. Das elastisch eingestellte Materialverhalten von FM1 (Typ N1) wird anhand des Verlaufs der Spannungsentwicklung deutlich, da sich bis zu einer Dehnung von 300 % ein kontinuierlicher Spannungsaufbau einstellte.

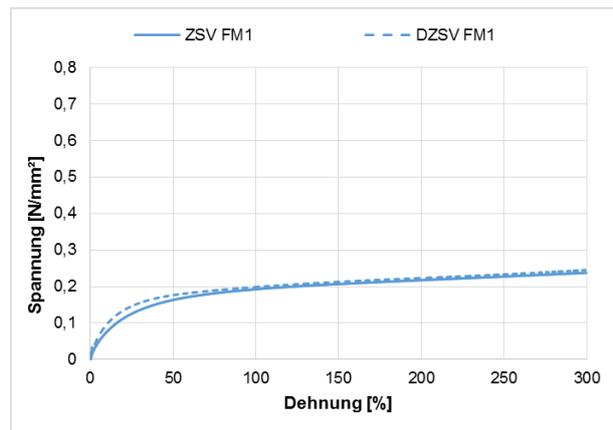


Bild 88: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM1 (Typ N1) im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
ZSV FM1	0,24	299,8
DZSV FM1	0,25	299,5

Tab. 38: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) der Fugenmasse FM1 (Typ N1) bei -20 °C

Für die Fugenmassen des Typs N2 (vgl. Bild 89, Tab. 39) konnte hingegen für FM2 durch die zyklischen Beanspruchungen gegenüber dem statischen Zug-/Scherversuch eine rd. 13 % höhere Maximalspannung bei gleichzeitig rd. 61 % geringerer Dehnung ermittelt werden. FM3 hingegen wies bei der zyklischen Beanspruchung in der erreichbaren Maximalspannung im Vergleich zum statischen Zug-/Scherversuch praktisch keinen Unterschied auf. Die beim Erreichen des Spannungsmaximums festgestellte Dehnung war nach der zyklischen Beanspruchung jedoch um rd. 34 % geringer als im statischen Zug-/Scherversuch. Bei FM4 konnte innerhalb der N2-Fugenmassen nach der zyklischen Beanspruchung gegenüber dem statischen Zug-/Scherversuch der höchste Zuwachs in der Maximalspannung (rd. 37 %) bei gleichzeitig rd. 66 % geringerer Dehnung beobachtet werden. Die charakteristische Spannungsentwicklung von FM3 grenzte sich sowohl im statischen Zug-/Scherversuch als auch nach der zyklischen Beanspruchung von FM2 und FM4 durch höhere Maximalspannungen und einem deutlich rascheren Spannungsabbau nach Erreichen des Spannungsmaximums bei -20 °C ab. Das elastisch-plastisch eingestellte Materialverhalten der Fugenmassen des Typs N2 zeigte sich insbesondere bei FM2 und FM4, welche auch nach Erreichen des Spannungsmaximums weiter Dehnung

aufnehmen konnten, ohne dass ein erheblicher Spannungsabfall festzustellen war.

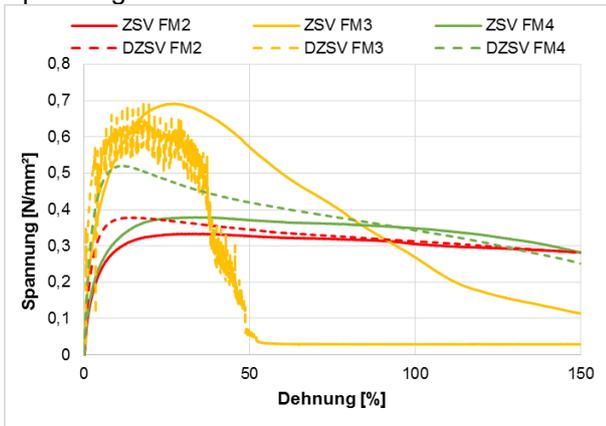


Bild 89: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM2-4 (Typ N2) im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei -20 °C

Fugenmasse [-]	σ_{max} [N/mm ²]	ϵ bei σ_{max} [%]
ZSV FM2	0,33	33,7
DZSV FM2	0,38	13,3
ZSV FM3	0,69	27,4
DZSV FM3	0,70	18,0
ZSV FM4	0,38	33,3
DZSV FM4	0,52	11,2

Tab. 39: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) der Fugenmassen FM2-4 (Typ N2) bei -20 °C

Fugenmasse FM6 (Typ N2+) zeigte nach der zyklischen Beanspruchung gegenüber dem statischen Zug-/Scherversuch ein rd. 35 % höheres Spannungsmaximum bei rd. 33 % geringerer Dehnung (vgl. Bild 90, Tab. 40). Die Charakteristik in der Spannungsentwicklung der ebenfalls elastisch-plastisch eingestellten FM6 ähnelte denen der Fugenmassen FM2 und FM4. Die kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) wiesen nach der zyklischen Beanspruchung beim Erreichen des Spannungsmaximums eine rd. 18 % höhere Dehnung als im statischen Zug-/Scherversuch (vgl. Bild 91, Tab. 41) auf. FM5 wies jedoch eine niedrigere und FM7 eine höhere Maximalspannung auf.

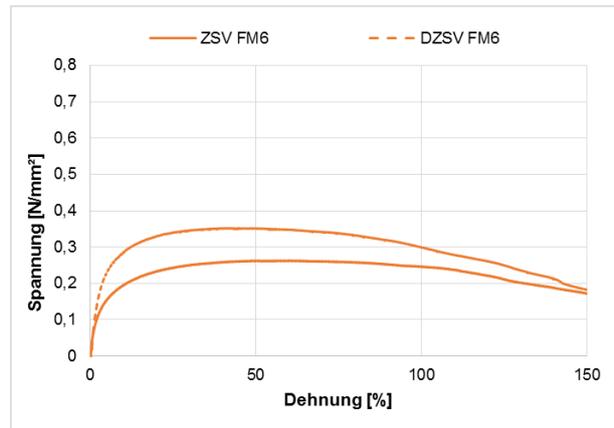


Bild 90: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei -20 °C

Fugenmasse [-]	σ_{max} [N/mm ²]	ϵ bei σ_{max} [%]
ZSV FM6	0,26	60,0
DZSV FM6	0,35	40,4

Tab. 40: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) der Fugenmasse FM6 (Typ N2+) bei -20 °C

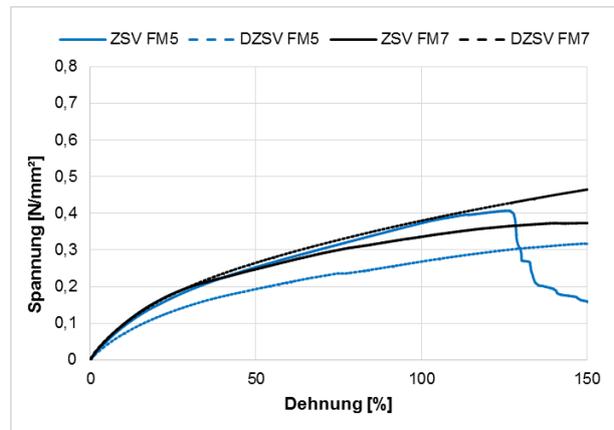


Bild 91: Spannungsentwicklung der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei -20 °C

Fugenmasse [-]	σ_{max} [N/mm ²]	ϵ bei σ_{max} [%]
ZSV FM5	0,41	126,4
DZSV FM5	0,32	150,0
ZSV FM7	0,37	158,4
DZSV FM7	0,50	187,9

Tab. 41: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) der Fugenmassen FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) bei -20 °C

Untersuchung bei +20 °C

Neben den statischen Zug-/Scherversuchen (ZSV) und den zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchen (DZSV) bei -20 °C wurden solche auch bei +20 °C durchgeführt. Wie aus Abschnitt 4.3.2 bereits bekannt, war zu erwarten, dass die Spannungen bei den aufgetragenen Verformungen aufgrund des thermoplastischen Materialverhaltens der heiß verarbeitbaren Fugenmassen bei einer Prüftemperatur von +20 °C im Vergleich zu den -20 °C Untersuchungen deutlich geringer ausfallen.

Bei Fugenmasse FM1 vom Typ N1 (vgl. Bild 92, Tab. 42) führte die zyklische Beanspruchung gegenüber dem statischen Zug-/Scherversuch zu einer Reduzierung in der Maximalspannung von rd. 50 % bei gleichzeitig rd. 69 % geringerer Dehnung.

Während sich bei den plastisch eingestellten Fugenmassen FM2, FM4 (Typ N2) und FM6 (Typ N2+) sowohl bei den ZSV als auch den DZSV bei vergleichsweise niedrigen Spannungen (0,01 bis 0,02 N/mm²) sehr großen Dehnungen (bis 280 %) einstellen, war bei der ebenfalls plastisch eingestellten Fugenmasse FM3 (Typ N2) die rd. doppelt so hohe Maximalspannung bereits bei einer Dehnung von nur etwa 28 % erreicht (vgl. Bild 93, Bild 94, Tab. 43, Tab. 44).

Die kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) zeigten hingegen bei +20 °C und -20 °C kein temperaturunabhängiges Materialverhalten, so dass die ermittelten Maximalspannungen bei ±20 °C weitgehend ident waren (vgl. Tab. 41 und Tab. 45).

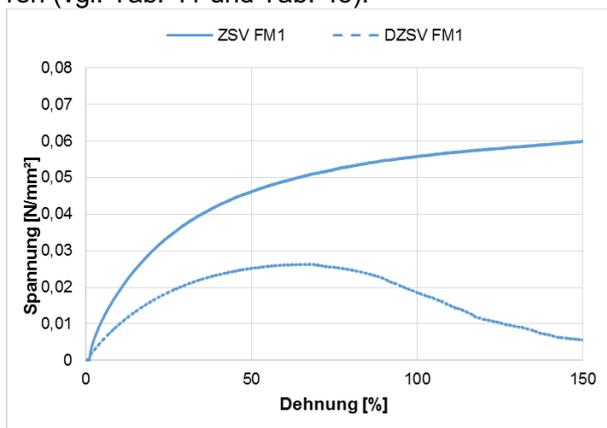


Bild 92: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM1 (Typ N1) im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
ZSV FM1	0,06	216,1
DZSV FM1	0,03	67,6

Tab. 42: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) FM1 (Typ N1) bei +20 °C

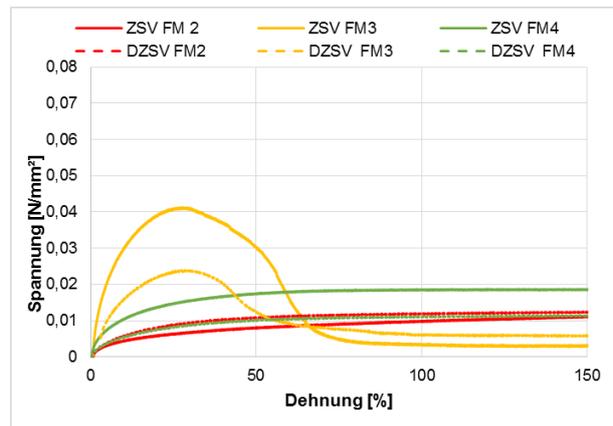


Bild 93: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM2-4 (Typ N2) im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
ZSV FM2	0,01	299,9
DZSV FM2	0,01	298,5
ZSV FM3	0,04	27,5
DZSV FM3	0,02	27,5
ZSV FM4	0,02	282,8
DZSV FM4	0,01	298,1

Tab. 43: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) FM2-4 (Typ N2) bei +20 °C

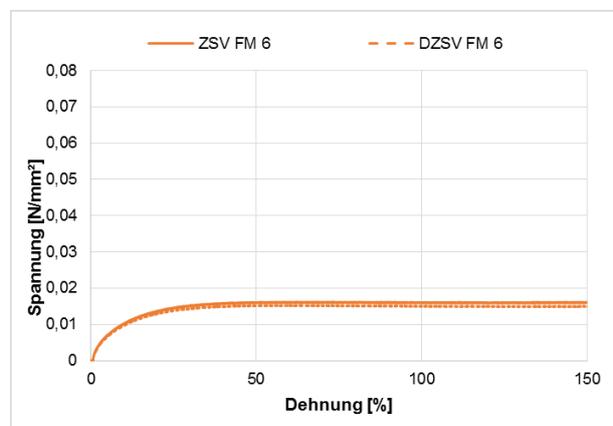


Bild 94: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
ZSV FM6	0,02	297,4
DZSV FM6	0,02	295,6

Tab. 44: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) FM6 (Typ N2+) bei +20 °C

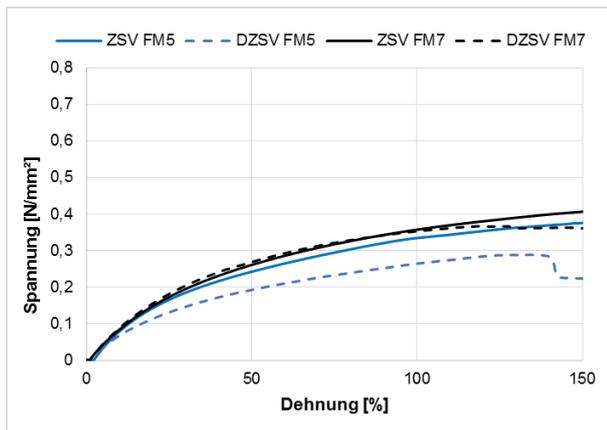


Bild 95: Spannungsentwicklung der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
ZSV FM5	0,39	186,2
DZSV FM5	0,29	134,4
ZSV FM7	0,42	176,3
DZSV FM7	0,37	120,2

Tab. 45: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) bei +20 °C

Die zugehörigen Schadensbilder (nach 300 %iger Dehnung) zeigten, dass bei Fugenmasse FM4 selbst bei der starken Überdehnung noch keine Abrisse von den Fugenflanken oder ein Reißen der Fugenmasse selber zu beobachten war. Bei Fugenmasse FM3 hingegen löste sich das Material bereits frühzeitig von den Fugenflanken ab (vgl. Bild 96).

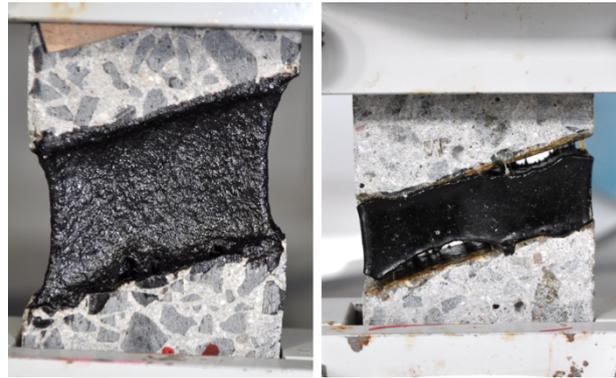


Bild 96: Schadensbilder im statischen Zug-/Scherversuch (links: FM4; rechts: FM3)

An den Proben der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM5 zeigte sich sowohl ein rein adhäsives als auch ein teilweise adhäsives Versagen mit einem kohäsiven Abscheren durch die Fugenmasse (vgl. Bild 97, links). Fugenmasse FM7 zeigte hingegen einheitlich ein rein kohäsives Versagen.



Bild 97: Versagensbilder im statischen Zug-/Scherversuch (links: FM5; rechts: FM7)

Untersuchung bei +60 °C

Abschließend wurde der statische Zug-/Scherversuch auch bei einer Prüftemperatur von +60 °C durchgeführt. Die Systemprüfkörper sowie die Prüfbedingungen waren bis auf die Prüftemperatur mit denen bei +20 °C identisch. Das thermoplastische Materialverhalten der heiß verarbeitbaren Fugenmassen erschwerte bereits bei der Prüftemperatur von +60 °C den Einbau der Probekörper in den Prüfstand. Schon durch das geringe Gewicht der Betonprobekörper verformten sich die Fugenmassen FM1 und FM4 signifikant (Bild 98). Fugenmasse FM3 löste sich sogar schon durch das Anheben des Systemprüfkörpers von der Fugenflanke ab. Demnach kann festgehalten werden, dass sich für die heiß verarbeitbaren Fugenmassen eine Prüftemperatur von +60 °C als ungeeignet darstellt, da sich die Fugenmassen bereits im unbeanspruchten Zustand verformen. Im Gegensatz dazu zeigten die kalt verarbeitbaren Fugen-

massen FM5 und FM7 auch bei +60 °C äußerlich keine bemerkenswerten Veränderungen.



Bild 98: Einbauszustand der Systemprüfkörper bei +60 °C (links: FM1; rechts: FM4)

Die Spannungsentwicklung des statischen Zug-/Scherversuchs bei +60 °C sind für die Fugenmassen FM1, FM2 und FM4 in Bild 99 dargestellt. Die dabei erfassten Maximalspannungen mit den zugehörigen Dehnungen sind in Tab. 46 aufgeführt.

Die Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs zeigen, dass bei einer Prüftemperatur von +60 °C die Spannungen um etwa das 4-fache geringer waren als bei einer Prüftemperatur von +20 °C. Des Weiteren wurde die Maximalspannung der untersuchten Fugenmassen erst mit Ende des Versuchs bei 300 % Dehnung erreicht (Tab. 46). In Bild 100 sind die ermittelten Spannungs-Dehnungsverläufe der Fugenmasse FM1 (Typs N1) in Abhängigkeit der untersuchten Prüftemperaturen dargestellt. Die Spannungsmaxima sowie die Dehnungen beim Erreichen der Spannungsmaxima sind der Tab. 47 zu entnehmen. Demnach war festzustellen, dass unabhängig von der Prüftemperatur die Spannungsmaxima erst gegen Versuchsende (300 % Dehnung) erreicht wurden.

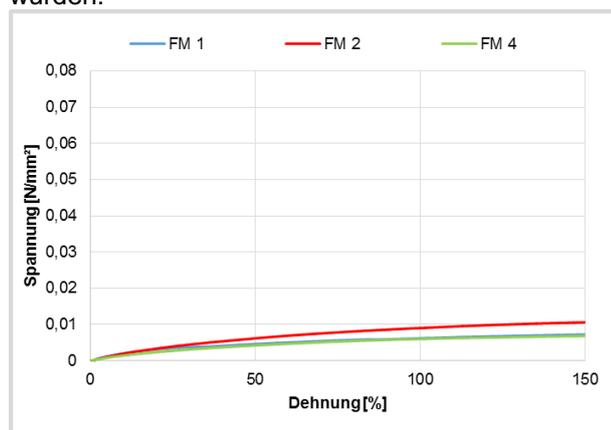


Bild 99: Spannungsentwicklung heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM1, FM2 und FM4 bei +60 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
FM1	0,009	299,4
FM2	0,013	300,0
FM4	0,008	299,2

Tab. 46: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs der heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM1, 2 und 4 bei +60 °C

Die Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs zeigen, dass bei einer Prüftemperatur von +60 °C die Spannungen um etwa das 4-fache geringer waren als bei einer Prüftemperatur von +20 °C. Des Weiteren wurde die Maximalspannung der untersuchten Fugenmassen erst mit Ende des Versuchs bei 300 % Dehnung erreicht (Tab. 46). In Bild 100 sind die ermittelten Spannungs-Dehnungsverläufe der Fugenmasse FM1 (Typs N1) in Abhängigkeit der untersuchten Prüftemperaturen dargestellt. Die Spannungsmaxima sowie die Dehnungen beim Erreichen der Spannungsmaxima sind der Tab. 47 zu entnehmen. Demnach war festzustellen, dass unabhängig von der Prüftemperatur die Spannungsmaxima erst gegen Versuchsende (300 % Dehnung) erreicht wurden.

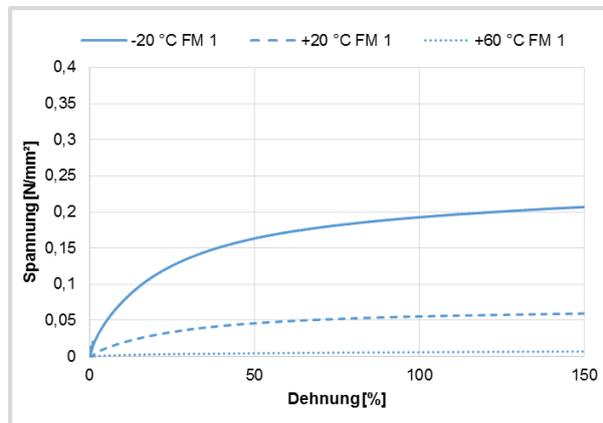


Bild 100: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuche bei -20 °C (0,1 mm/min), +20 °C und +60 °C (1,0 mm/min)

FM1	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
-20 °C	0,238	299,8
+20 °C	0,064	216,1
+60 °C	0,009	299,4

Tab. 47: Ergebnisse der statischen Zug-/Scherversuche der Fugenmasse FM1 bei -20 °C (0,1 mm/min), +20 °C und +60 °C (1,0 mm/min)

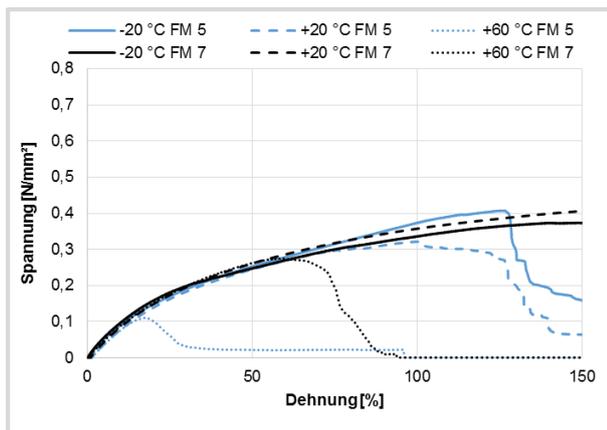


Bild 101: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuche bei -20 °C (0,1 mm/min), +20 °C und +60 °C (1,0 mm/min)

Fugenmasse [-]	σ_{\max} [N/mm ²]	ϵ bei σ_{\max} [%]
FM 5 -20 °C	0,41	126,4
FM 7 -20 °C	0,37	158,4
FM 5 +20 °C	0,32	99,9
FM 7 +20 °C	0,42	176,3
FM 5 +60 °C	0,11	17,3
FM 7 +60 °C	0,28	59,5

Tab. 48: Ergebnisse der statischen Zug-/Scherversuche der Fugenmasse FM5 und FM 7 bei -20 °C (0,1 mm/min), +20 °C und +60 °C (1,0 mm/min)

Die Spannungsentwicklung der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM5 war unabhängig von der Prüftemperatur bis zu einer Dehnung von rund 20 % nahezu identisch (vgl. Bild 101, Tab. 48). Bei einer Prüftemperatur von +60 °C wurde damit das Spannungsmaximum erreicht und der Systemprüfkörper versagte adhäsiv. Auch bei FM 5 zeigten sich mit steigender Prüftemperatur zunehmend geringere Spannungsmaxima, wobei die Unterschiede jedoch geringer ausfielen im Vergleich zu den heiß verarbeitbaren Fugenmassen. Fugenmasse FM7 zeigte im Vergleich zu FM5 hinsichtlich einer steigenden Prüftemperatur ein robusteres Verhalten. Gleichmaßen zeigte FM7 auch bei einer Prüftemperatur von +60 °C bis zum Spannungsmaximum (bei rd. 60 % Dehnung) eine mehr oder weniger identische Spannungsentwicklung wie bei ± 20 °C.

4.5 Modifizierte Systemprüfungen an künstlich gealterten Systemprüfkörpern

Zur Beurteilung des Einflusses einer künstlichen Alterung entsprechend Abschnitt 4.2.4 auf das Verhalten der Fugenmassen wurden die Ergebnisse von Systemprüfungen an so gealterten Proben

jenen an nicht gealterten Referenzsystemprüfungen gegenübergestellt. Da sich bei den Referenzuntersuchungen bei einer Prüftemperatur von +60 °C kaum verwertbare Ergebnisse für die heiß verarbeitbaren Fugenmassen erzielen ließen, wurde diese Prüftemperatur bei den künstlich gealterten Proben von Haus aus nicht mehr einbezogen. Für die Kennzeichnung der jeweiligen Ergebnisse wurden die nachfolgenden Bezeichnungen verwendet:

REF nicht gealterten Referenzsystemprüfung
V1 nach Variante 1 gealterte Systemprüfung

4.5.1 Statische Zugversuche

Untersuchung bei -20 °C

Die analog zu den in Abschnitt 4.4.1 nach künstlicher Alterung (V1) durchgeführten statischen Zugversuche sind in Bild 102 bis Bild 105 dargestellt, die zugehörigen Maximalspannungen und die dabei erreichten Dehnungen sind in den Tab. 49 bis Tab. 52 dokumentiert. Die Untersuchungsergebnisse der bei +20 °C durchgeführten Untersuchungen können dem Anhang 10.1.2 entnommen werden.

Die statischen Zugversuche bei -20 °C zeigten für Fugenmasse FM1 (Typ N1), dass die nach der künstlichen Alterung (V1) erreichte Maximalspannung annähernd identisch zu jener der Referenzprüfung (REF) ausfiel, die zugehörige Dehnung bei -20 °C jedoch rd. 4-fach größer war (Bild 100, Tab. 47). Die Spannungsentwicklung der Fugenmasse FM2 (Typ N2) zeigte nach der künstlichen Alterung einen ähnlichen charakteristischen Verlauf wie bei der Referenzprüfung (Bild 101). Die an der V1-gealterten Probe erzielte Maximalspannung war um 7 % niedriger, die dabei erreichte Dehnung um 14 % geringer als bei der REF-Probe (Tab. 48). Die Fugenmasse FM3 (Typ N2) erreichte nach der künstlichen Alterung gegenüber der Referenzprobe eine etwa doppelt so große Maximalspannung, die zugehörige Dehnung stieg um rd. 83 % an. Fugenmasse FM4 (ebenfalls Typ N2) wies infolge der künstlichen Alterung eine 39 % höhere Maximalspannung bei gleichzeitig 26 % größerer Dehnung als bei der Referenzuntersuchung auf.

Bereits in der Referenzprüfung an nicht gealterten Proben konnte für Fugenmasse FM6 des modifizierten Typs N2+ ein höheres Dehnvermögen bei gleichzeitig erheblich geringerer Maximalspannung als bei den klassischen heiß verarbeitbaren N2-Fugenmassen festgestellt werden. Durch die künstliche V1-Alterung erhöhte sich bei dieser Fugenmasse die Maximalspannung gegenüber der Referenzprüfung an nicht gealterten Proben um

85 % bei gleichzeitig 35 % geringerer Dehnung (Bild 102, Tab. 49).

Bei beiden kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) konnte nach der hier vorgenommenen V1-Alterung mit Dehnungen um rd. 260% bei gleichzeitig um rd. 35 bis 70 % reduzierten Maximalspannungen im Vergleich zu den jeweils zugehörigen nicht gealterten Proben ein deutlich höheres Dehnpotenzial nachgewiesen werden (Bild 103, Tab. 50).

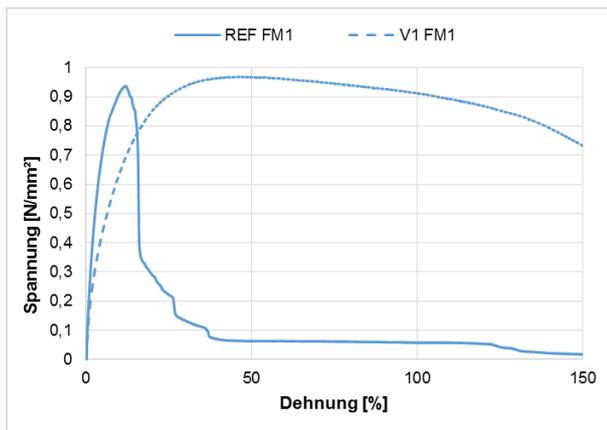


Bild 102: Spannungsentwicklung im statischen Zugversuch der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM1 (Typ N1) V1 und REF bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM1	0,94	11,8
V1 FM1	0,97	47,0

Tab. 49: Ergebnisse der statischen Zugversuche der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM 1 (Typ N1) bei -20 °C

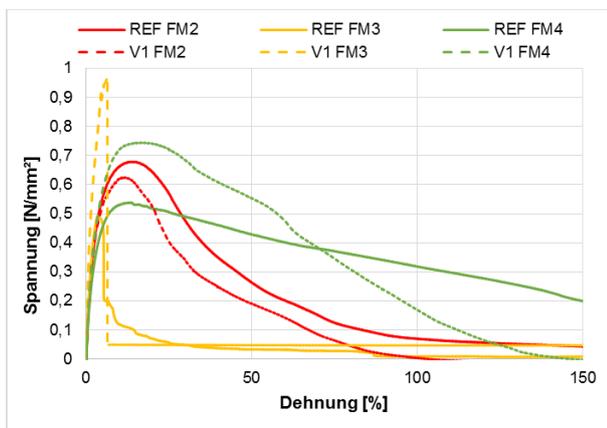


Bild 103: Spannungsentwicklung im statischen Zugversuch der heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM2-4 (Typ N2) V1 und REF bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM2	0,68	13,7
V1 FM2	0,63	11,8
REF FM3	0,49	3,5
V1 FM3	0,97	6,4
REF FM4	0,54	13,3
V1 FM4	0,75	16,8

Tab. 50: Ergebnisse der statischen Zugversuche der heiß verarbeitbaren Fugenmassen bei -20 °C

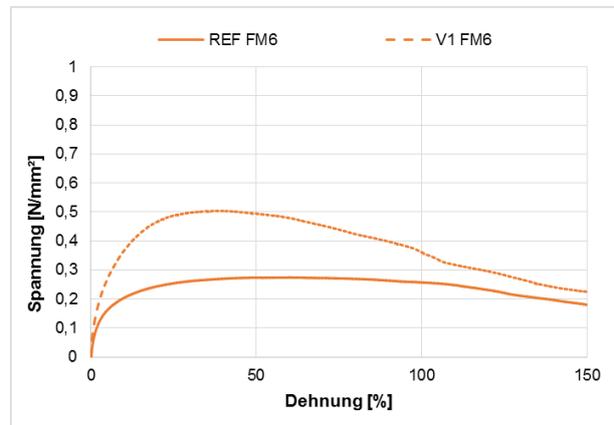


Bild 104: Spannungsentwicklung im statischen Zugversuch der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) V1 und REF bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM6	0,27	60,0
V1 FM6	0,50	39,2

Tab. 51: Ergebnisse der statischen Zugversuche der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) bei -20 °C

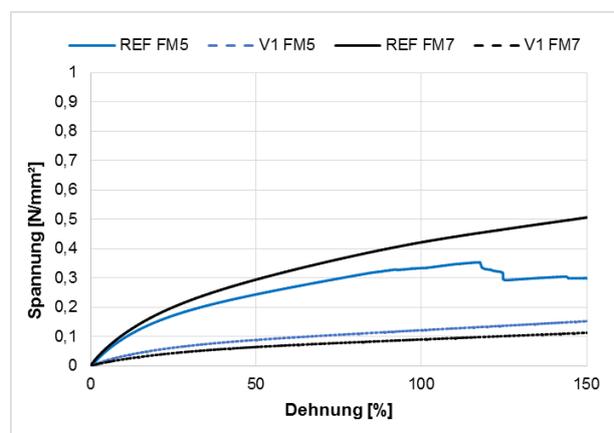


Bild 105: Spannungsentwicklung im statischen Zugversuch der kalt verarbeitbaren Fugenmassen bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM5	0,35	117,5
V1 FM5	0,23	272,5
REF FM7	0,57	198,3
V1 FM7	0,17	259,8

Tab. 52: Ergebnisse der statischen Zugversuche der kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 und FM7 bei -20 °C

4.5.2 Statische Zug-/Scherversuche

Untersuchung bei -20 °C

Infolge der künstlichen Alterung der Systemprüfkörper (V1) bauten sich in der Fugenmasse FM1 (Typ N1) gegenüber der Referenzprüfung (REF) erheblich (rd. 3,2-fach) höhere Spannungen auf (vgl. Bild 106, Tab. 53), die beim Spannungsmaximum festgestellte Dehnung fiel mit nur mehr 15 % gegenüber 300 % bei der Referenzprüfung signifikant ab. Der anschließende kontinuierliche Spannungsabfall ließ auf ein adhäsives Versagen der gealterten Systemprüfkörper schließen, was sich auch anhand der Versagensbilder bestätigte.

Die heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2 zeigten nach der künstlichen Alterung, mit Ausnahme von FM 3, im Vergleich zu den zugehörigen Referenzprüfungen ebenfalls erheblich höhere Spannungsmaxima (min. 2,2-fache) bei ebenfalls reduziertem Dehnvermögen (vgl. Bild 107, Tab. 54). FM3 zeigte nach der künstlichen Alterung gegenüber der Referenzprüfung ein nahezu gleiches Spannungsmaximum, jedoch bei 60 % geringerer Dehnung.

Die ebenfalls heiß verarbeitbare, jedoch modifizierte Fugenmasse FM6 (Typ N2+) zeigte hingegen auch nach der künstlichen Alterung eine ähnliche charakteristische Spannungsentwicklung wie in der Referenzprüfung ohne künstliche Alterung (vgl. Bild 108, Tab. 55). Die sowohl ohne als auch mit künstlicher Alterung beim Spannungsmaximum erreichte Dehnung lag bei rd. 60 %. Das Spannungsmaximum war bei der V1-gealterten Probe um rd. 46 % höher als bei der REF-Probe. Nach dem Überschreiten des Spannungsmaximums unterschied sich das weitere Verhalten dieser modifizierten N2+-Fugenmasse jedoch grundlegend von dem der klassischen N2-Fugenmassen: Bei Ersterer wurden nach Überschreiten der Maximalspannung sehr hohe Dehnungen ohne einen merklichen Spannungsabfall aufgenommen, während bei den klassischen N2-Fugenmassen durchweg ein mehr oder weniger großer Spannungsabfall zu verzeichnen war.

Die kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) zeigten nach der hier

vorgenommenen künstlichen V1-Alterung im Vergleich zur Referenzprüfung deutlich niedrigere Maximalspannungen (vgl. Bild 109, Tab. 56). Nach der PAV-Konditionierung zeigte sich sowohl bei FM5 als auch bei FM7 eine erheblich weichere Konsistenz und eine Volumenzunahme der Fugenmasse. Der Grund dafür ist in der kombinierten Druck- und Temperaturbeanspruchung während der PAV-Konditionierung zu vermuten, die bei kalt verarbeitbaren Fugenmassen zu einer Aufspaltung der chemisch vernetzten Polymere in kürzere Polymere oder Monomere führen kann. Daraus ist abzuleiten, dass die hier primär für heiß verarbeitbare Fugenmassen vorgenommene PAV-Konditionierung für kalt verarbeitbare Fugenmasse ungeeignet ist, was auch im Vorfeld bereits erwartet wurde. Um zu überprüfen, inwieweit bei einer künstlichen Alterung nur über UV- und Frost-Tauwechsel-Bearbeitung (ohne Druck-Temperaturbeaufschlagung) die genannten Probleme vermeidbar sind, wurde für FM7 ein weiterer statischer Zug-/Scherversuch mit einer so modifizierten Alterung durchgeführt. Den Ergebnissen kann entnommen werden (vgl. Tab. 56), dass sich eine solche Alterung aus UV- und Frost-Tauwechsel-Bearbeitung nur wenig auf das Material- sowie Adhäsionsverhalten der kalt verarbeitbaren Fugenmasse auswirkte, gegenüber der Referenzprüfung ohne Alterung wurde hier eine lediglich rd. 8 % niedrigere Maximalspannung bei rd. 3 % geringerer Dehnung festgestellt.

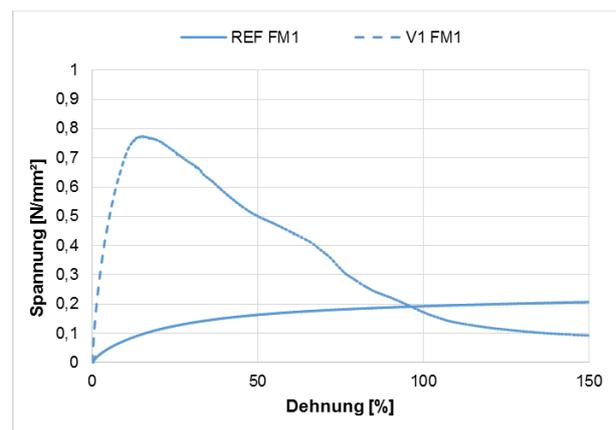


Bild 106: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM1 (Typ N1) REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM1	0,24	299,8
V1 FM1	0,77	15,0

Tab. 53: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM1 (Typ N1) REF und V1 bei -20 °C

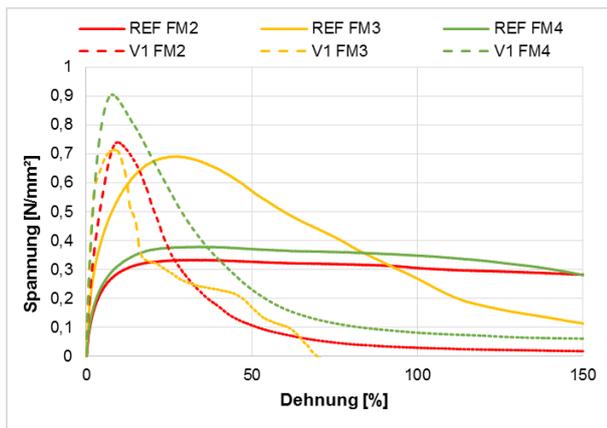


Bild 107: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM2-4 (Typ N2) REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM2	0,33	33,7
V1 FM2	0,74	9,8
REF FM3	0,69	27,4
V1 FM3	0,72	8,2
REF FM4	0,38	33,3
V1 FM4	0,91	8,0

Tab. 54: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM2-4 (Typ N2) REF und V1 bei -20 °C

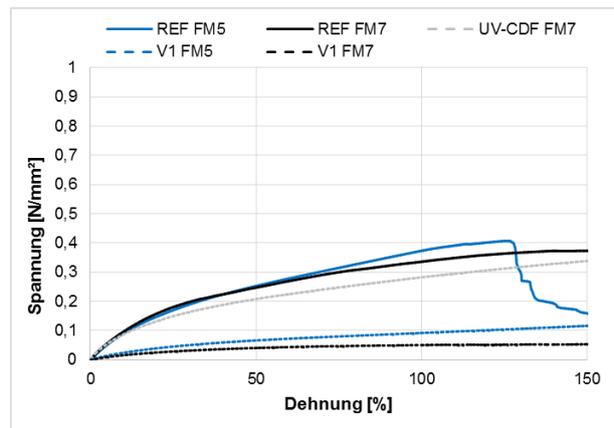


Bild 109: Spannungsentwicklung der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM5	0,41	126,4
V1 FM5	0,19	284,9
REF FM7	0,37	158,4
V1 FM7	0,06	212,8
UV-CDF FM7	0,34	154,4

Tab. 56: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) REF und V1 bei -20 °C

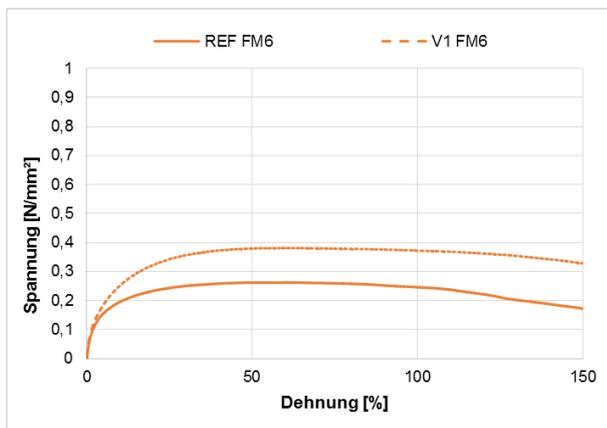


Bild 108: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM6	0,26	60,0
V1 FM6	0,38	61,2

Tab. 55: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM6 (Typ N2+) REF und V1 bei -20 °C

Untersuchung bei +20 °C

Die in Bild 110 bis Bild 113 dargestellten Ergebnisse der statischen Zug-/Scherversuche bei +20 °C der künstlich gealterten Fugenmassen zeigen, dass bei den heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2 und N2+ infolge der künstlichen Alterung die erreichten Maximalspannung im Vergleich zu den Referenzprüfungen höher waren, sich nach Erreichen des Spannungsmaximums der charakteristische Spannungsverlauf von gealterten und nicht-gealterten Proben jedoch nahezu gleich einstellte. Demnach konnte mit Ausnahme von FM3 auch nach 300 % Dehnung kein Versagen an den Systemprüfkörpern festgestellt werden.

Fugenmasse FM1 (Typ N1) baute nach der künstlichen Alterung im statischen Zug-/Scherversuch zu Beginn deutlich schneller Spannung auf als in der nicht-gealterten Probe (Bild 108), erreichte jedoch bereits nach rd. 35 % Dehnung das Spannungsmaximum (Tab. 55). Bei weiterem Dehnungszuwachs folgte in der V1-gealterten Probe bereits ein kontinuierlicher Spannungsabbau, während die Spannung in der REF-Probe in diesem Dehnungsbereich noch stetig zunahm.

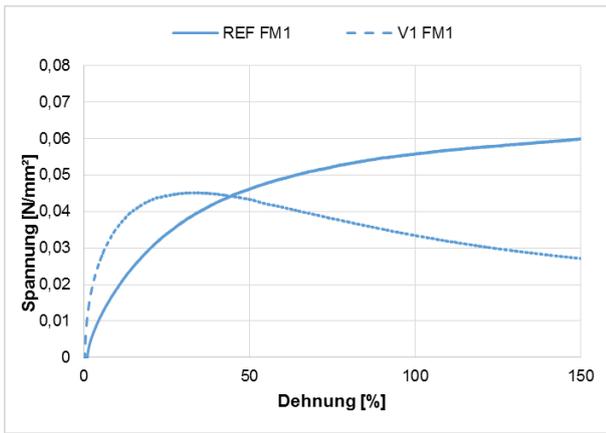


Bild 110: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM1 (Typ N1) REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM1	0,06	216,1
V1 FM1	0,05	35,3

Tab. 57: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM1 (Typ N1) REF und V1 bei +20 °C

Die kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) wiesen auch bei +20 °C erheblich geringere Spannung nach der künstlichen Alterung der Systemprüfkörper auf (vgl. Bild 113, Tab. 60).

Da die zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuche der künstlich gealterten Systemprüfkörper bei einer Prüftemperatur von +20 °C nahezu identische Ergebnisse im Vergleich zu den statischen Zug-/Scherversuchen lieferten, sind diese lediglich im Anhang 10.1.2 (Bild 205 bis Bild 208) dargestellt.

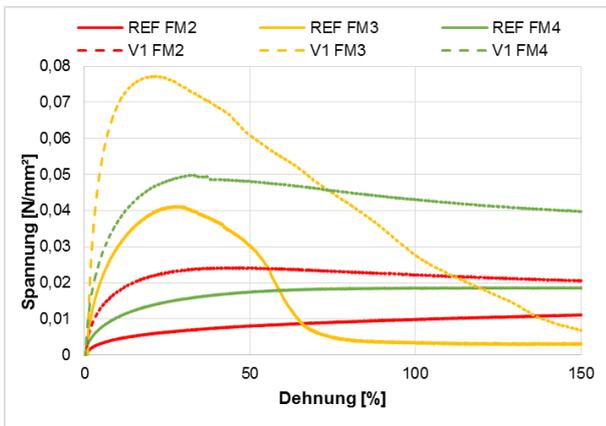


Bild 111: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen FM2-4 (Typ N2) REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM2	0,01	299,9
V1 FM2	0,02	44,5
REF FM3	0,04	27,5
V1 FM3	0,08	21,8
REF FM4	0,02	282,8
V1 FM4	0,05	32,4

Tab. 58: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM2-4 (Typ N2) REF und V1 bei +20 °C

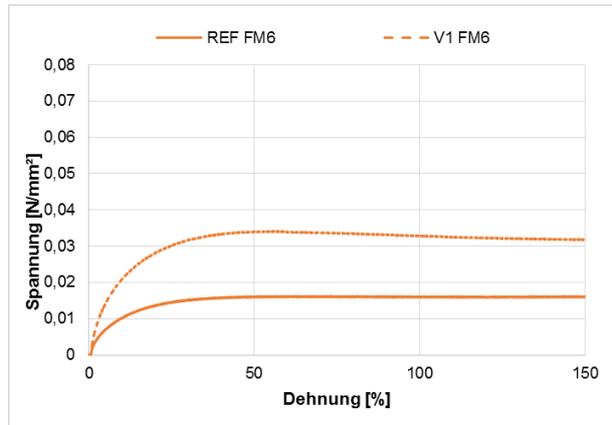


Bild 112: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM6	0,02	297,4
V1 FM6	0,03	54,6

Tab. 59: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM6 (Typ N2+) REF und V1 bei +20 °C

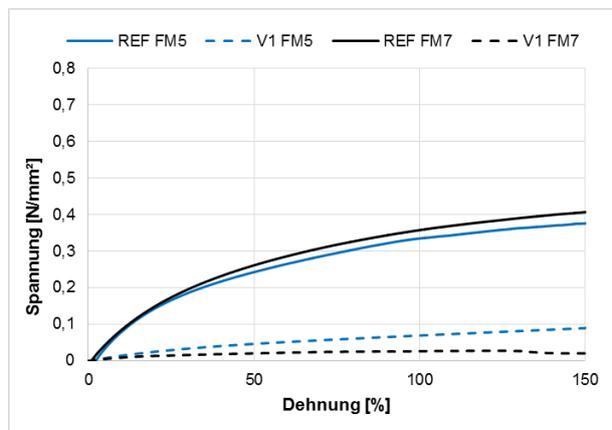


Bild 113: Spannungsentwicklung der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM5	0,39	186,2
V1 FM5	0,15	300,0
REF FM7	0,42	176,3
V1 FM7	0,03	124,2

Tab. 60: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) REF und V1 bei +20 °C

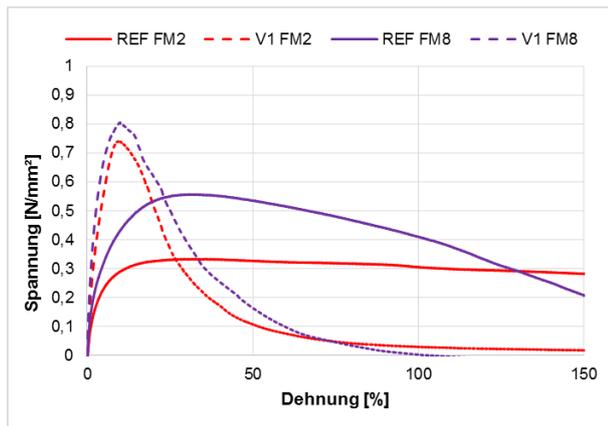


Bild 114: Spannungsentwicklung der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM2 und FM8 REF und V1 im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM2	0,33	33,7
V1 FM2	0,74	9,8
REF FM8	0,56	30,9
V1 FM8	0,81	10,0

Tab. 61: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs FM2 und FM8 REF und V1 bei +20 °C

Die zusätzlich untersuchte Fugenmasse FM8 (Typ N2), welche der Fugenmasse FM2 entspricht, jedoch aus dem Produktionsjahr 2011 stammte, zeigte bereits im Referenzzustand ein rd. 70 % höheres Spannungsmaximum als die Fugenmasse FM2 (vgl. Bild 114, Tab. 61). Infolge der künstlichen Alterung von FM8 erreichte diese im Vergleich FM2 nur ein geringfügig höheres Spannungsmaximum. Die charakteristische Spannungsentwicklung war dabei nahezu ident zu jener der Fugenmasse FM2.

4.5.3 Zyklische Druck-/Zug-/Scherversuche

Untersuchung bei -20 °C

Die zusätzlich bei -20 °C an vorab künstlich gealterten Systemprüfkörper durchgeführte zyklische Beanspruchung im Druck-/Zug-/Scherversuch (V1 DZSV) führte bei Fugenmasse FM1 (Typ N1) gegenüber den ebenfalls künstlich gealterten stati-

schen Zug-/Scherversuch (V1 ZSV) zu einer Reduzierung der beim Erreichen der Maximalspannung aufnehmbaren Dehnung um 73 % (Bild 115, Tab. 62). Die dabei ermittelte Maximalspannung blieb nahezu unverändert.

Bei den Fugenmassen FM2 bis FM4 (Typ N2) führte die zusätzliche zyklische Beanspruchung, verglichen mit den zugehörigen statischen Zug-/Scherversuchen zu einer Erhöhung der Maximalspannung, die jedoch sehr unterschiedlich ausfiel (FM3: 100 %, FM4: 29 % und FM4: 16 %) (vgl. Bild 105, Tab. 63). Die dabei jeweils erreichte Gesamtdehnung wurde durch die zusätzliche zyklische Beanspruchung ebenfalls sehr unterschiedlich (Erhöhung um 4 % (FM 2) bzw. 75 % (FM3) sowie Reduzierung um 40% (FM4)) verändert.

Die zyklische Beanspruchung führte weder bei der modifizierten heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) noch bei den beiden kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 und FM7 zu nennenswerten Veränderungen in der jeweiligen Spannungsentwicklung (Bild 117, Tab. 64) bzw. (Bild 117, Tab. 64).

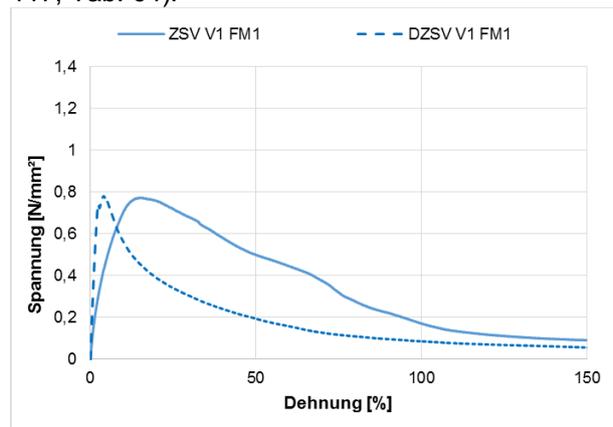


Bild 115: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM1 (Typ N1) V1 im statischen Zug-/Scherversuch (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch (DZSV) bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
ZSV V1 FM1	0,77	15,0
DZSV V1 FM1	0,78	4,1

Tab. 62: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) FM1 (Typ N1) V1 bei -20 °C

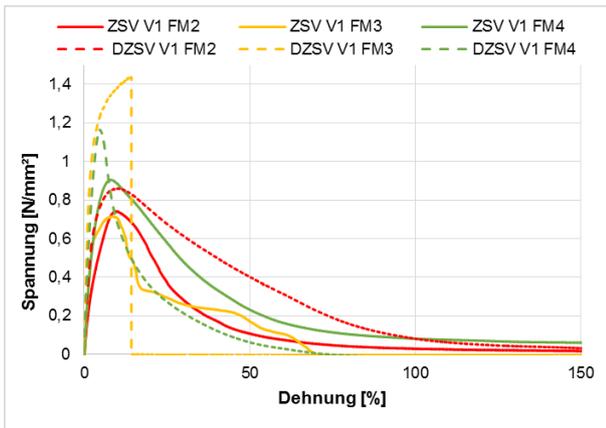


Bild 116: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM2 bis FM4 (Typ N2) REF und V1 im ZSV und DSZV bei -20 °C

Fugenmasse [-]	σ_{max} [N/mm ²]	ϵ bei σ_{max} [%]
ZSV V1 FM2	0,74	9,8
DZSV V1 FM2	0,86	10,2
ZSV V1 FM3	0,72	8,2
DZSV V1 FM3	1,44	14,3
ZSV V1 FM4	0,91	8,0
DZSV V1 FM4	1,17	4,8

Tab. 63: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) FM2-4 (Typ N2) V1 bei -20 °C

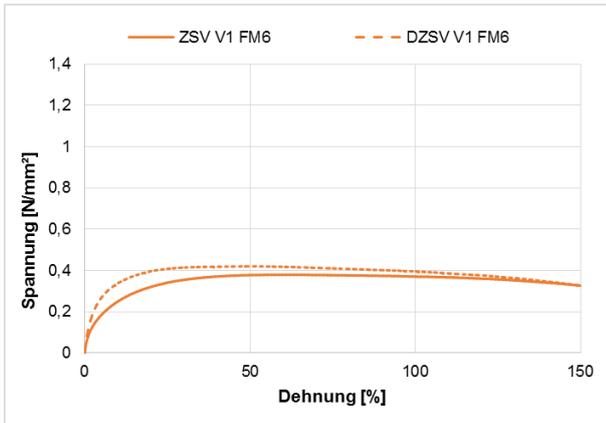


Bild 117: Spannungsentwicklung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) REF und V1 im ZSV und DSZV bei -20 °C

Fugenmasse [-]	σ_{max} [N/mm ²]	ϵ bei σ_{max} [%]
ZSV V1 FM6	0,38	61,2
DZSV V1 FM6	0,42	48,0

Tab. 64: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) FM6 (Typ N2+) V1 bei -20 °C

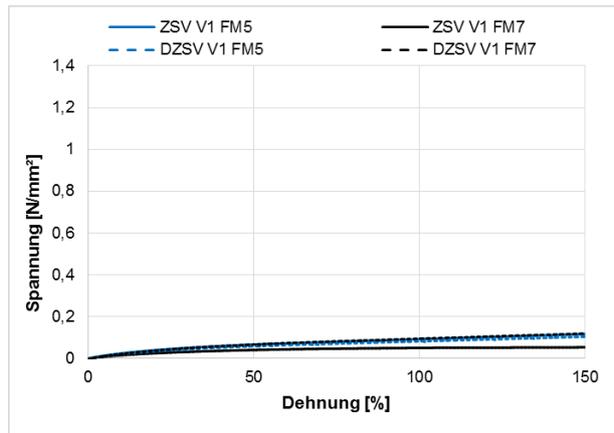


Bild 118: Spannungsentwicklung der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) V1 im ZSV und DSZV bei -20 °C

Fugenmasse [-]	σ_{max} [N/mm ²]	ϵ bei σ_{max} [%]
ZSV V1 FM5	0,19	284,9
DZSV V1 FM5	0,17	298,1
ZSV V1 FM7	0,06	212,8
DZSV V1 FM7	0,18	268,3

Tab. 65: Ergebnisse des statischen Zug-/Scherversuchs (ZSV) und zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV) FM5 (Klasse 25) und FM7 (Klasse 35) V1 bei -20 °C

4.5.4 Zusammenfassung der modifizierten Systemprüfungen an künstlich gealterten Systemprüfkörpern

Eine künstliche Alterung der Systemprüfkörper bewirkte insbesondere bei einer Prüftemperatur von -20 °C deutliche Veränderungen in der Spannungs-Dehnungsentwicklung der untersuchten Fugenmassen. Bei den Fugenmassen FM1 bis FM4 führte die künstliche Alterung zu teilweise erheblich höheren Maximalspannungen sowie deutlich reduziertem Dehnvermögen. Als Ursache können die bereits in Abschnitt 4.2.2 dargelegten Veränderungen in den rheologischen Eigenschaften (komplexer Schermodul und Phasenwinkel) nach der PAV-Konditionierung genannt werden. Dabei konnte für FM1 durch die thermische Beanspruchung eine Alterung des Bitumens und für FM2 und FM4 eine Polymerdegradation identifiziert werden. Die heiß verarbeitbare Fugenmasse FM3 vom Typ N2 zeigte von Beginn an im Vergleich zu FM2 und FM4 vom gleichen Typus ein differenziertes Materialverhalten respektive ein geringeres Dehnvermögen. Nach der künstlichen Alterung von FM3 konnte zwar eine Reduzierung des Dehnvermögens im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C festgestellt werden, jedoch blieb die erreichte Maximalspannung nahezu identisch. Dies wird auch durch eine im Vergleich

zu FM2 und FM4 geringere Erhöhung des komplexen Schermoduls bestätigt, was bei dieser Fugenmasse auf einen geringeren Einfluss der Bitumenalterung gegen eine erzwungene Verformung schließen lässt.

Die modifizierte heiß verarbeitbare Fugenmasse FM6 (Typ N2+) zeigte hingegen auch nach der künstlichen Alterung gegenüber den zugehörigen nicht gealterten Referenzproben keine nennenswerten Veränderungen im Spannungs-Dehnungsverhalten. Für die gute Alterungsbeständigkeit dieser modifizierten Fugenmasse gegenüber den klassischen Vertretern FM1 bis FM4 ist vermutlich ein höherer Polymergehalt verantwortlich, der bereits in den rheologischen Untersuchungen (vgl. Abschnitt 4.1.2) für ein differenziertes Steifigkeitsverhalten im nicht gealterten Zustand als maßgeblicher Unterschied durch die Modifikation ermittelt wurde.

Für die kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 und FM7 hat sich gezeigt, dass das für heiß verarbeitbaren Fugenmassen herangezogene Verfahren zur künstlichen Alterung nicht zweckmäßig ist. Insbesondere die Druck-Temperaturbeanspruchung (PAV-Konditionierung) in diesem Modus verändert die Struktur der Polymere so signifikant, dass dies die natürliche Alterung nicht hinreichend simuliert. Somit ist für solche Fugenmassen das Verfahren zur beschleunigten Alterung entsprechend anzupassen.

5 Untersuchung an repräsentativen Streckenabschnitten

Das neu entwickelte Prüfverfahren sollte zusätzlich zu den im Labor hergestellten Prüfkörpern an Prüfkörper aus bestehenden Fugenfüllsystemen validiert werden, um somit eine Aussage über den Fugenzustand in situ anhand von quantitativen Daten zu ermöglichen und einen eventuell vorhandenen Schädigungsgrad des Fugenfüllsystems abzuschätzen. Die Aussagekraft dieser Messergebnisse liefert somit eine erste Einschätzung zur Validität des Prüfverfahrens. Für einen weiterreichenden Bewertungshintergrund sind im Anschluss ggf. ergänzende Strecken mit unterschiedlichen

Randbedingungen (Nutzungsdauer, Fugenmasse etc.) zu überprüfen. Hierzu wurden im Dialog mit der Praxis geeignete Streckenabschnitte ausgewählt. Ziel war es drei Streckenabschnitte zu ermitteln, welche möglichst viele Gemeinsamkeiten aufwiesen und sich – im optimalen Fall – nur durch die Liegezeit der Fugenmasse unterscheiden.

Die Recherche hat gezeigt, dass die Fugenmasse FM2 eine geeignete Basis darstellt, um möglichst vergleichbare Streckenabschnitte auszuwählen.

Basierend auf der Datengrundlage der Recherche wurden die nachstehenden Streckenabschnitte ausgewählt:

A48 - ca. 3 km Abschnittslänge

Liegezeit der Fugenmasse zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme: ca. 1,5 Jahre

A2 - ca. 14,5 km Abschnittslänge

Liegezeit der Fugenmasse zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme: ca. 3 Jahre

A40 - ca. 1 km Abschnittslänge

Liegezeit der Fugenmasse zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme: ca. 13,5 Jahre

Diese Streckenabschnitte wiesen die folgenden Gemeinsamkeiten auf:

- Bezeichnung der heiß verarbeitbaren Fugenmasse
- Ausführende Firma
- Dokumentation der Fugenherstellung
- Messmarken zur Bestimmung der Fugenspaltbreite vorhanden
- Messdaten der Fugenspaltbreiten bzw. Fugenspaltöffnungsweiten vorhanden

5.1 Zustandserfassung repräsentativer Streckenabschnitte

5.1.1 Vorgehensweise

Zur qualitativen Beurteilung des Fugenzustandes in situ wurden die drei ausgewählten Streckenab-

schnitte im Rahmen einer visuellen Zustandserfassung begutachtet.

Im Anschluss an die Zustandserfassung wurde für jeden Streckenabschnitt vor Ort ein Bereich für die Bohrkernentnahme definiert. Dieser sollte ein möglichst intaktes Bild der Fuge aufweisen. Die für die Bohrkernentnahme vorgesehenen Fugen wurden ausführlich dokumentiert. Neben den Plattenabmessungen wurde die konstruktive Ausbildung der Fuge inklusive der relevanten Abmessungen aufgezeichnet.

Ein maßgebender Vorteil der drei ausgewählten Streckenabschnitte war die bereits erfolgte Installation von Messmarken zur Erfassung der Änderung der Fugenspaltbreite. Die zum Zeitpunkt der Begutachtung vorherrschenden Fugenspaltbreiten wurden ebenfalls dokumentiert.

5.1.2 BAB A48

Die Begutachtung der A48 erfolgte im März 2016 bei heiterem bis sonnigem Wetter. Die Lufttemperatur betrug 8,2 bis 12,3 °C, die zugehörigen Bauteiltemperaturen der Betonfahrbahndecke betragen aufgrund der Sonneneinstrahlung 6,9 bis 14,2 °C. Die Randbedingungen des Streckenabschnitts, in welchem FM2 eingesetzt wurde, sind im Folgenden zusammengefasst.

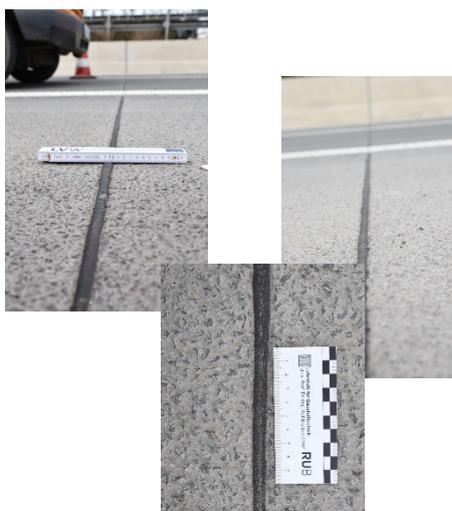
Eigenschaften des Streckenabschnittes:

- Grundhafte Erneuerung Oktober 2014
- Einbau der Fugenfüllsysteme im November und Dezember 2014
- Liegezeit der Fugenmasse ca. 1,5 Jahre
- Alter der Betondecke ca. 1,5 Jahre
- Waschbetonoberfläche
- Teilbereich: 100 m
- Fugenspaltbreite: 10 mm
- Plattenlänge: ca. 5,0 m (4,95 bis 5,08 m)
- Plattenbreite: ca. 3,0 m (3,01 bis 3,02 m)

Neben der quantitativen Ermittlung der Fugenspaltöffnungsweiten, wurde vor der Bohrkernentnahme eine qualitative visuelle Zustandserfassung durchgeführt. Ziel dieser Zustandserfassung war es, möglichst repräsentative und intakte Fugen für die Bohrkernentnahme zu eruieren.

Visuelle Zustandserfassung:

- z.T. (stark) überdrückt
- z.T. ungleichmäßiger Verguss
- z.T. Blasenbildung
- z.T. zweilagiger Verguss



Links: überdrückte Fuge

Mitte: Blasenbildung

Rechts: leichte „Elefantenhaut“, konvexe Lage der FM

Bild 119: Zustandserfassung A48 – Querfugenspaltbreite 10 mm

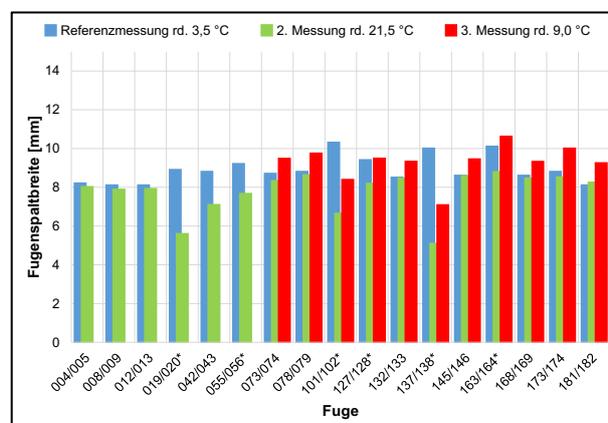
Die qualitative Bewertung der visuellen Zustandserfassung werden anhand der Zusammenfassung in Bild 119 verdeutlicht. Aufgrund der ungünstigen Witterungsverhältnisse zum Zeitpunkt der Fugenerstellung (Lufttemperaturen: $-0,3$ bis $+13,6$ °C; Bauteiltemperaturen: $+0,1$ bis $+9,8$ °C) sind die festgestellte Blasenbildung, der ungleichmäßige Verguss sowie der zweilagige Verguss auf den Einbau zurückzuführen und aus der Dokumentation des Einbaus von Fugenmassen auf der A48 bekannt. Die Überdrückung der Querscheinfugen ist vorrangig im Standstreifen vorhanden. Diese Problematik kann nach aktuellem Kenntnisstand nur spekulativ beantwortet werden und lässt sich möglicherweise auf die Stauchung der Fugenmasse bei warmen Temperaturen, im Zusammenwirken mit einer zu geringen Rückverformung bei kalten Temperaturen zurückführen.

Die Bohrkernentnahme erfolgte an ausgewählten Fugen mit einer Fugenspaltbreite von rd. 10 mm. Grundlegend ergab sich ein positives Erscheinungsbild dieser Fugen, sodass die qualitativ als gut bewerteten Fugen, mit einem gleichmäßigen Fugenverguss und einer möglichst geringen Überdrückung für die Bohrkernentnahmen im Standstreifen vorgesehen wurden.

Änderung der Fugenspaltbreite

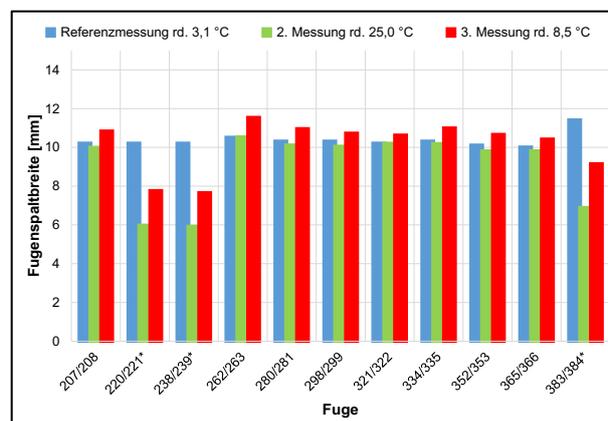
Zur Bestimmung der Änderung der Fugenspaltbreiten liegen die Daten von drei Untersuchungszeitpunkten vor. Die erste Messung erfolgte zum Zeitpunkt der Fugenerstellung im November/Dezember 2014. Im Juli 2015 erfolgte die zweite Messung. Während der Zustandserfassung und der Bohrkernentnahme erfolgte die dritte Messung im März/April 2016. Die Darstellung der absoluten Fugenspaltbreiten ist unterteilt nach den ursprüng-

lichen Fugenspaltbreiten und in Bild 120 bis Bild 122 dargestellt.



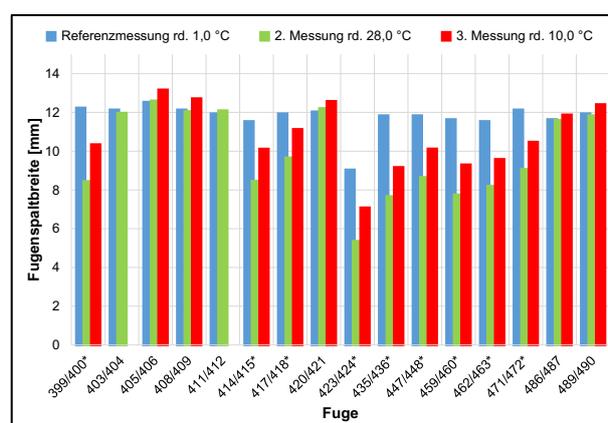
*angrenzende Fugen zum Zeitpunkt der Messung nicht gerissen

Bild 120: Fugenspaltbreiten A48 – Querfugenspaltbreite 8 mm



*angrenzende Fugen zum Zeitpunkt der Messung nicht gerissen

Bild 121: Fugenspaltbreiten A48 – Querfugenspaltbreite 10 mm



*angrenzende Fugen zum Zeitpunkt der Messung nicht gerissen

Bild 122: Fugenspaltbreiten A48 – Querfugenspaltbreite 12 mm

Die statistische Auswertung der gesamten Messdaten ist in Tab. 66 dokumentiert. Auffällig sind die großen Stauchungen (negativen Dehnungen) von bis zu $-49,6$ % bei der zweiten Messung, bzw.

-29,6 % bei der dritten Messung. Die Analyse der Rissbreiten der angrenzenden Fugen zum Zeitpunkt der Fugenherstellung zeigt, dass die Extremwerte der Stauchung die Fugen betreffen, welche nach der Fugenherstellung zuerst gerissen sind. Der Einfluss nicht gerissener Querscheinfugen ist folglich in der statistischen Betrachtung der Fugenspaltbewegungen nicht zu vernachlässigen.

	Min	Max	Mittel	Median	Tem.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[°C]
Fugenspaltbreite = 8 mm					
2. Messung	-49,6	1,8	-12,0	-3,3	+21,5
3. Messung	-29,6	14,3	3,0	9,0	+9,0
Fugenspaltbreite = 10 mm					
2. Messung	-42,1	0,2	-12,4	-2,2	+25,0
3. Messung	-25,1	9,8	-2,1	4,1	+9,0
Fugenspaltbreite = 12 mm					
2. Messung	-40,9	1,4	-16	-22,3	+28,0
3. Messung	-22,6	5,1	-8,9	-13	+10,0

Tab. 66: Fugenspaltbewegung bezogen auf die Initialmessung – A48



Bild 123: Überbeanspruchung der Fugensysteme A48 (links: heiß verarbeitbare Fugenmasse; rechts: heiß verarbeitbare Fugenmasse)

Exemplarisch sind in Bild 123 jeweils ein überbeanspruchtes Fugenfüllsystem mit einer heiß verarbeitbaren Fugenmasse und einer kalt verarbeitbaren Fugenmasse dargestellt.

	Min	Max	Mittel	Median	Tem.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[°C]
Fugenspaltbreite = 8 mm					
2. Messung	-19,7	1,8	-3,4	-2,3	+21,5
3. Messung	8,4	14,3	10,8	9,9	+9,0
Fugenspaltbreite = 10 mm					
2. Messung	-2,9	0,2	-1,6	-1,9	+25,0
3. Messung	4,0	9,8	5,8	5,8	+9,0
Fugenspaltbreite = 12 mm					
2. Messung	-1,4	1,4	0,0	0,3	+28,0
3. Messung	2,1	5,1	4,1	4,5	+10,0

Tab. 67: Fugenspaltbewegung bezogen auf die Initialmessung, ohne Fugenspaltbewegungen an Paketrissen – A48

Tab. 67 zeigt eine analoge statistische Auswertung der Änderung der Fugenspaltbreiten, wie sie bereits Tab. 66 beinhaltet, unter Ausschluss der Querscheinfugen, bei denen die angrenzenden Fugen zum Zeitpunkt der Initialmessung nicht gerissen waren („Paketreißer“). Mit Ausnahme von Testfeld 1 (Fugenspaltbreite = 8 mm) ist eine deutliche Reduzierung der Spannweite der Messwerte zu verzeichnen.

5.1.3 BAB A2

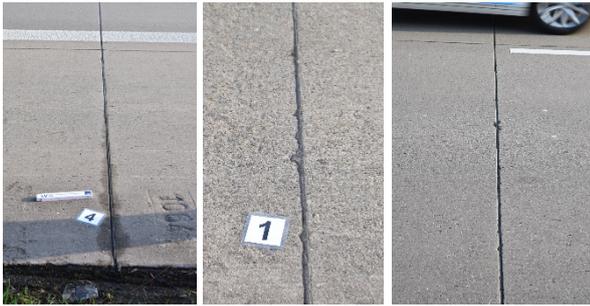
Der betrachtete Abschnitt auf der A2 wies mit einer Fugenspaltbreite von 10 mm und einer Liegezeit der Fugenmasse FM 2 von ca. 3 Jahren zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme ebenfalls sehr gute Randbedingungen zur Validierung der Prüfsystematik anhand von repräsentativen Streckenabschnitten auf.

Die Eigenschaften des Streckenabschnittes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eigenschaften des Streckenabschnittes:

- Fugensanierung Mai bis Juli 2013
- Liegezeit der Fugenmasse ca. 3 Jahre
- Alter der Betondecke > 20 Jahre
- Teilbereich: ca. 14,5 km
- Fugenspaltbreite: 10 mm
- Plattenlänge: ca. 5,0 m (4,63 bis 5,21 m)
- Plattenbreite: ca. 2,5 m (2,49 bis 2,51 m)

Aufgrund der Gesamtlänge von ca. 14,5 km, wurden zur Erfassung eines repräsentativen Teilabschnittes mit möglichst intakten Fugenfüllsystemen verschiedene Teilabschnitte visuell begutachtet und anschließend der Streckenabschnitt mit den bestmöglichen Randbedingungen ausgewählt.



Links: undichte Fuge

Mitte: stark überdrückte Fuge

Rechts: Absackung der Fugenmasse, fehlende Lagestabilität

Bild 124: Zustandserfassung A2

Die visuelle Zustandserfassung im Bereich des ersten Untersuchungsabschnittes sind im Folgenden zusammengefasst und mittels Bild 124 verdeutlicht.

Visuelle Zustandserfassung (Abschnitt 1):

- z.T. im Standstreifen überdrückt
- z.T. ungleichmäßiger Verguss
- z.T. Absackung der Fugenmasse
- z.T. undicht
- unterschiedliches Erscheinungsbild zwischen Standstreifen und Hauptfahrstreifen
- z.T. (alte) Kantenausbrücke
- leichte Oberflächenversprödung ("Elefantenhaut")

In Bild 125 sind Detailaufnahmen zum Schadenzustand „Kantenausbrüche“ sowie „Undichtigkeiten“ angeführt. Aufgrund der visuellen Zustandserfassung wurde in diesem Untersuchungsabschnitt der A2 keine Bohrkernentnahme durchgeführt. Maßgebendes Entscheidungskriterium war die mangelnde Dichtheit der Fugenfüllsysteme, welche die Ergebnisse der Systemprüfungen im Labor maßgeblich beeinflusst hätte.



Bild 125: Details des Zustandserfassung A2 – Abschnitt 1

Im Streckenabschnitt im Bereich des zweiten Untersuchungsabschnittes wurde ein ähnlicher Zustand festgestellt.

Visuelle Zustandserfassung (Abschnitt 3):

- z.T. im Standstreifen überdrückt
- z.T. lokale Fehlstellen im Hauptfahrstreifen
- z.T. lokal undicht
- unterschiedliches Erscheinungsbild zwischen Standstreifen und Hauptfahrstreifen
- z.T. (alte) Kantenausbrücke
- leichte Oberflächenversprödung ("Elefantenhaut")
- Grundsätzlich intakte Bereiche vorhanden



Links: leicht überdrückte Fuge

Mitte: Absackung der FM, fehlende Lagestabilität (1. FS)

Rechts: Ausföhrung der FM (1. FS)

Bild 126: Zustandserfassung A2 – Abschnitt 3

Grundsätzlich war in diesem Bereich ein teilweise ausgeprägter sichtbarer Unterschied zwischen dem Standstreifen und dem ersten Fahrstreifen zu erkennen. Im Vergleich zu den Untersuchungsabschnitten 2 und 3, konnte im Bereich des Standstreifens ein qualitativ besserer Zustand festgestellt werden, sodass die Bohrkernentnahme in diesem Abschnitt erfolgte.

Änderung der Fugenspaltbreiten

Die Darstellung der Messergebnisse der Änderung der Fugenspaltbewegung ist Bild 127 und Tab. 68 zu entnehmen.

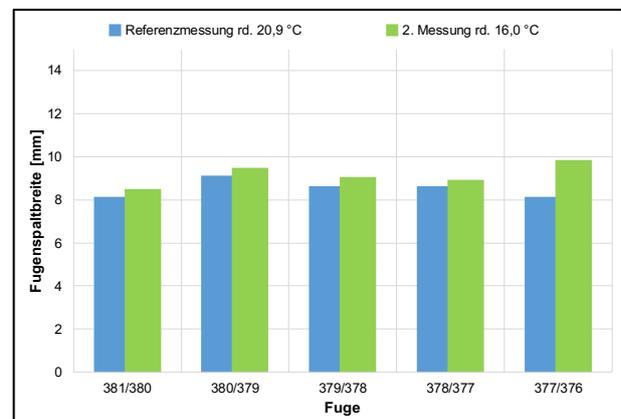


Bild 127: Fugenspaltbreiten A2, Messung RUB im Vergleich zu [10]

	Min	Max	Mittel	Median	Temp.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[°C]
Fugenspaltbreite = ca. 10 mm					
2. Messung	3,4	21,4	7,7	4,5	+16,0

Tab. 68: Fugenspaltbewegung in bezogen auf die Initialmessung – A2 [10]

5.1.4 BAB A40

Die Fugenfüllsysteme auf der A40 wiesen mit einer Liegezeit von 13,5 Jahren den größten Nutzungszeitraum der drei untersuchten repräsentativen Streckenabschnitte auf. Abweichend zu den Streckenabschnitten der A2 und der A48, wurden auf der A40 größere Betonplattenabmessungen eingesetzt. Die Plattenlängen betragen 10 m bei einer Fugenspaltbreite von 20 mm.

Die weiteren Eigenschaften des Streckenabschnitts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Eigenschaften des Streckenabschnittes:

- Fugensanierung Dezember 2002
- Liegezeit ca. 13,5 Jahre
- Alter der Betondecke > 25 Jahre
- Vereinzelte Fugen noch nicht saniert (Auskunft der Behörde)
- Fugenspaltbreite: 20 mm
- Stahlfaserbewehrter Unterbeton
- Plattenlänge: ca. 10,0 m
- Plattenbreite: ca. 3,0 m

Die Fugenfüllsysteme waren Teil einer Versuchsstrecke, welche von RECKNAGEL et. al [55] von 2002 bis 2012 begleitet wurden. Bereits im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine unplanmäßige Sanierung in dem o.g. Streckenabschnitt im Zeitraum zwischen März 2010 und Dezember 2012 vermutet. Aufgrund der Auskunft der zuständigen Behörden über nicht ausgebesserte Fugen, wurden diese für die Grundlage der Untersuchungen herangezogen.

Visuelle Zustandserfassung:

- großteils lagestabil
- z.T. Absackungen im Hauptfahrstreifen (1. FS) erkennbar
- z.T. undicht, Flankenablösungen
- z.T. lokale Ausfahrungen
- Kanten- und Eckausbrüche
- leichte Oberflächenversprödung ("Elefantenhaut")
- zweilagiger Verguss

Analog zur Beobachtung von RECKNAGEL et. al [55] im Dezember 2012, wurden auch bei der Begutachtung der ausgewählten Fugen im März 2015 ein besseres Erscheinungsbild als erwartet angetroffen. Die Beurteilung der qualitativen visuellen Zustandserfassung lässt sich wie folgt zusammenfassen und ist durch Bild 128 und Bild 129 dokumentiert.



Bild 128: Detail der Zustandserfassung A40 – undichtes Fugenfüllsystem



Links: undichte Fuge; Grasbewuchs

Mitte: Lagestabile FM, Ablösung der FM an den Fugenflanken

Rechts: Kantenschäden, Ablösung der FM an den Fugenflanken

Bild 129: Zustandserfassung A40

Die Vermutung einer unplanmäßigen Instandsetzung der Fugenfüllsysteme bestätigt sich auch durch die Betrachtung der entnommenen Fugenmassenproben aus dem Fugenspalt. Es konnte deutlich ein zweilagiger Verguss festgestellt werden, wobei zwischen der oberen und der unteren Vergusslage größtenteils kein Verbund festzustellen war (vgl. Bild 131).



Bild 130: Detail der Zustandserfassung A40 – „wilde“ Risse aufgrund der Plattenlänge von 10 m, trotz stahlfaserbewehrtem Beton



Bild 131: Details des Zustandserfassung A40 – zweilagiger Verguss

Ergänzend ist festzustellen, dass ungefähr im Bereich der Plattenmitte trotz stahlfaserbewehrtem Unterbeton „wilde“ Querrisse aufgetreten sind, sodass sich eine effektive Plattenlänge von ca. 5 m eingestellt hat.

Änderung der Fugenspaltbreiten

Die Darstellung der Messergebnisse der Änderung der Fugenspaltbewegung ist, ergänzt um die vorliegenden Fugenspaltmessungen von RECKNAGEL et. al [55], Bild 132 und Tab. 69 zu entnehmen.

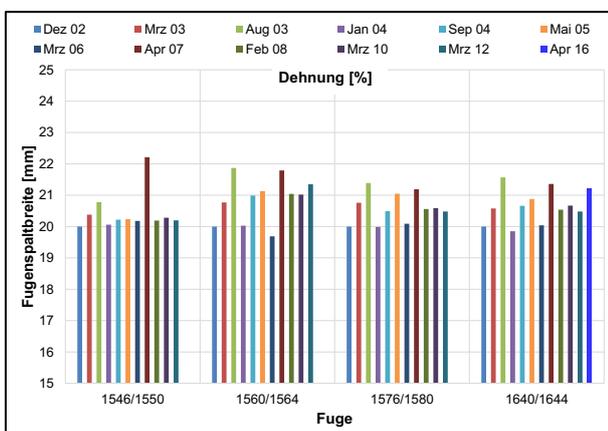


Bild 132: Fugenspaltbreiten A40 im Vergleich zu [55]

	Min	Max	Mittel	Median	Temp.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[°C]
Fugenspaltbreite = ca. 20 mm (Dez 02)					
Mrz 03	-3,8	-1,9	-3,1	-2,9	+8,0
Aug 03	-9,3	-3,9	-7,0	-7,0	+43,0
Jan 04	-0,3	1,0	0,3	0,0	+4,0
Sep 04	-4,9	-1,1	-2,8	-2,5	+13,0
Mai 05	-5,7	-1,2	-4,1	-4,4	+8,0
Mrz 06	-0,9	1,6	0,2	-0,2	+2,0
Apr 07	-11,1	-6,0	-7,8	-6,8	+20,0
Feb 08	-5,2	-1,0	-2,9	-2,8	+13,0
Mrz 10	-5,1	-1,4	-3,0	-3,0	+7,0
Mrz 12	-6,7	-1,0	-2,8	-2,4	+8,0
Apr 16	-6,1	-6,1	-	-	+14,9

Tab. 69: Fugenspaltbewegung in bezogen auf die ausgeschriebene Fugenspaltbreite – A40

5.2 Laboruntersuchung der Ausbauproben

5.2.1 Ausgewählte Stoffeigenschaften und rheologische Kenndaten

An den Ausbauproben wurden die Kennwerte für die Nadelpenetration, die Konuspenetration sowie den Erweichungspunkt Ring und Kugel bestimmt. Zum Vergleich ist ebenfalls FM8 (FM2 des Produktionsjahres 2011) in den Vergleich aufgenommen worden. Die Ergebnisse sind in Tab. 70 dargestellt und in Bild 133 und Bild 134 gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass der Anforderungswert des Erweichungspunktes Ring und Kugel für heiß verarbeitbare Fugenmassen gemäß TL Fug-StB 15 [69] von FM2 auch nach 14 Jahren noch erfüllt wird. Grundsätzlich ist bei den Fugenmassen mit längerer Liegezeit eine Reduzierung des Erweichungspunktes sowie der Nadel- bzw. Konuspenetration festzustellen. Dieser Effekt ist vermutlich auf eine Kombination aus Polymerdegradation und Bindemittelverhärtung zurückzuführen.

FM	Nadel- penetration	Konus- penetration	EP RuK
[-]	[1/10 mm]	[1/10 mm]	[°C]
FM2	61,5	67,0	94,6
FM8	61,2	50,2	95,1
FM2 n. WA*	66,1	-	97,4
A48	61,0	52,0	92,6
A2	50,1	41,6	89,8
A40	47,8	43,2	89,0

*Prüfung nach Wärmealterung (WA) für 168 h bei 70 °C gemäß TP Fug-StB 01 [68]

Tab. 70: Messwerte Nadelpenetration und EP RuK der repräsentativen Streckenabschnitte

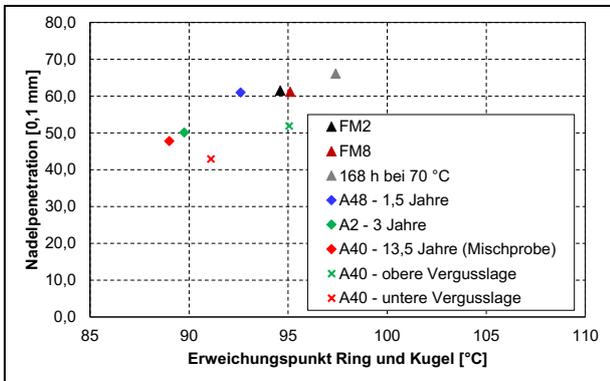


Bild 133: Darstellung der Nadelpenetration in Abhängigkeit vom EP RuK

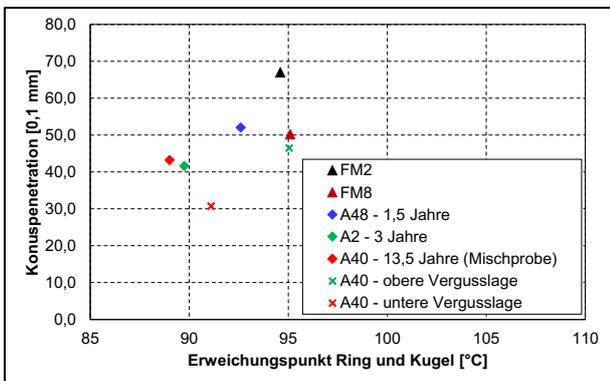


Bild 134: Darstellung der Konuspenetration in Abhängigkeit vom EP RuK

Die Analyse der rheologischen Kenndaten mittels Dynamischen Scherrheometer erfolgte analog zu den in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Untersuchungen. Die Ergebnisse der Prüfung, unterteilt nach 0,1 Hz und 10 Hz, sind in Bild 135 und Bild 136 dargestellt.

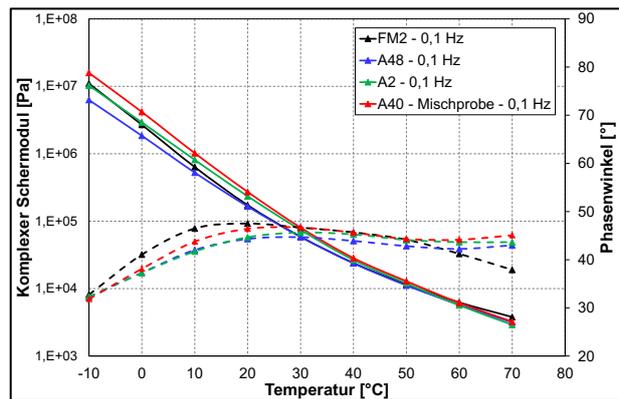


Bild 135: Rheologische Kenngrößen der Ausbauproben – 0,1 Hz

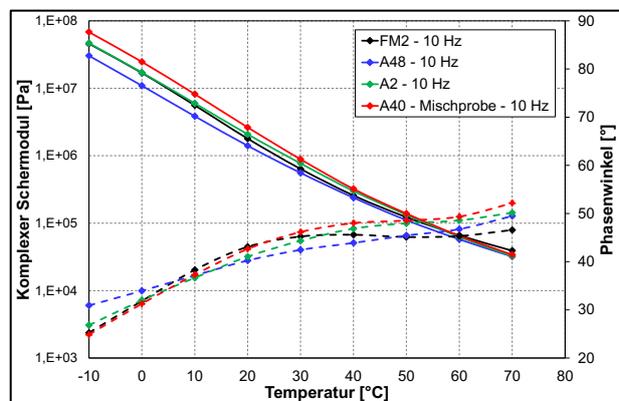


Bild 136: Rheologische Kenngrößen der Ausbauproben – 10 Hz

Die signifikantesten Veränderungen wurden bei den Ausbauproben der A40 erwartet. Wie in Bild 131 deutlich zu erkennen ist, wurde im Untersuchungsabschnitt ein zweilagiger Fugenverguß vorgefunden. Die visuelle Zustandserfassung ließ vermuten, dass es sich hierbei um eine außerplanmäßige Sanierungsmaßnahme handeln könnte. Um dies zu eruieren, wurde im weiteren Verlauf eine separate Untersuchung der zwei Vergusslagen durchgeführt.

FM	Nadel- penetration	Konus- penetration	EP RuK
[-]	[1/10 mm]	[1/10 mm]	[°C]
FM2	61,5	67,0	94,6
A40 - Mischprobe	47,8	43,2	89,0
A40 - obere Vergusslage	51,9	46,5	95,1
A40 - untere Vergusslage	42,9	30,7	91,1

Tab. 71: Messwerte Nadelpenetration und EP RuK der Ausbauproben A40

Die konventionellen Prüfungen zeigten erwartungsgemäße Differenzen zwischen der oberen und der unteren Vergusslage. Der Erweichungs-

punkt RuK zwischen der oberen und der unteren Vergusslage unterscheidet sich um rd. 4 °C. Dies deutet auf eine längere Liegezeit der unteren Vergusslage hin. Die Ergebnisse der Nadelpenetration sowie der Konuspenetration wiesen bei der unteren Vergusslage eine um 9,0 1/10 mm bzw. 15,8 1/10 mm geringere Eindringtiefe als bei der oberen Vergusslage auf, was auf eine gewisse Verhärtung des Materials hindeuten kann und die längere Liegezeit der unteren Vergusslage bestätigt.

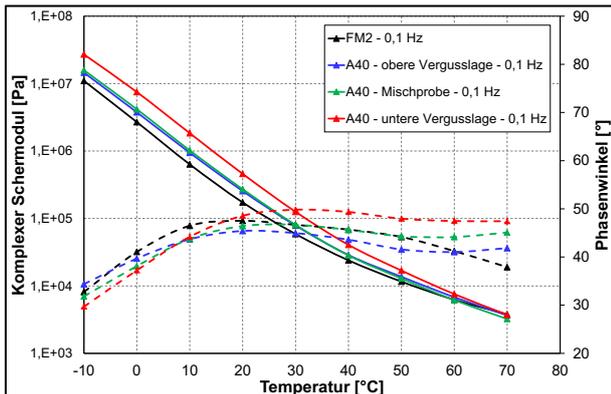


Bild 137: Rheologische Kenngrößen der Ausbauproben A40 – 0,1 Hz

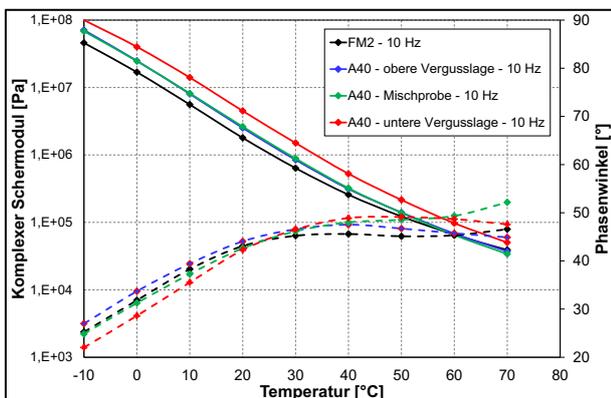


Bild 138: Rheologische Kenngrößen der Ausbauproben A40 – 10 Hz

Die Ergebnisse der rheologischen Kenndaten bestätigen die Vermutung einer unplanmäßigen Sanierung der betroffenen Fugenfüllsysteme. Sowohl bei der Prüffrequenz von 0,1 Hz (vgl. Bild 137) als auch bei der Prüffrequenz von 10 Hz (vgl. Bild 138) konnte ein ähnliches rheologisches Verhalten der Ausbauproben festgestellt werden. Der komplexe Schermodul der oberen Vergusslage ist äquivalent zu dem komplexen Schermodul der Mischprobe und liegt auf einem leicht höheren Niveau als die Referenzprobe. Verglichen mit den Untersuchungsergebnissen der rheologischen Kenndaten der Ausbauproben der A48 (Fugenverguss Dezember 2014, ca. 1,5 Jahre Liegezeit) und A2 (Fugenverguss Mai 2013, ca. 3 Jahre Liegezeit), bestätigen die in Bild 137 und Bild 138 dargestellten rheologischen Kenndaten die Vermu-

tung von RECKNAGEL et. al [55], dass eine unplanmäßige Sanierung der Fugenfüllsysteme zwischen März 2010 und Dezember 2012 durchgeführt wurde.

Die untere Vergusslage wies im Vergleich zur oberen Vergusslage einen höheren komplexen Schermodul auf, was auf eine stärkere, oxidative Alterung der Bitumenanteile in der Fugenmasse hindeutet. Eine signifikante Veränderung der Polymeranteile der Fugenmasse war auf Basis der Verläufe der Phasenwinkel nicht feststellbar.

5.2.2 Statischer Zug-/Scherversuch

Untersuchung bei +20 °C

Die aus den Teststrecken gewonnenen Systemprüfkörper wurden unter denselben Prüfbedingungen wie in Abschnitt 4.3.7 für die Laborprüfkörper beschrieben im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C untersucht. Vorab wurden die geometrischen Daten der Systemprüfkörper erfasst.

In Bild 139, Bild 141 und Bild 142 sind die Spannungs-Dehnungslinien von jeweils drei Systemprüfkörpern aus den Teststrecken A48, A2 und A40 den Laborprüfkörpern mit der gleichen Fugenmasse (FM2) gegenübergestellt. Die Spannungsmaxima und die zugehörigen Dehnungen sind in Tab. 72 bis Tab. 74 aufgeführt.

Aus Bild 139 ist ersichtlich, dass sich die Spannungen in den Systemprüfkörpern aus der A48 vergleichsweise unterschiedlich entwickelten. Im Vergleich zur Referenzprobe (Laborprüfkörper) waren die Spannungsmaxima der rd. 1,5 Jahre älteren Fugenmassen aus der A48 um rd. 50 bis 80 % höher. Bei den Schadensbildern ist zu erkennen, dass die Systemprüfkörper A48–3.1 und A48–8.1 adhäsiv versagten. Bei der Probe A48–2.1 und dem Laborbetonprobekörper waren keine signifikanten Schäden zu erkennen (Bild 140).

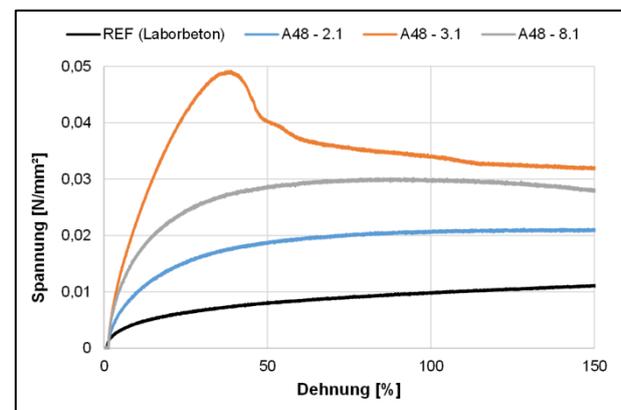


Bild 139: Statischer Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern aus der A48 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +20°C, 1,0 mm/min)

A48 (+20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,01	299,9
A48-2.1	0,02	293,5
A48-3.1	0,05	38,9
A48-8.1	0,03	94,7

Tab. 72: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A48 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +20°C, 1,0 mm/min)



Bild 140: Zustandsbilder im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern aus der A48 (rechts) im Vergleich zum jeweiligen Laborprüfkörper (links); Prüftemperatur: +20 °C

In Bild 141 sind die Spannungs-Dehnungslinien für die Prüfkörper aus der A2 und wiederum des zugehörigen Laborprüfkörpers dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Spannungsentwicklung in den Proben aus der A2 untereinander nahezu gleich war. Gegenüber der Referenzprobe waren die Spannungsmaxima der rd. 3 Jahre älteren Fugenmassen in der A2 um rd. 75 % höher (Tab. 73). Die zugehörigen Dehnungen bei der Maximalspannung waren gegenüber der Referenzprobe um 70 bis 80 % geringer (Tab. 73). Bei den Schadensbildern der originären Systemprüfkörper war ein adhesives Versagensbild festzustellen.

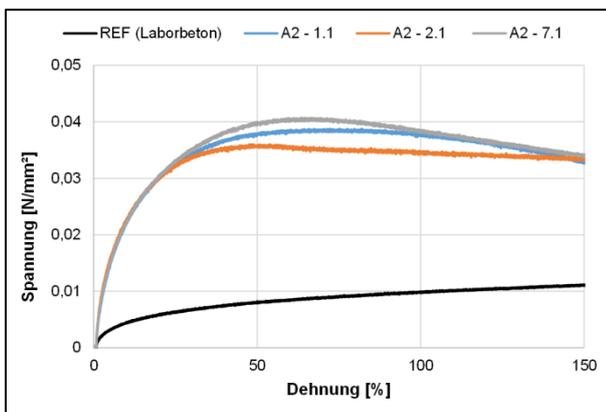


Bild 141: Statische Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern aus der A2 im Vergleich zum jeweiligen Laborprüfkörper (FM2, +20°C, 1,0 mm/min)

A2 (+20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,01	299,9
A2-1.1	0,04	82,0
A2-2.1	0,04	53,8
A2-7.1	0,04	66,5

Tab. 73: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +20°C, 1,0 mm/min)

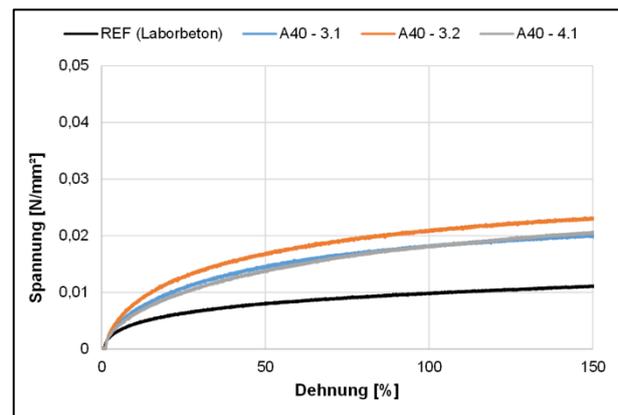


Bild 142: Statische Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A40 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +20°C, 1,0 mm/min)

A40 (+20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,01	299,9
A40-3.1	0,02	297,0
A40-3.2	0,03	298,5
A40-4.1	0,02	299,5

Tab. 74: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A40 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +20°C, 1,0 mm/min)

Auch bei den Systemprüfkörpern aus der A40 war der Verlauf der Spannungsentwicklungen untereinander nahezu gleich (Bild 142). Die daran ermittelten Spannungen waren aber wiederum höher als jene der Referenzprobe. Nach den erhaltenen Angaben wurden diese Fugenmassen vor knapp 13,5 Jahre eingebaut. Werden die Spannungen dieser Prüfkörper aus der A2 mit jenen aus den anderen beiden Teststrecken (A48, 1,5 Jahre alt und A2, 3 Jahre alt, Bild 139 und Bild 141) verglichen, so stellten sich bei den A40-Proben mit 0,02 N/mm² die geringsten Spannungen ein. Außerdem waren die zugehörigen Dehnungen der A40-Proben mit knapp 300 % vergleichbar mit jenen der Referenzprobe (Tab. 74). Nach diesen Gegenüberstellun-

gen kann nicht zweifelsfrei davon ausgegangen werden, dass die Fugenmasse im A40-Abschnitt tatsächlich bereits vor über 10 Jahren eingebaut worden war, zumal die Fugenmassen auch visuell nur geringe Alterungserscheinungen aufwiesen.

Untersuchung bei -20 °C

Des Weiteren wurden die Systemprüfkörper aus den Versuchsstrecken statischen Zug-/Scherversuchen bei einer Prüftemperatur von -20 °C unterzogen (vgl. Abschnitt 4.3.7).

In Bild 143 sind die Spannungs-Dehnungslinien von drei Systemprüfkörpern aus der Teststrecke A48 sowie dem Laborprüfkörper mit der gleichen Fugenmasse (FM2) gegenübergestellt. Die dabei festgestellten Spannungmaxima und die zugehörigen Dehnungen sind in der Tab. 75 aufgelistet.

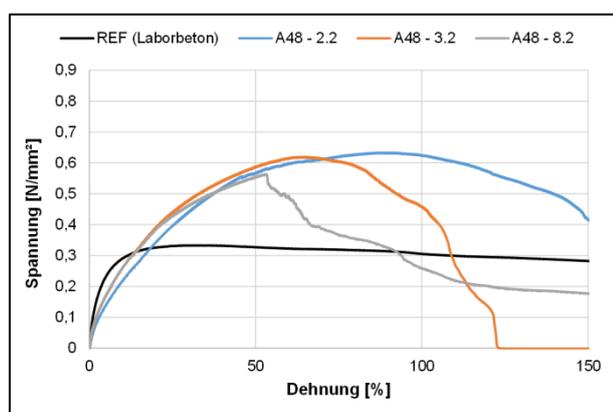


Bild 143: Statische Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A 48 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

A48 (-20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,33	33,7
A48-2.2	0,63	86,9
A48-3.2	0,62	63,8
A48-8.2	0,56	53,1

Tab. 75: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A48 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

Es ist erneut festzustellen, dass sich bei niedriger Temperatur größere Spannungen aufbauten als bei höherer Temperatur. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Spannungsentwicklungen der originären Systemprüfkörper bis zur Dehnung von 50 % nahezu identisch waren. Der Prüfkörper A48-8.2 wurde aus der weiteren Wertung ausgeschlossen, da die Betonfugenflanke ausgebrochen war. Die Spannungsentwicklung in den beiden Proben

A48-2.2 und A48-3.2 unterschied sich bis zu einer Dehnung von rd. 75 % nicht signifikant. Verglichen mit der Spannungsentwicklung der Referenz (Laborprüfkörper) zeigten diese jedoch eine um rd. 50 % höhere Spannung. Bei den beiden Systemprüfkörpern aus der A48 trat ein adhäsives Versagen ein, wohingegen die Referenzprobe bis zum Abbruch des Versuchs nicht versagte.

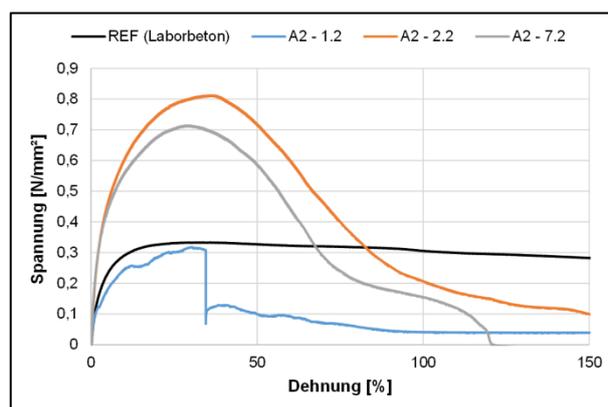


Bild 144: Statische Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

A2 (-20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,33	33,7
A2-1.2	0,32	30,1
A2-2.2	0,81	34,4
A2-7.2	0,71	29,0

Tab. 76: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

In Bild 144 sind die Spannungs-Dehnungslinien für die Systemprüfkörper aus der A2 zu entnehmen. Der Prüfkörper A2-1.2 hat sich aus der Fixierung gelöst und konnte zur Bewertung nicht herangezogen werden. Die Spannungsentwicklungen der beiden Systemprüfkörper A2-2.2 und A2-7.2 unterscheiden sich nicht signifikant. Hingegen haben sich bei den Proben aus der A2 gegenüber der Referenzprobe mehr als doppelt so hohe Spannungen eingestellt. Die Systemprüfkörper aus der A2 versagten adhäsiv.

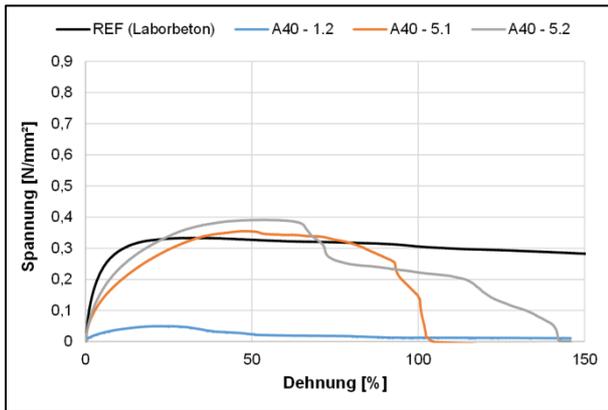


Bild 145: Statischer Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A40 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

A40 (-20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,33	33,7
A40-1.2	0,05	21,3
A40-5.1	0,36	47,4
A40-5.2	0,39	52,9

Tab. 77: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A40 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, -20°C, 0,1 mm/min)

Bei den Systemprüfkörpern aus der A40 in Bild 145 ist erneut auffällig, dass die rd. 13,5 Jahre alte Fugenmasse im Vergleich zu den jüngeren Proben aus der A48 und A2 (1,5 bzw. 3 Jahre alt) die geringsten Spannungen aufwies (Bild 145). Erwartungsgemäß bauen sich in den ältesten Fugenmassen die höchsten Spannungen und die geringsten Dehnungen auf. Es ist ersichtlich, dass der Systemprüfkörper A40-1.2 eine um rd. 85 % niedrigere Spannung aufbaute bei im Vergleich geringsten Dehnung von knapp 20 % (Tab. 77). Daraus ist zu entnehmen, dass der Verbund zwischen Betonfugenflanke und Fugenmasse bereits geschädigt und kein 100%iger Haftverbund existierte. Weiterhin war ein adhäsives Versagensbild zu beobachten.

Untersuchung bei +60 °C

In den nächsten Untersuchungen wurden die Systemprüfkörper wie in Abschnitt 4.3.7 bei einer Prüftemperatur von +60 °C im statischen Zug-/Scherversuch untersucht. Erwartungsgemäß wurden die Fugenmassen erneut weicher und die Spannungen waren somit auch im Vergleich zu den niedrigeren Prüftemperaturen deutlich geringer.

Die Spannungsentwicklung der statischen Zug-/Scherversuche der Systemprüfkörper aus der

A48 (Bild 146) und A40 (Bild 148) waren im Bezug zur Referenzprobe bei unterschiedlicher Liegedauer der Fugenmasse nahezu gleichbleibend. Die zugehörigen Dehnungen sind in Tab. 78 (A48) und Tab. 80 (A40) aufgeführt. Bei den Systemprüfkörpern aus der A48 waren keine Schäden zu erkennen, wohingegen sich die Fugenmassen an den Systemprüfkörpern der A40 von den Betonflanken leicht lösten.

Die Spannungen der Systemprüfkörper aus der A2 sind in Bild 147 dargestellt. Die Maximalspannungen mit den zugehörigen Dehnungen sind in Tab. 79 aufgeführt.

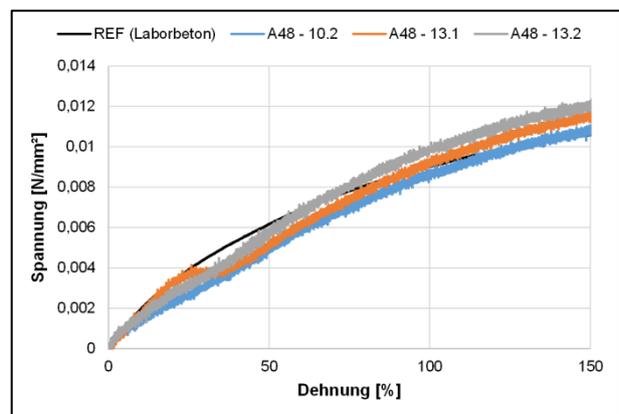


Bild 146: Statischer Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A48 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +60°C, 1,0 mm/min)

A48 (+60°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,013	300,0
A48 - 10.2	0,014	298,9
A48 - 13.1	0,014	297,8
A48 - 13.2	0,014	295,6

Tab. 78: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A48 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +60°C, 1,0 mm/min)

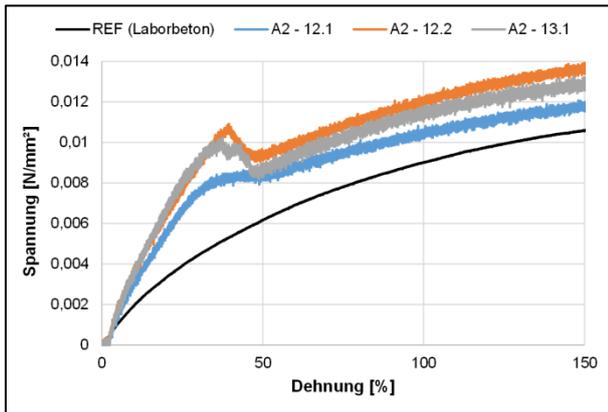


Bild 147: Statische Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +60°C, 1,0 mm/min)

A2 (+60°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,013	300,0
A2 – 12.1	0,014	299,2
A2 – 12.2	0,016	298,9
A2 – 13.1	0,015	295,2

Tab. 79: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +60°C, 1,0 mm/min)

Es ist zu erkennen dass die Spannungsmaxima erst am Ende der Untersuchungen (300%) erreicht wurden. Die Spannungen der Systemprüfkörper aus der A2 bauten anfangs im Bezug zur Referenzprobe stärker auf. Zum Ende hin wiesen die Spannungsmaxima untereinander keinen großen Unterschied auf. Die Systemprüfkörper zeigten auch hier keine besonderen Versagensmerkmale auf.

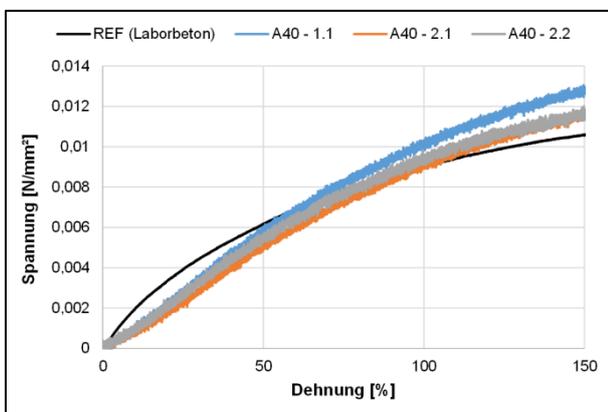


Bild 148: Statische Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A40 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +60°C, 1,0 mm/min)

A40 (+60°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,013	300,0
A40 – 1.1	0,017	299,6
A40 – 2.1	0,015	297,4
A40 – 2.2	0,015	296,5

Tab. 80: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A40 im Vergleich zum Laborprüfkörper (FM2, +60°C, 1,0 mm/min)

5.2.3 Zyklischer Druck-/Zug-/Scherversuch

Untersuchung bei +20 °C

Schließlich wurden auch die originären Systemprüfkörper aus den Teststrecken A48 und A2 der zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuch ausgesetzt.

Für die zyklische Beanspruchung der Fugensysteme bei einer Prüftemperatur von +20 °C wurde wie in Abschnitt 4.3.7 eine Amplitude von $\pm 0,125$ mm, bezogen auf die Fugenbreite von 10 mm, vorausgesetzt. Die Versuchsreihe wurde mit 10.000 Lastwechseln und einer Frequenz von 1,5 Hz durchgeführt. Für die Fugensysteme aus den jeweiligen Teststrecken wurden zwei Belastungsfälle betrachtet:

REF: ohne zyklische Beanspruchung

B1: 0% Vordehnung + zyklische Beanspruchung

In Bild 149 sind die Spannungsmaxima im statischen Zug-/Scherversuch nach zyklischer Beanspruchung dargestellt. Die zugehörigen Dehnungen sind der Tab. 81 zu entnehmen.

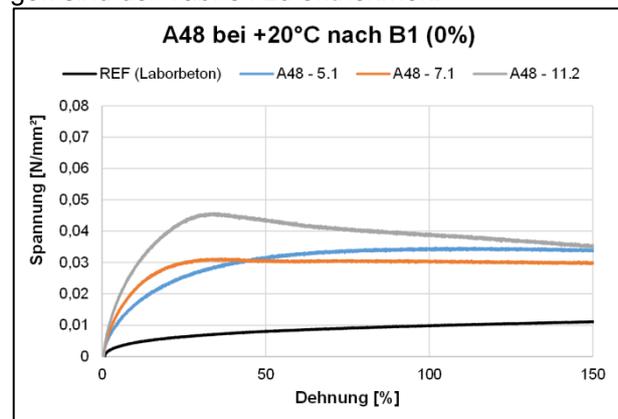


Bild 149: Statische Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A48 nach zyklischer Beanspruchung im Vergleich zum Laborprüfkörper (+20°C, 1,0 mm/min)

A48 (+20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,01	299,9
A48 – 5.1	0,04	113,9
A48 – 7.1	0,03	37,6
A48 – 11.2	0,05	34,1

Tab. 81: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A48 nach zyklischer Beanspruchung im Vergleich zum Laborprüfkörper (+20°C, 1,0 mm/min)

Es ist zu beobachten, dass sich nach der zyklischen Beanspruchung höhere Spannungen entwickelten als im Vergleich zur Referenzprobe (FM2). Doch Unterschiede in der Spannungsentwicklung nach einem rein statischen Zug-/Scherversuch waren nicht zu erkennen. Die Dehnungen hingegen waren beim Erreichen der Spannungsmaxima größtenteils um ein vielfaches kleiner (vgl. Bild 139).

Bei Betrachtung der Systemprüfkörper nach dem statischen Zug-/Scherversuch war sowohl nach zyklischer Beanspruchung als auch ohne jegliche vorherige Beanspruchung ein adhäsives bis zu keinem sichtbaren Versagensbild erkennbar. In Bild 150 sind die im statischen Zug-/Scherversuch bestimmten Spannungsmaxima aus den Systemprüfkörpern der Teststrecke A2 sowie in Tab. 82 die zugehörigen Dehnungen aufgeführt.

Auch an den originären Systemprüfkörpern der A2 ist zu erkennen, dass sich nach der zyklischen Beanspruchung höhere Spannungen entwickelten als im Bezug zur Referenzprobe (FM2). Außerdem ist im Vergleich zur Spannungsentwicklung nach einem rein statischen Zug-/Scherversuch auffällig, dass die Spannungen nach der zyklischen Beanspruchung 20 bis 40 % höher lagen. Die Dehnungen hingegen waren beim Erreichen der Spannungsmaxima größtenteils weiterhin geringer (vgl. Bild 141). Bei Betrachtung der Schadensbilder nach zyklischer Beanspruchung und dem reinen statischen Zug-/Scherversuch ohne zyklische Beanspruchung war ein Ablösen der Fugenmasse von den Betonflanken ersichtlich.

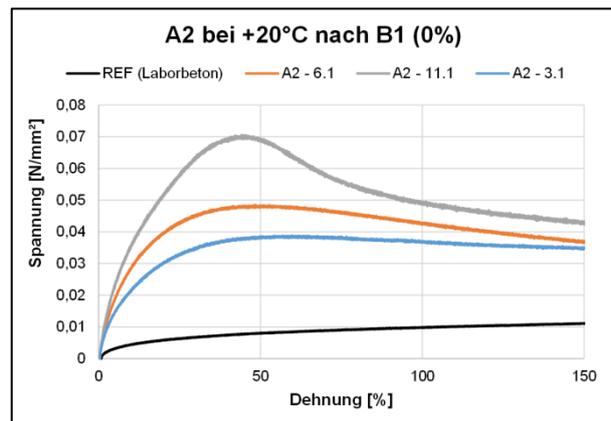


Bild 150: Statischer Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 nach zyklischer Beanspruchung im Vergleich zum Laborprüfkörper (+20°C, 1,0 mm/min)

A2 (+20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,01	299,9
A2 – 6.1	0,04	59,6
A2 – 11.1	0,05	48,3
A2 – 3.1	0,07	44,1

Tab. 82: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 nach zyklischer Beanspruchung im Vergleich zum Laborprüfkörper (+20°C, 1,0 mm/min)

Untersuchung bei -20 °C

In Bild 151 sind die im statischen Zug-/Scherversuch ermittelten Spannungsmaxima nach zyklischer Beanspruchung bei einer Prüftemperatur von -20 °C dargestellt. Dabei wurde wie in Abschnitt 4.3.7 eine Amplitude von $\pm 0,05$ mm, bezogen auf die Fugenbreite von 10 mm, vorausgesetzt. Die Versuchsreihe wurde mit 3.000 Lastwechsel und einer Frequenz von 0,5 Hz durchgeführt. Für die Fugensysteme wurden analog bei einer Prüftemperatur von +20 °C dieselben zwei Belastungsfälle betrachtet.

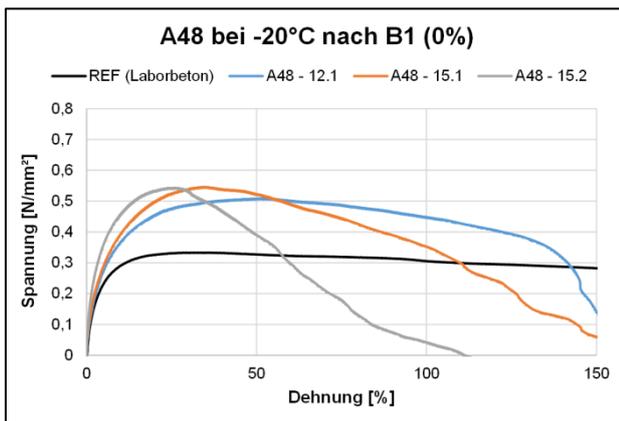


Bild 151: Statischer Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A48 nach zyklischer Beanspruchung im Vergleich zum Laborprüfkörper (-20°C, 0,1 mm/min)

A48 (-20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,33	33,7
A48 – 12.1	0,51	53,2
A48 – 15.1	0,55	34,8
A48 – 15.2	0,54	26,0

Tab. 83: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A48 nach zyklischer Beanspruchung im Vergleich zum Laborprüfkörper (-20°C, 0,1 mm/min)

An den Systemprüfkörpern der A48 bei einer Prüftemperatur von -20 °C ist ersichtlich, dass weiterhin wie auch bei einer Prüftemperatur von +20 °C sich nach der zyklischen Beanspruchung höhere Spannungen einstellen als im Bezug zur Referenzprobe (FM2). Die Spannungsentwicklung nach zyklischer Beanspruchung im Vergleich zu einem reinen statischen Zug-/Scherversuch war geringfügig niedriger, wobei die Dehnungen deutlich geringer waren (vgl. Bild 143). An den Schadensbildern der originären Systemprüfkörper war sowohl nach einer zyklischen Beanspruchung als auch nach einem rein statischen Zug-/Scherversuch ein adhäsives Versagensbild zu beobachten, wohingegen die Referenzmasse am Laborbeton keine signifikanten Schäden aufwies.

Auch in Bild 152 ist an den Systemprüfkörpern der A2 bei einer Prüftemperatur von -20 °C zu erkennen, dass sich nach der zyklischen Beanspruchung höhere Spannungen einstellen als im Bezug zur Referenzprobe (FM2). Entgegengesetzt zum vorherigen Verhalten lag die Spannungsentwicklung nach zyklischer Beanspruchung im Vergleich zu einem rein statischen Zug-/Scherversuch geringfügig höher, wobei die Dehnungen beim Erreichen der Spannungsmaxima im Vergleich geringer waren (vgl. Bild 144).

Die originären Systemprüfkörper wiesen sowohl nach einer zyklischen Beanspruchung als auch nach einem rein statischen Zug-/Scherversuch ein adhäsives Versagensbild auf. An der Referenzmasse am Laborbeton waren keine signifikanten Schäden ersichtlich.

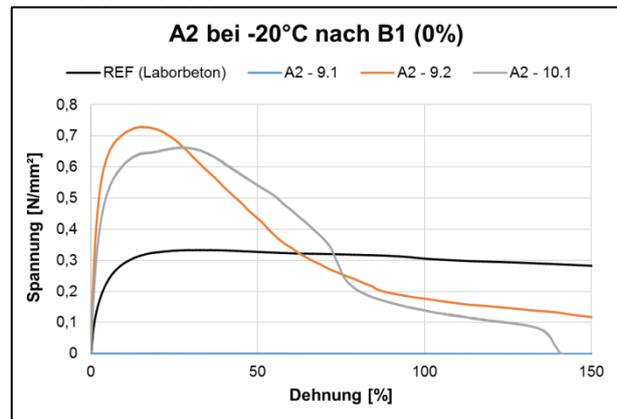


Bild 152: Statischer Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 nach zyklischer Beanspruchung (-20°C, 0,1 mm/min)

A2 (-20°C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF (Laborbeton)	0,33	33,7
A2 – 9.1	0,0	0,0
A2 – 9.2	0,73	15,5
A2 – 10.1	0,66	27,8

Tab. 84: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 nach zyklischer Beanspruchung (-20°C, 0,1 mm/min)

5.3 Zusammenfassung und Bewertung der repräsentativen Streckenabschnitte BAB A48, A2 und A40

Bei den untersuchten Streckenabschnitten der BAB A2, A40 und A48 wurde stets die Fugenmasse FM2 (Typ N2) eingebaut. Die Laboruntersuchungen an Ausbauproben dieser Fugenmassen sowie an originären Systemprüfkörpern aus Bohrkernen aus diesen Streckenabschnitten haben gezeigt, dass sich in Abhängigkeit der Nutzungsdauer die Eigenschaften der Fugenmassen verändern. Dies konnte nicht nur anhand der rheologischen Charakterisierung gemäß Abschnitt 5.2.1, sondern auch an den modifizierten Systemprüfkörpern nach Abschnitt 5.2.2 und 5.2.3 gezeigt werden. Bei den Proben aus der BAB A40 ist aus den ermittelten Stoffeigenschaften der ausgebauten Fugenmassen sowie dem in situ vorgefundenen

Zustand des Fugenvergusses davon auszugehen, dass die bei Beprobung vorgefundene Fugenmasse nicht mehr der in den Akten dokumentierten 13 Jahre alten Fugenmasse entspricht, sondern vielmehr zwischenzeitlich eine außerplanmäßige, nicht dokumentierte Instandsetzung stattgefunden hat. Daher wurden die Ergebnisse aus diesem BAB-Abschnitt bei der weiteren Bewertung außer Acht gelassen. Die im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C an den originären Prüfkörper der BAB A2 und A48 sowie den im Labor künstlich gealterten Proben (V1) und den nicht gealterten Referenzproben (REF) ermittelten Spannungsentwicklungen sind in Bild 153 und Tab. 85 gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass mit zunehmender Nutzungsdauer die ermittelte Maximalspannung in dieser Fugenmasse anstieg und sich die dabei erreichte Dehnung verminderte. Die im Labor herbeigeführte künstliche Alterung (V1) wies eine nahezu gleiche Maximalspannung wie die 3 Jahre alten originären Prüfkörper der A2 auf, allerdings war die bei der Maximalspannung erreichte Dehnung noch niedriger.

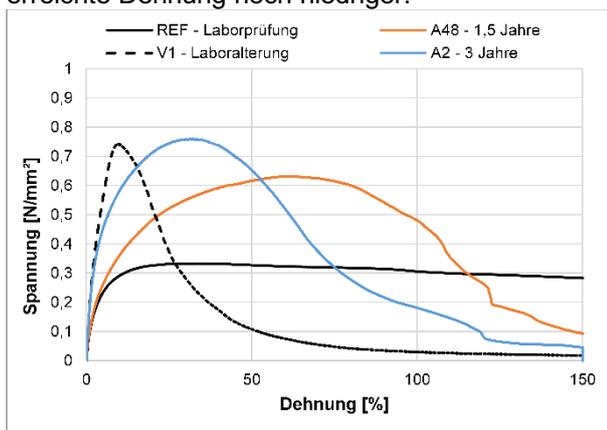


Bild 153: Statischer Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 und A48 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern REF und V1 (FM2, -20 °C , $0,1\text{ mm/min}$)

(-20 °C)	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm^2]	[%]
REF (Laborprüfung)	0,33	33,7
A48 - 1,5 Jahre	0,63	61,6
A2 - 3 Jahre	0,76	32,2
V1 - Laboralterung	0,74	9,8

Tab. 85: Spannungsentwicklung im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern der A2 und A48 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern REF und V1 (FM2, -20 °C , $0,1\text{ mm/min}$)

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass zum einen die Systemprüfungen an originären Prüfkörpern aus der Autobahn vergleichbare Ergebnisse zu den im Labor hergestellten Prüfkörpern liefern und zum andern, dass die nach V1 im

Labor vorgenommene künstliche Alterung für Fugenmasse FM2 in etwa mit einer natürlichen Alterung in den Fugen einer BAB unter üblicher Nutzung von mehreren Jahren korreliert. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Maximalspannung durchaus eine vergleichbare Größenordnung aufwies, die Dehnbarkeit der künstlich gealterten Variante (V1) jedoch unterhalb der Praxisproben lag.

6 Erprobungsstrecke BAB A23

6.1 Randbedingungen der Erprobungsstrecke

Als Erprobungsstrecke wurde die A23, zwischen Elmshorn und Itzehoe ausgewählt. In diesem Bereich erfolgte vom 27. Juni bis zum 26. Juli 2016 die Sanierung der Fugenfüllsysteme, wobei vier unterschiedliche Testfelder angelegt wurden.

Die Herstellung der Betonfahrbahndecke erfolgte in Richtungsfahrbahn Hamburg im Jahr 2004 und in Richtungsfahrbahn Heide im Jahr 2006.

Die Aufbaukenndaten lauten:

- 26 cm Fahrbahndecke aus Beton gemäß ZTV Beton-StB 01
- 20 cm Frostschuttschicht aus Recyclingmaterial (aufbereiteter Betonaufbruch, Zementverfestigungsaufbruch)
- Verfestigung gemäß ZTV T-StB 95/98, Abschnitt 3.1, angenähert der Sieblinie 0/32 gemäß Bild 2.4 ZTV T-StB 95/98 mit Bindemittel Zement CEM I gem. ZTVT 95/98 und LB, Teil A, Abschnitt 5
- 15 cm ungebundene Tragschicht aus aufbereiteter Betondeckschicht und Zementverfestigung angenähert der Sieblinie gemäß Bild 2.4 Schottertragschicht 0/32 ZTV T-StB 95/98

Die Gesamtdicke des Aufbaus summiert sich folglich zu 61 cm. Bei dem vorliegenden Aufbau handelt es sich nicht um eine Standardbauweise gemäß den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2001 [58].

6.2 Aufbau der Testfelder

Bei der Fugensanierung wurden vier unterschiedliche Testfelder realisiert. Diese Testfelder unterscheiden sich einerseits in der Art der Vorbehandlung der Fugenflanken – Ausbürsten der Fugen oder Nachschneiden und Ausbürsten der Fugenflanken – andererseits wurde jeweils eine heiß verarbeitbare Fugenmasse (FM6) und eine kalt verarbeitbare Fugenmasse (FM7) eingesetzt. Eine detaillierte Auflistung der variierenden Parameter ist in Tab. 86 gegeben. Die zugehörige Systemskizze ist in Bild 154 aufgeführt.

In jedem Testfeld wurde ein Validierungsabschnitt mit einer Länge von 300 bzw. 500 m intensiv über rd. 21 Monate begleitet. In diesen Validierungsabschnitten wurden an jeweils 10 Fugen Messmarken zur Dokumentation der Änderung der Fugenspaltbreiten installiert. Ebenfalls wurde ein Thermoelement je Testfeld installiert. Somit können die Bauteiltemperaturen an der Oberfläche der Betonfahrbahndecke sowie ca. 3 cm, ca. 13 cm und ca. 21 cm unterhalb der Fahrbahnoberkante diskontinuierlich (zum Zeitpunkt der Begutachtungstermine) bestimmt werden.

Testfeld	RF	Länge	Fugenmasse	Vorbehandlung
1.1	Heide	3.200 m	kalt verarbeitbare FM (FM7)	Fasen der Fugenflanken und Ausbürsten
1.2	Heide	1.000 m	kalt verarbeitbare FM (FM7)	Nachschneiden, Fasen der Fugenflanken und Ausbürsten
2.1	Hamburg	3.200 m	heiß verarbeitbare FM (FM6)	Fasen der Fugenflanken und Ausbürsten
2.2	Hamburg	1.000 m	heiß verarbeitbare FM (FM6)	Nachschneiden, Fasen der Fugenflanken und Ausbürsten

Tab. 86: Systemunterschiede der Testfelder auf der A23

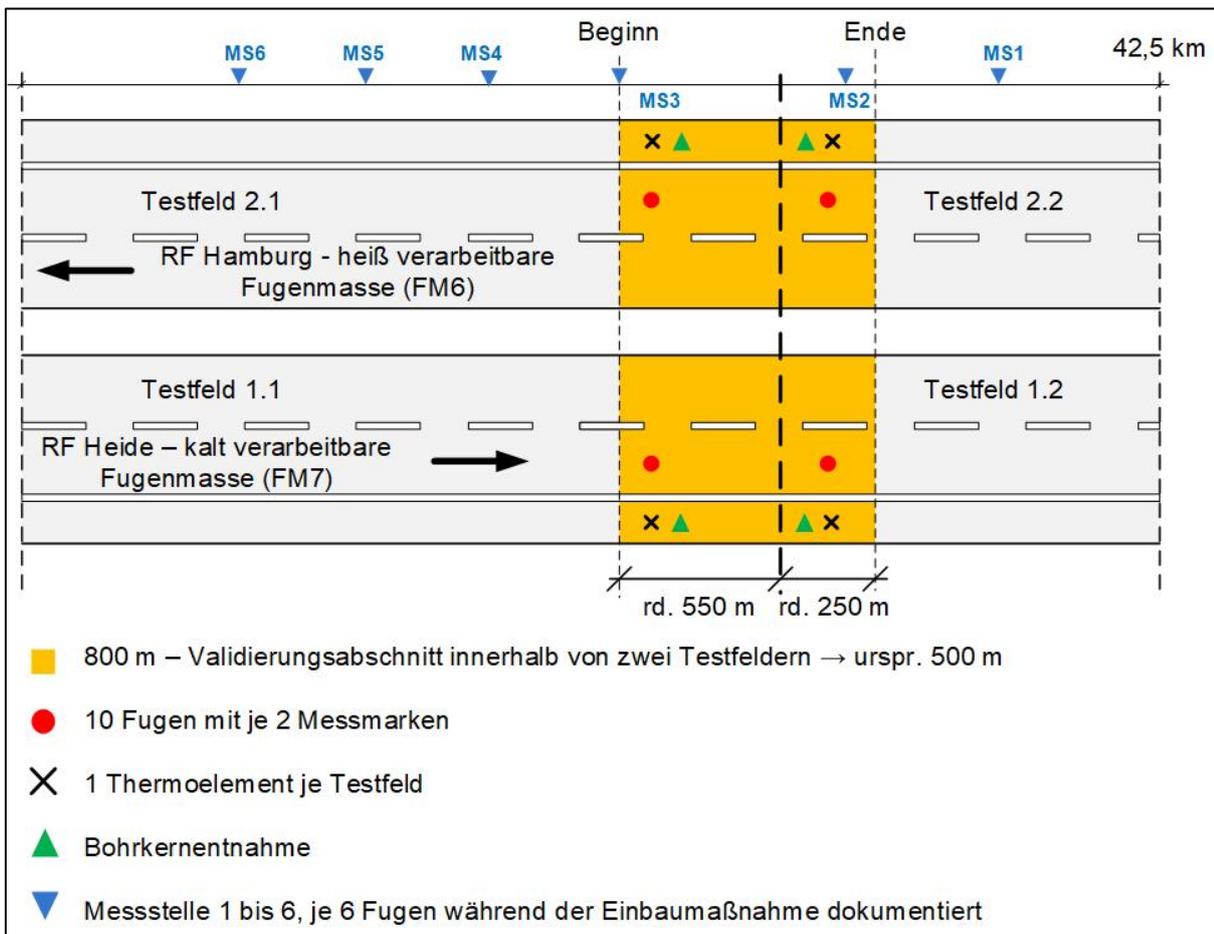


Bild 154: Systemskizze der Erprobungsstrecke BAB A23

6.3 Begleitung der Fugensanierung und Einbaudokumentation

Im Rahmen der Fugensanierung erfolgte eine ausführliche Einbaubegleitung. Hierbei wurde der Fokus auf die nachstehenden Punkte gelegt:

- Temperaturdokumentation der Oberflächen, der Luft und der Fugenmasse
- Einbau von Messmarken und Thermoelementen in jedes Testfeld gemäß Bild 154
- Bestimmung der Fugenspaltbreiten inklusive Initialmessung der Messmarken und Bestimmung der Fugenspaltbreiten zum Zeitpunkt des Fugenvergusses
- Wärmebildaufnahmen während des Einbaus der heiß verarbeitbaren Fugenmassen
- Sicherung von Rückstellproben
- Dichtheitsprüfung nach Herstellung der Fugenfüllsysteme mittels Saugglocke

Die Fugensanierung erfolgte bei vergleichsweise sommerlichem Wetter, wobei regnerische Tage für den Ausbau der alten Fugenprofile und zur Fugenvorbereitung genutzt wurden. Der eigentliche Verguss der Fugenmassen erfolgte bei möglichst trockener Witterung.

Die Längsscheinfuge wurde grundsätzlich nachgeschnitten. In den Testfeldern 1.2 und 2.2 wurde darüber hinaus die Querscheinfuge ebenfalls nachgeschnitten und neu angefast. Die Fugen – unabhängig ob nachgeschnitten oder nicht – wurden vor dem Einbau der Fugenmassen mittels rotierender Drahtbürste gereinigt und von Schmutzrückständen befreit. Anschließend erfolgte die Applizierung des Voranstrichmittels mittels manueller Druckluftspritze. Dies erfolgte sowohl für die heiß verarbeitbare Fugenmasse (FM6) als auch für die kalt verarbeitbare Fugenmasse (FM7) mit dem entsprechenden Voranstrichmittel. Nach Abluftzeiten von mindestens 60 Minuten bei der heiß verarbeitbaren Fugenmasse (FM6) und mindestens 15 Minuten bei der kalt verarbeitbaren Fugenmasse (FM7) erfolgte der Verguss, wobei beide Fugenmassen maschinell vergossen wurden. Eine ausführliche Fotodokumentation des Einbauablaufes kann dem Anhang 10.3 entnommen werden.

Während des Fugenvergusses wurden Lufttemperaturen zwischen 19,9 und 36,4 °C sowie Bauteiltemperaturen an der Betonoberfläche von 18,6 bis 40,3 °C gemessen (vgl. Tab. 91).

Temperatur/ Feuchtigkeit		Testfeld			
		1.1	1.2	2.1	2.2
Luft- feuchtigkeit	[%]	30,0 - 64,0		28,0 - 55,0	
Luft- temperatur	[°C]	19,9 - 36,2		26,4 - 36,4	
Bauteil- temperatur	[°C]	18,6 - 40,3		29,9 - 40,3	

Tab. 87: Temperaturen zum Zeitpunkt des Fugenvergusses

Weitere detaillierte Informationen über die Witterungsverhältnisse, die Temperaturen und die Einbaurandbedingungen (Anzahl der Vergusslagen, Ablüftzeit des Voranstrichmittels, Blasenbildung etc.) können dem Anhang 10.4 entnommen werden.

Die Fugenspaltbreiten vor der Fugensanierung betragen ca. 8 bis 10 mm. In Testfeld 1.1 und 2.1 erfolgte nach dem Ausbau der Fugenprofile eine Reinigung der Querscheinfugen mittels rotierender Drahtbürste. Ein Nachschneiden der Querscheinfugen erfolgte sowohl in Testfeld 1.2 als auch in Testfeld 2.2. Die dokumentierte Fugenaufweitung betrug in diesem Bereich rd. 0,7 bis 1,3 mm.

Die Fugenspaltbreiten nach der Reinigung mit der rotierenden Drahtbürste und vor dem Verguss sind in Tab. 88 und Tab. 89 dokumentiert. Eine vollständige grafische Angabe der Fugenspaltbreiten, unterteilt nach Standstreifen und ersten Fahrstreifen kann dem Anhang 10.4 entnommen werden.

	Min	Max	Mittel	Median	Temp.
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°C]
Testfeld 1.1					
SS	9,4	9,7	9,5	9,5	+18,0
1. FS	9,9	10,3	10,0	9,9	+18,0
Testfeld 1.2 (vor dem Nachschneiden)					
SS	8,2	8,5	8,3	8,3	+28,3
1. FS	8,4	8,8	8,6	8,7	+28,3
Testfeld 1.2 (nach dem Nachschneiden)					
SS	9,8	10,1	9,9	9,9	+18,0
1. FS	9,3	10,0	9,5	9,4	+18,0

Tab. 88: Fugenspaltabmessungen vor dem Verguss in Testfeld 1.1 und 1.2

Bei dem Einbau der heiß verarbeitbaren Fugenmasse (FM6) ist darüber hinaus auf die Einhaltung der vom Hersteller vorgegebenen Verarbeitungstemperatur von 160 bis 180 °C zu achten. Die Temperaturüberprüfung erfolgte zum einen durch die Messung der Temperaturen im Rührwerkskocher, zum anderen wurden Thermographieaufnahmen mit einer Infrarotkamera von den Fugen

während des Herstellungsprozesses aufgenommen.

	Min	Max	Mittel	Median	Temp.
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[°C]
Testfeld 2.1					
SS	9,1	9,5	9,3	9,3	+24,4
1. FS	9,7	10,3	9,9	10,0	+24,4
Testfeld 2.2 (vor dem Nachschneiden)					
SS	9,4	9,7	9,6	9,6	+25,1
1. FS	9,3	10,2	9,8	9,8	+25,1
Testfeld 2.2 (nach dem Nachschneiden)					
SS	10,0	10,4	10,2	10,3	+24,6
1. FS	9,9	10,6	10,3	10,3	+24,6

Tab. 89: Fugenspaltabmessungen vor dem Verguss in Testfeld 2.1 und 2.2

Tab. 90 zeigt, dass im Rührwerkskocher keine signifikanten Abweichungen von den Herstellerangaben festgestellt werden konnten. Die Thermographieaufnahmen bieten die Möglichkeit die Temperatur der Fugenmasse direkt nach dem Einbau sowie das Abkühlverhalten innerhalb der Fuge zu analysieren (vgl. Bild 155). Die maximale Temperatur, welche anhand der Thermographieaufnahmen ermittelt werden konnte, lag bei 143,0 °C.

Datum	Temperatur im Rührwerkskocher	
	Anfang [°C]	Ende [°C]
23.07.2016	153,2	182,2
24.07.2016	170,7	176,8
25.07.2016	174,3	168,9
26.07.2016	166,3	163,3

Tab. 90: Temperaturen der heiß verarbeitbaren Fugenmasse (FM6) im Rührwerkskocher



Bild 155: Beispielhafte Thermographieaufnahme

Die qualitative Dokumentation des Einbaus der kalt verarbeitbaren Fugenmasse lässt sich darüber hinaus wie folgt zusammenfassen:

Anmerkungen zur Herstellung der Fugenfüllsysteme in Testfeld 1.1 und 1.2 (FM7):

- Einlagiger Verguss
- Keine Absackungen im Fugenkreuz (ggf. im Nachgang manuell instandgesetzt)

- Vereinzelte Blasenbildung, vermehrt im 2. Fahrstreifen (2. FS), Blasenbildung vorwiegend an der Fugenflanke
- Keine Auffälligkeiten bei der Dichtheitsprüfung mittels Saugglocke

Analog zur Herstellung der Fugenfüllsysteme mit kalt verarbeitbaren Fugenmasse lässt sich die qualitative Dokumentation wie folgt zusammenfassen:

Anmerkungen zur Herstellung der Fugenfüllsysteme in Testfeld 2.1 und 2.2 (FM6):

- i.d.R. einlagiger Verguss
- Teilweise ausgeprägte Rinnenbildung (extreme Hohlkehle)
- Vereinzelte Blasenbildung, vermehrt in der Längsfuge, Blasenbildung vorwiegend in der Fugenmitte
- Keine Auffälligkeiten bei der Dichtheitsprüfung mittels Saugglocke

6.4 Dokumentation des Fugenzustandes während der Nutzungsdauer

Die Begutachtung der Erprobungsstrecke erfolgte im Dreimonatsturnus, sodass zusätzlich zur Einbaubegleitung im Juni und Juli 2016 sieben weitere Termine zur Begutachtung der Erprobungsstrecke im Zeitraum von Juli 2016 bis März 2018 (rd. 21 Monate) durchgeführt wurden (vgl. Bild 156).

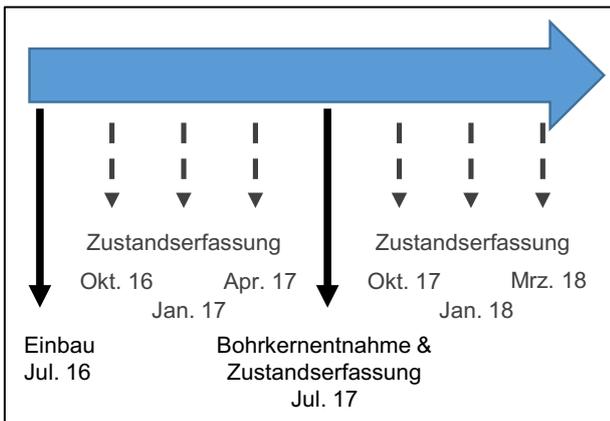


Bild 156: Begutachtungstermine BAB A23

6.4.1 1. Begutachtung (Oktober 2016)

Die erste Begutachtung der Erprobungsstrecke nach Fertigstellung der Fugenfüllsysteme erfolgte am 19. und 20.10.2016 bei heiterem bis sonnigem Wetter.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Performance der Fugenmassen haben die vorherrschenden Temperaturveränderungen. Unter anderem ist die Fugenbewegung nachhaltig von der Witterung und somit auch von der Lufttemperatur unmittelbar vor der Messung in situ beeinflusst.

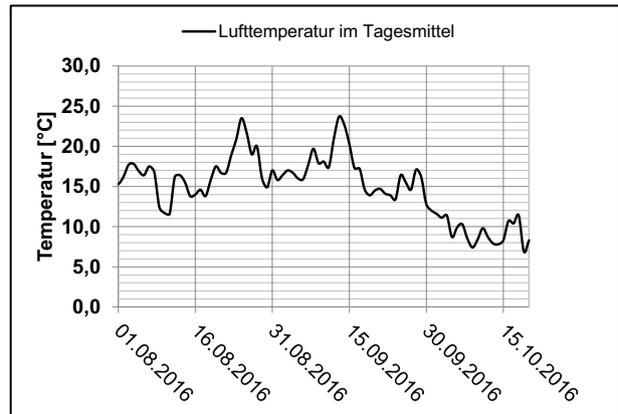


Bild 157: Lufttemperatur im Tagesmittel von August bis Oktober 2016 [12]

Bild 157 zeigt den Verlauf der Lufttemperaturen im Tagesmittel, welche vom Deutschen Wetterdienst an der Messstation Itzehoe ermittelt wurden [12]. Die Lufttemperaturen im Tagesmittel lagen am 19.10.2016 bei 6,9 °C und am 20.10.2016 bei 8,3 °C. Diese Temperaturen sind etwas geringer als die Lufttemperaturen im Tagesmittel an den drei Tagen unmittelbar vor der Begutachtung, befinden sich aber auf einem vergleichbaren Niveau gegenüber den 14 Tagen vor der Begutachtung.

Die Temperaturen zum Zeitpunkt der Begutachtung im Oktober 2016 sind in Tab. 91 angeführt. Die Messungen zeigten zwischen der Bauteiltemperatur an der Fahrbahnoberfläche und der Lufttemperatur ein etwa vergleichbares Temperaturniveau. Die Messungen der Temperaturfühler der Thermoelemente zeigten, dass die Bauteiltemperatur unterhalb der Fahrbahnoberkante einen negativen Temperaturgradienten aufwies. Dies ist bedingt durch tiefere Temperaturen in der Nacht durchaus plausibel.

Temperatur/ Feuchtigkeit		Testfeld			
		1.1	1.2	2.1	2.2
Luftfeuchtigkeit	[%]	64	74	82	85
Lufttemperatur	[°C]	10,7 - 12,1	11,3 - 11,7	12,2 - 14,8	9,1 - 9,5
Betonoberfläche	[°C]	9,2 - 10,3	10,7 - 12,6	10,5 - 14,8	8,7 - 9,5
ca. 3 cm unter FOK	[°C]	8,9	10,4	8,3	8,2
ca. 13 cm unter FOK	[°C]	7,3	10,0	7,7	7,9
ca. 21 cm unter FOK	[°C]	4,3	9,2	7,1	6,2

Tab. 91: Temperaturen zum Zeitpunkt der Begutachtung im Oktober 2016

Analog zu den bisherigen visuellen Zustandserfassungen lässt sich die Dokumentation der Testfelder 1.1 und 1.2 nach drei Monaten Nutzungsdauer wie folgt zusammenfassen:

Visuelle Zustandserfassung Testfeld 1.1 und 1.2 (FM7)

- Lagestabil, keine Absackungen
- Fugenoberfläche im Standstreifen verschmutzt
- Leichte Verfärbung der Fugenmassenoberfläche
- Identisches Erscheinungsbild zwischen Standstreifen und Hauptfahrstreifen (1. FS)
- Lokaler Überverguss
- Blasenbildung analog Einbaudokumentation
- Keine Auffälligkeiten bei der Dichtheitsprüfung mittels Sauglocke

Grundlegend sind keine maßgeblichen Veränderungen gegenüber dem Zustand der Fugenfüllsysteme direkt nach der Fertigstellung zu verzeichnen. Der visuelle Zustand der Fugenfüllsysteme ist beispielhaft durch Bild 158 dargestellt.



Bild 158: Beispielhafte visuelle Zustandserfassung in Testfeld 1.1 und 1.2 im Oktober 2016

Die Zusammenfassung der qualitativen visuellen Zustandserfassung der heiß verarbeiteten Fugenmasse (FM6) in Testfeld 2.1 und 2.2 entsprach nach drei Monaten Nutzungsdauer grundlegend ebenfalls dem Zustand zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Fugenfüllsysteme. Äquivalent zur kalt verarbeitbaren Fugenmasse wurden nur oberflächliche Veränderungen der Fugenmasse in Form einer leichten Oberflächenversprödung („Elefantenhaut“) festgestellt (vgl. Bild 159).

Visuelle Zustandserfassung Testfeld 2.1 und 2.2 (FM6)

- Lagestabil, keine Absackungen (ausgeprägte Hohlkehle z.T. noch vorhanden)
- Fugenoberfläche im SS verschmutzt
- Leichte Oberflächenversprödung („Elefantenhaut“)
- Identisches Erscheinungsbild zwischen Standstreifen und Hauptfahrstreifen (1. FS)
- Lokaler Überverguss
- Blasenbildung analog Einbaudokumentation
- Keine Auffälligkeiten bei der Dichtheitsprüfung mittels Sauglocke



Bild 159: Beispielhafte visuelle Zustandserfassung in Testfeld 2.1 und 2.2 im Oktober 2016

6.4.2 2. bis 7. Begutachtung (Januar 2017 bis März 2018)

Analog zu den Ergebnissen der 1. Begutachtung (Abschnitt 6.4.1) erfolgte die Dokumentation der weiteren Begutachtungen.

Der Verlauf der Lufttemperatur im Tagesmittel gemäß den Daten des Deutschen Wetterdienstes der Messstelle Itzehoe ist in Bild 160 dargestellt. Ähnlich zum ersten Begutachtungstermin kann festgestellt werden, dass in einem Zeitfenster von rd. 14 Tagen vor den entsprechenden Ortsterminen stets ein vergleichbares Temperaturniveau – mit einem Delta von etwa 5 °C – gemessen wurde. Deutliche positive oder negative Temperaturveränderungen, welche die Messergebnisse der Begutachtungstermine möglicherweise beeinflusst hätten, konnten nicht festgestellt werden.

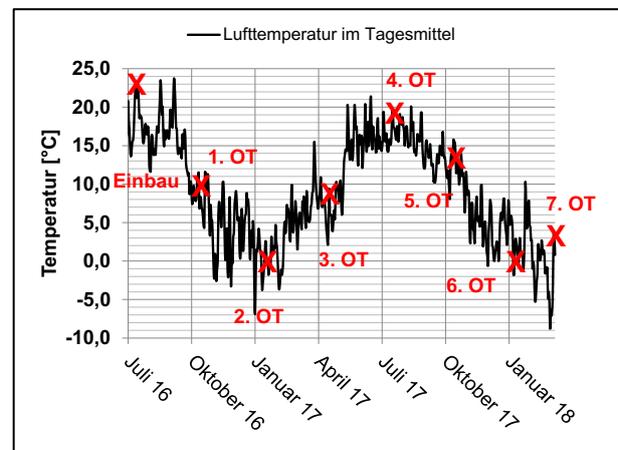


Bild 160: Lufttemperatur im Tagesmittel von Juni 2016 bis März 2018 [12]

In Bild 160 ist zu erkennen, dass die Begutachtungstermine eine große Bandbreite der während der Nutzungsdauer vorherrschenden Temperaturspanne abgedeckt haben. Analog zu Tab. 91 sind die vollständigen Temperaturdokumentationen der Begutachtungstermine in Anhang 10.5 angeführt. Die maximale Bauteiltemperatur (Oberflächentemperatur des Betons) lag während der Begutachtung bei +34,5 °C, zum Zeitpunkt der Fugensanierung sogar bei +40,3 °C. Demgegenüber steht die geringste Bauteiltemperatur mit -1,0 °C im Januar 2017. Somit ergibt sich ein maximal gemessenes Temperaturdelta der Bauteiltemperaturen an der

Oberfläche von 41,3 °C innerhalb des Begutachtungszeitraums.

Die Fugenfüllsysteme wiesen am Ende des Begutachtungszeitraums nach rd. 21 Monaten Nutzungsdauer – unabhängig von der Fugenmassenart und der Flankenvorbehandlung – ein gutes bis sehr gutes Erscheinungsbild auf.

Zusätzlich zu den qualitativen visuellen Zustandserfassungen wurde ab dem 3. Begutachtungstermin (April 2017) die Arbeitsfassung zur visuellen Bewertung von heiß und kalt verarbeitbaren Fugenmassen der Bearbeitergruppe „Bewertung von Fugensystemen über das visuelle Erscheinungsbild“ des FGSV-Arbeitskreises 8.3.1 „Überarbeitung der ZTV Fug, TL + TP“ mit dem Stand Dezember 2016 [5] in das Untersuchungsprogramm der Begutachtungstermine aufgenommen (vgl. Abschnitt 6.5.5). Aufgrund der vergleichsweise geringen Veränderungen zwischen dem 1. und dem letzten Begutachtungstermin, ist nachfolgend die qualitative Bewertung des Zustandes der Fugenfüllsysteme zum Ende des Begutachtungszeitraums angeführt.

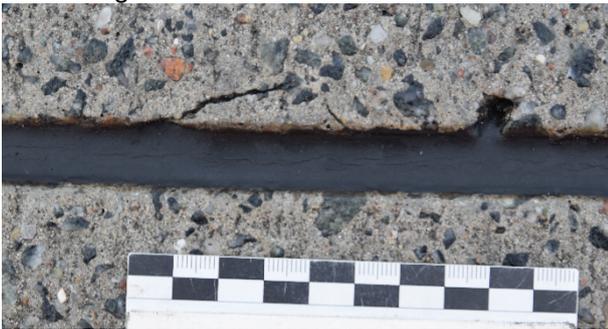


Bild 161: Schädigung der Betonflanke in Form von Abplatzungen sowie oberflächliche Risse der Fugenmasse parallel zur Fugenflanke (Januar 2018, Testfeld 1.1)



Bild 162: Detailaufnahme von oberflächlichen Rissen der Fugenmasse parallel zur Fugenflanke (Januar 2018, Testfeld 1.1)

Visuelle Zustandserfassung Testfeld 1.1 und 1.2 (FM7)

- Lagestabil, keine Absackungen
- Fugenoberfläche im Standstreifen z.T. stark verschmutzt (Bild 163)
- Leichte Zunahme der Verfärbung der Fugenmassenoberfläche
- Geringfügige oberflächliche Risse parallel zur Fugenflanke (Tiefe <1 mm) z.B. Bild 161 und Bild 162
- Identisches Erscheinungsbild zwischen Standstreifen und Hauptfahrstreifen (1. FS)
- Lokaler Überverguss
- Blasenbildung analog Einbaudokumentation
- Keine Auffälligkeiten bei der Dichtheitsprüfung mittels Saugglocke
- Erste Schädigungen an der Fugenflanke im Betongefüge an zwei Fugen in Testfeld 1.1 (vgl. Bild 161)



Bild 163: Verschmutzung inkl. Streusalzablagerungen im Standstreifen (Januar 2018, Testfeld 1.2)

Insgesamt wurden keine maßgeblichen Veränderungen gegenüber dem Zustand direkt nach der Fertigstellung verzeichnet. Der visuelle Zustand der Fugenfüllsysteme nach rd. 19 Monaten Nutzungsdauer ist beispielhaft durch Bild 164 dargestellt.

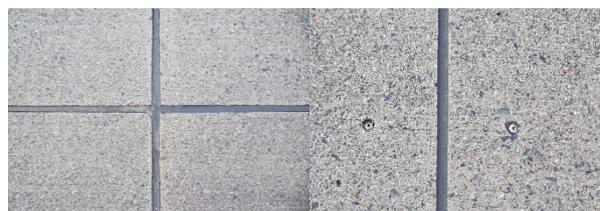


Bild 164: Beispielhafte visuelle Zustandserfassung in Testfeld 1.1 und 1.2 im Januar 2018

Die Zusammenfassung der qualitativen visuellen Zustandserfassung der heiß verarbeiteten Fugenmasse (FM6) in Testfeld 2.1 und 2.2 entsprach nach 21 Monaten Nutzungsdauer grundlegend ebenfalls dem Zustand zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Fugenfüllsysteme. Äquivalent zur kalt verarbeitbaren Fugenmassen wurden nur oberflächliche Veränderungen der Fugenmasse in Form einer leichten Oberflächenversprödung („Elefantenhaut“) festgestellt (vgl. Bild 159).

Visuelle Zustandserfassung Testfeld 2.1 und 2.2 (FM6)

- Lage stabil, keine Absackungen (ausgeprägte Hohlkehle z.T. noch vorhanden)
- Fugenoberfläche im Standstreifen z.T. stark verschmutzt
- Leichte Oberflächenversprödung („Elefantenhaut“), etwas ausgeprägter als im Oktober 2016 (max. Tiefe rd. 1 mm)
- Identisches Erscheinungsbild zwischen Standstreifen und Hauptfahrstreifen (1. FS)
- Lokaler Überverguss (mittlerweile i.d.R. überfahren und gewalzt)
- Blasenbildung analog Einbaudokumentation
- Keine Auffälligkeiten bei der Dichtheitsprüfung mittels Saugglocke



Bild 165: Beispielhafte visuelle Zustandserfassung in Testfeld 2.1 und 2.2 im Januar 2018

Die Messergebnisse der Zustandserfassungen wurden im nachfolgenden Abschnitt 6.5 analysiert.

6.5 Auswertung der Messergebnisse der in situ-Zustandserfassungen

6.5.1 Änderung der Fugenspaltbreiten

Änderung der Fugenspaltbreiten (Querschnitten)

Die Bestimmung der Fugenspaltbreiten erfolgte an neun Zeitpunkten. Unmittelbar nach der Installation der Messmarken wurden die Initialmessungen am Fugenspalt sowie an den Messmarken mittels Setzdehnungsmessgerät durchgeführt (vgl. Bild 19). Anhand dieser Messwerte wurden in den folgenden Messungen die Differenzen der Messmarken ermittelt und somit die zum Zeitpunkt der Messung vorliegende Fugenspaltbreite bestimmt.

In Bild 166 bis Bild 169 sind die Messwerte der absoluten Fugenspaltbreiten (welche indirekt über die Messung der Messmarken bestimmt wurden) zum Zeitpunkt des Fugenvergusses sowie zum Zeitpunkt der Begutachtungstermine aufgezeigt. Die nachfolgenden Grafiken umfassen somit eine Datenbasis von rd. 1150 Messungen der Messmarken.

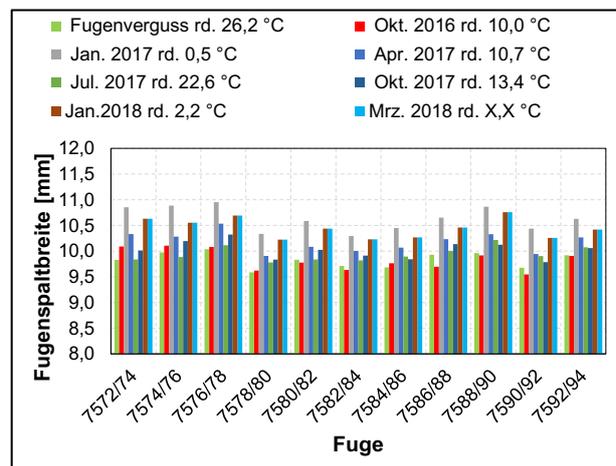


Bild 166: Fugenspaltbreiten A23 – Testfeld 1.1

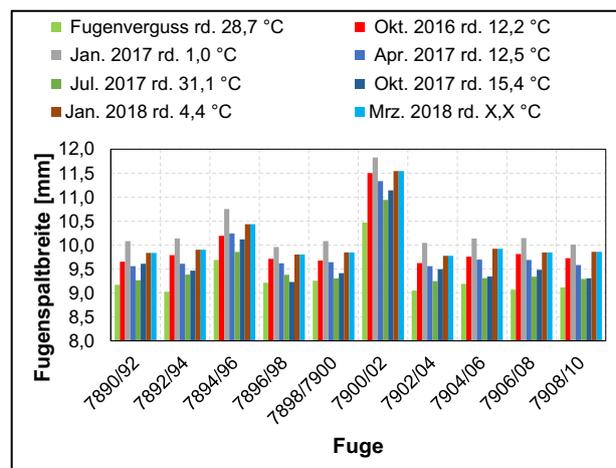


Bild 167: Fugenspaltbreiten A23 – Testfeld 1.2

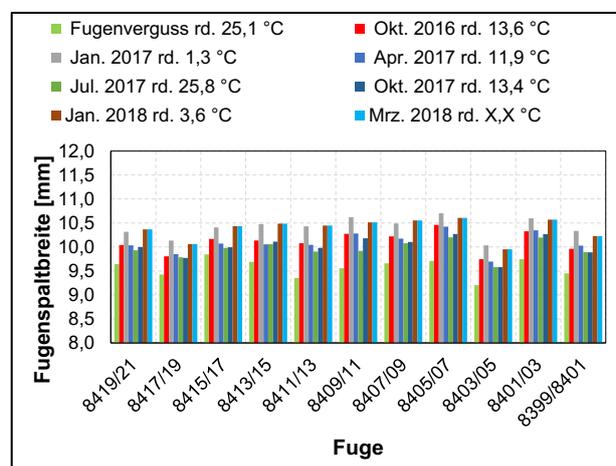


Bild 168: Fugenspaltbreiten A23 – Testfeld 2.1

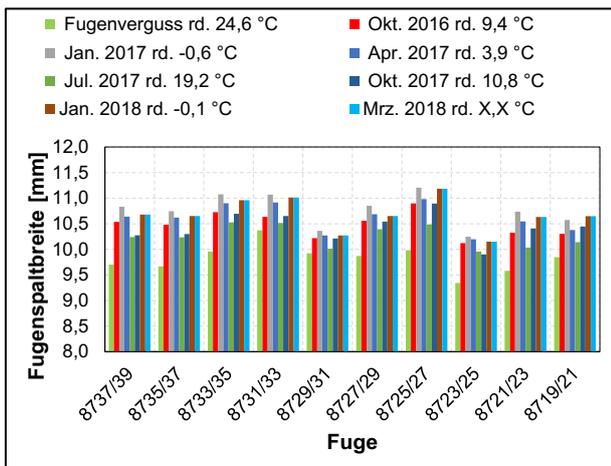


Bild 169: Fugenspaltbreiten A23 – Testfeld 2.2

Für die Bestimmung der prozentualen Änderung der Fugenspaltbreite, welche normativ durch die zulässige Gesamtverformung (ZGV) der Fugenmasse definiert ist, ist die Fugenspaltbreite zum Zeitpunkt des Fugenvergusses maßgebend. Die zulässige Gesamtverformung beschreibt den Verformungsbereich einer Fugenmasse, „innerhalb dessen die Fugenmasse ihre Funktionsfähigkeit beibehält“ [74].

Tab. 92 zeigt die Änderungen der Fugenspaltbewegungen bezogen auf den Zeitpunkt des Fugenvergusses. Testfeld 1.2, 2.1 und 2.2 wiesen im Oktober 2016 im Mittel eine Dehnung von rd. 6,2 % auf und bestätigen die Erwartung, dass bei einer Temperaturreduzierung von im Mittel 14,7 °C eine Öffnung der Fugenspaltbreiten stattfand. In Testfeld 1.1 wurde hingegen im Mittel keine Dehnung und keine Stauchung des Fugenfüllsystems festgestellt. Dieses abweichende Systemverhalten zeigte sich auch im Verlauf der weitergehenden Untersuchungen.

Grundsätzlich ist aufgrund der statistischen Auswertung (Tab. 92) festzustellen, dass die annähernde Übereinstimmung von Median und Mittelwert auf eine Normalverteilung der Messwerte hindeutet. Somit kann zum einen durch den Median der Mittelwert bestätigt werden, zum anderen ist es theoretisch möglich anhand des Vergleichs von Median und Mittelwert mögliche Paketverschiebungen (oder Paketreißen) zu detektieren (vgl. Abschnitt 5.1.2).

Wie in Abschnitt 2.4.1 bereits ausführlich theoretisch hergeleitet und durch die Erkenntnisse aus Praxiserprobungen in Abschnitt 2.4.2 bestätigt, ist die Fugenspaltbreite maßgeblich von der Temperatur abhängig. Zur Überprüfung dieses Zusammenhangs für die BAB A23 sind in Bild 170 die Einzelmesswerte und die daraus generierten Mittelwerte der Dehnungen in Bezug auf die Fugenspaltbreite zum Zeitpunkt des Fugenvergusses in

Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur dargestellt. Die Mittelwerte sowie die zugehörigen Oberflächentemperaturen sind ebenfalls in Tab. 92 dokumentiert.

	Min	Max	Mittel	Median	Temp.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[°C]
Testfeld 1.1					
Jul. 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	+26,2
Okt. 2016	-2,3	2,6	0,0	-0,1	+10,0
Jan. 2017	6,0	10,4	8,1	7,9	+0,5
Apr. 2017	2,6	5,1	3,6	3,3	+10,7
Jul. 2017	-0,9	2,6	1,1	1,1	+22,6
Okt. 2017	1,1	2,9	2,0	2,0	+13,4
Jan. 2018	5,0	8,1	6,3	6,1	+2,2
Mrz 2018	4,4	9,1	6,3	6,0	+0,8
Testfeld 1.2					
Jul. 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	+28,7
Okt. 2016	4,5	9,8	6,6	6,2	+12,2
Jan. 2017	8,1	13,0	10,6	10,6	+1,0
Apr. 2017	4,2	8,2	5,6	5,6	+12,5
Jul. 2017	0,5	4,5	2,2	1,9	+31,1
Okt. 2017	0,2	6,4	3,6	4,5	+15,4
Jan. 2018	6,4	10,2	8,0	8,0	+4,4
Mrz 2018	4,9	10,4	7,5	7,1	+6,6
Testfeld 2.1					
Jul. 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	+25,1
Okt. 2016	3,3	7,8	5,7	5,8	+13,6
Jan. 2017	5,7	11,5	8,8	8,8	+1,3
Apr. 2017	2,3	7,6	5,5	5,3	+11,9
Jul. 2017	1,4	5,9	4,0	4,1	+25,8
Okt. 2017	1,5	6,7	4,6	4,6	+13,4
Jan. 2018	6,0	11,7	8,5	8,3	+3,6
Mrz 2018	4,0	9,5	7,3	7,4	+2,1
Testfeld 2.2					
Jul. 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	+24,6
Okt. 2016	2,6	9,2	6,7	7,8	+9,4
Jan. 2017	4,4	12,3	9,6	10,6	-0,6
Apr. 2017	3,5	10,1	8,1	9,3	+3,9
Jul. 2017	0,9	6,6	4,4	5,2	+19,2
Okt. 2017	2,7	9,1	6,2	6,3	+10,8
Jan. 2018	3,5	12,1	8,8	9,3	-0,1
Mrz 2018	0,5	8,4	5,6	6,5	10,8

Tab. 92: Dehnung und Stauchung der Querscheinfugen des Fugensystems bezogen auf den Zeitpunkt des Fugenvergusses (Fixiertemperatur)

Die lineare Abhängigkeit zwischen der Fugenspaltbreite (in Form der Dehnung) sowie der Ober-

flächentemperatur wird in Bild 171 durch die vergleichsweise hohen Bestimmtheitsmaße von bis zu $R^2 = 0,94$ bestätigt. Auffällig ist, dass die Testfelder 1.2, 2.1 und 2.2 ein vergleichbares Bewegungsprofil aufwiesen, wohingegen die Messwerte von Testfeld 1.1 abwichen. Dieser Sachverhalt hat auch ohne die Messung im Oktober 2016 ($\epsilon = \pm 0,0$ %) bestand.

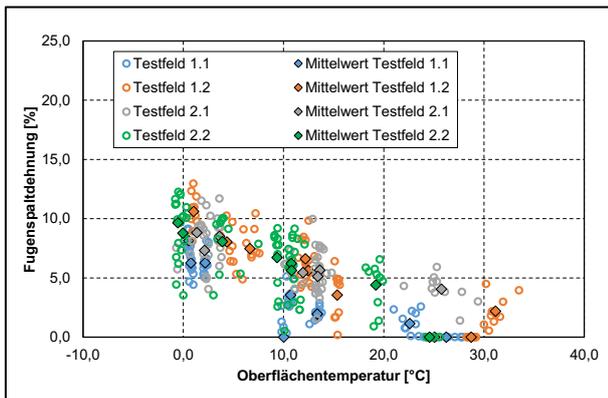


Bild 170: Fugenspaltänderung in % in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur

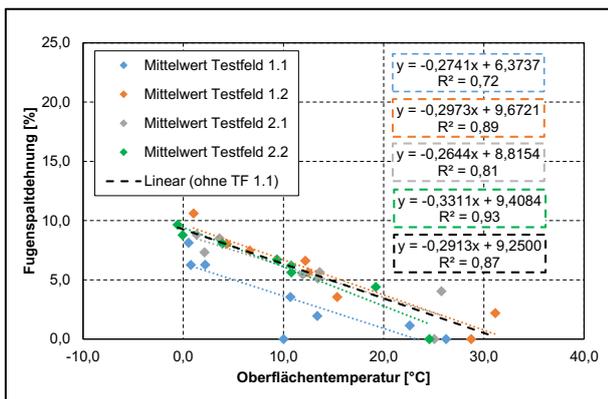


Bild 171: Lineare Abhängigkeit zwischen der Oberflächentemperatur und der Änderung der Fugenspaltbreite in %

Gemäß [29] bzw. [74] beträgt die ZGV – welche der Summe aus Dehnung und Stauchung entspricht – für Fugenmassen des Typs N2 25 %. Anhand der Regressionsfunktionen ist es somit möglich die Temperatur zum Zeitpunkt einer Dehnung von $\epsilon = 25$ % zu bestimmen. Die Betrachtung der vier Testfelder zeigt in Bezug auf die Oberflächentemperatur eine Spannweite zwischen $-68,0$ und $-47,1$ °C. Im Mittel beträgt dieser Kennwert bei Testfeld 1.2, 2.1 und 2.2 $-54,1$ °C (aufgrund der Abweichenden Messergebnisse von Testfeld 1.1 wurden diese von der Betrachtung ausgeschlossen). Bezogen auf eine Temperatur der Oberfläche zum Zeitpunkt des Fugenvergusses zwischen $+24,6$ und $+28,7$ °C – im Mittel $26,1$ °C – ergibt sich folglich ein mittleres Temperaturdelta von $80,2$ °C. Theoretisch ist somit im Mittel z.B. eine

Fugenspaltbewegung zwischen -20 °C und $+60$ °C durch die Fugenmasse aufnehmbar.

Diese vergleichsweise geringen Dehnungen resultieren vermutlich aus der Bauweise der Erprobungsstrecke (26 cm Betondecke auf Verfestigung ohne Vliesstoff).

Im Verlauf des Forschungsvorhabens erfolgte keine kontinuierliche Aufzeichnung der Messwerte, daher liegen auch zur Temperaturdokumentation nur punktuelle, diskontinuierliche Messergebnisse vor. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wurden weitere Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) der Messstelle Itzehoe im Zeitraum vom 01.06.2016 bis zum 07.03.2018 herangezogen [12].

Die Messwerte der Lufttemperaturen waren sowohl als Tagesmittelwerte, als auch als Stundenwerte beim DWD abrufbar. In Tab. 96 sind die Extremwerte der Auswertung der DWD-Daten sowie die Extremwertbetrachtung der Messwerte über den Begutachtungs- und Einbauzeitraum dargestellt.

Die Betrachtung der punktuellen Messungen Oberflächentemperatur bzw. die Betrachtung der Stundenwerte des DWD können in diesem Fall zur Beurteilung nur orientierend als Bewertungsgrundlage herangezogen werden. Es ist jedoch ersichtlich, dass das maximale Temperaturdelta – unabhängig von der Ermittlung der Extremwerte – im betrachteten Zeitraum maximal bei rd. 42 °C liegt (vgl. Tab. 93). Somit verbleibt für eine Überlastung der Fugenmasse eine Sicherheitsreserve von rd. 38 °C.

Es ist anzumerken, dass in dieser Betrachtung die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten des Betons und der Fugenmasse nicht berücksichtigt wurden. Ebenso gilt es die zeitverzögerte Reaktion der Betonplatten zu berücksichtigen. So stellen sich die maximalen Dehnungen bzw. Stauchungen nicht unmittelbar mit dem Auftreten der minimalen bzw. maximalen Lufttemperaturen ein. Sofern eine weitergehende Bewertung der Lufttemperaturen sinnvoll wäre, gilt es hierbei einen definierten Zeitraum zu betrachten.

	T_{MIN}	T_{MAX}	ΔT
	[°C]	[°C]	[°C]
Tagesmittel nach [12]	-8,8	23,7	32,5
Stundenwerte nach [12]	-11,4	30,3	41,7
Lufttemperatur Messungen RUB	-3,6	36,4	40,0
Oberflächentemperatur Messungen RUB	-0,8	40,3	41,1

Tab. 93: Mittelwerte der Fugenspaltbreite der Längsscheinfugen

Einfluss des Temperaturgradienten

Zum Zeitpunkt der Begutachtungen von Oktober 2016 bis März 2018 wurden in jedem Testfeld Messungen der Temperatur unterhalb der Fahr- bahnoberkante (FOK) durchgeführt. Neben der berührungslosen Messung der Oberflächentempe- ratur wurden Widerstandselemente zur Tempera- turmessung in den Tiefen ca. 3 cm (oberflächen- nah), ca. 13 cm (Plattenmitte) und ca. 21 cm (unte- res Plattenviertel) installiert. Somit konnte ein Rückschluss über den Verlauf der Bauteiltempera- tur in Abhängigkeit vom Abstand zur Fahrbahn- oberkante gewonnen werden. In den „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Ober- baus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschich- ten – RDO Asphalt“ [52] ist eine von KAYSER bestimmte Möglichkeit zur „Ermittlung des dimen- sionierungsrelevanten Temperaturverlaufes im Asphaltoberbau sowie der Häufigkeit des Auftre- tens der zugeordneten Oberflächentemperaturen“ [52] in Anhang 2 beschrieben. Diese Temperatur- verläufe sind in Bild 173 zum Vergleich mit den auf der BAB A23 ermittelten Messwerten eingepflegt. Insgesamt lässt sich hierbei eine vergleichsweise gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Messwerten (RDO Asphalt) und den gemessenen Messwerten über die Bauteiltiefe feststellen.

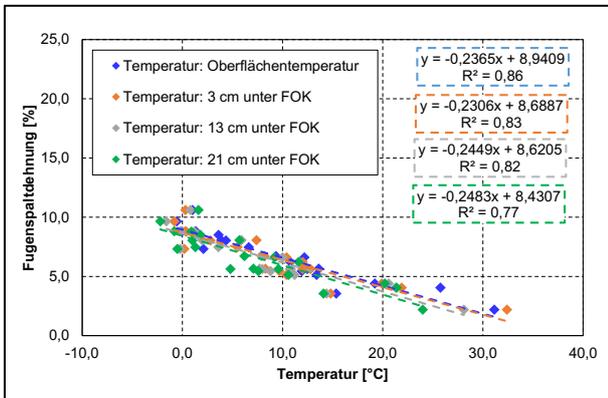


Bild 172: Lineare Abhängigkeit zwischen der Bauteiltemperatur und der Änderung der Fugenspaltdéhnung in %

Zur Ermittlung des Einflusses des Temperaturgra- dienten über die Bauteiltiefe, wurden gemäß Bild 171 die Regressionsfunktionen der Mittelwerte aus Testfeld 1.2, 2.1 und 2.2 für einen Vergleich her- angezogen. Aus Bild 172 und Tab. 95 wird ersicht- lich, dass eine lineare Abhängigkeit zwischen Fugenspaltdéhnung und Oberflächentemperatur be- steht. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine Messung der Temperaturen unterhalb der FOK im Juli 2016 nicht möglich war, da zu diesem Zeitpunkt die Thermoelemente installiert werden mussten.

Die Messergebnisse der Déhnungen zum Zeit- punkt des Fugenvergusses im Juli 2016

($\epsilon = 0,0 \%$) lagen insgesamt unterhalb der Regres- sionsfunktion. Folglich ist eine Erhöhung des Tempe- raturdeltas bis zum Erreichen einer ZGV von 25 % erwartungsgemäß. Zwischen dem maxima- len Temperaturdelta von 96,8 °C (ca. 3 cm unter FOK) und dem minimalen Temperaturdelta von 92,8 °C (ca. 21 cm unter FOK) lag somit lediglich eine Differenz von 4,1 % vor. Bezogen auf das Temperaturdelta an der Oberfläche von 95,7 °C (FOK) betrug die Differenz zum Minimum nur 1,1 % und zum Maximum lediglich 3,0 %.

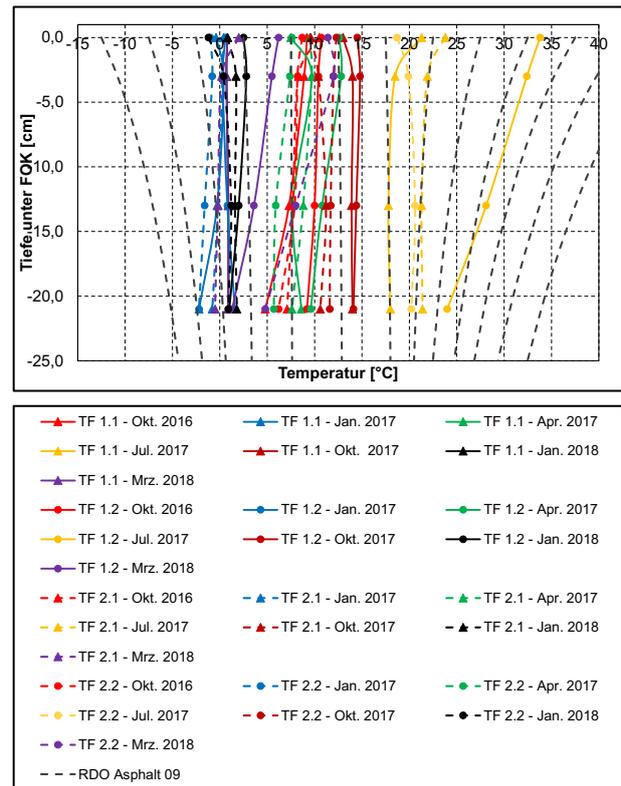


Bild 173: Temperaturverlauf in Abhängigkeit von der Bauteiltiefe

Aufgrund der fehlenden Informationen über die Messergebnisse im Sommer 2016, wobei zu die- sem Zeitpunkt die maximalen Temperaturen gemessen wurden, sind die Ergebnisse mit Vorbehalt zu betrachten. Die Differenz zwischen den Tempe- raturdeltas bis zum Erreichen der ZGV von 25 % mit bzw. ohne den Messwerten aus dem Juli 2016 beträgt rd. 15,6 °C, bezogen auf die gesamten Messwerte (inkl. Juli 2016) entspricht dies einer Abweichung von 19,4 %. Der Einfluss einer Mes- sung bei extremen Witterungsbedingungen ist somit gegenüber der Tiefe der Messung unterhalb der Fahrbahnoberkante wesentlich dominanter.

Auf Basis der hier ermittelten Messwerte, ist bei dieser Bauweise die Bestimmung der Oberflächen- temperatur als hinreichend genau anzusehen.

Temperaturmessung an der Oberfläche	Regressionsfunktion	Bestimmtheitsmaß	T bei $\epsilon = 25\%$
	[-]	R ²	[°C]
Testfeld 1.1	$f(x) = -0,2741x + 6,3737$	0,72	-68,0
Testfeld 1.2	$f(x) = -0,2973x + 9,6721$	0,89	-51,6
Testfeld 2.1	$f(x) = -0,2644x + 8,8154$	0,81	-61,2
Testfeld 2.2	$f(x) = -0,3311x + 9,4084$	0,93	-47,1
gesamt	$f(x) = -0,2805x + 8,4512$	0,71	-59,0
gesamt ohne TF 1.1	$f(x) = -0,2913x + 9,2500$	0,87	-54,1

Tab. 94: Regressionsfunktionen der Änderung der Fugenspaltbreiten (Testfeld 1.1 bis 2.2)

Temperaturmessung	Regressionsfunktion	Bestimmtheitsmaß	T bei $\epsilon = 25\%$
	[-]	R ²	[°C]
Oberflächentemperatur	$f(x) = -0,2913x + 9,2500$	0,87	-54,1
Oberflächentemperatur ohne Messwerte Juli 2016	$f(x) = -0,2365x + 8,9409$	0,87	-69,6
ca. 3 cm unter FOK	$f(x) = -0,2306x + 8,6887$	0,83	-70,7
ca. 13 cm unter FOK	$f(x) = -0,2449x + 8,6205$	0,82	-66,9
ca. 21 cm unter FOK	$f(x) = -0,2483x + 8,4307$	0,77	-66,7

Tab. 95: Regressionsfunktionen der Änderung der Fugenspaltbreiten in Abhängigkeit von der Bauteiltiefe

Änderung der Fugenspaltbreiten (Längsscheinfugen)

Zur Bestimmung der Fugenspaltöffnungsweiten der Längsscheinfugen wurden an sechs Fugen je Testfeld jeweils drei Messungen je Fuge durchgeführt. Die Bestimmung der Messwerte erfolgte unmittelbar in der Fuge mittels Messschieber. Die Zusammenfassung der absoluten Fugenspaltbreiten der Längsfugen ist in Tab. 96 festgehalten. Die ergänzende statistische Ausarbeitung der Messwerte ist in Tab. 97 und Tab. 98 angeführt.

	Testfeld 1.1	Testfeld 1.2	Testfeld 2.1	Testfeld 2.2
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Jul. 2016	8,0	8,0	8,0	7,5
Okt. 2016	8,3	8,3	7,5	8,0
Jan. 2017	8,3	8,3	8,2	8,2
Apr. 2017	8,3	8,1	7,7	8,2
Jul. 2017	8,3	8,1	7,7	8,2
Okt. 2017	8,2	8,0	7,6	8,3
Jan. 2018	7,9	7,8	7,9	n.m.*
Mrz. 2018	8,0	7,8	n.m.*	n.m.*

*nicht messbar, zu hohe Steifigkeit der Fugenmasse

Tab. 96: Mittelwerte der Fugenspaltbreite der Längsscheinfugen

Erwartet wurde eine Fugenspaltbewegung, welche etwa einem Drittel der Fugenspaltbewegungen der Querscheinfugen entspricht. Wider Erwarten konnte festgestellt werden, dass die Messung der Fu-

genspaltbreiten unmittelbar in der Fuge zu keinen auswertbaren Ergebnissen führt. Insbesondere Fugenspaltbreiten von Fugenfüllsystemen, welche mit heiß verarbeitbare Fugenmassen hergestellt wurden, lassen sich bei tiefen Temperaturen kaum bzw. nicht exakt messen.

	Min	Max	Mittel	Median	Temp.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[°C]
Testfeld 1.1					
Jul. 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	+26,2
Okt. 2016	2,5	5,6	3,8	3,5	+10,0
Jan. 2017	-1,4	0,8	-0,5	-0,7	+0,5
Apr. 2017	-3,7	-1,3	-2,7	-2,8	+10,7
Jul. 2017	-2,6	1,4	-0,9	-1,1	+22,6
Okt. 2017	-3,6	-1,2	-2,2	-2,1	+13,4
Jan. 2018	-8,0	-2,3	-5,0	-5,1	+2,2
Mrz 2018	-5,6	-2,4	-3,8	-3,4	+0,8
Testfeld 1.2					
Jul. 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	+28,7
Okt. 2016	2,7	5,4	3,5	2,9	+12,2
Jan. 2017	-2,0	2,1	0,3	0,4	+1,0
Apr. 2017	-5,5	-3,4	-4,4	-4,6	+12,5
Jul. 2017	-3,1	-1,7	-2,4	-2,4	+31,1
Okt. 2017	-6,1	-0,5	-2,9	-2,5	+15,4
Jan. 2018	-7,4	-3,4	-5,8	-6,0	+4,4
Mrz 2018	-7,4	-4,8	-5,8	-5,7	+6,6

Tab. 97: Dehnung und Stauchung der Längsscheinfugen (bezogen auf die Fixiertemperatur), Testfeld 1.1 und 1.2

	Min	Max	Mittel	Median	Temp.
	[%]	[%]	[%]	[%]	[°C]
Testfeld 2.1					
Jul. 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	+25,1
Okt. 2016	-9,6	-4,3	-6,0	-5,6	+13,6
Jan. 2017	6,0	12,6	8,7	9,3	+1,3
Apr. 2017	-4,5	1,8	-2,2	-2,8	+11,9
Jul. 2017	-1,8	5,9	0,4	-1,0	+25,8
Okt. 2017	-2,0	4,8	1,2	0,6	+13,4
Jan. 2018	1,0	8,5	5,3	5,3	+3,6
Mrz 2018	n.m.*	n.m.*	n.m.*	n.m.*	+2,1
Testfeld 2.2					
Jul. 2016	0,0	0,0	0,0	0,0	+24,6
Okt. 2016	4,7	7,3	6,0	6,0	+9,4
Jan. 2017	-1,3	7,5	3,1	2,8	-0,6
Apr. 2017	-4,4	1,7	-1,1	-0,8	+3,9
Jul. 2017	-2,0	6,1	2,2	2,8	+19,2
Okt. 2017	-1,8	10,8	4,4	4,5	+10,8
Jan. 2018	n.m.*	n.m.*	n.m.*	n.m.*	-0,1
Mrz 2018	n.m.*	n.m.*	n.m.*	n.m.*	+10,8

*nicht messbar, zu hohe Steifigkeit der Fugenmasse

Tab. 98: Dehnung und Stauchung der Längsscheinfugen (bezogen auf die Fixiertemperatur), Testfeld 2.1 und 2.2

6.5.2 Bewertung der Dichtheit der Fugenfüllsysteme

Die Beurteilung der Dichtheit des Fugenfüllsystems wurde durch einen semi-quantitativen Bewertungsansatz ermöglicht. In Anlehnung an RECK-NAGEL et. al [55], wurde das Grundsystem der Dichtheitsprüfung übernommen und um einen quantitativen Bewertungsansatz ergänzt.

Für die Dichtheitsprüfung wurde eine 3 %ige-Tensidlösung vor der Prüfung auf die Fuge aufgetragen. Anschließend erfolgte die Unterdruckprüfung mittels Vakuumsaugglocke. (Zur Einschätzung der Prüfung wurde vor Beginn der Untersuchungen stets der minimal erreichbare Unterdruck auf der Betonoberfläche geprüft. Somit war eine Einschätzung der Qualität der Abdichtung der Saugglocke während der Prüfung möglich. Prüfungen mit einer Unterdruckdifferenz zum atmosphärischen Druck > 0,2 bar wurden nicht in die Auswertung einbezogen.)

Zur weitergehenden Bewertung der qualitativen Dichtheitsprüfung wurde eine Bewertungsmatrix entsprechend Tab. 99 erstellt. Somit ist es möglich, die beiden Bewertungskriterien Blasenintensität (Beschreibt die „Größe“ der Blasen) und Schadensausprägung (Beschreibt die Summe der Häufigkeiten der Undichtigkeiten innerhalb einer Dicht-

heitsprüfung) in einem Netzdiagramm grafisch darzustellen. Beispielhaft ist eine Fotoaufnahme einer Dichtheitsprüfung in Bild 174 dargestellt.

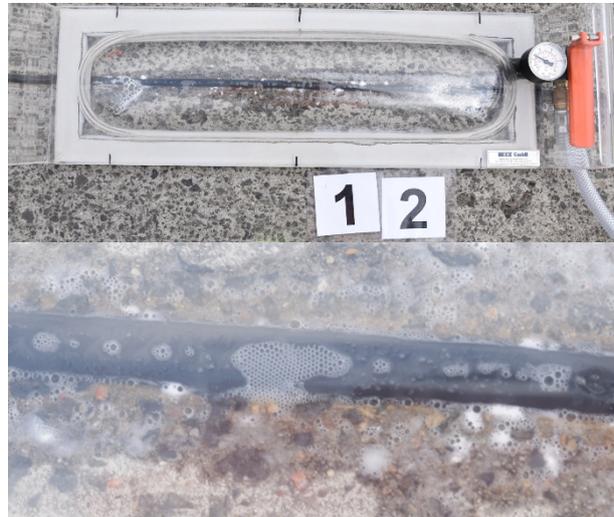


Bild 174: Dichtheitsprüfung mittels Vakuumsaugglocke am Beispiel: wenige Blasen, lokal <5 cm (oben Gesamtaufnahme, unten: Detail)

Bewertungskriterium	Kategorie	Beschreibung
Blasenintensität	0	keine Blasen
	1	sehr wenige Blasen
	2	deutliche Blasen
	3	ausgeprägte Blasen
	4	extrem viele Blasen
	5	Prüfung nicht möglich
Schadensausprägung	0	keine Blasen
	1	lokal (Bereich ≤ 5 cm)
	3	vermehrt lokal (Bereich 5 cm bis 25 cm)
	5	großflächig (Bereich >25 cm)

Tab. 99: Bewertungsmatrix zur Dichtheitsprüfung

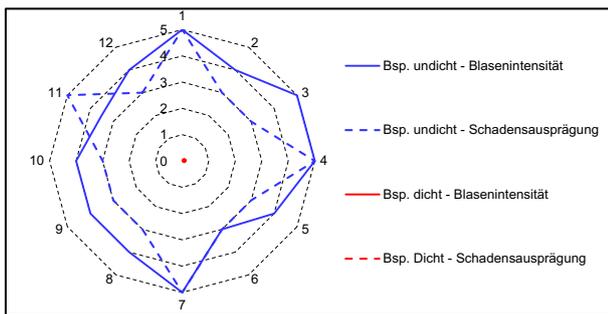


Bild 175: Theoretische Visualisierung für die Beurteilung der Dichtheit des Fugensystems

Anhand von Netzdiagrammen ist es möglich Veränderungen von ausgewählten Kenngrößen zu visualisieren. Die Achsen 1 bis 12 entsprechen den einzelnen Messpunkten eines Testfeldes, wobei die Punkte 1, 2, 5, 6, 9 und 10 an Querfugen im 1. Fahrstreifen liegen, die Punkte 3, 7 und 11 liegen an Querfugen im Standstreifen und die Punkte 4, 8 und 12 entsprechen Messungen an Längsfugen.

Bild 175 zeigt die fiktive Darstellung von 12 Messungen. In Rot sind Messungen an einem vollständig intakten Fugenfüllsystem dargestellt, daher liegen sämtliche Messwerte der Blasenintensität und Schadensausprägung bei 0. In Blau sind dem gegenübergestellt fiktive Messwerte eines undichten Fugenfüllsystems. Eine Veränderung der Dichtheit ist hierbei klar durch die vergrößerte Fläche des Netzdiagramms zu erkennen. Folglich entspricht eine größere Fläche des Netzdiagramms einer schlechteren Qualität der Dichtheit des Fugenfüllsystems.

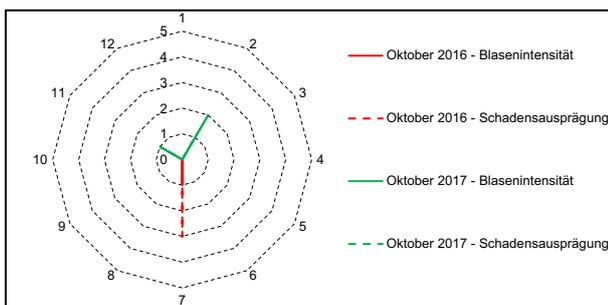


Bild 176: Beurteilung der Dichtheit des Fugensystems von Testfeld 1.1 (FM7)

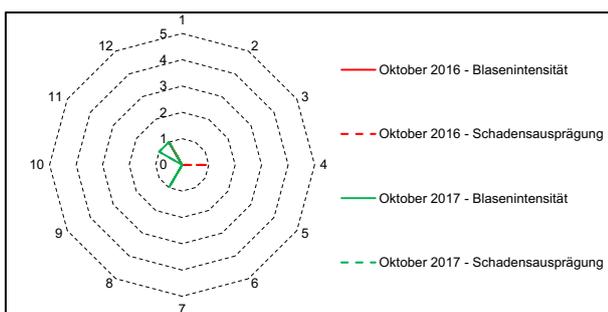


Bild 177: Beurteilung der Dichtheit des Fugensystems von Testfeld 2.1 (FM6)

In Bild 176 und Bild 177 sind die Veränderungen der Dichtheit von den Messpunkten in Testfeld 1.1 (kalt verarbeitbare Fugenmasse FM7) und Testfeld 2.1 (heiß verarbeitbare Fugenmasse FM6) im Zeitraum von Oktober 2016 bis Oktober 2017 exemplarisch dargestellt. Insgesamt konnten keine großflächigen Veränderungen der Dichtheit in diesem Zeitraum festgestellt werden. Diese Erkenntnis gilt analog für Testfeld 1.2 und 2.2 (vgl. Anhang 10.5.2).

Es gilt anzumerken, dass Dichtheitsprüfungen bei dem verwendeten System bei Temperaturen $<5\text{ °C}$ mitunter kritisch zu bewerten sind. Bei der Prüfung im Januar 2018 war aufgrund der erhöhten Steifigkeit des Abdichtungsmaterials der Vakuumsaugglocke und der feuchten Betonoberfläche keine valide Prüfung der Dichtheit möglich. Grundsätzlich wurden Dichtheitsprüfungen erst ab einem Unterdruck von $-0,2\text{ bar}$ als valides Messergebnis eingestuft.

6.5.3 Veränderung der Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der Fahrbahnoberkante

Im Vorfeld zur Einrichtung der Erprobungsstrecke sowie im Betreuungsausschuss wurde intensiv über eine vergleichsweise einfache und robuste Methode zur Bestimmung der Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der Fahrbahnoberkante diskutiert. In [5] ist hierzu die visuelle Einschätzung der Höhenlage als „Weiteres Kriterium“ definiert. Die Einteilung erfolgt durch die Noten 1 (Differenz OK Verguss und FOK $\leq 3\text{ mm}$), 2 (Differenz OK Verguss und FOK 3 bis 6 mm) und 3 (Differenz OK Verguss und FOK $>6\text{ mm}$).

Es sei angemerkt, dass nach [74] das Anfasen der Fugenkanten unter 45 ° erfolgen soll und die Fase in der Draufsicht eine Breite von $2 \pm 1\text{ mm}$ aufweisen muss. Über trigonometrische Beziehungen des hieraus resultierenden gleichschenkligen Dreiecks ist die Tiefe der Fase analog zur Breite der Fase in der Draufsicht. Die Zustandsnote 1 kann folglich nur bei korrekt ausgeführter Fase und nach [74] Bild 1 ausgeführtem Fugenverguss erreicht werden.

Die Höhenlage der Fugenmasse wurde jeweils mit Hilfe eines Messschiebers in jedem Testfeld an 6 Querscheinfugen an zwei Messstellen im 1. Fahrstreifen und an zwei Messstellen im Standstreifen ermittelt.

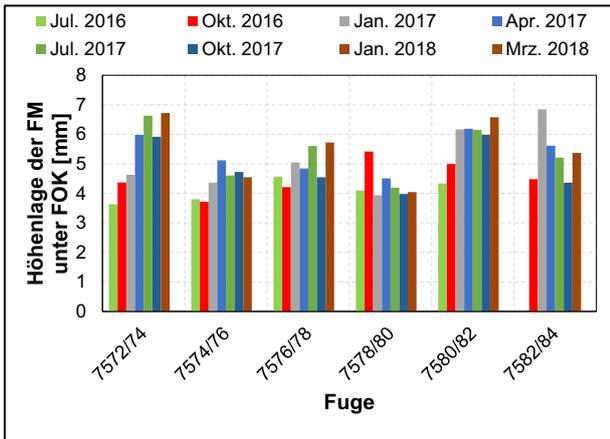


Bild 178: Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der Fahr-
bahnoberkante, 1. Fahrstreifen TF 1.1

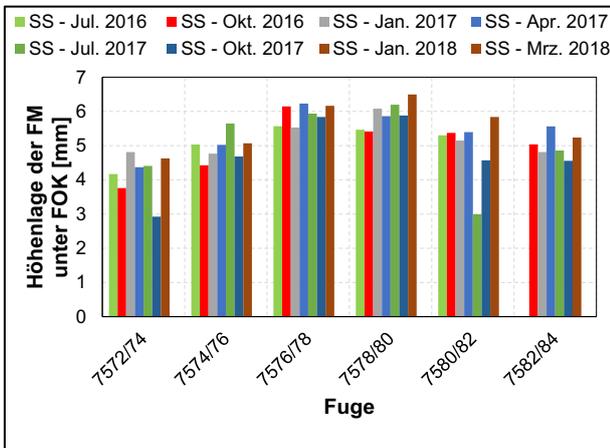


Bild 179: Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der Fahr-
bahnoberkante, Standstreifen TF 1.1

In Bild 178 sind exemplarisch die Messergebnisse der Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der Fahrbahnoberkante für den 1. Fahrstreifen für Testfeld 1.1 angeführt. Die identische Darstellung für die Messwerte des Standstreifens ist in Bild 179 dargestellt. Weitere Messergebnisse sind in Anhang 10.5 angeführt.

Es ließen sich anhand der Messergebnisse keine klaren Tendenzen ableiten. Die größtmögliche Differenz der Messwerte wurde aufgrund der Veränderung der Fugenspaltdimensionen zwischen den Messungen im Sommer und im Winter erwartet. Hierbei wurde im Juli 2017 ein Zustand erwartet, bei dem die Fugenmasse näher an der Fahrbahnoberkante liegt als im Januar 2017. Das erwartete Stichmaß sollte im Sommer dementsprechend geringer als im Winter und die Differenz zwischen Januar und Juli ein positives Vorzeichen aufweisen. Die statistische Analyse dieser Messwerte wies (für alle Testfelder) im Standstreifen eine mittlere Differenz von 0,2 mm und im 1. Fahrstreifen eine mittlere Differenz von -0,1 mm auf. Bild 180 zeigt die hierbei ermittelte Häufigkeitsverteilung der Messwerte. Es ist ersichtlich, dass die

Verteilung einer Normalverteilung ähnelt, wobei der Erwartungswert hier gegen 0 strebt.

Die vergleichsweise hohen Temperaturen zum Zeitpunkt des Fugenvergusses führen, wie in Abschnitt 6.5.1 ersichtlich, zu höheren Dehnungen und geringeren Stauchungen der Fugenmasse. In Konsequenz führt dies zu einer geringeren Stauchung der Fugenmasse und somit zu einem geringeren Herausdrücken der Fugenmassen. Dementsprechend waren unter den vorliegenden Randbedingungen keine extremen Veränderungen der Höhenlage bei intakten Fugenfüllsystemen zwischen Sommer und Winter zu erwarten.

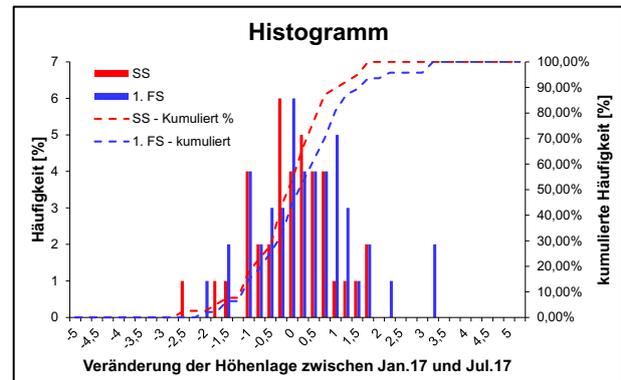


Bild 180: Statistische Auswertung zur maximal erwarteten Differenz der Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der Fahr-
bahnoberkante ($n_{SS}=39$; $n_{1.FS}=47$)

Eine vergleichsweise einfache und schnelle Messung der Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der Fahrbahnoberkante nur mit Hilfe eines Messschiebers an zuvor definierten Messstellen ist demnach nicht zielführend. Die zusätzliche Installation von Messmarken zur Bestimmung der vertikalen Höhenlage der Fugenmasse – wobei die Höhenlage stets auf eine Referenzhöhe bezogen werden muss – ist im Hinblick auf die Präzision der Messergebnisse erstrebenswert, der Mehrwert dieser Messungen ist jedoch zu hinterfragen.

6.5.4 Bewertung der vertikalen Plattenlagen

Die Beurteilung der Auflagerungsbedingungen sowie die Beurteilung der dynamischen Lasteintragung in den gesamten Oberbau sollten ursprünglich – sofern möglich – durch die Unterstützung seitens des Auftraggebers durch Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer (FWD) erfolgen. Diese Messungen waren aufgrund der Projektstruktur und terminlichen Zwängen leider nicht möglich. WIELAND [71] verwies im Rahmen seiner Dissertation auf einen Messbericht der BAST aus dem Jahr 2009, bei dem unter Zuhilfenahme eines Linien-Digitalnivelements die konkave Wölbung von Fahrbahnplatten festgestellt wurde. Hierbei konnten Stichmaße zwischen den höchsten und den geringsten Messwerten nach Abzug der

Längsneigung von bis zu 10 mm festgestellt werden.

In Anlehnung an dieses Verfahren wurden je Testfeld an 6 aufeinanderfolgende Platten die vertikalen Verformungen zum Zeitpunkt der Messung jeweils an den Plattenenden und den Viertelspunkten bestimmt. Dabei wurden stets eine Hin- und eine Rückmessung zur Validierung der Messergebnisse durchgeführt. Beispielhaft ist in Bild 181 der Einfluss der Normierung der Längsneigung (rd. 1 %) dargestellt.

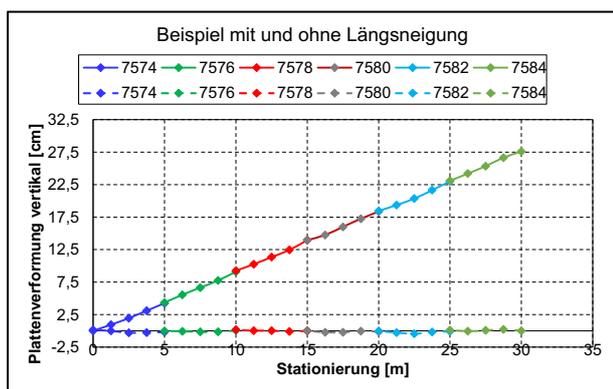


Bild 181: Vertikale Plattenlage mit und ohne Längsneigung am Beispiel Testfeld 1.1, Januar 2018

In Bild 182 sind für Testfeld 1.1 exemplarisch die Messergebnisse der Begutachtungstermine von Januar 2017 bis Januar 2018 aufgeführt. Die maximalen Differenzen in Bezug auf alle dargestellten Fahrbahnplatten betragen rd. ± 5 mm. Der Vergleich der einzelnen Messpunkte zu unterschiedlichen Zeitpunkten zeigt hingegen keine signifikante Verformung. Aufgrund der Bauweise (26 cm Betondecke auf Verfestigung ohne Vliesstoff) ist dieses Ergebnis durchaus als plausibel zu bewerten. Tendenziell wurden durch diesen Ansatz der Messungen – im diesem Fall – vielmehr die Unebenheiten als die Wölbvorgänge der Fahrbahnplatten bestimmt (vgl. Anhang 10.5.4, Bild 243).

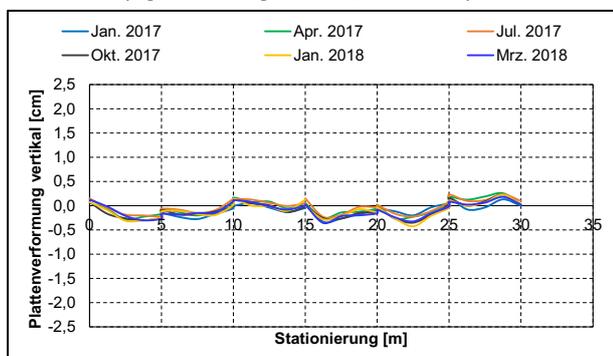


Bild 182: Vertikale Plattenlage am Beispiel Testfeld 1.1 von Januar 2017 bis Januar 2018

6.5.5 Bewertung der visuellen Zustandserfassungen

Die grafische Ausarbeitung der Ergebnisse der visuellen Zustandserfassung von April 2017 bis März 2018 sind in Anhang 10.6 angeführt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die qualitativen Aussagen aus Abschnitt 6.4 bestätigt werden können.

Sowohl in Testfeld 1.1 und 1.2 als auch in Testfeld 2.1 und 2.2 stellten sich im Verlauf des Begutachtungszeitraums von rd. 21 Monaten nur vergleichsweise geringe Veränderungen ein. Diese Erkenntnis kann durch die Bewertung der „Kriterien zur Funktionsfähigkeit“ bestätigt werden. Den fünf unterschiedlichen Bewertungsparametern kann eine gute Reproduzierbarkeit bei der visuellen Beurteilung zugeordnet werden. Die zweite Beurteilung erfolgt anhand der „Weiteren Kriterien“.

Die Anwendung der Arbeitsfassung zur visuellen Bewertung von heiß und kalt verarbeitbaren Fugenmassen [5] wies insbesondere bei der Beurteilung und Benotung der Höhenlage der Fugenmasse unterhalb der FOK, bei der Bestimmung der losen Schmutzansammlungen an der Oberfläche sowie bei der Beurteilung der Blasenbildung Schwächen auf. Die Kriterien der Kategorie „Weitere Kriterien“ sind teilweise deutlich durch die Herstellung beeinflusst (z.B. zu geringer Verguss oder Blasenbildung während des Vergusses). Die visuelle Einschätzung der Höhe der Fugenmasse unterhalb der FOK, differenziert nach den Anforderungen 1 bis 3 mm unterhalb der FOK, 3 bis 6 mm unterhalb der FOK oder >6 mm unterhalb der FOK, ist ohne Hilfsmittel nur sehr schwierig einzuschätzen, zumal die Höhenlage der Fugenmasse bei der Herstellung maßgebend durch die Fase der Fugenkante beeinflusst wird.

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Faktor bei der visuellen Beurteilung der Fugenfüllsysteme ist die vorherrschende Witterung. Bei feuchter oder nasser (und wasserführender) Fugenoberfläche sind sowohl Alterungseffekte und Blasenbildungen nur sehr schwierig zu erkennen. Darüber hinaus werden lose Schmutzansammlungen an der Oberfläche durch ausgeprägte Niederschlagsereignisse weggespült. Somit ist eine vermehrte Schmutzansammlung (z.B. wie im Oktober 2016) durchaus durch längere niederschlagsarme Zeitspannen zu erklären, wohingegen zu niederschlagsreichen Zeiten (z.B. Januar 2018) deutlich geringere Verschmutzungen vorliegen können.

Sämtliche Beurteilungen wurden in situ vom selben Prüfer durchgeführt. Der Einfluss unterschiedlicher Prüfer auf die Einschätzung des visuellen

Erscheinungsbildes ist in dieser Messreihe auszu-schließen.

6.6 Laboruntersuchung der Ausbauproben

6.6.1 Ausgewählte Stoffeigenschaften und rheologische Kenndaten

Zusätzlich zu den Referenzproben im Labor, welche aus der identischen Produktionscharge wie die Fugenmasse in der Erprobungsstrecke stammen, wurde in Testfeld 2.1 und 2.2 jeweils eine Probe der Fugenmasse aus dem Rührwerkskocher entnommen, um somit den Einfluss der Heißverarbeitung und die damit einhergehende Kurzzeitalterung während des Einbauprozesses zu ermitteln. Die Entnahme erfolgte aus der Vergusslanze.

Ein erster Ansatz zur Beurteilung des Einflusses der Langzeitalterung während der Nutzungsdauer war durch die Analyse der Fugenmassen, welche im Juli 2017 nach einem Jahr Nutzungsdauer aus der Fuge entnommen wurden, möglich. Vor der Durchführung der Untersuchungen wurden diese Proben im Labor möglichst schonend gereinigt und von Schmutzanhaftungen befreit.

Die Ergebnisse der konventionellen Fugenmas-senprüfungen sind in Tab. 100, Bild 183 und Bild 184 aufgeführt. Die Darstellung der rheologischen Kenndaten erfolgt unterteilt nach der Prüffrequenz in Bild 185 und Bild 186.

Es ist ersichtlich, dass die konventionellen Kenn-daten der Fugenmassen bei der reinen Laborver-arbeitung sowie nach der Erhitzung im Rührwerks-kocher auf einem vergleichbaren Niveau lagen. Nach einer Liegezeit von 1 Jahr (Probenahme im Juli 2017) ist anhand der konventionellen Prüfer-genergebnisse ebenfalls noch keine Materialverände-rung feststellbar.

Die Interpretation der rheologischen Kennwerte zeigt, dass das Verhältnis zwischen viskosen und elastischen Anteilen – definiert durch den Pha-senwinkel – eine vergleichbare Charakteristik auf-wies. Einzig der komplexe Schermodul der rein im Labor verarbeiteten Probe (FM6) war ab einer Temperatur von ca. 30 °C leicht höher als die komplexen Schermoduln der Proben aus dem Rührwerkskocher.

FM	Nadel-penetration	Konus-penetration	EP RuK
[-]	[1/10 mm]	[1/10 mm]	[°C]
FM6	63,9	57,1	103,4
A23 - TF 2.1 - Kocher	75,2	51,7	105,8
A23 - TF 2.2 - Kocher	63,8	52,4	104,7
A23 - TF 2.1 - 1 Jahr	65,0	49,4	104,3
A23 - TF 2.2 - 1 Jahr	61,2	50,2	104,7

Tab. 100: Messwerte Konuspenetration, Nadelpenetration und EP RuK der A23

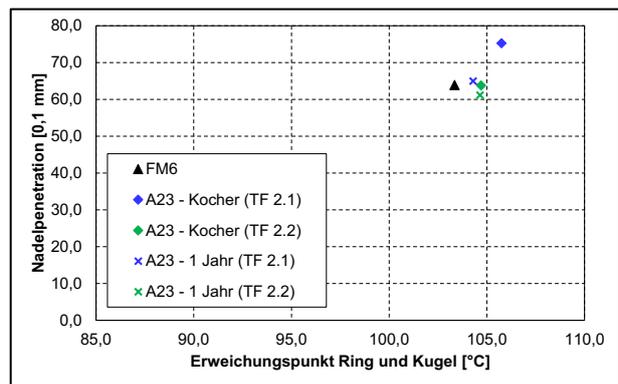


Bild 183: Darstellung der Nadelpenetration in Abhängigkeit vom EP RuK

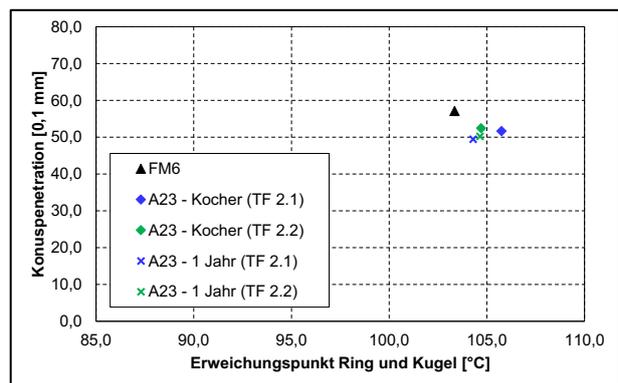


Bild 184: Darstellung der Konuspenetration in Abhängigkeit vom EP RuK

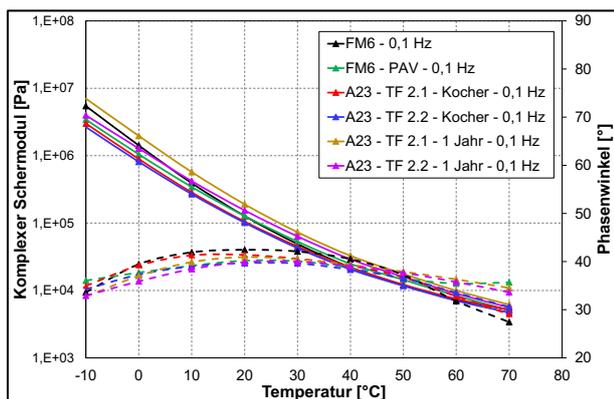


Bild 185: Rheologische Kenngrößen der A23 – 0,1 Hz

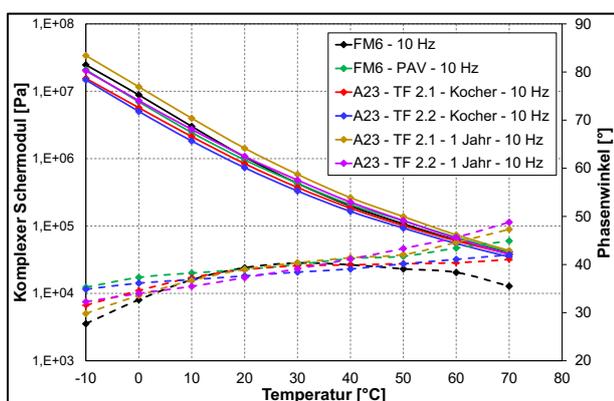


Bild 186: Rheologische Kenngrößen der A23 – 10 Hz

Nach einer Nutzungsdauer von rd. 12 Monaten erfolgte im Juli 2017 eine Probenahme unmittelbar aus dem Standstreifen. Im Vergleich zu den Untersuchungsergebnissen der Referenzproben (Probenvorbereitung im Labor und Probenahme aus dem Rührwerkskocher), wies die Fugenmasse nach rd. einem Jahr Nutzungsdauer einen leicht erhöhten komplexen Schermodul auf. Eine signifikante Veränderung des viskoelastischen Materialverhaltens, definiert durch eine Veränderung des Phasenwinkels, konnte nicht festgestellt werden. Auf Basis der rheologischen Kenndaten konnten keine Erkenntnisse über maßgebende Veränderungen des Systems detektiert werden, welche nach einem Jahr Nutzungsdauer auf ein frühzeitiges Versagen des Fugenfüllsystems aufgrund von Materialveränderungen der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 hindeuten.

6.6.2 Statische Zug-/Scherversuche

Zur Gegenüberstellung der im Labor hergestellten Systemprüfkörper im Referenz- und künstlich gealterten Zustand (REF, V1) wurden, analog zu den Untersuchungen der repräsentativen Streckenabschnitte A2, A40 und A48, im Juli 2017 Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm aus den Quertugen des Standstreifens der BAB A23 entnommen. Die Liegedauer der Fugenmasse zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme betrug 12 Mona-

te. Die aus der Erprobungsstrecke gewonnenen originären Systemprüfkörper wurden unter denselben Prüfbedingungen wie in Abschnitt 4.3.7 untersucht. Wie bereits in Tab. 34 dargestellt, wurden bei den Testfeldern 1.1 und 2.1 die Fugenflanken vor dem Verguss ausgebürstet. Die Fugenflanken der Testfelder 1.2 und 2.2 wurden vor dem Verguss zudem nachgeschnitten und anschließend ausgebürstet.

Untersuchungen bei -20 °C

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den statischen Zug-/Scherversuchen bei -20 °C der originären Systemprüfkörper der A23 mit jenen der Labor-Systemprüfkörper (REF und V1) zeigen für die modifizierte N2+-Fugenmasse FM6, dass bis zu einer Dehnung von etwa 35 % der Spannungsaufbau in den künstlich gealterten Proben V1 mit jenen aus der A23 in etwa vergleichbar war (Bild 187, Tab. 101). An den Proben aus der A23 wurde in den statischen Zug-/Scherversuchen mit zunehmender Dehnung (bis rd. 279 %) weiter Spannung (bis rd. 0,7 N/mm²) aufgebaut. Das Spannungsmaximum war bei den Ausbauproben gegenüber jenen der künstlichen Laboralterung V1 um rd. 74 % höher.

Da die Spannungsentwicklung der statischen Zug-/Scherversuche der A23 T2.1 und T2.2 nahezu ident waren, kann im vorliegenden Fall gefolgert werden, dass das zusätzliche Nachschneiden der Fugenflanken im Vergleich zum alleinigen Ausbürsten keinen signifikanten Einfluss auf das Adhäsionsverhalten zwischen Fugenmasse und Fugenflanke hatte.

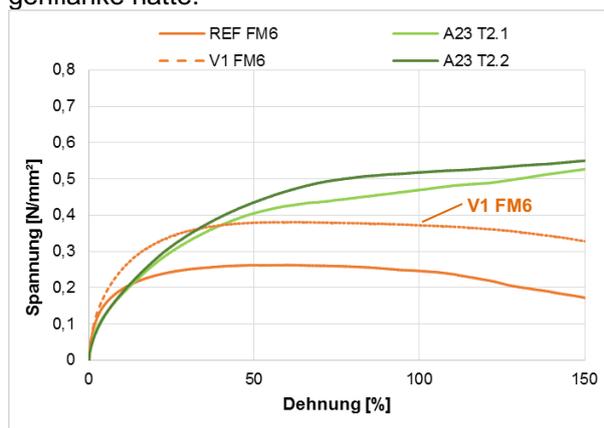


Bild 187: Spannungsentwicklung der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM6	0,26	60,0
V1 FM6	0,38	61,2
A23 T2.1	0,66	279,4
A23 T2.2	0,69	297,9

Tab. 101: Ergebnisse der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C

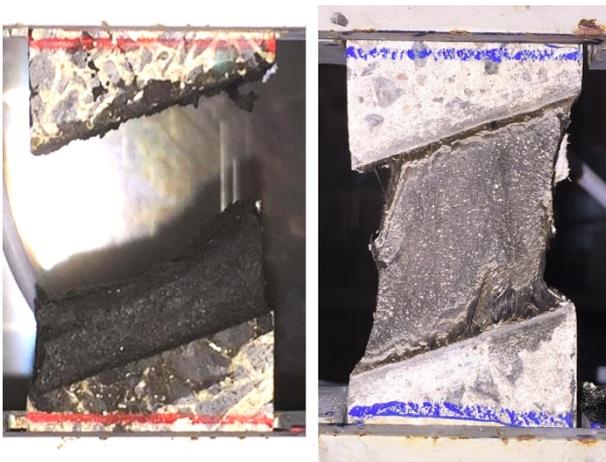


Bild 188: Zustandsbilder im statischen Zug-/Scherversuch an originären Systemprüfkörpern aus der A23 (rechts) im Vergleich zum jeweiligen Laborprüfkörper V1 (links); Prüftemperatur: -20 °C

Bild 188 (links) zeigt den Zustand des im Labor künstlichen gealterten Systemprüfkörpers nach einer Dehnung von 300 % im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C. Demnach versagten diese Systemprüfkörper offensichtlich adhäsiv. Die originären Systemprüfkörper aus der BAB A23 zeigten hingegen auch nach 300 % Dehnung einen weitgehend intakten Verbund zur Fugenflanke, was mit dem unterschiedlichen Verhalten von Labor- und Praxisproben bei größeren Dehnungen im statischen Zug-/Scherversuch einhergeht.

Wie aus Bild 189 ersichtlich ist, bauten sich die Spannungen in den Referenz- (REF) und A23-Proben der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM7 (Klasse 35) bis zu einer Dehnung von rd. 30 % nahezu identisch auf. Während sich die Proben A23 T1.2 und die REF-Proben in ihren Spannungs-Dehnungsentwicklungen darüber hinaus sehr ähnlich verhielten (Spannungsmaxima rd. 0,35 N/mm² bei Dehnungen von 120 bis 160 %), war bei den A23 T1.1-Proben das Spannungsmaximum von 0,20 N/mm² bereits bei einer Dehnung von nur rd. 44 % erreicht. Aus den Unterschieden zwischen den Proben T1.1 und T1.2 lässt sich möglicherweise ein positiver Effekt des zusätzlichen Nachschneidens der Fugenflanken auf das

Adhäsionsverhalten zwischen Fugenmasse und Fugenflanke ableiten. Dies bekräftigen auch die Versagensbilder nach dem statischen Zug-/Scherversuch, die ein adhäsives Versagen der A23 T1.1 bei 44% Dehnung (Bild 190, links) und ein kohäsives Versagen der A23 T1.2 bei 120% Dehnung (Bild 190, rechts) zeigen.

Weiterhin ist aus Bild 187 zu erkennen, dass sich die nach V1 künstlich gealterte Fugenmasse FM7 in der Systemprüfung signifikant anders verhält als die Referenzproben und die Proben aus der BAB A23. Dies bekräftigt die bereits in Abschnitt 4.5.2 beschriebene Annahme, dass die künstliche Alterung nach V1 respektive die darin enthaltene PAV-Konditionierung kein geeignetes Alterungsverfahren für kalt verarbeitbare Fugenmassen darstellt.

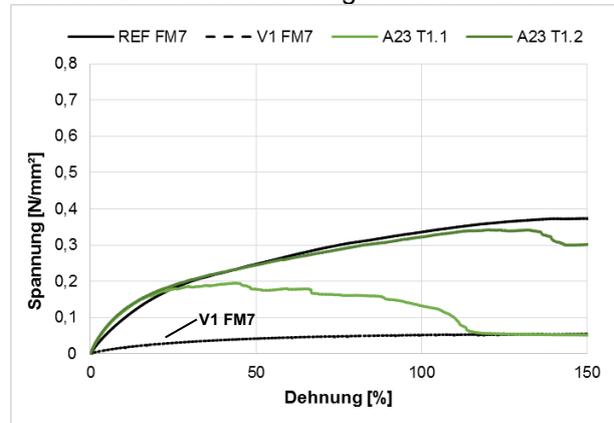


Bild 189: Spannungsentwicklung der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM7 (Klasse 35) im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C

Fugenmasse	σ_{max}	ϵ bei σ_{max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM7	0,37	158,4
V1 FM7	0,06	212,8
A23 T1.1	0,20	43,8
A23 T1.2	0,34	120,4

Tab. 102: Ergebnisse der originären Systemprüfkörper BAB A23 und den Laborprüfkörpern der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM7 (Klasse 35) im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C



Bild 190: Zustandsbilder im statischen Zug-/Scherversuch der originären Systemprüfkörper FM7 der A23 T1.1 (links) und A23 T1.2 (rechts) Prüftemperatur: -20 °C

Untersuchungen bei +20 °C

In den bei +20 °C durchgeführten statischen Zug-/Scherversuchen zeigte sich, dass sich die Spannungen in den Systemproben aus der A 23 (T2.1 und T2.2) mit der heiß verarbeitbaren modifizierten Fugenmasse FM6 (Typ N2+) vergleichbar mit den im Labor künstlich gealterten Proben (V1) derselben Fugenmasse entwickelten (Bild 191 und Tab. 102). Auch nach 300 % Dehnung zeigten weder die originären Systemprüfkörper der A23 noch die im Labor hergestellten Prüfkörper ein adhäsives oder kohäsives Versagen.

Die Systemprüfungen an den Proben mit der kaltverarbeitbaren Fugenmasse FM7 aus der BAB A23 (T1.1 und T1.2) zeigten bei +20 °C eine ähnliche Spannungsentwicklung wie bei -20 °C. Ebenfalls konnte ein frühzeitiges adhäsives Versagen bei A23 T1.1 nach einer Dehnung von etwa 35 % festgestellt werden. Bis zu dieser Dehnung entwickelten sich die Spannungen zwischen den beiden Ausführungsvarianten (T1.1 und T1.2) nahezu gleich (Bild 192, Tab. 104). Anschließend zeigte sich jedoch wiederum ein deutlicher Unterschied.

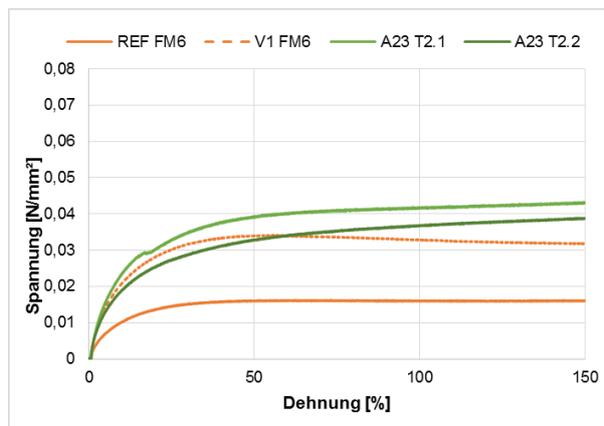


Bild 191: Spannungsentwicklung der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM6	0,02	297,4
V1 FM6	0,03	54,6
A23 T2.1	0,05	299,8
A23 T2.2	0,04	299,9

Tab. 103: Ergebnisse der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Die Probe aus der Fuge, die vor dem Ausbürsten nochmals nachgeschnitten wurde (T1.2), baute auch darüber hinaus bis zu einer Dehnung von 145 % weiter Spannungen auf. Gegenüber der nicht-gealterten Fugenmasse (REF) lagen die Spannungen dieser 1 Jahr alten Probe T1.2 um rd. 40 % niedriger. Bei der Probe aus der Fuge, die nur ausgebürstet wurde, fiel die Spannung ab einer Dehnung von 35 % sukzessive ab.

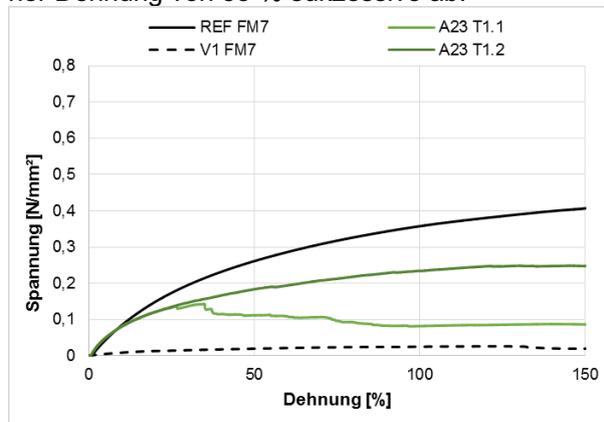


Bild 192: Spannungsentwicklung der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der kaltverarbeitbaren Fugenmasse FM7 (Klasse 35) im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM7	0,42	176,3
V1 FM7	0,03	124,2
A23 T1.1	0,14	34,6
A23 T1.2	0,25	145,2

Tab. 104: Ergebnisse der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM7 (Klasse 35) im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Untersuchung bei +60 °C

Zusätzlich wurden für die kalt verarbeitbare Fugenmasse FM7 statische Zug-/Scherversuche bei einer Prüftemperatur von +60 °C durchgeführt. Die dabei ermittelten Spannungs-Dehnungsbeziehungen sind in Bild 193 und Tab. 105 dokumentiert. Sie zeigen wiederum ein vergleichsweise frühes Versagen der A23 T1.1-Systemprüfkörper, bei denen die Fuge vor dem Einbau der Fugenmasse nur ausgebürstet worden war. Die originären Systemprüfkörper aus der BAB A23 zeigten wie die Referenzprobe (REF) in der Tendenz bei allen drei untersuchten Temperaturen (-20, +20 und +60 °C) ein vergleichbares Materialverhalten, wenn auch auf unterschiedlichem Spannungsniveau. Die Spannungen entwickelten sich bei allen Prüftemperaturen analog, wenngleich die Proben mit steigender Prüftemperatur bei immer geringer werdenden Dehnungen versagten.

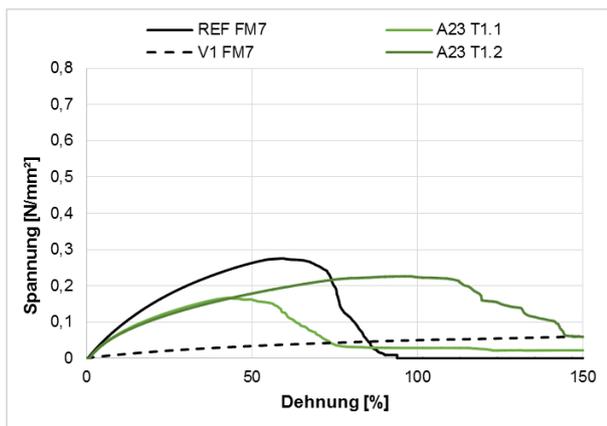


Bild 193: Spannungsentwicklung der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM7 (Klasse 35) im statischen Zug-/Scherversuch bei +60 °C

Fugenmasse	σ_{\max}	ϵ bei σ_{\max}
[-]	[N/mm ²]	[%]
REF FM7	0,28	59,5
V1 FM7	0,07	256,3
A23 T1.1	0,17	43,2
A23 T1.2	0,23	96,3

Tab. 105: Ergebnisse der originären Systemprüfkörper der A23 im Vergleich zu den Laborprüfkörpern der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM7 (Klasse 35) im statischen Zug-/Scherversuch bei +60 °C

6.7 Zusammenfassung und Bewertung der Erprobungsstrecke BAB A23

Die Erprobungsstrecke BAB A23 wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts, beginnend mit der Instandsetzung der Fugen und anschließend während der nächsten 21 Monate durch mehrfache in-situ-Untersuchungen intensiv wissenschaftlich begleitet. Während dieser Beobachtungszeit zeigten sich – erwartungsgemäß – bei beiden Fugenmassen FM6 und FM7 keine Schäden respektive alterungs- und nutzungsbedingte Veränderungen. Dementsprechend wurde auch in den begleitenden Laboruntersuchungen an Systemproben aus der Strecke mit beiden Fugenmassen kein nachteiliges Verhalten festgestellt. Vielmehr zeigte beispielsweise die Fugenmasse FM6 in der Probe aus der Strecke selbst bei -20°C ein größeres Dehnvermögen als in der im Labor hergestellten Referenzprobe. Bei der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM7 war insbesondere ein Einfluss des zusätzlichen Nachschneides und Ausbürstens der Fugenflanken bei der Instandsetzung im Testfeld 1.2 auf das Adhäsionsverhalten zwischen Fugenmasse und Fugenflanke festzustellen.

7 Definition eines quantitativen Bewertungsansatzes für modifizierte Systemprüfungen

7.1 Möglichkeiten zur quantitativen Bewertung

Um das Verhalten von unterschiedlichen Fugenmassen einschl. dem Alterungspotenzial entsprechend differenziert bewerten zu können, wird nachfolgend in einem ersten Ansatz ein Bewertungskonzept auf Basis der bislang vorliegenden Untersuchungen an Systemprüfkörpern dargelegt. Dies gilt es, im Laufe der Zeit durch weitere Studien entsprechend zu verifizieren oder – bei Bedarf – entsprechend zu modifizieren.

Wie bereits in den vorstehenden Abschnitten verdeutlicht, ist das Alterungsverhalten von Fugenfüllsystemen ein vielschichtiger Prozess, welcher durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst wird bzw. beeinflusst werden kann. Durch die Festlegung der Randbedingungen für eine künstliche Alterung im Labor ist es gelungen, ein Alterungsverfahren für Fugenmassen – mit dem Fokus auf heiß verarbeitbare Fugenmassen – zu generieren. Durch die Interpretation der Spannungs-Dehnungs-Diagramme (z.B. Bild 153) war es möglich das Materialverhalten und die resultierenden Erkenntnisse zielgerichtet zu beurteilen und anhand der rheologischen Kennwerte zu bestätigen.

Für eine quantitative Beurteilung des Materialverhaltens ist hingegen ein nachvollziehbarer, mathematischer Kennwert zur Charakterisierung der Fugenmassen anzustreben, welcher keine tiefergehende Interpretation des Kurvenverlaufs zwingend erfordert.

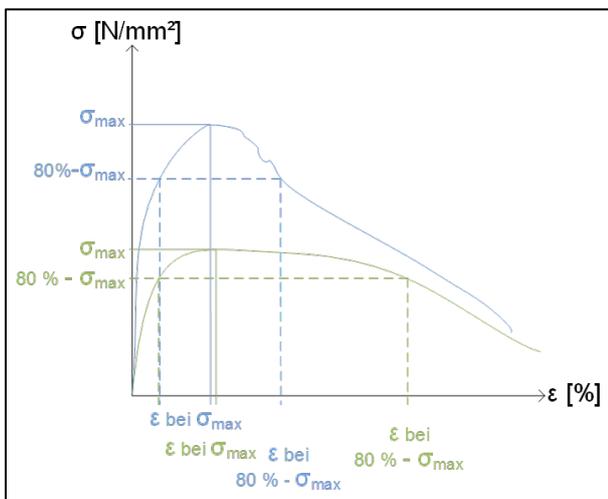


Bild 194: Quantitativer Bewertungsansatz zur Beurteilung des Alterungsverhaltens von Fugenmassen

Zur Beurteilung des Alterungsverhaltens von Fugenfüllsystemen waren hierbei unterschiedliche Bewertungsparameter möglich:

- Maximalspannung (σ_{MAX})
- Dehnung zum Zeitpunkt der Maximalspannung (ϵ bei σ_{MAX})
- Dehnung zum Zeitpunkt von X % der Maximalspannung im abfallenden Spannungsast (ϵ bei X %- σ_{MAX})

Die Maximalspannung kann durchaus als erster Indikator zur Beurteilung der Materialveränderung herangezogen werden, jedoch ist eine vollständige Beurteilung allein auf Basis dieses einen Kennwerts nicht ausreichend. So besteht die Möglichkeit, dass eine Fugenmasse trotz hoher Spannungen im Laborversuch in situ eine gute Materialperformance aufweist.

Maßgebend für die Funktionsfähigkeit des Fugenfüllsystems in situ ist eine adäquate Spannungs-Dehnungs-Charakteristik. Bei tiefen Gebrauchstemperaturen ist die Steifigkeit von heiß verarbeitbaren Fugenmassen deutlich höher. Folglich ist eine hinreichende Funktionsfähigkeit bei tiefen Temperaturen von noch ausreichend viskosen Dehnungsanteilen abhängig. Basierend auf der Querschnittsreduzierung während eines Zug- bzw. Zug-/Scherversuchs ist eine gewisse Spannungsreduzierung durch die Querschnittsreduzierung zu erklären. Dementsprechend besteht die Möglichkeit, dass trotz reduzierter (absoluter) Spannung das Fugenfüllsystem weiterhin vollständig intakt ist. Um diesen Aspekt hinreichend zu berücksichtigen, wurde ein Bewertungsansatz definiert, welcher als Bezugsgröße die Dehnung zum Zeitpunkt von 80 % der Maximalspannung im abfallenden Ast des Spannungs-Dehnungs-Diagramms heranzieht (Bild 192).

Dieser Auswertungsansatz liefert zum einen die Möglichkeit zwei quantitative Kenngrößen (ϵ bei 80 %- σ_{max} im Referenzzustand und nach der künstlichen Alterung im Labor) zu vergleichen und eine Aussage über die Alterungssensibilität des Fugenfüllsystems bzw. der Fugenmasse z.B. durch die Bildung eines Verhältniswertes zu treffen. Zum anderen können auf Grundlage der in situ gealterten (originären) Systemprüfkörper mögliche Mindest-Dehngrenzwerte festgelegt werden.

Weitergehende Ansätze zur quantitativen Bewertung der Leistungsfähigkeit der Fugenmassen, wie z.B. anhand der Dehnung zum Zeitpunkt einer definierten Veränderung der Steigung im abfallenden Ast des Spannungs-Dehnungs-Diagramms, führten zu vergleichbaren Erkenntnissen. Tendenziell überwogen die Restriktionen der weiterführenden Bewertungsansätze gegenüber dem Mehrwert eines komplexeren Bewertungsansatz-

zes, daher wurden diese Ansätze hier nicht weiter dargestellt.

7.2 Entwicklung eines Bewertungskonzeptes

Für eine quantitative Bewertung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen der Typen N2 und N2+ anhand der modifizierten Systemprüfungen sind Kenn- und Grenzwerte für die Spannungen bzw. Dehnungen erforderlich, die eine Einordnung in Kategorien ermöglichen. Wie bereits in Abschnitt 7.1 beschrieben, wurde als maßgebender Kennwert zur Bewertung von heiß verarbeitbaren Fugenmassen die erreichte Dehnung bei 80 % des Spannungsmaximums im abfallenden Ast festgelegt. Für die getrennte Bewertung der Fugenmassen im nicht-gealterten Referenzzustand und im künstlich gealterten Zustand wurden nachfolgend zwei Kriterien definiert.

- Kriterium 1:
ε bei 80 %-σ_{max} nach künstl. Alterung (ε_{80,KA})
- Kriterium 2:
ε bei 80 %-σ_{max} im Referenzzustand (ε_{80,Ref})

Die Einordnung des jeweiligen Dehnungskennwertes erfolgt in folgende Kategorien:

- Kategorie A (gut)
- Kategorie B (ausreichend)
- Kategorie C (mangelhaft)

Grenzwerte für die einzelnen Kategorien werden sinnvollerweise anhand statischer Zug-/Scherversuche bei -20 °C festgelegt (vgl. Bild 195), da heiß verarbeitbare Fugenmassen bei niedrigen Gebrauchstemperaturen (-20 °C) deutlich erhöhte Steifigkeiten und nach künstlicher Alterung erheblich reduzierte viskose Dehnungsanteile aufweisen.

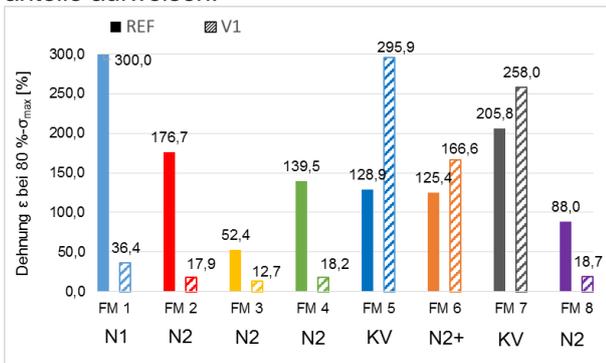


Bild 195: Dehnung bei 80 % des Spannungsmaximums im abfallenden Ast des statischen Zug-/Scherversuchs bei -20 °C im Referenzzustand (REF) und nach künstlicher Alterung (V1)

Zur Festlegung von wissenschaftlich fundierten Grenzwerten wurden weiterhin die Ergebnisse der originären Systemprüfungen an der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM2 aus den repräsentativen Streckenabschnitten der BAB A48 (nach einer Nutzungsdauer von 1,5 Jahren) und BAB A2 (nach einer Nutzungsdauer von 3 Jahre) herangezogen. Wie aus Bild 196 zu entnehmen ist, konnte mit zunehmendem Alter der Fugenmassen eine stetige Abnahme der charakteristischen Dehnung (bei 80 % des Spannungsmaximums im abfallenden Ast) festgestellt werden. Unter Annahme eines exponentiellen Verlaufs der Alterung von heiß verarbeitbaren Fugenmassen konnte für die künstliche Laboralterung (V1) ein simulierter Nutzungszeitraum von etwa 6 Jahren mit einem Bestimmtheitsmaß R = 0,9976 ermittelt werden (vgl. Bild 197). Dies zeigt zum einen, dass die modifizierte Systemprüfung des statischen Zug-/Scherversuchs auch an originären Systemprüfkörpern plausible Ergebnisse liefert, zum andern, dass die hier vorgenommene künstliche Alterung (V1), unter Annahme eines exponentiellen Alterungsverlaufs, eine gute Korrelation zu der in situ-Alterung in den beiden BAB-Streckenabschnitten aufweist.

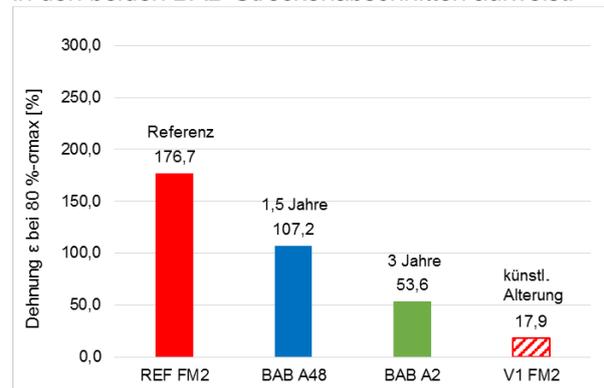


Bild 196: Auswertung der Dehnung bei 80 % des Spannungsmaximums im abfallenden Ast des statischen Zug-/Scherversuchs bei -20 °C im Referenzzustand (REF), BAB A48, BAB A2 und nach künstlicher Alterung (V1)

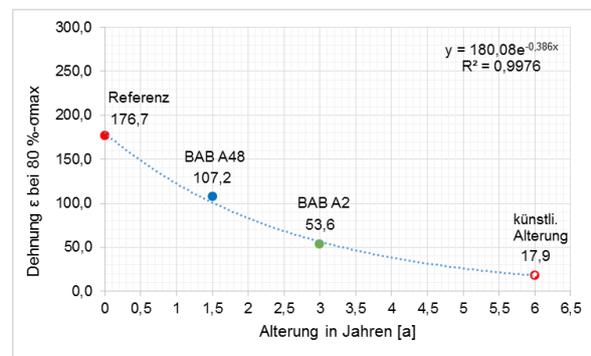


Bild 197: Ermittlung der simulierten Nutzungsdauer durch die künstliche Laboralterung unter Annahme eines exponentiellen Alterungsverlaufs der heiß verarbeitbaren Fugenmasse des Typs N2 im statischen Zug-/Scherversuch bei -20 °C

Die Grenzwerte für die mindestens zu erreichende Dehnung je Kategorie (A, B, C) wurden für das Kriterium 1 aus Bild 197 abgeleitet (vgl. Tab. 106). Die erreichte Dehnung der originären Systemprüfkörper der BAB A2 wiesen nach einer Nutzungsdauer von 3 Jahren rd. 53,6 % auf. Bei Entnahme der Bohrkern wurden an diesen Fugen keine signifikanten Undichtigkeiten oder Schäden festgestellt, so dass von einem intakten Fugensystem ausgegangen werden kann (Kategorie A: $\epsilon_{80,KA} > 50$ %). Eine weitere Reduzierung des Dehnvermögens ($25 \% \leq \epsilon_{80,KA} \leq 50$ %) infolge der künstlichen Alterung wurde hingegen nur noch mit der Kategorie B bewertet. Als Kategorie C wurden Fugenmassen eingestuft, die nach der künstlichen Alterung lediglich eine Dehnung $\epsilon_{80,KA} < 25$ % erreichten, was einer äquivalenten / simulierten Alterung von etwa 5 Jahren entspricht.

Kriterium 1	Grenzwerte $\epsilon_{80,KA}$ [%] für -20 °C
Kategorie A	$\epsilon_{80,KA} > 50$
Kategorie B	$25 \leq \epsilon_{80,KA} \leq 50$
Kategorie C	$\epsilon_{80,KA} < 25$ %

Tab. 106: Grenzwerte der mindestens zu erreichenden Dehnung für Kriterium 1 bei -20 °C

Kriterium 2	Grenzwerte $\epsilon_{80,Ref}$ [%] für -20 °C
Kategorie A	$\epsilon_{80,Ref} > 100$
Kategorie B	$50 \leq \epsilon_{80,Ref} \leq 100$
Kategorie C	$\epsilon_{80,Ref} < 50$

Tab. 107: Grenzwerte der mindestens zu erreichenden Dehnung für Kriterium 2 bei -20 °C

Die Grenzwerte für das Kriterium 2 an den nichtgealterten Referenzproben wurden dahingehend festgelegt, dass die zu erreichende charakteristische Dehnung (bei 80 % des Spannungsmaximums im abfallenden Ast) für jede Kategorie stets doppelt so groß sein muss, wie die an den korrespondierenden künstlich gealterten Proben (vgl. Tab. 107).

Die hier beschriebene Einstufung kann sowohl für statische Zug-Scherversuche (ZSV) als auch für zyklische Druck-Zug-Scherversuche (DZSV) herangezogen werden. Zur Unterscheidung werden die Indizes st (für statische ZSV) bzw. zy (für DZSV) eingeführt.

7.3 Bewertung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2

Entsprechend den vorgestellten Bewertungskriterien und Einstufungen in Kategorien wurden die

Untersuchungsergebnisse der heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2 und N2+ für eine Prüftemperatur von -20 °C ausgewertet. Demnach konnten hinsichtlich Kriterium 1 alle Fugenmassen des Typs N2 mit Ausnahme der modifizierten Fugenmasse FM6 (Typ N2+) im statischen Zug-Scherversuch lediglich in die Kategorie C eingestuft werden (Tab. 108). Im Referenzzustand (Kriterium 2) hingegen erreichten bei den statischen Zug-/Scherversuchen bis auf FM3 und FM8 (je Kategorie B) alle weiteren Fugenmassen Kategorie A.

Fugenmassen (Typ N2)	Kriterium 1 Kategorie	Kriterium 2 Kategorie
FM2	C _{st}	A _{st}
FM3	C _{st}	B _{st}
FM4	C _{st}	A _{st}
FM6 (TypN2+)	A _{st}	A _{st}
FM8	C _{st}	B _{st}

Tab. 108: Ergebnisse der Bewertung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen (Typs N2) anhand des statischen Zug-/Scherversuchs bei -20 °C

Erfolgt die Bewertung der Untersuchungsergebnisse unter Einbeziehung der zusätzlichen zyklischen Beanspruchung im Druck-/Zug-/Scherversuch bei -20 °C (auf Grundlage derselben Grenzwerte), so ist festzustellen, dass hinsichtlich Kriterium 1 alle Fugenmassen den gleichen Kategorien wie im statischen Zug-/Scherversuch zugeordnet wurden (Tab. 109). Dies begründet sich darin, dass bereits alle Fugenmassen des Typs N2 ohne zusätzliche zyklische Beanspruchung der schwächsten Kategorie zuzuordnen waren. Die modifizierte Fugenmasse FM6 (Typ N2+) hingegen konnte auch infolge der zyklischen Beanspruchung der Kategorie A zugeordnet werden. Hinsichtlich Kriterium 2 (nicht gealterter Referenzzustand) konnten die Fugenmassen FM3 und FM4 jeweils eine Kategorie höher eingestuft werden.

Fugenmassen (Typ N2)	Kriterium 1 Kategorie	Kriterium 2 Kategorie
FM2	C _{zy}	A _{zy}
FM3	C _{zy}	C _{zy}
FM4	C _{zy}	B _{zy}
FM6 (TypN2+)	A _{zy}	A _{zy}
FM8	C _{zy}	B _{zy}

Tab. 109: Ergebnisse der Bewertung der heiß verarbeitbaren Fugenmassen (Typs N2) anhand des zyklischen Druck-/Zug-/Scherversuchs bei -20 °C

Wie bereits aus den in Abschnitt 4.5 dargelegten Untersuchungsergebnissen zu entnehmen ist,

zeigte sich zwischen der Fugenmasse FM6 des Typs N2+ und den übrigen Typ N2-Fugenmassen ein deutlich unterschiedliches Verhalten, was sich auch in der hier vorgenommenen Bewertung widerspiegelt. Dies lässt darauf schließen, dass die modifizierten heiß verarbeitbaren Fugenmassen der aktuellen Generation sowohl infolge einer in situ-Alterung als auch durch eine künstliche Alterung ein stabileres Material- und Systemverhalten aufweisen als die früheren N2-Fugenmassen.

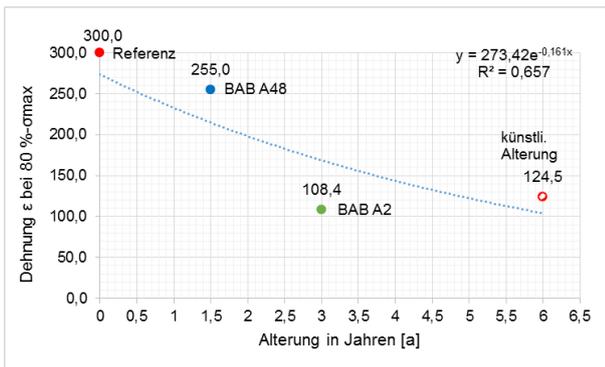


Bild 198: Ermittlung der simulierten Nutzungsdauer durch die künstliche Laboralterung unter Annahme eines exponentiellen Alterungsverlaufs der heiß verarbeitbaren Fugenmasse des Typs N2 im statischen Zug-/Scherversuch bei +20 °C

Eine vergleichbare Bewertung der Fugenmassen bei der Prüfung bei +20 °C ist theoretisch zwar ebenfalls möglich, wurde hier jedoch nicht weiter verfolgt. Bei der Gegenüberstellung der Prüfergebnisse aus Labor- und originären Systemprüfkörpern konnte eine Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von lediglich $R = 0,657$ nachgewiesen werden (vgl. Bild 198). Des Weiteren zeigten die Untersuchungsergebnisse bei +20 °C, dass eine Differenzierung der Fugenmassen infolge des hohen Dehnvermögens in diesem Temperaturbereich nur bedingt möglich war (vgl. Bild 111). Bei noch höherer Prüftemperatur (+60 °C) deformierten sich die Systemprüfkörper bereits beim Einbau in den Mehrfachprüfstand sehr stark bzw. lösten sich die Fugenmassen von den Fugenflanken, sodass auch hier eine weitere Betrachtung verworfen wurde.

7.4 Alterungsstabilität der Fugenmassen

Um die Alterungsstabilität einer Fugenmasse bewerten zu können, liegt auf der Hand, das Verhältnis der charakteristischen Bewertungsgrößen (jeweilige Dehnung bei 80 % der Maximalspannung im abfallenden Ast) zwischen nicht gealterten (REF) und künstlich gealterten Systemproben (V1) heranzuziehen. Dieser Kennwert wird nachfolgend als Alterungsindex AI bezeichnet.

Ein Alterungsindex $AI > 1$ weist mit steigendem Zahlenwert auf eine zunehmende Alterungsempfindlichkeit hin. Ein Alterungsindex $AI < 1$ bezeugt hingegen eine gewisse Robustheit gegenüber einer Alterung der Fugenmasse.

Alterungsindex AI AI = REF / V1 [-]				
	ZSV		DZSV	
	+20 °C	-20 °C	+20 °C	-20 °C
FM1 Typ N1	3,6	8,3	1,3	33,3
FM2 (Typ N2)	1,5	10,0	2,4	1,8
FM3 (Typ N2)	1,0	4,2	0,9	1,2
FM4(Typ N2)	2,1	7,7	1,4	7,1
FM6 (Typ N2+)	1,0	0,8	1,0	0,3
FM8 (Typ N2)	2,3	4,8	1,3	3,1

Tab. 110: Alterungsindex AI des Zug-/Scherversuchs (ZSV) und Druck-/Zug-/Scherversuchs (DZSV)

Es ist ersichtlich, dass der Alterungsindex AI, ermittelt aus den Ergebnissen der Prüfung bei -20 °C und somit erhöhter mechanischer Beanspruchung, tendenziell höher ist als bei einer Prüftemperatur von +20 °C. Die modifizierte Fugenmasse FM6 des Typs N2+ wies über alle Beanspruchungen hinweg den konstantesten und niedrigsten Alterungsindex auf, was sich mit der in Abschnitt 7.2 vorgenommenen Bewertung deckt.

Vergleicht man die Alterungsindizes der N1-Fugenmasse FM1 mit den zugehörigen Werten aller N2-Fugenmassen, so weist Erstere in den meisten Fällen den ungünstigsten Alterungsindex auf. Innerhalb der N2-Fugenmassen (ohne N2+) verhält sich die Fugenmasse FM3 tendenziell etwas günstiger als die andern Fugenmassen dieses Typs.

7.5 Zusammenfassung der Bewertung

Der vorgestellte quantitative Bewertungsansatz für die modifizierten Systemprüfungen ermöglicht mit den charakteristischen Kennwerten der Dehnung bei 80 % der Maximalspannung im abfallenden Ast ($\epsilon_{80,kA}$, $\epsilon_{80,Ref}$) einschl. den aus in-situ Vergleichen wissenschaftlich abgeleiteten Grenzwerten gemeinsam mit dem Alterungsindex AI eine ganzheitliche Bewertung der Fugenmasse sowohl im nicht gealterten Referenzzustand als auch im künstlich gealterten Zustand. In Bezug auf die Dauerhaftigkeit von eingebauten Fugenmassen haben sowohl die in diversen Laboruntersuchungen ermittelten Spannungsentwicklungen als auch der daraus entwickelte Bewertungsansatz für die heiß verarbeitbaren Fugenmassen gezeigt, dass deren Alterungsverhalten das Gesamtsystem „Fuge“

maßgeblich beeinflusst und dieser Parameter daher zwingend zu berücksichtigen ist.

Jedoch ist auch festzuhalten, dass der hier vorgestellte Bewertungsansatz auf der Anbindung an lediglich zwei in-situ Streckenabschnitten (Nutzungsdauer 1,5 und 3 Jahre) mit einer Fugenmasse basiert. Für eine allgemein gültige Festlegung von Grenzwerten und des Bewertungskonzepts insgesamt sind daher weitere Studien nahezu unabdingbar. Dabei ist zu empfehlen, dass zum einen originäre Systemprüfkörper mit der bislang zu Grund gelegten Fugenmasse FM2 und einer Nutzungsdauer > 3 Jahre untersucht werden, um so die Annahme eines exponentiellen Alterungsverlaufs von heiß verarbeitbaren Fugenmassen zu validieren (vgl. Bild 197). Zum anderen sollten analoge Systemprüfungen an Ausbauproben und Laborproben an weiteren heiß verarbeitbaren Fugenmassen erfolgen. Für kalt verarbeitbare Fugenmassen ist zunächst das Verfahren zur künstlichen Alterung von diesen unter Wegfall der PAV-Alterung zu modifizieren, bevor auch für diese Fugenmassen – nach Vergleichsversuchen mit Systemproben aus in-situ-Strecken – ein entsprechender Bewertungsansatz generiert werden kann.

Auf die in den letzten Jahren an heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2 festgestellten Mängel hin wurden diese Fugenmassen von den einschlägigen Herstellern weiterentwickelt. Dies führte in den Systemuntersuchungen an der Fugenmasse FM6 des Typs N2+ sowohl hinsichtlich des Dehnvermögens als auch im Alterungsverhalten bereits zu erheblich verbesserten Bewertungsergebnissen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Fugenfüllsysteme für Betonstraßen sind während der Nutzungsdauer einer Vielzahl von Beanspruchungen ausgesetzt, welche erhöhte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Gesamtsystems „Fuge“ stellen. Dazu zählen neben den jahreszeitlich schwankenden klimatischen Einflüssen auch zyklische Beanspruchungen aus Verkehrsbelastung sowie die Alterung der Fugenmassen. Die in den letzten Jahren sowohl an Bestands- als auch an Neubaustrecken vermehrt aufgetretenen Schäden an Fugenabdichtungen ließen Handlungsbedarf in Bezug auf die Ursachenfindung sowie die Hinterfragung der aktuellen Regelwerke erkennen. Vor diesem Hintergrund wurde in diesem Forschungsprojekt ein praxisorientiertes Prüfverfahren mit Systemprüfkörpern entwickelt, welches zum einen das Gesamtsystem „Fuge“ bestehend aus Betonfugenflanke, Voranstrichmittel (Primer) sowie der Fugenmasse umfasst und andererseits die maßgebenden in-situ-Beanspruchungsszenarien auf das Gesamtsystem abbildet.

In der ersten Stufe des Forschungsvorhabens erfolgte eine Parameterstudie, die neben einer umfassenden Literaturrecherche und Erhebung von repräsentativen Streckenabschnitten bereits die Ermittlung von rheologischen Kenndaten sowie weiteren physikalischen Stoffeigenschaften von insgesamt sechs heiß und zwei kalt verarbeitbaren Fugenmassen beinhaltet. Weiterhin wurden gezielte Laboruntersuchungen zum Alterungsverhalten sowie möglicher Schadensmechanismen am gesamten Fugensystem durchgeführt. An drei repräsentativen Streckenabschnitten wurden neben einer Zustandserfassung zudem jeweils Bohrkerne und Ausbauproben für Laboruntersuchungen entnommen.

In der darauffolgenden zweiten Stufe erfolgte die Verknüpfung der zuvor in Parameterstudien erzielten Ergebnisse, um ein kombiniertes Prüfverfahren entwickeln zu können. An Systemprüfkörpern, die sowohl im Labor hergestellt als auch aus Bohrkerne aus Betonfahrbahndecken gewonnen werden können, wurden in erster Linie statische Zug-/Scherversuche und zyklische Druck-/Zug-/Scherversuche durchgeführt. Als aussagekräftigste Prüftemperatur erwies sich -20 °C , da infolge des thermoplastischen Materialverhaltens der heiß verarbeitbaren Fugenmassen die Steifigkeit und somit auch die Beanspruchung mit sinkender Temperatur zunehmen. Zur künstlichen Alterung der Systemprüfkörper wurde ein Alterungsszenario entwickelt, das die maßgebenden Beanspruchungen möglichst realitätsnah abbildet. Der Vergleich

der Untersuchungsergebnisse im Referenz- und im künstlich gealterten Zustand ergab, dass infolge der künstlichen Alterung die heiß verarbeitbaren Fugenmassen, mit Ausnahme der modifizierten Fugenmasse FM6 vom Typ N2+, nach der Alterung erheblich höhere Maximalspannungen und ein deutlich reduziertes Dehnvermögen aufwiesen. Dieses Verhalten konnte zudem für die Fugenmassen FM1 bis FM4 nach beschleunigter Alterung unter Druck- und Temperaturbeanspruchung (PAV-Konditionierung) durch entsprechende Veränderungen der im dynamischen Scherrheometer ermittelten Phasenwinkel und komplexen Schermoduln belegt werden. Das Alterungsverhalten war demnach u.a. massiv durch die Veränderung der Polymerstrukturen geprägt. Zusätzliche zyklische Beanspruchungen führten bei Fugenmasse FM1 vom Typ N1 nach der künstlichen Alterung beim Druck-/Zug-/Scherversuch zwar zu keiner Erhöhung der Maximalspannung, jedoch zu einer weiteren Reduzierung des Dehnvermögens. Bei den heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2 führte eine zyklische Beanspruchung tendenziell zu einer mehr oder weniger ausgeprägten Erhöhung der Maximalspannung bei gleichzeitig reduziertem Dehnvermögen. Hingegen wurde die modifizierte heiß verarbeitbare Fugenmasse FM6 (Typ N2+) durch die zyklische Beanspruchung am wenigsten beeinflusst.

Für die kalt verarbeitbaren Fugenmassen FM5 und FM7 erwies sich die künstliche Alterung respektive die darin enthaltene Druck- und Temperaturbeanspruchung (PAV-Konditionierung), die primär für bitumenhaltige Bindemittel ausgelegt ist, als nicht zweckmäßiges Verfahren. Dies äußerte sich durch erheblich niedrigere Spannungen in den modifizierten Systemprüfungen als in den nicht gealterten Referenzproben. Als Ursache wird die Aufspaltung der chemisch vernetzten Polymere in kürzere Polymere oder Monomere bei kalt verarbeitbaren Fugenmassen vermutet. Daher ist für diese Art der Fugenmassen das Verfahren zur künstlichen Alterung noch entsprechend anzupassen (Wegfall der PAV-Konditionierung).

Zur ersten Validierung der entwickelten Laborprüfverfahren wurden in einer dritten Stufe des Forschungsvorhabens vier verschiedene Testfelder auf der BAB A23 einbezogen. Diese vier Varianten unterschieden sich zum einen in der Art der Vorbehandlung der Fugenflanken – Ausbürsten der Fugen bzw. Nachschneiden und Ausbürsten der Fugenflanken – und zum anderen in den verwendeten Fugenmassen (eine heiß verarbeitbare Fugenmasse (FM6) und eine kalt verarbeitbare Fugenmasse (FM7)). Neben der Begleitung der Instandsetzung wurde in jedem Testfeld ein Validie-

rungsabschnitt mit einer Länge von jeweils 300 m bzw. 500 m intensiv über rd. 21 Monate beobachtet. In diesen Validierungsabschnitten wurden an jeweils 10 Fugen Messmarken zur Dokumentation der Änderung der Fugenspaltbreiten sowie in jedes Testfeld ein Thermoelement installiert. Zwischen den jeweils gemessenen Oberflächentemperaturen und den zugehörigen Spaltbreiten der Querscheinfugen konnte grundsätzlich eine gute lineare Abhängigkeit festgestellt werden. Die Dichtheit der Fugenfüllsysteme wurde mit einer Vakuum-Saugglocke über semi-quantitative Kriterien bewertet. Dabei konnten innerhalb des Betrachtungszeitraums von rd. 21 Monaten keine Veränderungen der Dichtheit festgestellt werden. Ebenso zeigten sich zwischen Sommer und Winter in den Höhenlagen der Abdichtungen im Querfugenbereich nur minimale Veränderungen. Grundsätzlich sollten Begutachtungen der Fugenfüllsysteme möglichst bei trockenerer Witterung durchgeführt werden. Dadurch können etwaige Fehleinschätzungen bei der visuellen Zustandserfassungen oder auch messtechnische Schwierigkeiten (z.B. bei der Abdichtung der Vakuumsaugglocke) weitestgehend vermieden werden.

Die nach 12 Monaten Nutzungsdauer entnommenen Ausbauproben zeigten bei der heiß verarbeitbaren Fugenmasse FM6 (Typ N2+) lediglich einen leicht erhöhten komplexen Schermodul. Eine signifikante Veränderung des viskoelastischen Materialverhaltens, definiert durch eine Veränderung des Phasenwinkels, konnte nicht festgestellt werden. Dies konnte auch in den Systemprüfungen an originären Proben aus der Strecke bestätigt werden, da diese bei -20 °C sogar ein größeres Dehnmögen als die nicht gealterten Referenzproben aufwiesen. Bei den ausgebauten Systemproben mit der kalt verarbeitbaren Fugenmasse FM7 konnte nebenbei ein positiver Einfluss des zusätzlichen Nachschneides der Fugenflanken (und anschließendem Ausbürsten) bei der Instandsetzung auf das Adhäsionsverhalten zwischen Fugenmasse und Fugenflanke festgestellt werden. Da für die Erprobungsstrecke der BAB A23 durch die in dieses Forschungsprojekt integrierte Zustandserfassung bereits umfassende Daten vorliegen, wäre es zweckmäßig, den Zustand und die Eigenschaften der auf dieser Strecke eingebauten Fugenfüllsysteme weiterhin zu verfolgen.

Unter Einbeziehung der Systemprüfungen an Labor- und in-situ-Proben wurde ein erster Bewertungsansatz entwickelt, mit dem anhand wissenschaftlich orientierter Kenn- und Grenzwerte Fugenmassen im nicht gealterten Referenzzustand ebenso wie im künstlich gealterten Zustand bewertet werden können.

In Abschnitt 7.5 wurde bereits empfohlen, weitere modifizierte Systemprüfungen an originären Systemprüfkörpern aus Bestandsstrecken mit einer bisherigen Nutzungsdauer deutlich über 3 Jahre vorzunehmen, um die dem jetzigen Ansatz zu Grunde gelegten Grenzwerte validieren oder ggf. auch modifizieren zu können. Zudem sollten die modifizierten Fugenmassen vom Typ N2+, welche sich durch FM6 bereits signifikant durch ein stabileres Alterungsverhalten von den untersuchten Typ N2 Fugenmassen differenzierte, zukünftig mit erhöhter Aufmerksamkeit berücksichtigt werden.

Ein auf Basis der bisherigen Erkenntnisse fundierter und quantifizierender Vorschlag für eine modifizierte Systemprüfung ist in Tab. 111 zusammengefasst. Die zugehörigen Anforderungswerte für heiß verarbeitbaren Fugenmassen des Typs N2 sind in Tab. 106 für statische Zug-/Scherversuche (ZSV) und in Tab. 107 für zyklische Druck-/Zug-/Scherversuche (DZSV) angeführt. Hierzu wird empfohlen, dass eine heiß verarbeitbare Fugenmasse des Typs N2 aus einem neuen Gebinde bei keiner Prüfung die Kategorie C aufweisen darf.

	Heiß verarbeitbare Fugenmassen	Kalt verarbeitbare Fugenmassen
Künstliche Alterung (V1)		
Randbedingungen und Reihenfolge	- Temperatur (65 h; 85 °C; 2,1 MPa) - UV- Bestrahlung (11 Tage) - Frost-Tauwechsel (14 Tage)	- UV- Bestrahlung (11 Tage) - Frost-Tauwechsel (14 Tage)
Empfohlene Prüfungen		
Referenzzustand (REF)	- ZSV bei -20 °C - DZSV bei -20 °C	- ZSV bei -20 °C - DZSV bei -20 °C
Gealterter Zustand (V1)	- ZSV bei -20 °C - DZSV bei -20 °C	- ZSV bei -20 °C - DZSV bei -20 °C

Tab. 111: Empfohlene Prüfungen zur Charakterisierung von heiß und kalt verarbeitbaren Fugenmassen

Für kalt verarbeitbare Fugenmassen ist zum aktuellen Zeitpunkt die Bewertungsbasis zu gering. Zur Definition maßgebender Anforderungswerte sind weitergehende Untersuchungen an Bestandsstrecken zu erfolgen. Die Erkenntnisse in Abschnitt

6.6.2 zeigen auch für die Anwendung bei kalt verarbeitbaren Fugenmassen einen plausiblen Mehrwert bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse. Eine vertiefte Betrachtung dieser Erkenntnisse im Nachgang zu diesem Projekt ist empfehlenswert.

9 Literaturverzeichnis

[1] **Alte-Teigler, R.; Recknagel, C.; Sondermann, E.:** Kommentare zu den Regelungen von Fugen in Verkehrsflächen : Teil 1, Straße und Autobahn, Heft 9/2005, S. 488-500, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2005

[2] **Alte-Teigler, R.; Recknagel, C.; Sondermann, E.:** Kommentare zu den Regelungen von Fugen in Verkehrsflächen : Teil 2, Straße und Autobahn, Heft 10/2005, S. 586-597, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2005

[3] **Alte-Teigler, R.; Recknagel, C.; Sondermann, E.:** Kommentare zu den Regelungen von Fugen in Verkehrsflächen : Teil 1, Straße und Autobahn, Heft 11/2005, S. 646-657, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2005

[4] **Alte-Teigler, R.; Roßbach, W.:** Die neue TL/ZTV/TP Fug-StB, Straße und Autobahn, Heft 02/2013, S. 78-84, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2013

[5] **Arbeitsfassung zur visuellen Bewertung von heiß und kalt verarbeitbaren Fugenmassen:** Bearbeitergruppe „Bewertung von Fugensystemen über das visuelle Erscheinungsbild“ des FGSV-Arbeitskreises 8.3.1 „Überarbeitung der ZTV Fug, TL + TP“, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Stand Dezember 2016, unveröffentlicht

[6] **Bagampadde, U.; Isacson, U.; Kiggundu, B. M.:** Classical and Contemporary Aspects of Stripping in Bituminous Mixes, Road Materials and Pavement Design, Volume 5 – No. 1/2004, 2004

[7] **Birmann, D.:** Langzeitbeobachtungen der Fugenöffnungen von Betonfahrbahnen - Messung und Bewertung -. Mitteilungen des Prüfamtes für Bau und Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Festschrift, Heft 60, Technische Universität München, 1988

[8] **Birmann, D.:** Langzeitverhalten von Betondecken. Straße und Autobahn, Heft 4/1992, S. 211-215, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1992

[9] **Breitenbücher, R.:** Potenzielle Ursachen der Rissbildung in Betonfahrbahndecken. 16. ibausil, Bauhaus-Universität Weimar, 2006

[10] **Daten der Fugenspaltbreiten von der BAB A2:** Wolfgang Roßbach, E-Mail vom 18.04.2016, Bergisch Gladbach, 2016

[11] **Deutscher Wetterdienst:** Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland, Mittlere Jahressummen, Zeitraum: 1981 - 2010, DWD, Abt. Klima- und Umweltberatung, Hamburg, 2012

[12] **Deutscher Wetterdienst:** Wetterdaten und -statistiken express, Internetpräsenz: www.dwd.de/WESTE, eingesehen am: 10.03.2018, Werte grafisch aufgearbeitet, 2018

[13] **DIN EN 1426:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2015

[14] **DIN EN 1427:** Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007

[15] **DIN EN 12198-1:** Sicherheit von Maschinen, Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung, Teil 1: Allgemeine Leitsätze, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2008

[16] **DIN EN 13880-1:** Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 1: Prüfverfahren zur Bestimmung der Dichte bei 25 °C, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[17] **DIN EN 13880-2:** Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 2: Prüfverfahren zur Bestimmung der Konus-Penetration bei 25 °C, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[18] **DIN EN 13880-3:** Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 3: Prüfverfahren zur Bestimmung der Kugel-Penetration und des elastischen Rückstellvermögens, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[19] **DIN EN 13880-4:** Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 4: Prüfverfahren zur Bestimmung der Wärmebeständigkeit; Änderung der Konus-Penetration, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[20] **DIN EN 13880-5:** Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 5: Prüfverfahren zur Bestimmung

der Fließlänge, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2004

[21] DIN EN 13880-6: Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 6: Prüfverfahren zur Vorbereitung von Proben für die Prüfung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[22] DIN EN 13880-7: Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 7: Funktionsprüfung von Fugenmassen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[23] DIN EN 13880-8: Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 8: Prüfverfahren zur Bestimmung der Gewichtsänderung nach Treibstofflagerung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[24] DIN EN 13880-9: Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 9: Prüfverfahren zur Bestimmung der Verträglichkeit mit Asphalten, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[25] DIN EN 13880-10: Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 10: Prüfverfahren zur Bestimmung des Dehn- und Haftvermögens bei kontinuierlicher Dehnung und Stauchung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[26] DIN EN 13880-11: Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 11: Prüfverfahren zur Erstellung von Asphalt-Probekörpern zur Verwendung in der Funktionsprüfung und zur Bestimmung der Verträglichkeit mit Asphalten, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[27] DIN EN 13880-12: Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 12: Prüfverfahren zur Herstellung von Beton-Probekörpern für die Bestimmung des Dehn- und Haftvermögens (Mischrezeptur), Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[28] DIN EN 13880-13: Heiß verarbeitbare Fugenmassen – Teil 13: Prüfverfahren zur Bestimmung des Dehn- und Haftvermögens bei diskontinuierlicher Dehnung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2003

[29] DIN EN 14188-1: Fugeneinlagen und Fugenmassen – Teil 1: Anforderungen an heiß verarbeitbare Fugenmassen; Deutsches Institut für

Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2004

[30] DIN EN 14188-2: Fugeneinlagen und Fugenmassen – Teil 2: Anforderungen an kalt verarbeitbare Fugenmassen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2004

[31] DIN EN 14188-2: Fugeneinlagen und Fugenmassen – Teil 2: Anforderungen an kalt verarbeitbare Fugenmassen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe ENT-WURF Dezember 2014

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

[33] DIN EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR), Beuth Verlag, Berlin, 2012

[34] DIN EN 14771: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Biegekreuchsteifigkeit mit dem Biegebalkenrheometer (BBR), Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2012

[35] E GmBA: „Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten“, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV), Köln, 2012

[36] Eisenmann; Lechner: Anforderungen an Fugensysteme aus Temperaturdehnungen, Bericht S15 der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1996

[37] Eisenmann, J.; Leykauf, G.: Betonfahrbahnen. Ernst & Sohn Verlag, 2. Auflage, Berlin, 2003

[38] Foos, S.: Unbewehrte Betonfahrbahnplatten unter witterungsbedingten Beanspruchungen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 606, 2014

[39] Hagner, T.: Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels Dynamischem Scherrheometer; Dissertation, TU Carolo-Wilhelmina Braunschweig, 2003

[40] Hean, S.; Partel, M. N.: Fugenabdichtung: Langzeitverhalten von Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen auf einer Versuchsstrecke, For-

schungsbericht: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), 2003

[41] **Hutschenreuther, J.; Wörner, T.:** Asphalt im Straßenbau, Aus der Praxis des Verkehrsbaus, 2. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin, 2010

[42] **Kommentar zur TL Streu:** Hinweise und Empfehlungen für die Beschaffung von Streustoffen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2004

[43] **Majidzadeh, K.; Brovold, F. N.:** Special Report 98: State of the Art: Effect of Water on Bitumen -Aggregate Mixtures, HRB, National Research Council, Washington D.C., 1968

[44] **Metzger, T.:** Das Rheologie-Handbuch, 4. Auflage, Vincentz Network, Hannover, 2012

[45] **Müller, H.:** Industrieböden aus Beton im Überblick, 4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Kalsruhe (TH), Seite 1-10, 2003

[46] **Neumann, H.-J., Rahimian, I.:** Über die Kolloidchemie des Bitumens, Bitumen, Heft 1, S. 1-5, 1973

[47] **Neumann, H.-J.:** Oxidationsverhalten von Bitumen bei Gebrauchstemperaturen; Erdöl Erdgas Kohle 103, 1987

[48] **Neumann, H.-J.; Rahimian, I.; Paczynska-Lahme, B.:** Zur Strukturalterung von Bitumen, Bitumen, Heft 2, S. 54-56, 1992

[49] **Neumann, H.-J.:** Was ist Bitumen?; Bitumen, Heft 4, S. 146-151, 1995

[50] **Radenberg, M.; Manke, R.:** Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit Gummimodifiziertem Bindemittel, Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): FE 07.0247/2011/AGB, Bochum, 2014

[51] **Radenberg, M.; Twer, D.; Louis, H.-P.; Buscham, B.:** Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphaltsschichten – Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens, Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): FE 07.0254/2011/ERB, Schlussbericht, unveröffentlicht, Bochum, 2016

[52] **RDO Asphalt:** Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschichten, For-

schungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2009

[53] **RDO Beton:** Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2009

[54] **Read, J.; Whiteoak, D.:** The SHELL Bitumen Handbook, Thomas Telford Publishing, Fifth Edition, 2003

[55] **Recknagel, C.; Huth, C.:** Alterungsverhalten von Fugenfüllsystemen in Verkehrsflächen: Teilbericht Bearbeitungsphase 5: Untersuchung zur Kennzeichnung der Dauerhaftigkeit von Fugenfüllstoffen unter praktischer Beanspruchung im Bundesfernstraßenbereich (Feldversuchsstrecken), Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): FE 08.169/2001/FRB, Berlin, 2012, unveröffentlicht

[56] **Roos, R.; Karcher, C.; Kubanek, K.:** Auswirkungen der Fugenpflege auf das Langzeitverhalten von Betonfahrbahnen, Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): FE-Vorhaben 04.0432/2009/FGB, Karlsruhe, 2013

[57] **Roßbach, W.:** Untersuchungen des Verhaltens von Fugenfüllungen in Erprobungsstrecken, Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): AP-Nr. 02 332/S3, Bergisch Gladbach, 2005, unveröffentlicht

[58] **RStO 01:** Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2001

[59] **RStO 12:** Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2012

[60] **Schneider, U.:** Polymermodifizierte Asphalte – Internationale Forschungsergebnisse der Modifizierungsmöglichkeiten und Eigenschaften, Bitumen, Heft 1, S. 14-20, 1992

[61] **Setzer, M.J.:** Beiträge zur 6. CDF/CIF Fachtagung. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Heft 10, Universität Duisburg-Essen, 2006

[62] **Sievering, C.:** Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahndecken unter besonderer Berücksichtigung des externen Alkalieintrags. Schriftenreihe

des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 4, Ruhr-Universität Bochum, 2012

[63] SNV 671920: Voranstrich- und Vergussmassen - Dehnbarkeit, Schweizerische Normenvereinigung (SNV), Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute (VSS), Zürich, 1974, zurückgezogen 2005

[64] TL Beton-StB 07: Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2007

[65] TL Fug-StB 01: Technische Lieferbedingungen für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2001

[66] TL Fug-StB 15: Technische Lieferbedingungen für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2015

[67] TL Streu: Technische Lieferbedingungen für Streustoffe des Straßenwinterdienstes, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2003

[68] TP Fug-StB 01: Technische Prüfvorschriften für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2001

[69] TP Fug-StB 15: Technische Prüfvorschriften für Fugenfüllstoffe in Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2015

[70] Westergaard, H.M.: Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis, In: Public Roads 7, No. 2, 1926

[71] Wieland, M.: Instandsetzung von Betonfahrbahnplatten durch Unterpressung – Laboruntersuchungen und messtechnischer Nachweis des Instandsetzungserfolgs; Dissertation, Technische Universität Dresden, 2011

[72] ZTV Beton-StB 07: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2007

[73] ZTV Fug-StB 01: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fugenfüllungen in Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2001

[74] ZTV Fug-StB 15: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fugenfüllungen in Verkehrsflächen, Ausgabe 2015, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2016

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Botor, Tost € 15,50

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

Augter, Kayser € 16,50

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

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

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

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

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

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

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

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

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel

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

2020

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

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

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

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

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

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

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

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

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

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

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichottka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

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

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

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

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

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

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirsakawetz € 23,00

S 154: Prozessoptimierung der Asphaltextraktion mit Oktansäuremethylester (OME)

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

S 155: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Beton – Verteilungsfunktion und Extremwerte

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

S 156: Asphaltoberbau und extreme Temperaturen

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

S 157: Erfassung von Bäumen mittels Laserscan-Daten zur Expositionsanalyse entlang des Bundesfernstraßennetzes in NRW

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

S 158: Anforderungen an Baustoffe für schwach durchlässige, dauerhaft tragfähige, ungebundene Bankette

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

S 159: Dauerhafte Betondecken – Optimierung der Fahrbahnoberfläche durch Texturierung mittels Grinding-Verfahren

Villaret, Alte-Teigeler, Altreuther, Beckenbauer, Frohböse, Gehlen, Oeser, Skarabis, Tulke, Wang
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 160: Untersuchungen zur Ursache von Treiberscheinungen in Tragschichten ohne Bindemittel unter Verwendung von RC-Baustoffen aus Beton

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

S 161: Ermittlung der realistischen Verkehrsverteilung auf mehrstreifigen Bundesfernstraßen als Eingangsgröße für die rechnerische Dimensionierung und Bewertung der strukturellen Substanz

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

S 162: Beurteilung von Betonfahrbahndecken hinsichtlich deren in-situ AKR-Potenzial bei Gesteinskörnungen nach dem ARS Nr. 04/2013

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

S 163: NANOASPHALT – Optimierung der Gebrauchseigenschaften und der Beständigkeit von Asphaltstraßen unter Nutzung der Nanotechnologie

Beginn, Belke, Oeser, Meyer, Paffrath, Wellner, Clauß, Beckedahl, Koppers, Schmidt, Erdmann, Schmidt, Hofmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 164: Untersuchung der Quellempfindlichkeit veränderlich fester Gesteine bei der Verwendung als Erdbaustoff

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

S 165: Analyse des gefügeabhängigen Löslichkeitsverhaltens potenziell AKR-empfindlicher Gesteinskörnungen

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

S 166: Vibrationshammerverfahren zur Bestimmung der Bezugsgröße für den Verdichtungsgrad von Schichten ohne Bindemittel

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

S 167: Aktualisierung und Anpassung der Straßenbelastungsdaten für die Dimensionierung

K. Villaret, S. Villaret, Kathmann, Oeser, Ückermann, Schröder, Riwe
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 168: Entwicklung einer Prüfsystematik zur Identifizierung der Bitumenart und der verwendeten Modifizierungsmittel in einem Ausbauasphalt

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

S 169: Untersuchung eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten

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

S 170: Kriterien für die Dauerhaftigkeit von Asphalttschichten - Untersuchungen zur Ansprache des Haftverhaltens

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

2022

S 171: Informationssystem Straßenzustand Teil 2: Entwicklung von Sensoren zur Erfassung des strukturellen Zustandes von Asphaltstraßen (SENSOR)

Bald, Böhm, Čičković, Tiemann, Hill, Peitsch, Gablovský, Muschalla, Czaja, Ulrich, Farbischewski, Huczek
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 172: Verbesserung der Erfassung des Verhaltens von Tragschichten ohne Bindemittel (ToB) zur Berücksichtigung in den RStO, RDO und den RSO

Wellner, Leischner, Spanier € 16,50

S 173: Analyse der Auswirkungen von Witterungsextremen an bestehenden Straßenbefestigungen in Betonbauweise

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

S 174: Raumdichtebestimmung an hohlraumreichen Asphalten

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

S 175: Einfluss der Fugenöffnungsweite auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton

Altreuther, Beckenbauer, Ertsey, Otto, Schubert, Kropp, Hoever
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 176: Strömungsmodelle zur Simulation der Durchsickerung von Straßenbauwerken mit Implementierung hydrologischer Parameter

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

S 177: Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

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